

дипл. ел. инж. Наташа Божиновска

АНАЛОГНА ЕЛЕКТРОНИКА

за II година

образовен профил
електротехничар за електроника
и телекомуникации

електротехничка струка

2010

Автор:

дипл. ел. инж. Наташа Божиновска

Рецензенти:

Вонр. проф. д-р Весна Чешелкоска,
Технички факултет Битола

Татјана Маленко, дипл.ел.инж.
Професор во СЕТУГС “Михајло Пупин” – Скопје

Петре Николовски, дипл.ел.инж.
Професор во СУГС “Владо Тасевски” – Скопје

Главен уредник:

Наташа Божиновска

Лектура:

Ивана Коцева

Компјутерска обработка, корица и коректура:

Наташа Божиновска
Жарко Божиновски

Издавач:

Министерство за образование и наука на Република Македонија

Печати:

Графички центар дооел, Скопје

Тираж:

450

Со решение на Министерот за образование и наука на Република Македонија бр. 22-4329/1 од 29.07.2010 година се одобрува употребата на овој учебник

CIP - Каталогизација во публикација
Национална и универзитетска библиотека “Св.Климент Охридски” , Скопје
621.3.037.33(075.3)
004.387(075.3)
БОЖИНОВСКА, Наташа
Аналогна електроника за II година : образовен профил електротехничар за електроника и телекомуникации : електротехничка струка / Наташа Божиновска.
- Скопје : Министерство за образование и наука на Република Македонија, 2010. - 286 стр. : илустр. ; 30 см
ISBN 978-608-226-024-2
COBISS.MK-ID 84235786

ПРЕДГОВОР

Учебникот **АНАЛОГНА ЕЛЕКТРОНИКА** за **II година** од електротехничка струка е резултат на промените во наставните програми за училиштата од електротехничка струка за профил на **електротехничар за електроника и телекомуникации**. Учебникот е пишуван во согласност со програмата за предметот АНАЛОГНА ЕЛЕКТРОНИКА за II година изработена во 2006 година. При изработката на учебникот е користен прирачникот “**Концепција за учебник за основно и средно образование**” издаден од Бирото за развој на образованието.

За успешно совладување на предметните содржини потребно е претходно знаење од предметите физика, математика, електротехника, електротехнички материјали и елементи и техничко цртање. Согласно со наставната програма, текстот на учебникот е поделен на **8 тематски целини**.

- 1. Полупроводнички диоди.** На почетокот се дадени основите на полупроводничката физика, кристалната структура на полупроводниците, формирањето на PN – спојот и неговите карактеристики, со акцент врз силициумскиот полупроводник и разни видови полупроводнички диоди.
- 2. Транзистори.** Во ова поглавје се објаснува создавањето на биполарните и на униполарните транзистори со помош на PN – споеви, нивните карактеристики и параметри, начинот на поларизација и нивната улога како прекинувачи.
- 3. Засилувачи.** Најголемиот дел од содржината на книгата е посветен на улогата, поделбата, параметрите и конфигурациите на засилувачите со биполарни и униполарни транзистори и операциските засилувачи.
- 4. Интегрирани кола.** Појавата на интегрираните кола внесува нови димензии во развојот на електронските кола. Во ова поглавје се разјаснети некои постапки во изработката на интегрираните кола.
- 5. Операциски засилувачи.** Предмет на анализа се улогата, поделбата, параметрите, повратната врска, конфигурациите и примената на операциските засилувачи. Во ова поглавје посебна анализа е направена на реалниот операциски засилувач $\mu A741$.
- 6. Извори на еднонасочен напон.** Начинот на работа на изворите за напојување е прикажан преку полубраново и целобраново насочување на наизменичниот напон и напонската стабилизација со осврт на интегрирани стабилизатори.
- 7. Тиристорите.** Тиристорите се прекинувачки елементи со широка примена. Овде е изнесена нивната поделба и карактеристики.
- 8. Специфични електронски елементи.** Фотоотпорниците, фотогенераторите, варисторите, дисплеј со лед диоди и течни кристали се специфични електронски елементи обработени во ова поглавје.

По разработката на наставните содржини, има резимеа кои ги истакнуваат најважните моменти од претходно изложениот материјал.

На крајот од секоја тематска целина се дадени прашања за тематско утврдување на истата. Исто така, на крајот од учебникот, дадени се решени примери и задачи за решавање.

Во изнесувањето на содржините се користени упростени математички операции и голем број слики и графички претставувања, кои треба да овозможат полесно совладување на градивото. Водена е сметка за постепено воведување на нови дефиниции, прашања за проверка на знаењето и задачи, со што се задоволуваат потребните дидактички насоки.

Авторот се надева дека учебникот ќе одговори на потребите на наставниците по предметната настава и на потребата на учениците за усвојување и за утврдување на материјалот.

Би сакала да изразам голема благодарност на рецезентите за сугестиите и за предлозите при конечното оформување на учебников.

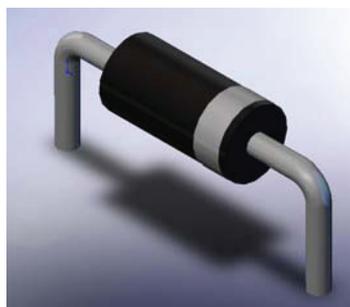
И на крај но не и последно, би сакала да се заблагодарам на мојот татко Тасиќ Зоран за неговата голема и несебична помош при изработката на овој учебник, кој со неговото долгогодишно искуство како универзитетски професор и автор на повеќе стручни трудови и учебници од областа на електрониката, даде голем придонес за квалитетот и изгледот на овој учебник.

Авторот

ПОЛУСПРОВОДНИЧКИ ДИОДИ

Со изучување на содржините од оваа тема ти ја учиш "азбуката" на електрониката, ќе стекнеш основни знаења за полупроводничките диоди и ќе можеш:

- да го познаваш предметот на изучување на аналогната електрониката;
- да ја објаснуваш поделбата на електрониката;
- да ги опишуваш електричните својствата на полупроводните материјали;
- да го објаснуваш создавањето на PN-спојот;
- да ја објаснуваш поларизацијата на PN-споевите;
- да ги познаваш параметрите и карактеристиките на полупроводничката диода;
- да ги разликуваш видовите на полупроводничките диоди;
- да го објаснуваш принципот на работа на разните видови полупроводнички диоди;
- да ја анализираш струјно-напонската карактеристика на диодата;
- да ја познаваш практичната примена на полупроводничките диоди.



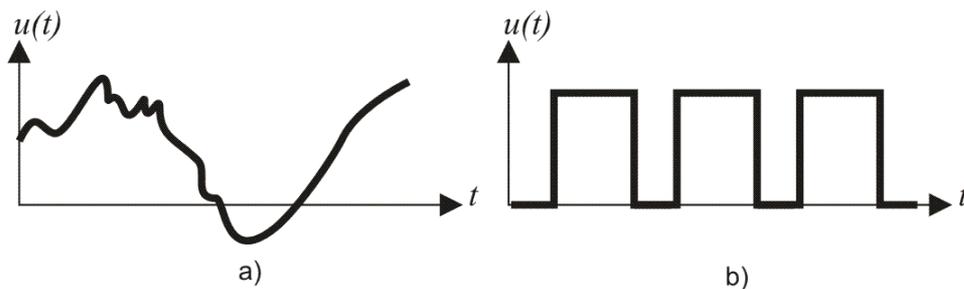
1.1. Предмет и поделба на ЕЛЕКТРОНИКАТА

На поимот "електроника" му се даваат три основни значења:

- а) Електрониката е наука која, како дел од физиката, се занимава со движењето на електроните во празен простор (електронски вакуумски цевки) и во полупроводнички материјали.
- б) Како дел од електротехниката, електрониката се занимава со анализа, развој и производство на електронски елементи, компоненти, уреди и системи.
- в) Електроника, како поим, се користи да означи дел од уред, произведен од електронски компоненти.

Електронска компонента е неделив граѓен блок на електронско коло, кој се наоѓа во свое куќиште, со најмалку два извода за поврзување со останатите електронски компоненти. Со поврзување на најмалку две електронски компоненти се добива **електронско коло**. Сите електронски компоненти се делат на активни и пасивни. **Активните компоненти** вршат засилувањето на електричниот сигнал т.е. мала промена на влезниот напон или струја предизвикува голема промена на излезниот напон. Во активни компоненти спаѓаат: биполарни транзистори, фетови, мосфетови, операциски засилувачи, микропроцесори, и други. **Пасивни компоненти** се: отпорници, калеми, кондензатори, диоди, варистори, NTC, PTC-термистори и VDR-отпорници и други.

Електронските уреди имаат голема примена, почнувајќи од компјутерски плочи до инструментални системи, од електронски пејсмејкери до електронско управување со разни машини, од радио и ТВ-приемници до комплексни радарски системи и многу други примени. Напон или струја, која се менува на одреден начин со времето за да кодира или за да пренесе информација се вика сигнал. Сигналот може да биде аналоген, ако се менува континуирано со времето (**слика 1.1а**), или дигитален ако се менува меѓу две дискретна нивоа (**слика 1.1б**), означени како високо или ниско или 1 и 0.



Слика 1.1: График на аналоген и дигитален сигнал.

Кај аналогниот сигнал, амплитудата на сигналот $u(t)$ претставува информација во секој момент на времето. За дигиталниот сигнал, информацијата е искажана со присуство или со отсуство на импулс.

Електрониката може да се подели, според видот на сигналот, на аналогна и дигитална електроника.

Аналогната електроника оперира со континуирани сигнали, кои во секој момент на време имаат амплитуда U_m со некаква вредност. **Дигиталната електроника** оперира со дискретни сигнали.

Електронските кола можат да бидат: аналогни, дигитални и хибридни. Во **аналогните кола** се работи со аналогни сигнали, во **дигиталните** со дигитални сигнали, а во **хибридните** и со едните и со другите. Во хибридните кола се прави и премин од аналогни во дигитални сигнали и обратно.

Во **аналогните кола** спаѓаат: засилувачи, осцилатори, модулатори, детектори, мешачи, филтри и други. Во **дигиталните кола** спаѓаат: основни логички кола, комбинациони мрежи, микропроцесори, мемории и други, сите реализирани во разни технологии: TTL, ECL, NMOS, PMOS, CMOS и др.

Електрониката е присутна во многу гранки, како, на пример, во сметачки уреди (хардверски дел), автоматика (контрола и управување со процеси, роботика), телекомуникации, микроелектроника (интегрирани кола), енергетска електроника, оптоелектроника, микробранова електроника и други.

Во текстот се користи следниов начин на означување на напонот и струјата:

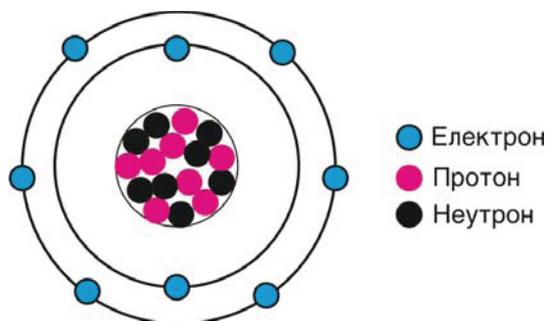
U, I - константна еднонасочна вредност;

$u(t), i(t)$ - моментните вредности на временски променливите компоненти;

U_m, I_m - амплитуда или максимална вредност на синусоидално променлив напон или струја.

1.2. Атомска структура на материјата

Атомот претставува основен елемент на градбата на сите материји. Тој е составен од јадро, во кое се распоредени поситни честички, **протони** и **неутрони**, а околу јадрото кружат други честички наречени **електрони** (слика 1.2). Структурата на атомот прв ја објавил данскиот физичар Нилс Бор, уште во 1913 година.



Слика 1.2: Структура на атомот.

Секој елемент во природата има специфична структура на своите атоми. Јадрото на атомот ја дефинира неговата маса. Позитивно наелектризираните протони и електрично

неутралните неутрони имаат многу поголема маса од негативно наелектризираните електрони. Тие се цврсто врзани за јадрото со јаки нуклеарни сили и во нормални услови не можат да се ослободат и да се движат надвор од јадрото. Бројот на протоните во јадрото на атомот ја дефинира хемиската структура на материјата, а со тоа и видот на материјата. Со промена на бројот на протоните се менува видот на атомот. Така, на пример, атомот на **силициумот** има 14, а атомот на **германиумот** има 32 протони.

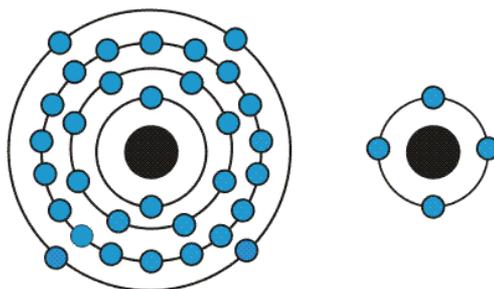
Неутроните имаат многу помало влијание врз хемискиот карактер на материјата од протоните. Тие, исто така, цврсто се врзани со јадрото и за промена на нивниот број е потребна огромна енергија. Со вадење или со додавање неутрони во јадрото, атомот се уште би го задржал истиот хемиски идентитет, само би се сменила неговата маса. Таква промена може да предизвика некои други нуклеарни активности, како што е радиоактивност.

Електроните се носачи на најмал познат електричен полнеж со негативен поларитет, кој изнесува $e = -1,6 \cdot 10^{-19} C$, колку што имаат и протоните, само со позитивен поларитет. Бројот на електроните во атомот е еднаков на бројот на протоните и тие заедно го одредуваат електричното однесување на атомот.

Електроните се распоредени на различни енергетски нивоа. За разлика од протоните и неутроните, електроните имаат значително поголема слобода да се движат околу јадрото на атомот. Еден број електрони се движи блиску до јадрото и со него прави неразделна целина. Мал број од нив, кои се викаат **валентни** електрони, лабаво е врзан со јадрото, а може и да го напушти атомот. Тие се наоѓаат во последната орбита, најоддалечени од јадрото и на највисоко енергетско ниво.

За исфрлање на валентниот електрон од неговата орбита е потребна многу помала енергија. Ако се случи тоа, атомот нема да го смени идентитетот, само ќе настапи промена на електрички неутралната состојба во која се наоѓа атомот. Ако некој електрон го напушти атомот, се создава **празнина** и атомот станува позитивно наелектризиран (позитивен јон). Кога во атомот ќе влезе дополнителен електрон, тој прави вишок на електрони во атомот и атомот станува негативно наелектризиран (негативен јон).

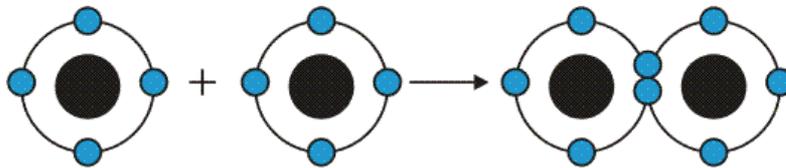
Моделот на атомот на силициум и неговиот упростен модел се дадени на **слика 1.3**.



Слика 1.3: Атом на силициум и неговиот упростен модел.

Тој е составен од јадро и од сите цврсто врзани електрони, освен валентните електрони, сите прикажани со поголемо крукче во средината и од валентните електрони околу тоа

јадро. Сите меѓусебни дејства на атомите се остваруваат преку валентните електрони. На **слика 1.4** е прикажана врската меѓу два атома на силициум. Бидејќи атомот на силициумот има четиривалентни електрони, тој може да се поврзе со уште четири други атоми на силициум и сите ќе бидат на иста оддалеченост еден од друг.



Слика 1.4: Валентна врска меѓу атомите на силициум.

ЗАПАМЕТИ !!!

- *Електрониката се занимава со анализа, развој и производство на електронските елементи, компоненти, уреди и системи.
- * Електронските компоненти се делат на активни и пасивни. Активните компоненти вршат засилувањето на електричниот сигнал т.е. мала промена на влезниот напон или струја предизвикува голема промена на излезниот напон.
- *Според видот на сигналот кој се обработува, електрониката се дели на аналогна и дигитална.
- *Атомот, како основен елемент на градбата на сите материи, е составен од јадро со протони и неутрони и од електрони кои се движат околу јадрото.
- *Електронот е носител на најмал електричен полнеж со негативен поларитет.
- *Електронот, кој го напуштил атомот, станува слободен електрон, а на неговото место се создава празнина. Празнината е еквивалент на електронот со електричен полнеж со позитивен поларитет.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Дефинирај го поимот "ЕЛЕКТРОНИКА"?
2. Што претставува електронско коло?
3. Кои се активни електронски компоненти?
4. Кои се пасивни електронски компоненти?
5. Како се дели електрониката?
6. Какви може да бидат електронските кола?
7. Нацртај ја структурата на атомот!
8. Колкав полнеж има електронот и со каков поларитет?
9. Кои електрони се валентни електрони?
10. Кој атом се нарекува негативен јон?
11. Како се добива позитивен јон?

1.3. Полупроводни материјали

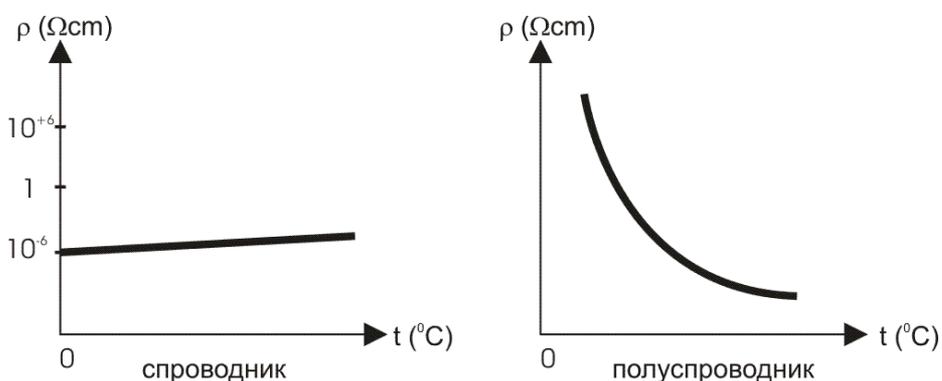
Електрони од разни видови атоми немаат еднаква можност да ги раскинат валентните врски и да станат слободни електрони. Одредени материјали, како што се металите, имаат многу лабаво врзани валентни електрони. За создавање слободни електрони во такви материјали е доволна мала количина на топлинска, светлинска или некој друг вид енергија. За такви материјали е доволно да се најдат во опкружување со собна температура, па да дојде до раскинување на валентните врски и создавање слободни електрони. Слободните електрони тука лесно се движат меѓу атомите, а степенот на слободата на движењето зависи од видот на материјалот.

Кај други видови материјали, како што е стаклото, валентните електрони се врзани поцврсто, се создава мал број слободни електрони, со мала слобода на движење. Способноста за слободно движење на слободните електрони во материјалот се вика спроводливост, а спротивставувањето на движењето се вика отпорност. Материјали со голем број слободни електрони се викаат **спроводници**, а оние со малку или без слободни електрони **изолатори**.

Групата материјали која по своите својства се наоѓа меѓу спроводниците и изолаторите се вика **полупроводници**. Во таа група можат да се вбројат германиумот и силициумот. Полупроводниците се разликуваат од спроводниците и од изолаторите по неколку својства.

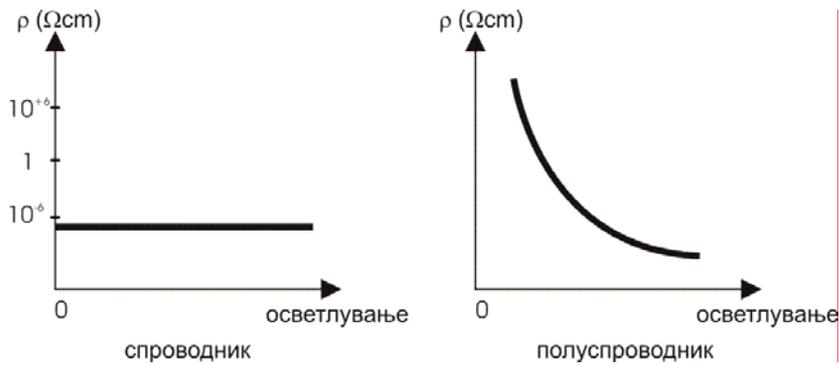
Специфичниот отпор на спроводниците е многу мал и се наоѓа во границите од 10^{-6} до $10^{-5} \Omega\text{cm}$, на изолаторите е екстремно голем и изнесува од 10^6 до $10^8 \Omega\text{cm}$, додека специфичниот отпор на полупроводниците се движи меѓу овие вредности и тоа од 10^{-3} до $10^7 \Omega\text{cm}$.

Отпорноста на спроводниците расте постепено со зголемување на температурата и тоа линеарно. Отпорноста на полупроводниците опаѓа експоненцијално кога расте температурата (**слика 1.5**).



Слика 1.5: Промена на отпорноста со промена на температурата.

Со промена на светлината, отпорноста на спроводниците не се менува, а отпорноста на полупроводниците опаѓа експоненцијално (**слика 1.6**).

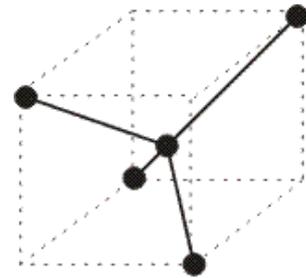


Слика 1.6: Промена на отпорноста со промена на светлината.

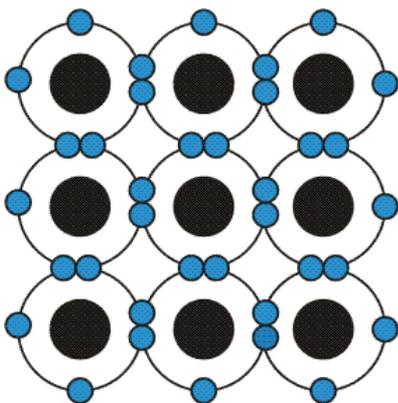
1.3.1. Електрични својства на полупроводните материјали

Ако се направи постојан распоред на атомите според еден правилен тридимензионален модел се добива кристална структура на тој материјал. Во таква структура се остварени сите можни валентни врски од по два електрона. На **слика 1.7** е прикажан модел на еден кристал на силициум.

Тој има форма на коцка, а основниот атом стои во центарот на коцката. Другите атоми од валентните врски на централниот атом се распоредени во четири темиња, така што не се допираат еден до друг. Прикажувањето на валентните врски на поголем број атоми на овој начин е многу комплицирано. Наместо просторното прикажување, поедноставно е прикажувањето во една рамнина, како на **слика 1.8**.



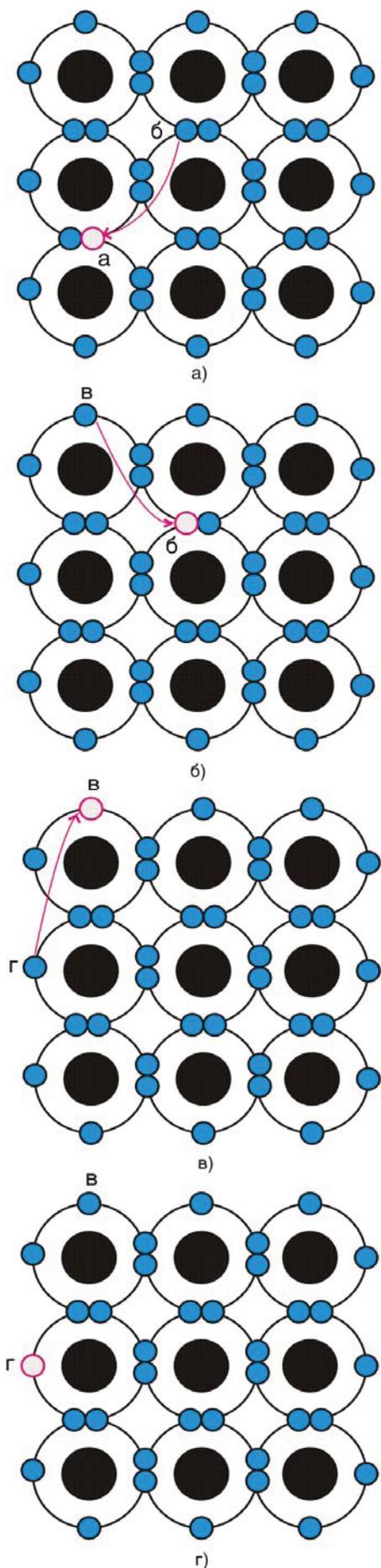
Слика 1.7: Модел на кристал на силициум.



Слика 1.8: Валентни врски на поголем број атоми.

На оваа слика јадрата на упростените модели на атоми се прикажани како поголеми, а валентните електрони како помали кругови. Валентните врски меѓу атомите се дадени со два меѓусебно врзани електрона. Вака претставен, кристалот на силициумот или германиумот е совршен изолатор, во него нема слободни електрони. Но, тоа важи само при температура на апсолутната нула ($-273^{\circ}\text{C} = 0\text{K}$).

При собна температура од 18 до 20°C (300K) се создаваат слободни електрони и кристалната структура веќе не е совршена. Несовршена кристална структура е основа за создавање полупроводнички материјали.



Таа несовершенство може да има: структурен, енергетски или хемиски карактер.

Структурната несовершенство се однесува на атомите на површината на материјалот, кога атомите не можат да ги остварат сите валентни врски.

Енергетските несовершености главно се должат на топлинската енергија. Веќе на собна температура, атомите во кристалната решетка почнуваат да треперат, движејќи се наизменично еден кон друг. При тоа може да дојде до прекинување на валентните врски и до создавање слободни електрони. За извлекување на еден електрон од неговото место е потребна минимална енергија од $0,75\text{eV}$ ($eV = 1,6 \cdot 10^{-19} J$) за германиумот и $1,2\text{eV}$ за силициумот.

Ослободените електрони по кратко време наоѓаат друго испразнето место, предавајќи ја својата енергија на други електрони. Во секој момент во кристалот постои одреден број слободни електрони. Со ослободувањето на електронот соодветната валентна врска останува непотполнета и на тоа место се јавува позитивен полнеж. Секој електрон, напуштајќи го атомот, зад себе остава позитивен полнеж. Во техниката на полупроводниците тој се вика **празнина**. И празнините се движат слично на електроните. Тоа е илустрирано на **слика 1.9**.

Во точката **а** (слика 1.9а) е создадена една празнина со присуство на тривалентен атом, а во точката **б**, со раскинување на валентната врска се ослободува електрон. Слободниот електрон се движи кон празнината во точката **а** и ја пополнува, а на местото **б** се јавува нова празнина (слика 1.9б). Процесот на повторното воспоставување валентна врска се вика **рекомбинација**. На истиот начин се формира и нова празнина во точката **в** (слика 1.9в) и натаму во **г** (слика 1.9г). Крајниот ефект е: празнината од точката **а** е преместена во точката **г**. Од ова произлегува дека насоката на движењето на празнините е спротивна од насоката на движењето на електроните.

Слика 1.9: Движење на празнините.

Со зголемувањето на температурата се зголемува бројот на слободните електрони, но во иста мерка и на празнините. Спроводливоста на полупроводникот расте, но кристалот и натаму останува неутрален.

Енергетските несовершености можат да настапат и под влијание на светлинската енергија, при што се јавува фотоелектричен ефект. Под фотоелектричен ефект се подразбира меѓусебното дејство на фотоните (светлосните кванти) и на електроните од атомот на полупроводникот. Кога фотонот на светлината и електронот вршат размена на енергијата со која располагаат, електронот го менува сопственото енергетско ниво. Ако енергијата, што му ја предава фотонот на електронот е доволна, електронот ќе ја напушти својата патека и ќе прејде во патека со повисоко енергетско ниво, или ќе ја раскине валентната врска и ќе стане слободен. Спротивен процес се одвива кога електронот преминува во патека со пониско енергетско ниво или ако се враќа во валентната врска. Таков премин е следен со емисија на еден квант на светлинска енергија – фотон.

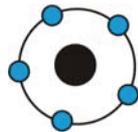
Полупроводници со овој вид несовершености се викаат непримесни, за разлика од примесните во кои несовершеноста се создава по хемиски пат. До хемиски несовершености доаѓа кога во кристалот се внесуваат одредени хемиски примеси, претставени со две групи елементи чии што атоми се интегрираат во кристалната структура на полупроводникот. Елементите од едната група имаат атоми со петвалентни електрони и тоа се фосфорот, арсенот и антимонот. Елементите од другата група имаат атоми со тривалентни електрони. Тука спаѓаат бор, алуминиум, галиум и индиум.

ЗАПАМЕТИ !!!

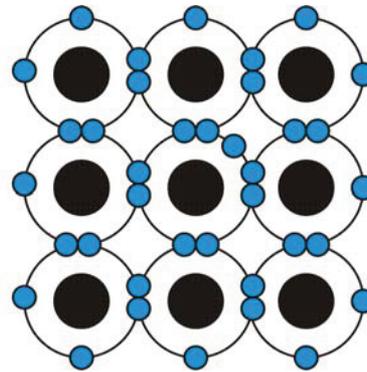
- *Во однос на движењето на електроните, материјалите се делат на: спроводници, изолатори и полупроводници.**
 - *Основни материјали на полупроводниците се германиум и силициум во кристална структура.**
 - *Материјалите се здобиваат со полупроводнички карактеристики кога кристалната структура станува несовершена.**
 - *Несовершеноста на кристалната структура може да има структурен, енергетски или хемиски карактер.**
 - *Примесни полупроводници се добиваат со внесување на атоми на хемиски примеси во кристалната структура на полупроводникот.**
-

1.3.2. Полупроводник од N-тип

Атомот на фосфорот (слика 1.10) е со петвалентни електрони и има еднакви димензии со димензиите на атомот на силициумот. Тој може лесно да се интегрира во кристалната структура на силициумот. Ако се додаде атом на фосфор на растопена маса од силициум, тој на едно место ќе го замени атомот на силициумот и ќе формира валентни врски со околните атоми. При тоа, еден електрон од атомот на фосфорот останува вишок. Тој не може да влезе во валентна врска, бидејќи сите се пополнети. Електронот е врзан лабаво со атомот на фосфорот и при собна температура станува слободен. За негово ослободување е доволна енергија од 0,05 eV.



Слика 1.10: Атом на фосфор.



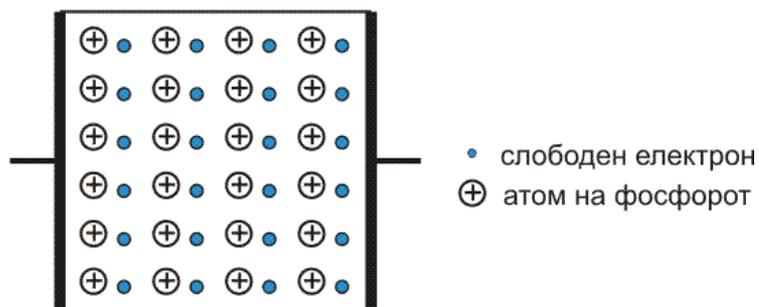
Слика: 1.11: Атом на фосфор во кристална решетка на германиум.

Интегрирањето на атомот на фосфорот во кристалната решетка на силициумот е претставено на слика 1.11.

Со внесување на петвалентни атоми во кристалната решетка на германиум или силициум се добива **полупроводник од N-тип** (негативен), кој има вишок слободни електрони и во кој спроводливоста е резултат на движењето на слободните електрони. Слободните електрони во полупроводник од N-тип се создаат на два начина: едните, со внесување петвалентни атоми на хемиски примеси, а другите со термичко раскинување на валентните врски меѓу атомите. Петвалентните атоми “даваат” слободни електрони, па според латинскиот јазик се нарекуваат **донори**. Донорите кога испуштиле електрон, стануваат **позитивни јони**, не се подвижни и не учествуваат во создавањето на струјата низ полупроводникот.

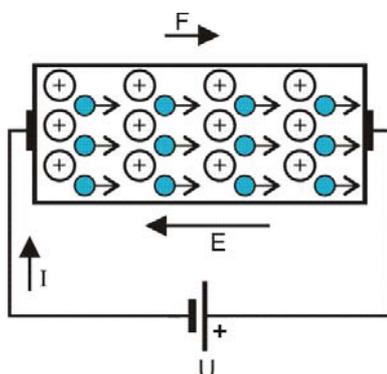
Со термичкото раскинување на валентните врски, покрај слободните електрони се создаваат и празнини. Нивната концентрација е многу помала од концентрацијата на електроните. Поради тоа, **електроните се главни**, а **празнините се споредни** носители на електричниот полнеж.

Шематски приказ на полупроводник од N-тип е даден на слика 1.12.



Слика 1.12: Шематски приказ на полупроводник од N-тип.

Слободните електрони и празнините во полупроводник на температура повисока од апсолутната нула се во постојано хаотично движење, како резултат на нивната термичка енергија. Без какво и да е надворешно влијание, движењето на носителите на полнеж нема никаква одредена насока.



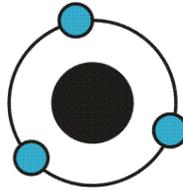
Слика 1.13: Полупроводник од N-тип во електрично поле.

Ако го приклучиме полупроводникот на еднонасочен извор на напојување, како на **слика 1.13**, во полупроводникот ќе се создаде електрично поле со јачина E , насочено од позитивниот кон негативниот приклучок од изворот. Силата F , која се јавува како резултат на дејството на полето E , ги насочува слободните електрони во спротивна насока од насоката на полето. Празнините ќе се движат во насоката на полето E . На тој начин низ колото ќе протече струја од негативниот кон позитивниот пол на изворот преку полупроводникот. Во сите понатамошни анализи на состојбите во полупроводниците ќе се користи т.н. електронска насока на струјата, која се совпаѓа со насоката на движењето на електроните.

Ако се промени поларитетот на изворот, се менува насоката на електричното поле и слободните електрони и празнините ќе се движат во спротивна насока од претходната, односно се менува и насоката на струјата. Нема посебна причина јачината на струјата да не биде иста во двата примера, што значи дека нема појава на насочување.

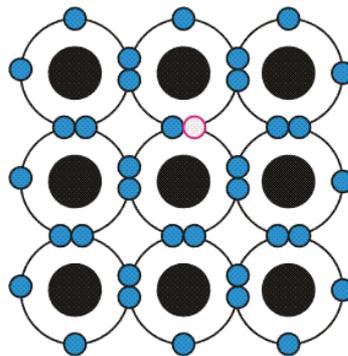
1.3.3. Полупроводник од Р-тип

Атомот на борот, прикажан на **слика 1.14**, има исти димензии со атомот на силициум, што значи дека може да се интегрира во нивната кристална решетка.



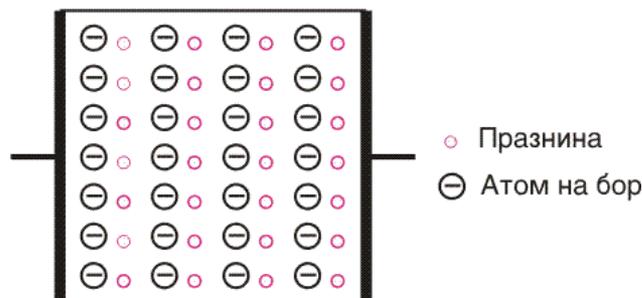
Слика 1.14: Атом на бор.

Тој е тривалентен и остварува тривалентни врски со околните атоми. Во обидот да ја оствари и четвртата валентна врска, тој "присвојува" еден електрон од соседните атоми, ослободен со термичко раскинување на валентните врски. На местото на "присвоениот" електрон **се создава празнина** (**слика 1.15**).



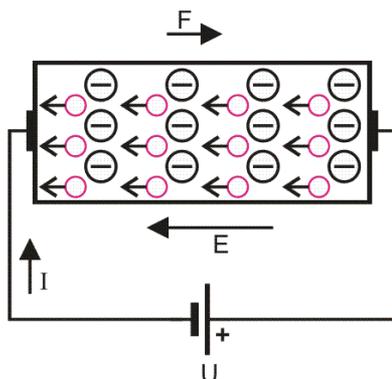
Слика 1.15: Атом на бор во кристална решетка на германиум.

Атомите на тривалентните примеси кои "присвојуваат" електрони се наречени **акцептори**, тие се со негативен електричен полнеж и се неподвижни. Со внесување акцепторски атоми во кристалната структура на германиум или силициум се создаваат празнини како основни носители на позитивен електричен полнеж. На овој начин се добива **полупроводник од Р-тип**, прикажан на **слика 1.16**.



Слика 1.16: Шематски приказ на полупроводник од Р-тип.

Празнините во овој тип полупроводник се создаваат на два начина: со внесување акцепторски атоми и со термичко раскинување на валентните врски. Како споредни носители овде се јавуваат електроните создадени со термичко раскинување на валентните врски.



Слика 1.17: Полупроводник од P-тип во електрично поле.

Со помош на **слика 1.17** ќе видиме што се случува во полупроводникот од P-тип под влијание на надворешно електрично поле. Со приклучување на еднонасочен извор на напон на краевите на полупроводникот, во него се создава електрично поле со јачина E и со насока од позитивниот кон негативниот пол на изворот. Силата F , која е резултат на полето E , ги насочува празнините да се движат во насоката во која дејствува електричното поле, а електроните во спротивната насока. Со такво насочено движење се воспоставува струја со јачина I .

Движењето на празнините, како што видовме со помош на слика 1.9, е привидно. Физички се поместуваат валентните електрони, а ефектот на тоа движење е појава на празнина на друго место, што е еквивалентно на движење на празнината. На местото на контактот на полупроводникот со доводната жица, празнините извлекуваат електрони од металот и се рекомбинираат, а на спротивниот контакт се создава нова празнина со премин на оној број валентни електрони во контактниот метал колкав што е бројот на рекомбинираните празнини. Со свртувањето на поларитетот на изворот се менува насоката на полето и празнините се движат во насока спротивна од претходната. Тоа значи дека и во полупроводник од P-тип не постои појава на насочување.

ЗАПАМЕТИ !!!

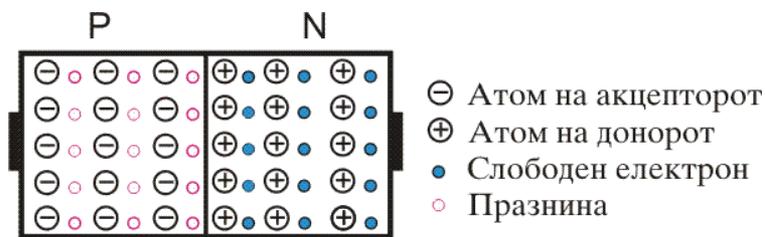
***Полупроводник од N-тип има вишок слободни електрони, создадени со процесот на внесување на петвалентни примеси. Поради вишокот слободни електрони, главни носители во полупроводник од N-тип се електроните а споредни празнините.**

***Полупроводник од P-типот има вишок празнини, создадени со внесување тривалентни примеси. Поради вишокот празнини, главни носители во полупроводник од P-тип се празнините а споредни електроните.**

*Бројот на главните носители е многу поголем од бројот на споредните носители и зависи од бројот на внесените атоми на примеси и температурата на полупроводникот.

1.4. PN - спој

Полупроводниците од N и од P-тип во прикажаната форма не се од голема полза. Многу поинтересен ефект се добива кога двата типа полупроводници меѓусебно се комбинираат во еден кристал на повеќе начини. Секако дека обично физичко спојување на двата вида кристали не е изводливо, туку на растопен, пречистен кристал од едната страна се додаваат акцепторски, а од другата страна донорски атоми. На тој начин се добива единствен кристал со PN –спој. Тој од едната страна има блок на полупроводник од P-тип, а од другата страна блок на полупроводник од N-тип (слика 1.18). Местото на спојот претставува област со мала дебелина.



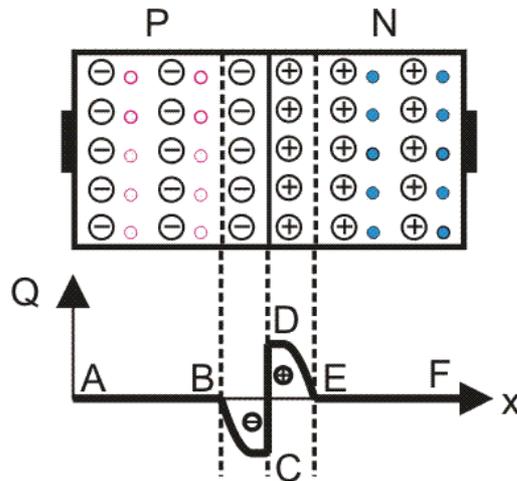
Слика 1.18: PN-спој составен од два кристала во моментот на создавање.

Во N-подрачјето бројот на слободните електрони е многу поголем од бројот на празнините, а во P-подрачјето бројот на празнините е многу поголем од бројот на електроните. Состојбата, прикажана на слика 1.18, постои само во моментот на создавањето на спојот, потоа веднаш се менува. Таква концентрација на електрони и празнини предизвикува движење на електроните од N-подрачјето и тие навлегуваат во P-подрачјето. Празнините од P-подрачјето пак се движат во спротивна насока кон N-подрачјето. Ова движење е дифузно, што подразбира физички принцип по кој честички од подрачје со поголема концентрација се преместуваат во подрачје со пониска концентрација се до изедначувањето на концентрациите, без какво и да е влијание од надвор.

Во двете подрачја доаѓа до рекомбинација: електроните дојдени од N-подрачјето се рекомбинираат со празнините од P-подрачјето, а празнините дојдени од P-подрачјето се рекомбинираат со електроните од N-подрачјето.

Електроните не можат да навлезат длабоко во P-подрачјето. Тие бргу се рекомбинираат и во P-подрачјето блиску до спојот остануваат само акцепторските атоми. Истото се случува и со празнините, па во N-подрачјето, блиску до спојот, остануваат само донорските атоми. Акцепторските и донорските атоми не можат да ја сменат положбата. Тие се неподвижни. Во

P-подрачјето, негативните акцепторски атоми формираат негативен просторен полнеж, чијашто концентрација опаѓа со оддалечувањето од спојот. Во N-подрачјето, донорските атоми формираат позитивен просторен полнеж и неговата концентрација опаѓа со оддалечувањето од спојот.



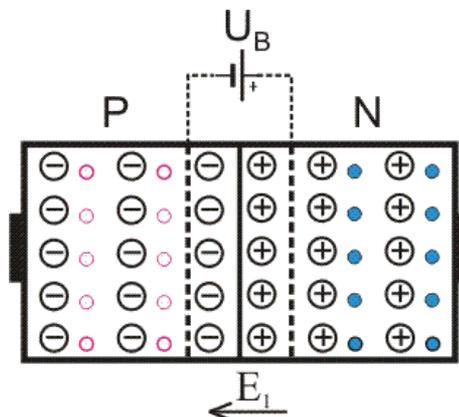
Слика 1.19: Распределба на густината на полнежи.

На **слика 1.19** е даден дијаграм на распределбата на густината на полнежот Q по должина на PN-спојот. Во оддалечениот дел на P-подрачјето не можат да се пробијат електроните од N-подрачјето. Таму владее рамнотежа на електричните полнежи како во стандардниот P-полупроводник и тоа е делот AB од карактеристиката. Со доближување кон спојот се зголемува густината на негативните полнежи. Одреден број електрони, дојдени од N-подрачјето, се рекомбинираат со празнините, а останува исто толков број акцепторски атоми и тие ја зголемуваат густината на негативните полнежи (дел BC од карактеристиката). Во преодната зона, густината на негативните полнежи е максимална, бидејќи тука веќе нема празнини.

Истото се случува и во N-подрачјето. Таму постои област на рамнотежа (делот FE), потоа зголемување на густината на позитивните полнежи претставени со донорските атоми (делот ED) и на крајот максимална густина на позитивните полнежи во точката D. Меѓу точките C и D имаме нагла промена од максимална негативна густина до максимална позитивна густина на полнежите. На спојот се јавува потенцијална разлика, наречена потенцијална бариера. Таа ги дефинира двете карактеристики на PN-спојот: внатрешното електрично поле E_1 и сопствениот капацитет на спојот.

1.4.1. Поларизација на PN - споевите

По завршувањето на процесот на формирање на PN-спојот и престанокот на дифузното движење на главните носители преку спојот, се добива состојба како на **слика 1.20**.



Слика 1.20: Потенцијална бариера во PN-спој.

Внатрешното електрично поле E_1 е насочено од N кон P-подрачјето на PN-спојот. Со дејството на ова поле престанува дифузионото движење на главните носители преку спојот. Полето дејствува така што ги придвижува електроните од спојот кон внатрешноста на N-подрачјето, а празнините кон внатрешноста на P-подрачјето. На самиот спој е формирана зона на попречување, во која нема слободни носители на полнеж, ниту, пак, постои можност за нивно преминување преку зоната. Ширината на зоната на попречување изнесува околу 1 μm . Потенцијалната бариера може да се претстави со замислен извор на еднонасочен напон U_B , како што се гледа на слика 1.20. Постојењето на потенцијалната бариера го прави спојот изолатор. Во присуство на внатрешното електрично поле спојот добива својство на кондензатор. Капацитетот на спојот се одредува според:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot S}{d} \dots\dots\dots(1.1)$$

каде што S претставува површина на спојот, d ширината на зоната на попречување, а ε диелектрична константа.

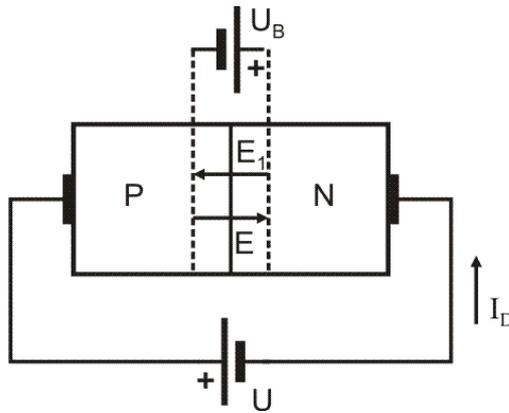
Што се однесува до споредните носители, внатрешното електрично поле го овозможува нивното преминување преку спојот и се формира струја на споредни електрони и струја на споредни празнини. Двете струи се со спротивни насоки, па како краен резултат се добива дека во PN-спој без надворешна поларизација, во кој и да е пресек на плочката на кристалот, средната густина на струјата е нула.

1.4.2. PN-спој во надворешно електрично поле

Ако се стават метални приклучни места на краевите на кристалот на PN-спој и на тие места се приклучи извор на еднонасочен напон, во внатрешноста на кристалот ќе се создаде електрично поле E , коешто понатаму ќе го викаме надворешно. Под негово влијание, во PN-спојот ќе настапат различни промени, во зависност од тоа како изворот е приклучен.

Директно поларизиран PN-спој

Ако се поврзе позитивниот пол на изворот со приклучокот на P-подрачјето, а негативниот пол на приклучокот на N-подрачјето (слика 1.21), надворешното електрично поле E ќе има спротивна насока од внатрешното поле E_1 . Бидејќи надворешното поле E има поголема јачина, резултантното поле ќе биде насочено од P кон N-подрачјето.



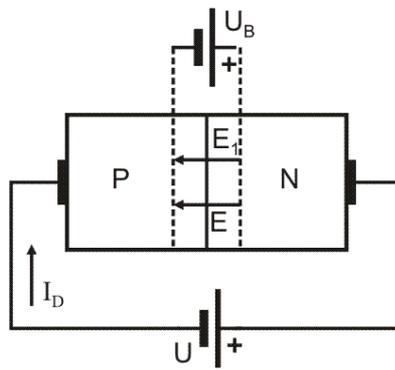
Слика 1.21: PN-спој поларизиран во спроводна насока.

Под влијание на резултантното поле, празнините од P-подрачјето ќе преминуваат во N-подрачје, а електроните од N-подрачјето преминуваат во P-подрачје. Потенцијалната бариера се намалува или се губи зависно од големината на напонот на изворот и протекува струја I_D . PN-спојот станува спроводлив, односно станува поларизиран во спроводлива насока.

За PN-спојот да стане спроводлив, потребно е струјата I_D да има јачина најмалку $1 \mu\text{A}$. Напонот, при кој ќе протече оваа струја се вика напон на вклучување и неговата вредност зависи од материјалот на полупроводникот. За германиумот тој изнесува $0,3\text{V}$, а за силициумот $0,7\text{V}$.

Инверзно поларизиран PN-спој

Ако се промени поларитетот на изворот се менува и насоката на надворешното поле E (слика 1.22) и неговата насока се совпаѓа со насоката на внатрешното поле E_1 . Сега потенцијалната бариера станува поголема, зоната на попречување поширока, па електроните и празнините уште потешко ќе можат да ја поминуваат.



Слика 1.22: PN-спој поларизиран во неспроводна насока.

Во оваа состојба, PN-спојот е поларизиран во неспроводна насока. Во неспроводно поларизируваниот PN-спој, сепак, тече мала струја. Тоа е струјата на споредните носители на полнежите, празнините во N-подрачјето и електроните во P-подрачјето. Оваа струја има многу мала вредност, затоа што е мал бројот на споредните во однос на главните носители на полнежите. Таа расте со зголемување на температурата.

ЗАПАМЕТИ !!!

***На местото на спојот на N и P-полупроводник се создава зона на попречување, испразнета од слободните електрони и празнини, потенцијална бариера и внатрешно електрично поле.**

***Директно поларизиран PN-спој се добива со приклучен позитивен пол на изворот за напојување на P, а негативен пол на N-типот и тој спроведува струја.**

***Инверзно поларизиран PN-спој се добива со приклучен позитивен пол на изворот за напојување на N, а негативниот пол на P-типот и тој не спроведува струја.**

***Во инверзно поларизиран спој тече само струјата на споредните носители, тоа е инверзна струја на спојот.**

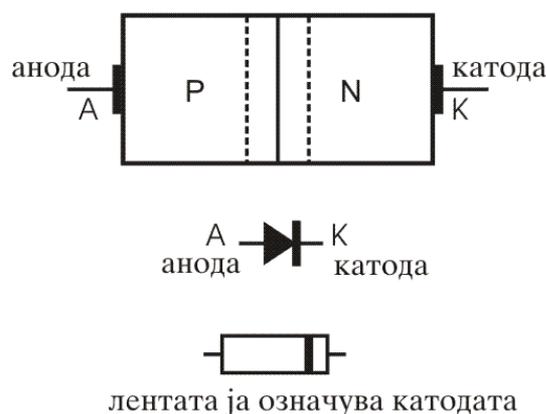
ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Како се делат материјалите?
2. Од што зависат електричните својства на материјалите?
3. Како се однесува полупроводникот при собна температура, а како при апсолутната нула?
4. Како се создава празнина?
5. Кои полупроводници се примесни полупроводници?
6. Како се добива полупроводник од N-тип?
7. Кои атоми се наречени донори?

8. Нацртај полупроводник од N-тип приклучен на надворешен извор и објасни што се случува!
9. Како се добива полупроводник од P-тип?
10. Кои атоми се наречени акцептори?
11. Нацртај полупроводник од P-тип приклучен на надворешен извор и објасни што се случува!
12. Кои носители се главни, а кои споредни кај полупроводникот од N-тип?
13. Кои носители се главни, а кои споредни кај полупроводникот од P-тип?
14. Што претставува PN-спој?
15. Како може да се поларизира PN-спојот?

1.5. Полупроводнички диоди

Прв и основен претставник на PN-спојот меѓу електронските елементи е полупроводничката диода. Структурата и електричниот симбол на диодата се дадени на **слика 1.23**.



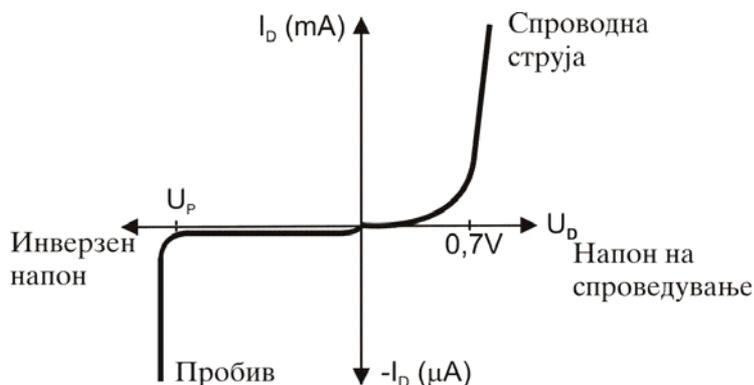
Слика 1.23: Структура и електричен симбол на диодата.

Металниот приклучок на P-делот е анода и се означува со A, а на N-делот е катода означена со K. Основната карактеристика на диодата е како и кај PN-спојот, да ја пропушта електричната струја само во една насока од анодата кон катодата.

Диодата е поларизирана во спроводна насока или директно, кога позитивниот пол на изворот за напојување е врзан со анодата, а негативниот со катодата. Инверзна или неспроводна поларизација имаме кога позитивниот пол на изворот е врзан со катодата, а негативниот со анодата на диодата.

1.5.1. Статичка карактеристика

Статичката карактеристика на диодата (слика 1.24) најдобро ја опишува состојбата при директната и при инверзната поларизација на диодата. Тоа е струјно - напонска карактеристика која ја претставува зависноста на струјата на диодата од еднонасочниот напон на нејзините краеве, при одредена константна температура на околината.



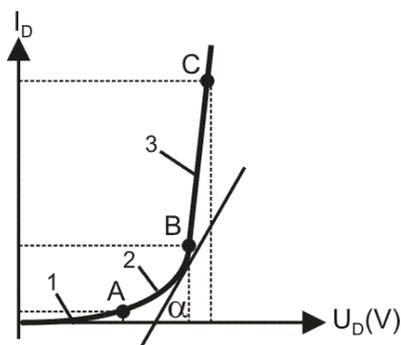
Слика 1.24: Статичка карактеристика на диодата.

Карактеристиката на директно поларизирана диода е прикажана во првиот квадрант. Таа може да се подели на три зони (слика 1.25).

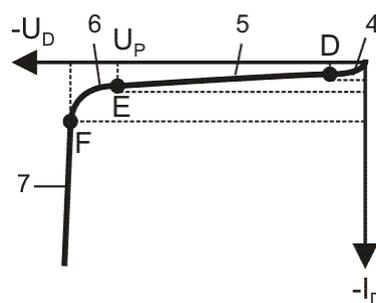
Првата зона, од координатниот почеток до точката А, е подрачје на многу мали напони. Тука се работи за напони од неколку десетини mV, при што струјата достигнува вредност од неколку десетини mA. Блиску до координатниот почеток таа е праволиниска, а потоа преминува во парабола.

Во втората зона формата на карактеристиката најмногу одговара за процесот на детекција. Таа се протега од точката А до точката на напонот на вклучувањето на диодата (В), кој, да повториме, за германиумот изнесува 0,3V, а за силициумот 0,7V.

Третата зона, од точката В до точката С, претставува подрачје на големи струи. Овде напонот на краевите на диодата не се менува значително во еден поширок опсег на промена на струјата.



Слика 1.25: Карактеристика на спроводно поларизирана диода.



Слика 1.26: Карактеристика на инверзно поларизирана диода.

Отпорот на диодата се менува со промена на директниот напон, донесен на диодата. Тој е одреден со тангенсот на аголот α што го зафаќа тангентата на карактеристиката во таа точка.

Карактеристиката на инверзно поларизираната диода е прикажана во третиот квадрант на координатен систем. И таа може да се подели на неколку зони (слика 1.26).

Зоната број 4, од 0 до точката D, е идентична со зоната број 1, спојот во двете зони се однесува симетрично и поради тоа при мали напони нема појава на насочување.

Во зоната број 5, од точката D до точката E, инверзната струја се доближува кон една константна вредност, наречена инверзна струја на заситување. Отпорот на диодата во оваа зона е многу голем, но никогаш не станува бесконечен.

Зона 6, од точката E до точката F, е подрачје на коленото на карактеристиката. Тука при мал пораст на инверзниот напон, инверзната струја многу се зголемува. Кај диодите од силициум оваа зона е многу тесна, а кај германиумови диоди е поширока. Вредноста на максималниот инверзен напон U_p се наоѓа на почетокот на коленото на карактеристиката.

Во зоната 7 настапува пробив на PN-спојот на диодата, при што инверзната струја многу се зголемува.

1.5.2. Пробивање на спојот на диодата

До пробивањето доаѓа од термички и од електрични причини. Термичкиот пробив настапува кога се нарушува термичката рамнотежа на PN-спојот. При големи јачини на струјата во внатрешниот отпор на диодата се создава топлина, која плочката на кристалот ја пренесува на околината. Најголемата дозволена работна температура на диодата зависи од полупроводничкиот материјал од кој е направена. За германиумот таа изнесува од +70 до +90°C, а за силициумот од +120 до +150°C. Кога е развиената топлина на плочката поголема од онаа што таа може да ја пренесе на околината, плочката се прегрева и може да се стопи, односно диодата да се уништи. Во врска со тоа, производителот ја пропишува максималната јачина на струјата, I_{max} , која во текот на работата не смее да се надмине.

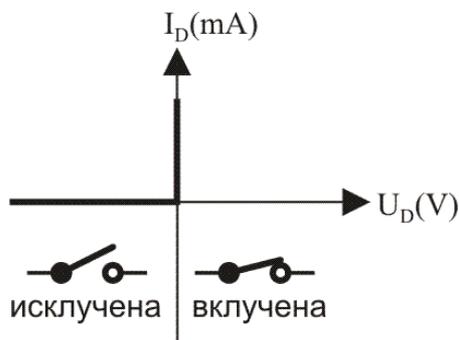
Електричниот пробив може да има лавински и тунелски или зенеров ефект.

Лавинскиот ефект се јавува во споеви со поголема ширина на запречниот слој. При големи инверзни напони во запречниот слој се создава јако електрично поле, кое на електроните што се движат преку тој слој им дава голема кинетичка енергија и забрзување. Кога таа енергија ќе достигне одредена граница, доаѓа до раскинување на нови валентни врски, бројот на слободните електрони се зголемува и се создава лавина од слободни електрони (слично на снежна лавина). Инверзната струја може да достигне голема вредност и да дојде до пробив на диодата. За да не дојде до оштетување, за секој тип на диоди производителот го дава инверзниот пробивен напон (U_p) кој не смее да се пречекори.

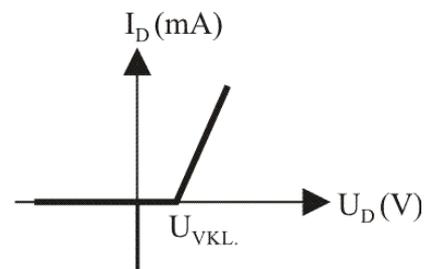
Тунелскиот или зенеров ефект може да се јави и кај диоди со мала ширина на спојот за попречување и висока концентрација на хемиските примеси. Со зголемување на инверзниот напон на таков спој преку вредноста на инверзниот пробивен напон U_p , електроните под влијание на создаденото поле ги кинат валентните врски, се зголемува бројот на слободните електрони и инверзната струја нагло расте. Се намалува внатрешниот отпор на диодата и тој не дозволува понатамошно зголемување на инверзниот напон. Дојдено е до пробив на спојот, но не и до негово уништување. Инверзниот напон останува константен.

Струјно-напонската карактеристика од слика 1.24 се однесува на физички реална диода.

За анализа на многу електронски кола се користи модел на идеална диода, која во директната насока има отпор нула и претставува совршен спроводник, а во инверзната насока нејзината струја е нула и има бесконечен отпор. Нејзината карактеристика е дадена на **слика 1.27**. Идеалната диода дејствува како затворен прекинувач, кога е директно поларизирана, и како отворен прекинувач, кога е инверзно поларизирана.



Слика 1.27: Карактеристика на идеална диода.



Слика 1.28: Карактеристика на делумно линеарна диода.

Третиот модел што е во употреба е делумно линеарна диода со што се упростуваат пресметките во колата со диоди. Нејзината карактеристика (**слика 1.28**) е составена од две линии: едната започнува некаде во инверзниот дел и завршува во точката на напонот на вклучувањето на диодата ($U_{VKL.}$), а другата продолжува од таа точка во подрачјето на директната поларизација со одреден агол. Со тој агол е одреден отпорот на диодата во директната насока.

ЗАПАМЕТИ !!!

***Полупроводничката диода е електронски елемент со PN-спој и со два извода: анода и катода.**

***Диодата е директно поларизирана, ако анодата е врзана на позитивен, а катодата на негативен потенцијал, или кога анодата е поврзана на повисок потенцијал од катодата.**

***Диодата е инверзно поларизирана, ако катодата е поврзана на повисок потенцијал од анодата.**

***Состојбата на диодата со директна и со инверзна поларизација е дадена со нејзината статичка карактеристика.**

***Пробив на диодата може да настапи од преголема температура на спојот.**

***Зенеров ефект настапува при инверзна поларизација при што инверзниот напон останува константен.**

***Лавински ефект настапува при пречекорување на дозволениот инверзен пробивен напон.**

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Дефинирај го поимот полупроводничка диода?
2. Нацртај го симболот на полупроводничката диода и означи го!
3. Објасни ја поларизацијата на диодата!
4. Дефинирај ја статичката карактеристика на диодата!
5. Нацртај ја статичката карактеристика на диодата!
6. Кога настапува термички пробив на диодата?
7. Каков може да биде електричниот пробив?
8. Објасни го поимот идеална диода и нацртај ја нејзината статичка карактеристика!

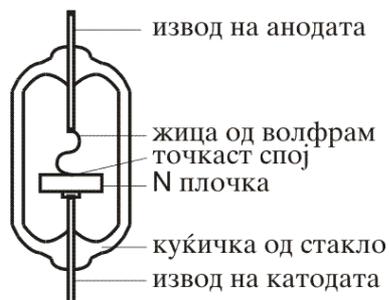
1.6. Видови и примена на полупроводнички диоди

Денес се среќаваме со повеќе видови диоди, зависно од материјалите од кои се изработени и од нивната намена. Во својот развој, за првите полупроводници е користен германиум како полупроводнички материјал. Но, понатаму силициумот се покажал како подобар во однос на процесот на обработката, како и во однос на температурната стабилност. Силициумот станува прв избор меѓу полупроводниците, а доста се застапени и некои соединенија на галиумот, како што е галиум-арсенид.

Според намената разликуваме: насочувачки, демодулациони, ограничувачки, импулсни, прекинувачки, капацитивни, фотодиоди, LED и други. Според конструкцијата разликуваме два вида, и тоа диоди со точкест спој и диоди со површински спој.

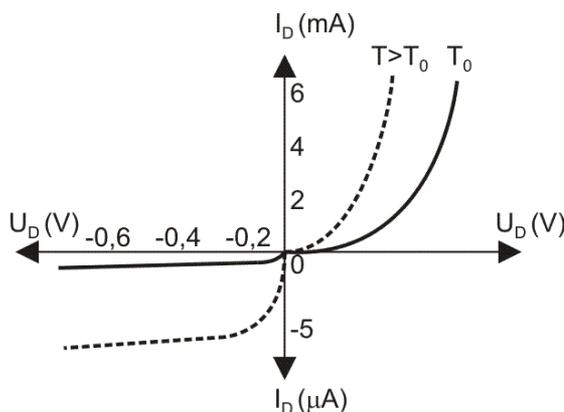
1.6.1. Диоди со точкест спој

Германиумот, сепак, не е сосема исфрлен. Тој се применува за изработка на **диоди со точкест спој**. Накратко околу нивната изработка: пречистен германиум се добива со постепено греење, така што при разни температури се одделуваат хемиските нечистотии. Пречистувањето се прави се додека специфичниот отпор на германиумот не достигне неколку десетици Ωcm . Потоа, додека се уште е во течна состојба, се додаваат примеси на петвалентни елементи (арсен, антимон) во таков сооднос еден атом на примесата да дојде на еден милион до една милијарда атоми на германиум. Со процес на извлекување се добива кристална структура од N-типот. Кристалот потоа се сече на тенки плочки, коишто по уште едно чистење од нечистотиите, нанесени при обработката, се заваруваат на метална подлога. Така подготвен кристал се става во куќиште, се воведува спирално свиткана жица од волфрам, платина или злато, со дебелина околу $6\ \mu\text{m}$ да ја допре кристалната плочка (**слика 1.29**). Металниот врв се заварува со плочката по електричен пат и диодата се оптоварува со нормална јачина на струјата. Потоа се пропуштаат импулси со 10 пати појака струја од максимално дозволената. На местото на допирот се развива топлина и се формира кратер во плочката. Електроните се извлекуваат од кратерот и така се формира PN-спој.



Слика 1.29: Конструкција на точкеста диода.

Струјно напонската карактеристика на германиум диодата OA90 е дадена на **слика 1.30**. Треба да се сврти вниманието на редот на големината на струјата: во директната насока таа е дадена во mA, а во инверзната во μA .



Слика 1.30: Струјно напонска карактеристика на германиум диода OA90.

Напонот на директно поларизираната диода е $0,3V$, што ја прави диодата поефикасна за мали сигнали со помали загуби на моќност, **особено за детекција на амплитудно и фреквенциски модулираните сигнали, или кај логички кола со ниско логичко ниво.** Отпорот на диодата со директна поларизација, при напон од $1V$ се движи во границите $50 - 200\Omega$, а за инверзно поларизирана при напон од $-10V$ изнесува $0,5-10M\Omega$.

Со малата површина на спојот се добива и мал сопствен капацитет, помал од $1pF$, што овозможува диодата да се употребува при високи фреквенции со голем степен на корисно дејство. Денес се користат **диоди со точкест спој особено во радиотехниката за детекторски степени.**

Недостаток на диодата OA90 е зависноста на нејзината карактеристика од температурата и поголема вредност на инверзната струја во однос на диоди од силициум.

1.6.2. Диоди со површински спој

Диодата со површински спој се состои од две кристални плочки, едната од P-тип, а другата од N-тип. Преку метални контакти тие се врзани со надворешни изводи на анода и катода, а спојот е затворен во метално или во пластично куќиште.

1.6.2.1. Насочувачки диоди

Насочувачките диоди се диоди со површински спој, а се користат за добивање еднонасочна струја од извор на наизменичен напон. Овие диоди имаат релативно голема површина на спојот, па низ нив може да течат струи со голема јачина и релативно високи инверзни напони. Нивната примена за високи фреквенции е ограничена со големите сопствени капацитивности.

Како материјал за изработка на насочувачките диоди се користи силициум, германиум и денес многу ретко селен.

За изборот на насочувачка диода битни се следниве параметри кои ги дава производителот:

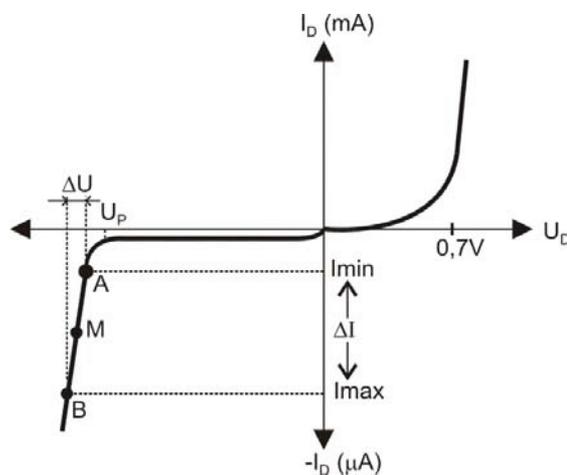
- најголема дозволена струја во директна насока I_{Dmax} ;
- максимален дозволени инверзен напон U_{Imax} (околу 70% од вредноста на пробивниот напон U_P);
- максимална дозволена моќност на дисипација P_{Dmax} (моќност претворена во топлина во внатрешноста на диодата).

Според моќноста, насочувачките диоди се делат на:

- диоди со мала моќност до $3W$;
- диоди со средна моќност до $10W$;
- диоди со голема моќност до неколку KW .

1.6.2.2. Зенер диоди

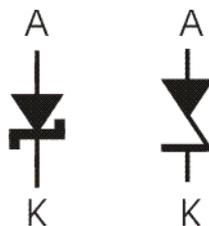
Зенер диода е силициумска диода со површински спој, наменета за стабилизација на еднонасочен напон. За разлика од стандардната насочувачка диода, зенер диодата има зголемен процент на хемиски примеси, како во N-подрачјето така и во P-подрачјето. Со тоа е подобрена нејзината струјно-напонска карактеристика во областа на инверзните напони каде што и е и работното подрачје. Подобрувањето се гледа во зголемена стрмнина на делот на карактеристиката и поостро колено после точката на пробивниот напон. Типичната струјно-напонска карактеристика е дадена на **слика 1.31**.



Слика 1.31: Струјно-напонска карактеристика на зенер диода.

За стабилизација на напон се користи делот меѓу точките A и B, познат како област на зенеров ефект. За голема промена на струјата ΔI се добива релативно мала промена на инверзниот напон ΔU на краевите на диодата, што е карактеристично за уредите коишто вршат стабилизација на напон. Во колото каде што се врши стабилизација, работната точка M на диодата (вредност на напонот што се стабилизира) се поставува на средината меѓу точките A и B.

Електричниот симбол на зенер диодата е даден на **слика 1.32**.



Слика 1.32: Електричен симбол на зенер диода.

Зенер диодите се изработуваат за напони на стабилизација од 3V до 75V, но можни се и напони надвор од овој опсег (до 200V). За напони помали од 3V тешко е да се произведе зенер диода со добри стабилизациони својства. За тие напони се користат сериски врзани силициумски диоди со површински спој, поларизирани во спроводна (директна) насока ($n \times 0,7V$).

Основните параметри за избор на зенер диодата се:

- зенер напонот во опсег 3,3V до 75V;
- толеранција на специфицираниот напон, која може да биде 5% или 10%, но на располагање се и многу попрецизни толеранции како што е 0,05% за посебни цели;
- моќност на диодата, која може да биде $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, 1, 5, 10 и 50W.

Зенер диодите се употребуваат за изработка на стабилизатори на напон, како извори на референтен напон и во ограничувачите на напон.

1.6.2.3. Импулсни диоди

Карактеристично за логичките операции во дигиталните кола е работа со **импулси** каде што имаме брза промена од логички ниско на логички високо ниво. Таквата операција треба да ја извршува некој вид прекинувачки елемент, кој во состојба отворено има бесконечно голем отпор, а во состојба затворено бесконечно мал отпор.

Полупроводничката диода се однесува слично, но целосно не ги исполнува овие барања. Главното ограничување потекнува од тоа што таа не може да обезбеди доволно брз премин од спроводна во неспроводна состојба. Причината лежи во појавата на натрупување на слободните носители на полнежот во слојот за попречување.

Кога диодата е директно поларизирана подолго време, на граничната површина на PN-спојот од диодата, на P-страната доаѓа до натрупување на споредни носители електрони, а на N-страната празнини. Ако спојот се префрли во состојба на инверзна поларизација, распределбата на споредните носители ќе се менува моментално, зашто нивното движење е дифузно и нивната концентрација опаѓа релативно бавно. Спојот останува спроводен за период во кој концентрацијата на споредните носители не се намали на ниво кое го има кога диодата е неполаризирана. Овој период се дефинира како време на растоварување на диодата.

Опаѓањето на концентрацијата на споредните носители продолжува и понатаму, се додека инверзната струја на спојот не ја достигне вредноста на заситувањето. Тоа е период на опаѓање на диодната струја. Се ова може да се разбере и како последица на постоење на дифузиониот капацитет на PN-спојот. Вкупното времетраење на преминувањето од директна во инверзно поларизирана состојба изнесува од 2 до 50 ns.

Во импулсните или прекинувачките диоди, наменети за такви операции, се применети технолошки постапки на додавање примеси на злато во силициумската плочка на диодата, со цел да се спречи создавање голема концентрација на споредните носители.

Според времето на исклучување, импулсните диоди се делат на микросекундни ($t_r > 0,1 \mu s$) и наносекундни ($t_r < 0,1 \mu s$).

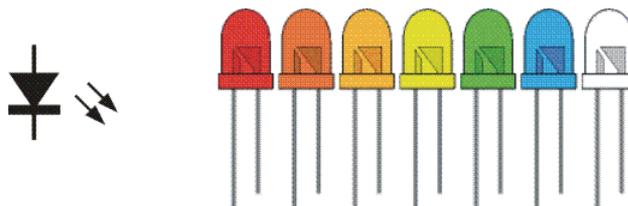
Импулсните диоди се употребуваат во дигиталните прекинувачки кола за извршување на логички операции со електрични сигнали од импулсен облик.

1.6.2.4. LED диода

LED или светлечка диода (името доаѓа од кратенката на англискиот израз **Light Emitting Diode** - диода која емитира светлина) претставува извор на светлина. Принципот на работа на LED диодата се базира на својството на електронот да емитира енергија од одредена област на видливиот спектар, кога преминува од повисоко во пониско енергетско ниво. За тоа е потребен надворешен извор за напојување. Бојата на зрачењето не зависи од јачината на струјата на диодата, туку од видот на полупроводниот материјал од кој е направена.

Секој хемиски елемент има своја емисија на зрачна енергија. Така, на пример, диода направена од комбинација на галиум, арсен и фосфор дава црвена светлина. Со промена на хемиската комбинација на PN-спојот можат да се добијат разни бои од видливиот дел на спектарот, како црвена, зелена, сина, жолта, или инфрацрвена (IR) и ултравиолетова (UV), од невидливиот дел на спектарот. Другите бои можат да се добијат како комбинација на две или повеќе примарни бои (црвена, сина, зелена) на диоди ставени во исто куќиште и користејќи заедничка оптичка леќа.

Електричниот симбол и изглед на LED диода е даден на **слика 1.33**.



Слика 1.33: Електричен симбол и изглед на LED диода.

За нормална работа, LED диодата користи директна поларизација, а напонот на краевите на диодата се движи меѓу 1,6V и 3V, зависно од бојата. Типична работна струја на LED диода со стандардна големина изнесува околу 20mA, а максимален инверзен напон до 5V. Освен стандардните, постојат и високоефикасни LED диоди со работна струја од 2 до 8mA. LED диодата има поголема брзина на вклучување и исклучување, што овозможува да се користи за пренос на дигитални информации преку фиброоптички влакна со голема брзина (до 10 импулси во секунда).

Ласерските диоди се тип на светлечки диоди и се користат кај оптичките уреди (ЦД и ДВД читачи/режачи) и кај комуникациите со голем капацитет (оптички влакна и оптичка комуникација).

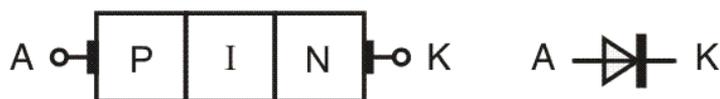
OLED (Organic Light-emitting Diode) диода претставува светлечка диода направена од органски полупроводник. Нејзиниот емитирачки пласт, подлогата и анодниот и катодниот приклучок се направени од органски молекули кои спроведуваат електрична струја. **OLED диодите се употребуваат во ТВ-екраните, компјутерските монитори, мобилните телефони, часовници, во светлечките реклами и информации во информациски апликации и патокази, мобилните телефони, часовници и слично.**

Со развојот на нови материјали се зголемува ефикасноста на LED диодите и тие стануваат реален извор на светлина со кој се заменуваат стандардните светилки. Моќноста на диодите со голема ефикасност достигнува вредност до 5W со 18-20 lm/W, што е повеќе од вредноста што ја дава стандардна светилка со вжештена спирала од 60 до 100W.

1.6.2.5. PIN диода

PIN диодите се составени од три полупроводни подрачја. Помеѓу подрачјата од P и N-тип се наоѓа област на чист полупроводник (I). При директна поларизација, спроводливоста на I-подрачјето се менува со јачината на струјата. Отпорноста на I-подрачјето е голема при мали вредности на еднонасочната струја, а мала при големи. Оваа особина на PIN диодата, формирање отпорност која може да се менува со помош на еднонасочна струја, односно напон, PIN диодата се употребува како прекинувачки елемент, како модулатор или како променлив отпорник во електрични кола со автоматска регулација на засилувањето.

Структурата и електричниот симбол на PIN диодата се дадени на **слика 1.34**.

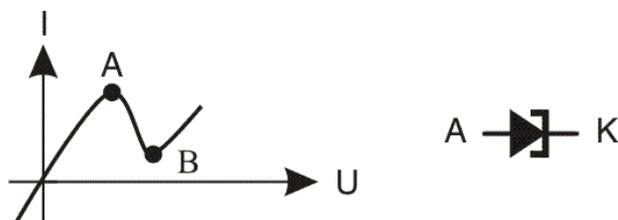


Слика 1.34: Структура и електричен симбол на PIN диодата.

1.6.2.6. Тунел диода

Тунел диодите се изработуваат од германиум со голема концентрација на примеси. Ширината на зоната на попречување во PN-спојот на тунел диодата е обратно пропорционална со концентрацијата на слободните носители, па тунел диодите, поради зголемениот процент на примеси, имаат многу мала ширина на зоната. На **сликата 1.35** се дадени струјно-напонската карактеристика на тунел диодата и нејзиниот електричен симбол. Делот од карактеристиката од точката А до точката В се нарекува “област на негативна

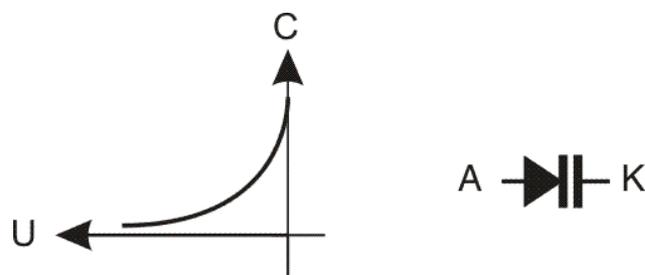
спроводливост” бидејќи со зголемување на напонот на краевите на диодата се намалува струјата низ неа. Тунел диодите се употребуваат во прекинувачките и засилувачките кола, а најчесто во осцилаторите. **Тунел диодата е диода со голема брзина и има примена во засилувачите во областа на микробранови.**



Слика 1.35: Струјно-напонската карактеристика и електричен симбол на тунел диодата.

1.6.2.7. Варикап диода

Варикап - капацитивни диоди се полупроводнички диоди чија капацитивност се менува со промена на приклучениот напон на нејзините краеве. Зависноста на капацитивноста од приклучениот напон и електричниот симбол на варикап диодата се дадени на **слика 1.36**.



Слика 1.36: Завсност на капацитивноста од приклучениот напонот и електричен симбол на варикап диодата.

Капацитивните диоди се применуваат во осцилаторните кола во радио и телевизиската техника во областа на високи фреквенции, во колата за автоматско регулирање на фреквенцијата, како променливи кондензатори со електрично управување. Во областа на микробранови се применува посебен вид на варикап диода, т.н. варактор диода, која служи за умножување на фреквенцијата.

1.6.2.8. GUN диода

GUN диода е диода која содржи полупроводник од N-тип. Таа има три подрачја, од кои, две со голема густина на примеси на краевите, и едно со мала густина на примеси кое се наоѓа меѓу нив. GUN диодата има негативен отпор и се користи во осцилатори во фреквентниот опсег од 10GHz.

ЗАПАМЕТИ !!!

*Точкеста диода се изработува од германиум, напонот на директно поларизирана диода е 0,3V, сопствениот капацитет е помал од 1pF, се применува во кола за високи фреквенции.

*Насочувачка диода е диода со површински спој, може да издржи струја со голема јачина и релативно висок инверзен напон, се употребува во насочувачки кола и склопови.

*Зенер диода работи во област на пробив со инверзни напони, се користи за стабилизација на напон.

*Импулсната диода има брз премин од неспроводна во спроводна состојба, се користи за импулсни и логички кола.

*Лед или светлечка диода дава светлина под влијание на надворешен извор за напојување, работи со директна поларизација.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Какви видови полупроводнички диоди разликуваме според конструкцијата?
 2. Објасни ја изработката на диодите со точкест спој?
 3. Каде наоѓаат примена диодите со точкест спој?
 4. Каде наоѓаат примена насочувачките диоди?
 5. Кои ограничувања ги има насочувачката диода?
 6. Како се делат насочувачките диоди?
 7. Објасни ги стабилизационото дејство на зенер диодата со помош на статичката карактеристика!
 8. Нацртај го шематскиот приказ на зенер диодата!
 9. За кои напони на стабилизација се изработуваат зенер диодите?
 10. Кои се основните параметри за избор на зенер диодата?
 11. Каде наоѓаат примена импулсните диоди?
 12. Нацртај ја шематска ознака на LED, PIN, варицап и тунел диода.
 13. Каде наоѓаат примена LED,GUN, PIN, OLED, варицап, тунел и ласерските диоди?
-

ТЕМАТСКО УТВРДУВАЊЕ

I Прашања со заокружување

(Заокружи ги точните одговори)

1. Активни компоненти се:

- а) отпорници
- б) диоди
- в) тиристори
- г) кондензатори.

2. Во аналогни кола спаѓаат:

- а) мемории
- б) микропроцесори
- в) осцилатори
- г) засилувачи
- д) филтри.

3. Материјалите со голем број слободни електрони се:

- а) полупроводници
- б) проводници
- в) изолатори.

4. Полупроводник од P-тип се добива со внесување на

- а) тривалентни атоми
- б) четривалентни атоми
- в) петвалентни атоми

во кристалната решетка на германиум или силициум.

5. Кога позитивниот пол на изворот се поврзе со N-подрачјето на PN-спојот, тогаш тој:

- а) е директно поларизиран
 - б) не е поларизиран
 - в) е инверзно поларизиран.
-

II Прашања со поврзување

6. Поврзи ги шематските симболи со соодветните диоди:



а)



б)



в)



г)



д)

1. Зенер диода _____
2. Насочувачка диода _____
3. LED диода _____
4. Варикап диода _____ .

7. Поврзи ја групата материјали со нивната специфична отпорност:

- | | |
|-------------------|--|
| 1. Полупроводници | а) од 10^{-6} до $10^{-5} \Omega\text{cm}$ _____ |
| 2. Изолатори | б) од 10^6 до $10^8 \Omega\text{cm}$ _____ |
| 3. Проводници | в) од 10^{-3} до $10^7 \Omega\text{cm}$ _____ . |

8. Поврзи го типот на полупроводник со главните носители:

- | | |
|----------|---------------------|
| 1. P-тип | а) електрони _____ |
| 2. N-тип | б) празнини _____ . |

9. Поврзи го дејството на идеалната диода со поларизацијата:

- | | |
|------------------------|----------------------------------|
| 1. Затворен прекинувач | а) директна поларизација _____ |
| 2. Отворен прекинувач | б) инверзна поларизација _____ . |

10. Поврзи ја диодата со нејзината примена:

- | | |
|---|----------------------|
| 1. Кола за автоматска регулација на фреквенцијата | а) тунел диода _____ |
| 2. Осцилатори | б) варикап _____ |
| 3. Модулатори | в) зенер диода _____ |
| 4. Стабилизатори на напони | г) PIN диода _____ . |

III Прашања со дополнување

11. При температура на апсолутната нула ($-273^{\circ}\text{C} = 0\text{K}$) полупроводникот се однесува како _____ .

12. Со внесување на петвалентни атоми во кристалната решетка на германиум или силициум се добива полупроводник од _____ тип.

13. Полупроводник од N-тип се добива со внесување на _____ валентни атоми во кристалната решетка на германиум или силициум.

14. Ако се поврзе позитивниот пол на изворот со приклучокот на P-подрачјето од PN-спојот, а негативниот пол на приклучокот на N-подрачјето на PN-спојот, тогаш PN-спојот ќе биде _____ поларизиран .

15. Струјно - напонска карактеристика на диода претставува зависност на _____ на диодата од _____, при одредена константна _____ .

Истражувај и дознај повеќе:



- Обиди се да откриеш во кои уреди од твоето домаќинство имаат примена диодите.

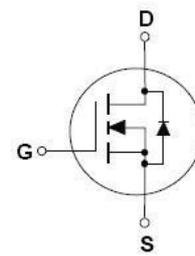
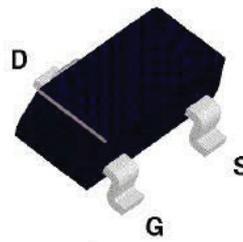
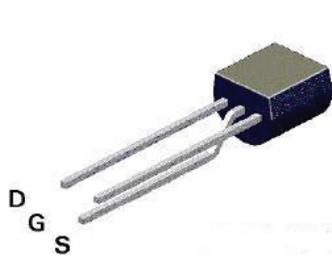
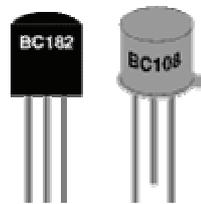
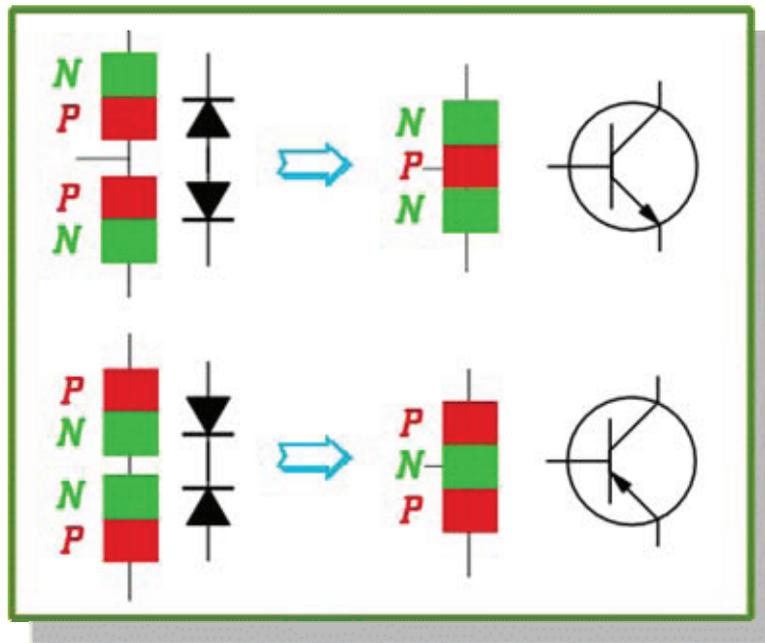
- Истражувај на интернет за видови и поширока примена на диодите од изложената во текстот и врз основа на истражувањето изработи проект.

- На часовите по практична настава согледај го насочувачкото дејство на полупроводничката насочувачка диода со помош на осцилоскоп.

ТРАНЗИСТОРИ

Со изучување на содржините од оваа тема, ќе стекнеш знаења за транзисторите и ќе можеш:

- да го толкуваш физичкото создавање на транзисторот со помош на PN-споеви;
- да ги разликуваш видовите на транзистори;
- да го објаснуваш начинот на поларизација кај транзисторите;
- да ја воочуваш разликата во поларизацијата и начинот на работа меѓу PNP и NPN-транзистор;
- да го објаснуваш графичкото претставување на статичките карактеристики на транзисторот;
- да го објаснуваш значењето на коефициентот на струјно засилување на транзисторот;
- да го претставуваш транзисторот преку еквивалентно коло со h параметри;
- да ја објаснуваш улогата на транзисторот како засилувачки елемент;
- да пресметуваш засилување;
- да ја воочуваш разликата во однесувањето на транзисторот при високи и при ниски фреквенции;
- да ја објаснуваш улогата на транзисторот како прекинувачки елемент;
- да ги споредуваш различните работни режими кај транзисторот кога тој работи во прекинувачки режим;
- да го објаснуваш принципот на работа на FET-от;
- да го споредуваш начинот на работа на биполарен транзистор и FET;
- да го објаснуваш принципот на работа на MOSFET-от;
- да ја воочуваш разликата меѓу FET и MOSFET;
- да анализираш FET и MOSFET во статички режим на работа;
- да претставуваш FET и MOSFET со еквивалентно коло за линеарен режим на работа (со μ и g_m);
- да ја објаснуваш улогата на FET и MOSFET како засилувачки елементи;
- да ја објаснуваш улогата на MOSFET како прекинувачки елемент;
- да ја познаваш примената на транзисторите.



Полупроводнички елемент со два PN-споја и три електроди претставува транзистор. Називот транзистор е добиен од англиските зборови **TRANS**fer res**ISTOR**, со значење преносна отпорност, или поточно, отпорност со која може да се управува.

Транзисторите можат да се поделат на две основни групи: биполарни транзистори и транзистори со ефект на поле (FET – **F**ield **E**ffect **T**ransistor). Двете групи се со слична конструкција со примена на PN-споеви, но со различен принцип на работа. Кај биполарните транзистори, во вкупната струја која тече низ транзисторот, учествуваат два вида на носители на полнеж – главни и споредни, за разлика од транзисторите со ефект на поле, кај кои струјата е формирана само од еден вид на носители на полнежот. Во анализите на случувањата во внатрешноста на полупроводниците, ќе се користи електронската насока на струјата.

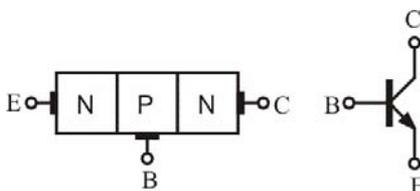
Според режимот на работа, транзисторите од двете групи можат да се поделат на засилувачи и на прекинувачи.

2. Транзистори

Структурата на биполарниот транзистор е составена од две PN-диоди со површински спој, ставени во процесот на производството многу блиску една до друга, така што да го споделат заедничкиот регион. Според тоа, **биполарниот транзистор претставува спој од два полупроводника од едниот вид, меѓу кои е вметнат полупроводник од другиот вид.** Таков распоред е можен во две варијанти означени со NPN и PNP.

2.1. NPN-транзистор

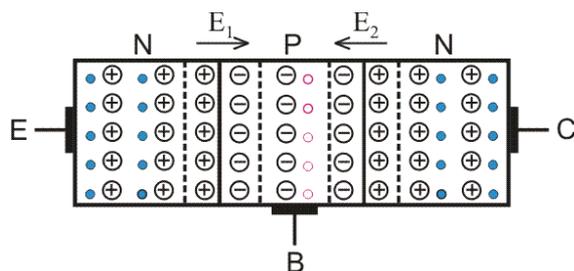
NPN транзисторот е составен од два PN-споја, допрени со P подрачјата. Неговата структура и шематската ознака се дадени на **слика 2.1**.



Слика 2.1: Структура и шематската ознака на NPN-транзистор.

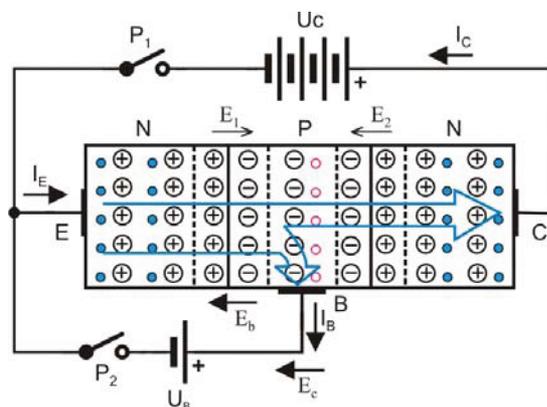
Средното подрачје на транзисторот се вика **база (B)** и во конструкцијата на транзисторот се бара да биде што потенок. Неговата ширина, за некои видови транзистори, може да има вредност околу 50 μm (за споредба, дебелината на спојот изнесува 1 μm). Едниот крај на N подрачјето се вика **емитер (E)** и има основна задача да емитира носители на полнеж - електрони, кои патуваат преку базата (B) и се собираат на спротивниот крај на транзисторот,

наречен **колектор (С)**. Процентот на примесите во N подрачјата е поголем од оној на P подрачјето.



Слика 2.2: Графички приказ на NPN-транзистор.

За подобро разбирање на процесите ќе се послужиме со графички приказ на NPN-транзисторот, даден на **слика 2.2**. Од сликата се гледа дека по завршениот процес на формирање на единствениот кристал, се создаваат две потенцијални бариери и две зони на попречување со внатрешните полиња E_1 и E_2 со спротивни насоки. Едната е на спојот емитер база, кој е наречен емитерски, а другата на спојот меѓу базата и колекторот и тој е наречен колекторски. Начинот на формирањето на бариерите е еднаков на оној што веќе е опишан во поглавјето 1.4 за полупроводниците и за диодите.



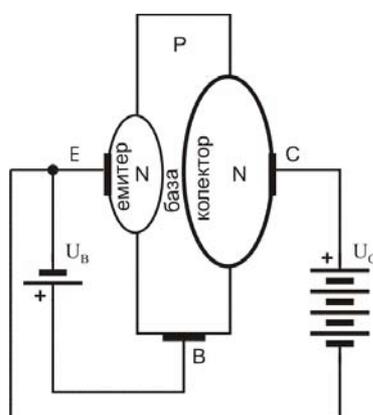
Слика 2.3: Поларизација на NPN-транзистор.

За поларизација на споевите се потребни два еднонасочни извори (**слика 2.3**). Изворот U_B е врзан меѓу базата и емитерот, а изворот U_C меѓу колекторот и емитерот.

Кога прекинувачот P_1 е затворен, а P_2 отворен, изворот U_C формира надворешно поле E_C , ориентирано од колекторот кон емитерот. Неговата насока се совпаѓа со насоката на внатрешното поле E_2 , а неговиот ефект е да го засили дејството на полето E_2 , се проширува зоната на попречување на колекторскиот спој и струјата I_C не може да тече.

Состојбата драстично се менува со затворање на прекинувачот P_2 . Изворот U_B создава надворешно поле E_b меѓу базата и емитерот, насочено од базата кон емитерот. За доволно голема вредност на напонот на изворот, надворешното поле E_b му се спротивставува на внатрешното поле E_1 и го прави емитерскиот спој директно поларизиран. Слободните

електрони во голем број преминуваат од регионот на емитерот преку емитерскиот спој и навлегуваат во регионот на базата. Но, бидејќи областа на базата е многу мала и располага со мал број празнини, можноста за рекомбинација меѓу електроните и празнините е многу мала. Само оние електрони што се рекомбинираат со празнините учествуваат во формирањето на базната струја I_B . Останатиот број електрони не можат да се насочат кон приклучокот на базата, тие по пат на дифузија се преместуваат на границата на зоната на попречување меѓу базата и колекторот. Тука, тие паѓаат под влијание на полето E_C и E_2 , го поминуваат колекторскиот спој и одат во регионот на колекторот. Како резултат, во колото емитер колектор ќе протече струјата I_C . Јачината на таа струја ќе зависи од бројот на слободните електрони кои преминале преку емитерскиот спој, односно од степенот на поларизацијата на емитерскиот спој. Значи, кај NPN-транзистор ќе тече струја меѓу емитер и колектор, само ако тече струја во колото емитер база, а тоа се случува кога колекторот е на повисок потенцијал од потенцијалот на базата кон емитерот ($U_{CE} \geq U_{BE} \geq 0.7V$).



Слика 2.4: Физички распоред на полупроводните региони на NPN-транзистор.

Од сликата на реалниот физички распоред на полупроводниците на NPN-транзистор (слика 2.4), се добива уште појасна претстава за процесот на формирањето на колекторската струја I_C . Ширината на базата меѓу емитерот и колекторот за некои видови транзистори изнесува до $50 \mu m$, а самиот спој меѓу полупроводниците P и N е околу $1 \mu m$. Површините на споевите база-колектор и база-емитер не се еднакви. Површината на колекторскиот спој е три пати поголема од површината на емитерскиот спој. Ова е потребно за да може колекторот да ги собере сите електрони кои доаѓаат од емитерот.

Поларитетот на изворите U_C и U_B е многу битен за функционирањето на транзисторот. Што ќе се случи ако се промени поларитетот на едниот или на двата извора? Да го промениме поларитетот само на изворот U_C , прекинувачот P_2 да биде отворен, а да го затвориме прекинувачот P_1 (слика 2.3). Како прво, се свртува насоката на полето E_C и таа се совпаѓа со насоката на полето E_1 . Потенцијалната бариера на емитерскиот спој се зголемува, се проширува зоната за попречување и транзисторот станува блокиран.

Ако го затвориме сега и прекинувачот P_2 , емитерскиот спој станува директно поларизиран и протекува струја I_B од емитерот кон базата. Но, во исто време протекува и голема струја од емитерот, преку подрачјето на базата кон колекторот преку колекторскиот спој на кој нема никаква потенцијална бариера. Бариерата е поништена со дејството на полето E_C и нема никакво дејство кое би го сопрело преминувањето на електроните преку колекторскиот спој, што може да предизвика уништување на транзисторот. Од друга страна, двата извора, во однос на колото база колектор се приклучени во серија и нивниот напон, како збир, го поларизира директно колекторскиот спој, што придонесува за зголемување на струјата.

Ако го свртиме поларитетот и на изворот U_B , двата извора и натаму остануваат врзани во серија меѓу базата и колекторот, но нивните напони се одземаат. Напонот база колектор е: $U_{BC} = U_B - U_C$. Овој напон ќе биде позитивен, односно базата ќе биде на повисок потенцијал од колекторот и спојот ќе биде директно поларизиран само кога е $U_B > U_C$. Во тој случај ќе дојде до оштетување на транзисторот.

Ако го свртиме поларитетот на изворот U_B , полето E_b ќе ја смени насоката и емитерскиот спој ќе биде инверзно поларизиран. Но, ако напонот на изворот U_C е поголем од напонот на изворот U_B , полето E_C ќе го поништи дејството на полето E_b и емитерскиот спој ќе биде директно поларизиран, што предизвикува оштетување на транзисторот. Само ако напонот на изворот U_B е еднаков или поголем од напонот на изворот U_C , транзисторот ќе биде заштитен.

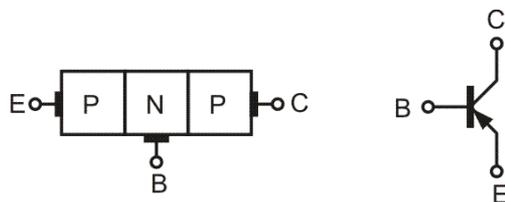
Струјата може да се ограничи и со додавање отпорници во надворешното коло.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Дефинирај го поимот транзистор.
2. Какви видови транзистори постојат?
3. Нацртај ја шематската ознака на NPN-транзисторот.
4. Колку електроди има транзисторот и како се нарекуваат?
5. Како се создава струјата при поларизацијата на NPN транзисторот?

2.2. PNP-транзистор

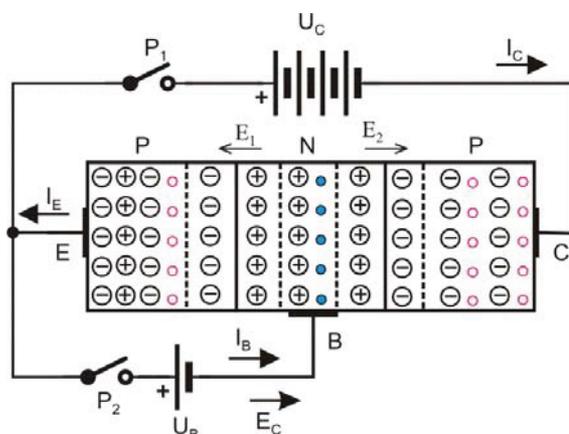
PNP транзисторот е составен од два PN-споја, допрени со N-подрачјата. Неговата структура и шематскиот знак се дадени на **слика 2.5**.



Слика 2.5: Структура и шематска ознака на PNP-транзистор.

Целата негова конструкција е иста со конструкцијата на NPN-транзисторот, со таа разлика што P и N-полупроводниците ги менуваат местата. Овде емитерот и колекторот се од P-тип, а базата е од N-тип. PN-споевите се поставени така што внатрешните полиња E_1 и E_2 сега се насочени едното спротивно од другото и во спротивна насока од онаа кај NPN-транзисторот. Процентот на примесите е поголем во P-подрачјата од оној на N-подрачјето, што значи дека овде главната струја е струја на празнините.

За разјаснување на процесите што се одвиваат во PNP-транзисторот ќе се послужиме со скицата, дадена на **слика 2.6**. Се забележува дека изворите U_C и U_B се поставени спротивно во однос на сличната скица на слика 2.3.



Слика 2.6: Графички приказ на PNP-транзистор.

Со затворање на прекинувачот P_1 , во внатрешноста на транзисторот се формира поле E_C со дејството на изворот U_C . Тоа поле е насочено од емитерот кон колекторот и го помага дејството на полето E_2 , со што се зголемува потенцијалната бариера и се проширува зоната на попречување меѓу базата и колекторот и транзисторот останува блокиран.

Со затворање на прекинувачот P_2 , емитерскиот спој директно се поларизира. Попречниот слој на емитерскиот спој се стеснува и се поништува, голем број празнини навлегуваат во подрачјето на базата. По пат на дифузија тие се поместуваат кон работ на подрачјето на попречување на колекторскиот спој, каде што паѓаат под влијание на резултантното поле на E_C и E_2 , го поминуваат подрачјето на попречување и се упатуваат кон колекторот и кон неговиот метален приклучок, каде што извлекуваат електрони од изворот U_C преку спроводникот кој е сврзан со колекторот. Оваа експресна анализа потсетува само дека се работи за истиот процес кој веќе е анализиран кај NPN-транзисторот.

Истите опасности од уништување на транзисторот постојат и кај PNP транзисторот ако дојде до свртување на поларитетот на изворите за напојување.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Нацртај ја шематската ознака на PNP-транзисторот.
2. Каква насока имаат внатрешните полиња E_1 и E_2 во PNP транзисторот во однос на NPN-транзисторот?
3. Кој спој се нарекува емитерски, а кој колекторски?
4. При каква поларизација може да дојде до уништување на транзисторот?

2.3. Инверзна струја

Да се вратиме сега на слика 2.3 и на состојбата кога е затворен само прекинувачот P_1 . Во транзисторот не тече струја, констатација до која е дојдено со следењето на движењето на основните носители – електроните. Ако се земе предвид постоењето и на споредните носители на полнежот, состојбата ќе се промени.

Празнините, споредните носители во подрачјето на колекторот, под влијание на полето K_C се движат кон подрачјето на базата, лесно преминуваат преку колекторскиот спој и навлегуваат во многу тесното подрачје на базата. Со оглед на разликата во ширината на подрачјето на колекторот и на базата, бројот на празнините дојдени во подрачјето на базата е многу поголем од бројот на електроните – споредни носители создадени во подрачјето на базата. Мал дел од празнините се рекомбинира со електроните од базата. Останатиот поголем број празнини, се уште под влијание на полето E_C , преминува и преку емитерскиот спој, совладувајќи ја потенцијалната бариера на спојот и се упатува кон металниот приклучок на емитерот, каде што извлекува електрони од изворот за напојување преку спроводникот со кој е врзан изворот со емитерот. На тој начин се формира инверзната струја која тече од колекторот кон емитерот. Таа струја ќе ја означиме со I_{CE0} како инверзна струја од колекторот кон емитерот со отворено коло на базата. Јачината на оваа струја зависи од бројот на раскинатите валентни врски, што значи од температурата на транзисторот.

Истото се случува и кај PNP-транзисторот, само што струјата I_{CE0} во него потекнува од електроните како споредни носители на полнеж во P-подрачјето на колекторот. Таа има спротивна насока од онаа на NPN-транзисторот и тоа од емитерот кон колекторот.

ЗАПАМЕТИ !!!

*Биполарен транзистор е струјно управуван електронски елемент со три изводи: колектор, база и емитер, во кој струјата поминува преку два PN – споја.

*Според распоредот на споевите, транзисторот може да биде од NPN или од PNP-тип.

*NPN транзистор е составен од два N-полупроводника со вметнат P-полупроводник меѓу нив. Главни носители на електричниот полнеж се електроните.

*PNP-транзистор е составен од два P-полупроводника со вметнат N-полупроводник меѓу нив. Главни носители на полнежот се празнините.

*Во колекторското коло на транзисторот тече струја само ако тече и базната струја.

*Инверзната струја на транзисторот е струја на споредните носители на полнеж, таа тече од колекторот кон емитерот кај NPN и од емитерот кон колекторот за PNP-транзисторот, при отворено коло на базата.

* При поларизација на NPN-транзисторот, колекторот е на повисок потенцијал од базата а базата од емитерот.

* При поларизација на PNP-транзисторот, емитерот е на повисок потенцијал од базата а базата од колекторот.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Кои носители ја создаваат струјата во NPN-транзисторот?
2. Кои носители ја создаваат струјата во PNP-транзисторот?
3. Како се создава струјата I_{CE0} во транзисторот?
4. Од што зависи јачината на струјата I_{CE0} ?

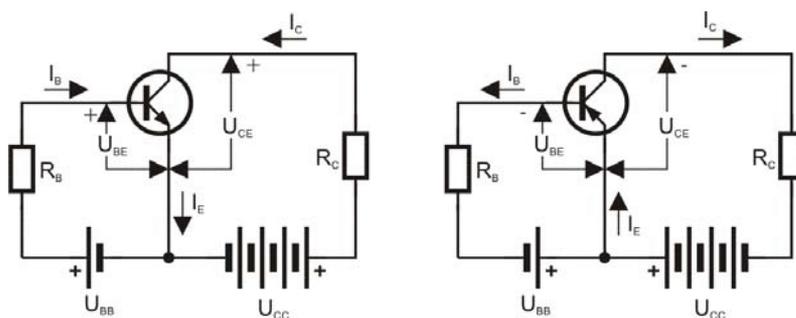
2.4. Карактеристики на транзисторот

Кај транзисторот постојат два режима на работа: статички и динамички. Статички режим на работа имаме кога во колото на транзисторот постојат само еднонасочни напони и струи со кои се поларизира транзисторот. Транзисторот се поларизира така што емитерскиот спој ќе биде директно поларизиран, а колекторскиот инверзно. Во динамичкиот режим на работа, покрај еднонасочните напони и струи, имаме напон и струја на наизменичен сигнал, кој треба да се засилува.

2.4.1. Статички режим на работа

Колото на транзисторот во статички режим на работа е прикажано на **слика 2.7**. За анализа го користиме колото со NPN-транзистор, која важи и за колото со PNP-транзистор, само со спротивни насоки на струите и напоните. Во колото на колекторот и на базата се ставени

отпорникот R_B , со кој се одредува базната струја и отпорникот R_C , со кој се одредува колекторската струја.



Слика 2.7: Колото на транзисторот во статички режим на работа.

Во анализата ќе ги користиме следниве ознаки:

U_{CE} – напон колектор–емитер

U_{BE} – напон база–емитер

U_{CC} - напон на изворот за напојување на колекторот

U_{BB} - напон на изворот за напојување на базата

I_C - колекторска струја

I_B - базна струја

I_E - емитерска струја

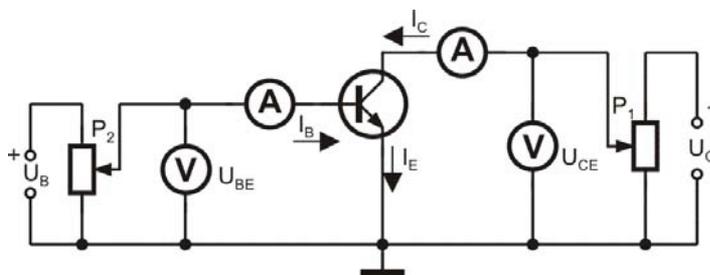
Во анализата на принципите на работа на транзисторите е користен метод на електронската насока на струите. Во пресметките, пак, вообичаено е да се користи метод на техничката насока, при што се работи само за промена на знаците на струите во однос на оние од електронската насока.

2.4.2. Статички карактеристики

Од горе наведените, четири големини се со јасно изразена меѓусебна зависност. Тоа се: базната струја I_B и напонот база - емитер U_{BE} , како влезни, и колекторската струја I_C и напонот колектор - емитер U_{CE} , како излезни големини. Нивните зависимости можат да се претстават графички преку статичките карактеристики на транзисторот. Бројот на овие карактеристики е доста голем, но нема потреба од сите за пресметка на транзисторско коло со графичка метода.

Комплетните карактеристики ги дава производителот на транзисторот, или се добиваат со едноставно коло за мерење.

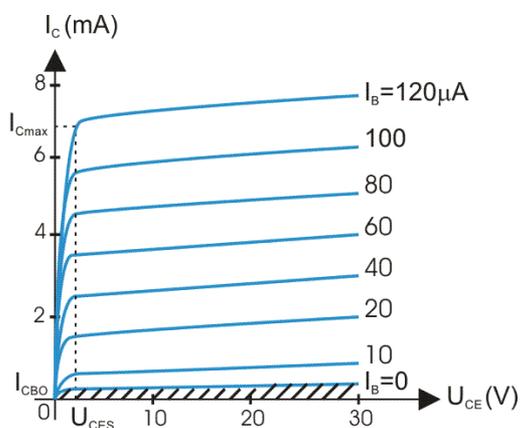
Такво коло е прикажано на **слика 2.8**.



Слика 2.8: Коло за мерење на статичките карактеристики на NPN-транзистор во спој со заеднички емитер.

На **слика 2.9** се прикажани карактеристиките на промената на колекторската струја I_C во зависност од промената на напонот U_{CE} за различни вредности на базната струја I_B , според функцијата:

$$I_C = f(U_{CE}) \text{ за } I_B = \text{const.} \dots\dots\dots(2.1)$$



Слика 2.9: Излезна карактеристика.

Оваа карактеристика се вика излезна и може да се снима со колото од слика 2.8. Напонот U_{CE} се мери со волтметар, врзан меѓу колекторот и емитерот, а колекторската струја I_C со милиамперметар, врзан во серија во колекторското коло. Потребно е уште да се мери и базната струја I_B со микроамперметар, врзан во серија во колото на базата.

Првата од карактеристиките се мери така што со потенциометарот P2 се регулира струјата I_B да биде 0, а со P1 се менува напонот U_{CE} во чекори од по 1V, почнувајќи од нула па до 10V и за секој чекор се забележува вредноста на струјата I_C , при што се води сметка струјата I_B да не се промени. Добиените резултати се внесуваат во координатниот систем $I_C - U_{CE}$ и со поврзување на точките се добива кривата $I_C = f(U_{CE})$ за $I_B = 0$.

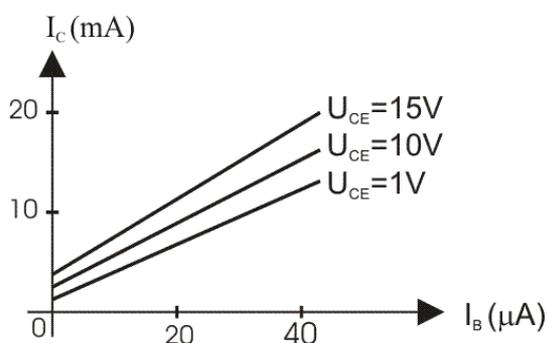
Потоа следува снимање на следната крива, така што со P2 се регулира да се добие струја I_B од 10mA, а целата постапка се повторува како и претходно. Со натамошна промена на струјата I_B на вредностите 20, 40, 60, 80, 100, 120 и 140 μ A се добиваат сите останати криви на дијаграмот.

Карактеристиката:

$$I_C = f(I_B) \text{ за } U_{CE} = \text{const.} \dots\dots\dots(2.2)$$

ги дава промените на колекторската струја I_C во зависност од промените на базната струја I_B за разни вредности на напонот U_{CE} . Таа е дадена на **слика 2.10** и е наречена преносна карактеристика. Оваа карактеристика одредува како се менува излезната струја со промена на влезната струја, а тоа значи какво е влијанието на влезот врз излезот.

Мерењето и на овие карактеристики може да се прави со истото мерно коло од слика 2.8. Напонот U_{CE} се нагодува со потенциометарот P_1 на една вредност, на пример, 1V, потоа со P_2 се менува базната струја во чекори од по $20\mu A$ и на милиамперметарот се отчитуваат вредностите на колекторската струја. При тоа, се води сметка вредноста на напонот U_{CE} да не се промени.



Слика 2.10: Преносна карактеристика.

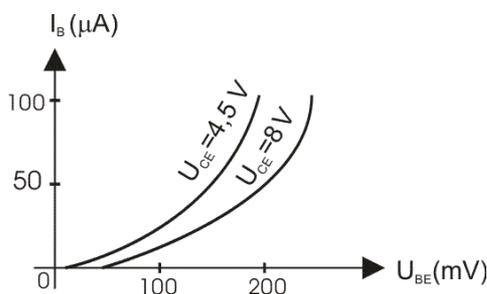
Ако се промени, се прави прво корекција на тој напон со P_1 , па потоа се прави читањето на вредноста на струјата I_C . Следното мерење е со поголема вредност на U_{CE} , како, на пример, 10V, следното на 15V итн. Со внесувањето на резултатите, се добиваат карактеристиките како на слика 2.10.

Карактеристиката:

$$I_B = f(U_{BE}) \text{ за } U_{CE} = \text{const.} \dots\dots\dots(2.3)$$

ја претставува промената на базната струја I_B во зависност од промените на напонот база - емитер U_{BE} за разни вредности на напонот колектор - емитер U_{CE} и позната е како влезна карактеристика.

Мерењето се прави со колото на слика 2.8, во коешто напонот база - емитер се регулира со потенциометарот R_2 , а напонот U_{CE} со потенциометарот P_1 . Со промена на напонот U_{BE} се менува струјата, при што се води сметка напонот U_{CE} да има постојано иста вредност. Следното мерење се прави со повисока константна вредност на U_{CE} итн. Ако се внесат измерените резултати во координатниот систем на оските $I_B - U_{BE}$, се добива резултат како на **слика 2.11**.



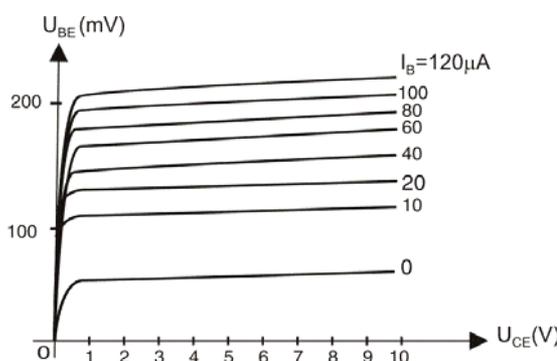
Слика 2.11: Влезна карактеристика.

Последната од карактеристиките од интерес е карактеристиката:

$$U_{BE} = f(U_{CE}) \text{ за } I_B = \text{const.} \dots\dots\dots(2.4)$$

Таа ја претставува промената на напонот база – емитер U_{BE} во зависност од промената на напонот колектор – емитер U_{CE} за разни вредности на базната струја I_B . Со неа се одредува

реакцијата на излезното врз влезното коло на транзисторот. Мерењето се прави со истото мерно коло како и досега. Резултатите на мерењето ја даваат **слика 2.12**.



Слика 2.12: Зависноста на напонот U_{BE} од напонот U_{CE} .

2.4.3 Параметри на транзисторот

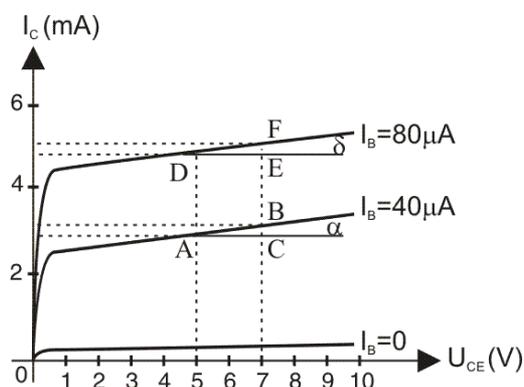
Статичките карактеристики на транзисторот даваат можност за дефинирање и за проучување на статичките параметри на транзисторот. Тие се нарекуваат статички, затоа што се дефинираат во услови на постоење само на еднонасочните напони и струи во колото на транзисторот.

Излезната карактеристика $I_C = f(U_{CE})$ за $I_B = \text{const.}$, дава можност за проучување на три важни параметри на транзисторот:

- излезниот отпор,
- струјното засилување,
- работната права.

2.4.3.1 Излезен отпор на транзисторот

Статичката работна точка на транзисторот е дефинирана со три големини: напонот U_{CE} , струјата I_C и струјата I_B и таа лежи на една од карактеристиките. Излезната карактеристика на транзисторот дава можност да се одреди излезниот отпор R_{iz} во работната точка, како што е прикажано на **слика 2.13**.



Слика 2.13: Одредување на излезниот отпор на транзисторот.

На пример, за напонот $U_{CE} = 5V$ и за базната струја $I_B = 40\mu A$ се добива работна точка A, така што од точката $5V$ на апсцисната оска се крева вертикала до пресекоот со карактеристиката за базна струја од $40\mu A$. На таа точка и одговара колекторска струја од $4,5mA$.

Ако од точката A повлечеме хоризонтална линија, таа со карактеристиката ќе зафаќа агол α . Овој агол е дефиниран со неговиот тангенс како:

$$tg\alpha = \frac{CB}{CA} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_C} = \frac{1}{R_{iz}} \text{ (во точката A)} \dots \dots \dots (2.5)$$

Тангенсот на аголот α го одредува излезниот отпор R_{iz} на транзисторот во точката A. Промена на колекторскиот напон од $2V$ ќе даде промена на колекторската струја од $0,2mA$, што е одредено со карактеристиката. Излезниот отпор во тој пример ќе биде:

$$R_{iz}(A) = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C} = \frac{2}{2 \cdot 10^{-4}} = 10000\Omega.$$

Ако се зголеми вредноста на базната струја на $80\mu A$, при еднаков напон U_{CE} од $5V$, се добива точката D. Аголот на карактеристиката со хоризонталата го одредува излезниот отпор на транзисторот во точката D:

$$tg\delta = \frac{EF}{DE} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_C} = \frac{1}{R_{iz}} \text{ (во точката D)} \dots \dots \dots (2.6)$$

Сега промената на колекторската струја ΔI_C изнесува $0,3mA$, а излезниот отпор ќе биде:

$$R_{iz}(D) = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta I_C} = \frac{2}{0,3 \cdot 10^{-3}} = 6666\Omega.$$

Точната дефиниција е дека реципрочната вредност на тангенсот на аголот на тангентата за одредена точка го претставува излезниот отпор на транзисторот во таа точка, но поради линеарниот дел на карактеристиката, тој се совпаѓа со аголот на самата карактеристика. Овој отпор опаѓа со растење на колекторската струја.

2.4.3.2. Коefициент на струјно засилување на транзисторот

Струјното засилување се дефинира како однос на промената на колекторската струја ΔI_C , предизвикана од промена на базната струја ΔI_B , се означува со β или h_{FE} и претставува неименуван број:

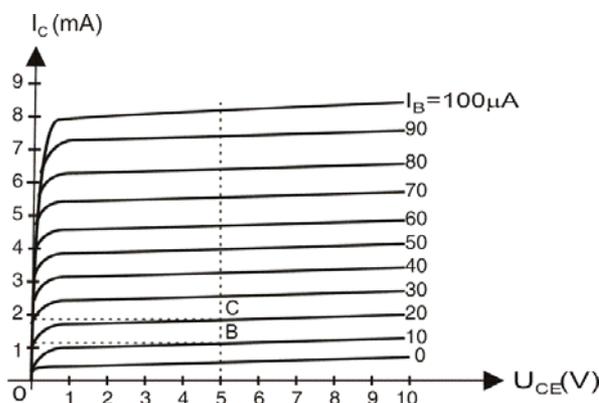
$$\beta = h_{FE} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \dots \dots \dots (2.7)$$

Кога промените на базната и колекторската струја се еднакви, односно кога е карактеристиката линеарна, изразот за струјното засилување може да се напише како:

$$\beta = h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} \dots \dots \dots (2.8)$$

Ако одбереме една вредност на напонот U_{CE} на апсцисната оска на излезната карактеристика (на пример, 5V) и повлечеме вертикална линија, таа линија ќе има повеќе пресечни точки со карактеристиките за разни вредности на базната струја (слика 2.14).

Со пренесување на тие точки по хоризонтала на ординатната оска ќе добиеме промени на колекторската струја, предизвикани од промените на базната струја.



Слика 2.14: Одредување на струјното засилување.

Ако се помести статичката работна точка од точката B, во која има базна струја од 10mA, во точката C со базна струја од 20mA, колекторската струја ќе се зголеми од 1200mA на 1800mA, па за струјното засилување добиваме:

$$\beta = h_{FE} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{(1800 - 1200)}{20 - 10} = \frac{600}{10} = 60.$$

Промената на струјното засилување зависи од видот на транзисторите. За транзистори со мала моќност, растојанието меѓу карактеристиките, за иста промена на базната струја е константно, што значи дека нивното струјно засилување не зависи од јачината на колекторската струја. Струјното засилување кај транзисторите со поголема моќност има помала вредност и опаѓа со зголемувањето на колекторската струја.

2.4.3.3. Работна права

Во практиката, колекторот на транзисторот многу ретко директно се врзува на изворот за напојување. Меѓу колекторот и изворот најчесто се вградува отпорник R_C (како на слика 2.7), со кој се нагудува вредноста на напонот U_{CE} и служи како оптоварување на колекторското коло. Овој отпорник може да се претстави со права во излезните карактеристики на транзисторот. Положбата на правата зависи од вредноста на напонот на изворот и од вредноста на отпорот на оптоварувањето, а може да се одреди по математички пат.

За математичкото одредување се користи равенката на работната права, добиена со примена на II Кирхофов закон за излезното коло на транзисторот:

$$U_{CC} - R_C I_C - U_{CE} = 0 \dots\dots\dots(2.9)$$

или во друга форма како:

$$U_{CE} = U_{CC} - R_C I_C \dots\dots\dots(2.10)$$

Сега треба да одредиме две точки и тоа: за $I_C = 0$, $U_{CE} = U_{CC}$ и за $U_{CE} = 0$, $I_C = \frac{U_{CC}}{R_C}$, да ги

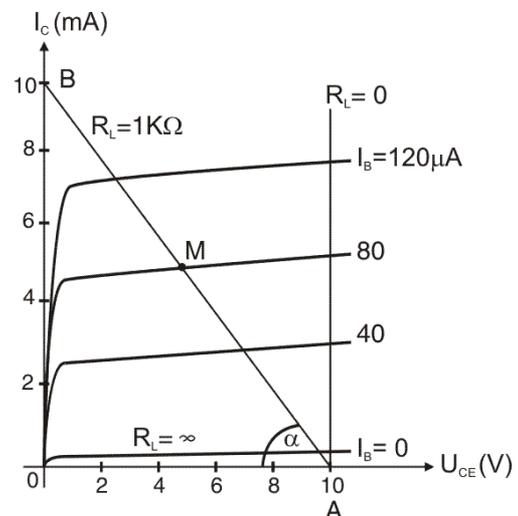
внесеме во системот на излезните карактеристики $I_C - U_{CE}$ и да ги поврземе. Така, на пример, ако се дадени вредностите за $U_{CC} = 10V$ и $R_C = 1K\Omega$, координатите на точките ќе бидат:

$$I_C = 0, U_{CE} = 10V, \text{ за точката A,} \quad U_{CE} = 0, I_C = \frac{10}{1000} = 10mA, \text{ за точката B.}$$

Добиената состојба се гледа на **слика 2.15**. Работната права зафаќа агол α со апсцисната оска, при што е:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{U_C}{R_C} = \frac{1}{R_C} \dots\dots\dots(2.11)$$

Статичката работна точка M на транзисторот може да се најде само на работната права. Со намалување на отпорот, аголот се зголемува и се добива максимална вредност од 90° , кога е отпорот на оптоварувањето 0. Како се зголемува отпорот, така се намалува и аголот и тој се поклопува со апсцисната оска кога отпорот е бесконечно голем, односно кога колекторското коло е отворено и не тече колекторска струја.



Слика 2.15: Положба на работната права.

Побудна права

Но, да се вратиме за момент на слика 2.7 и да го анализираме колото на базата. Според II Кирхофов закон можеме да ја напишеме равенката на тоа коло како:

$$U_{BB} - R_B I_B - U_{BE} = 0 \dots\dots\dots(2.12)$$

или:

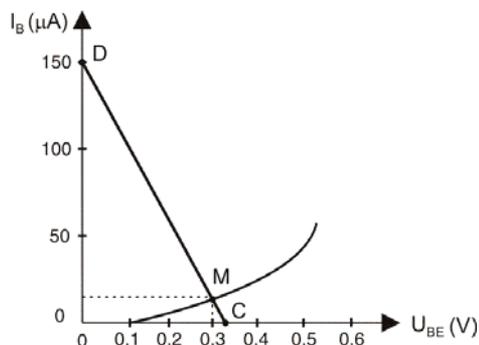
$$U_{BE} = U_{BB} - R_B I_B \dots\dots\dots(2.13)$$

од каде е:

$$I_B = \frac{(U_{BB} - U_{BE})}{R_B} \dots\dots\dots(2.14)$$

што претставува равенка на побудната права. Според оваа равенка може да се нацрта побудната права во влезните статички карактеристики на транзисторот. Се одредуваат

двете точки C за $I_B = 0$, $U_{BE} = U_{BB}$ и D за $U_{BE} = 0$, $I_B = \frac{U_{BB}}{R_B}$ и со нивното поврзување се добива побудната права (слика 2.16).



Слика 2.16: Положба на побудната линија.

За германиумските транзистори, напонот U_{BE} не може да ја премине вредноста од 0,34 и тој може да се занемари во однос на вредноста на напонот U_{BB} . Според тоа, приближната вредност на еднонасочната струја на базата I_B ќе биде:

$$I_B \approx \frac{U_{BB}}{R_B} \dots\dots\dots(2.15)$$

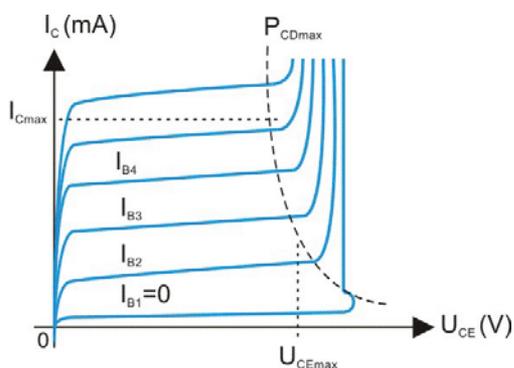
2.4.4 Ограничувања при работа на транзисторот

За правилна и сигурна работа на електронските кола со транзистори треба да се води сметка за максималните дозволени вредности на напонот, струјата и моќноста на транзисторот.

Колекторскиот спој во нормален начин на работа е инверзно поларизиран. При поголема вредност на инверзниот напон се случува Зенеров ефект, а потоа и лавински ефект, при што доаѓа до топлински пробив и оштетување на транзисторот. На слика 2.17 се дадени излезните карактеристики на транзистор во спој со заеднички емитер, продолжени до областа на пробивот на колекторскиот спој. На дијаграмот е прикажано како се одредува максималниот дозволен напон меѓу колекторот и емитерот U_{CEmax} . Тој треба да биде понизок од пробивниот напон и секогаш е одреден од страна на производителот на транзисторот.

Во нормален режим на работа, во транзисторот при одреден напон U_{CE} тече и одредена колекторска струја I_C , што значи дека во внатрешноста на транзисторот се троши моќност:

$$P_{CD} = U_{CE} I_C \dots\dots\dots(2.16)$$



Слика 2.17: Ограничување на работното подрачје на транзисторот.

Тоа е моќност од која нема никаква корист, туку таа се претвора во топлина од која транзисторот треба да се ослободи. Оваа топлина се создава на колекторот и се вика моќност на дисипација. Максималната дозвољена моќност на дисипација P_{CDmax} има константна вредност и во полето на излезните карактеристики е претставена како хипербола. Работната линија и работната точка на транзисторот мора да се постават во областа под кривата на P_{CDmax} , во која сите точки одговараат на моќност помала од максималната моќност на дисипацијата. На дијаграмот на излезните карактеристики се означени границите на работниот режим на транзисторот со максималната дозвољена колекторска струја I_{Cmax} , максималниот дозвољен колекторски напон U_{CEmax} и максималната дозвољена дисипација P_{CDmax} .

За транзистори со помала моќност, одведувањето на топлината се прави по пат на зрачење во околината. Транзисторите со средна и голема моќност имаат вградени метални плочки на колекторот, со што се зголемува зрачењето на топлината. Во практичното изведување на транзисторските степени со поголема моќност, одведувањето на топлината се подобрува со монтажа на транзисторот на метален радијатор со поголема површина.

ЗАПАМЕТИ !!!

*Во статичкиот режим на работа, во колото на транзисторот се присутни само еднонасочните вредности на напоните и струите.

*Со поларизацијата на транзисторот, емитерскиот спој е директно, а колекторскиот е инверзно поларизиран.

*Положбата на работната точка се одредува со напонот U_{CE} и со струите I_C и I_B , така што да се најде на работната линија.

*Факторот на струјното засилување β или h_{FE} покажува колку пати колекторската струја е поголема од базната струја.

*Дисипација е моќност која се претвора во топлина во транзисторот. За заштита од прекумерно греење, на транзисторот се вградуваат ладилни тела.

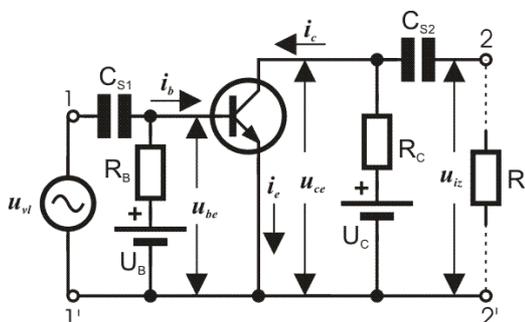
ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Дефинирај статички режим на работа на транзисторот.
2. Кои големини се влезни, а кои излезни кај транзисторот во спој со заеднички емитер?
3. Како се дефинира излезна, влезна преносна и директно преносна карактеристика?
4. Кои се најважните параметри на транзисторот?
5. Што претставува β ?
6. Од што зависи положбата на работната правата на транзисторот и како се одредува?
7. Зошто треба да се води сметка за максималните дозволени вредности на напонот, струјата и моќноста на транзисторот?

2.5 Динамички режим на работа

Сите напори што ги правиме, за да го ставиме транзисторот во статички режим на работа се само припрема за тој да може да ја извршува функцијата на засилувач. Со донесување наизменичен напон и струја на сигналот на влезот на транзисторот, неговата работна точка веќе не мирува, туку се поместува долж работната линија во ритамот на сигналот и транзисторот преминува во динамички режим на работа.

Динамичкиот режим на работа подразбира функционирање на транзисторот како засилувач. Во динамичкиот режим, освен еднонасочните напони и струи, со кои се поларизира транзисторот и му се одредува статичката работна точка, постои и наизменичен напон и струја на сигналот, кој треба да биде засилен.

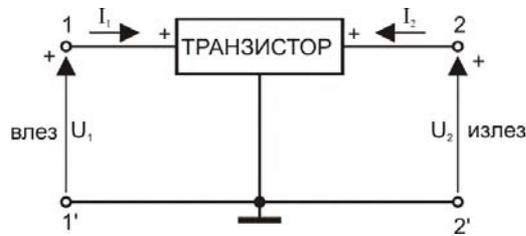


Слика 2.18: Транзистор во динамички режим.

Тој сигнал се носи на влезот на транзисторскиот засилувачки степен (слика 2.18) и се добива засилен на излезот од тој степен за натамошна обработка (натамошно засилување или за активирање на одреден уред).

2.5.1. Еквивалентна шема на транзистор со h -параметри

Транзисторот е нелинеарен елемент, но може да се направи негов модел како линеарен елемент, како специјален случај на општа линеарна мрежа со две порти. Портата се дефинира како два приклучока за влезот и два приклучока за излезот (слика 2.19).



Слика 2.19: Транзистор како активен четворопол.

Математичката анализа на таква мрежа се изведува со z -параметри (импеданси), со y -параметри (адмитанси) или со h -параметри (хибридни). Со овие параметри се формираат по две равенки со кои се одредува односот меѓу влезниот напон и влезната струја кон излезниот напон и излезната струја.

Односите меѓу напоните и струите на влезот и на излезот се дефинираат со три системи на равенки:

$$\begin{cases} u_1 = z_{11}i_1 + z_{12}i_2 \\ u_2 = z_{21}i_1 + z_{22}i_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_1 = y_{11}u_1 + y_{12}u_2 \\ i_2 = y_{21}u_1 + y_{22}u_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_1 = h_{11}i_1 + h_{12}u_2 \\ i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}u_2 \end{cases} \dots\dots\dots(2.17)$$

Во првиот систем фигурираат z – параметрите, тие се однесуваат како импеданси на следниов начин: z_{11} – влезна импеданса, z_{22} – излезна импеданса, z_{12} и z_{21} – преносни импеданси, при што членовите $z_{12}i_2$ и $z_{21}i_1$ претставуваат внатрешни зависни напонски извори.

Во вториот систем фигурираат y – параметрите, кои претставуваат адмитанси на следниов начин: y_{11} – влезна адмитанса, y_{22} – излезна адмитанса, y_{12} и y_{21} преносни адмитанси, при што членовите $y_{12}u_2$ и $y_{21}u_1$ претставуваат внатрешни зависни струјни извори.

Во третиот систем се h – параметрите, кои имаат различна природа. Третиот систем на равенки се вика систем на равенки со хибридни или **h – параметри**.

Параметрите од едниот систем можат да се пресметаат, со малку алгебарски манипулации, од вредностите на параметрите од другите два система.

За анализа на транзисторот кога работи со нискофреквенциски сигнали со мали амплитуди најповолни се h – параметрите. Наизменичните напони и струи, во тој случај, можат да се претстават како мали промени на еднонасочните вредности и системот на равенките со h – параметрите може да се напише како:

$$\begin{cases} \Delta U_1 = h_{11}\Delta I_1 + h_{12}\Delta U_2 \\ \Delta I_2 = h_{21}\Delta I_1 + h_{22}\Delta U_2 \end{cases} \dots\dots\dots(2.18)$$

Со кратко спојување на излезното коло на транзисторот во однос на наизменичната струја, промената на излезниот напон ΔU_2 станува нула. Од првата равенка на системот се добива:

$$h_{11} = h_i = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} \text{ за } \Delta U_2 = 0 \dots\dots\dots(2.19)$$

Овој параметар претставува влезен отпор на транзисторот при краткоспоен излез.

Кога влезното коло е отворено, не тече влезната струја, па имаме $\Delta I_1 = 0$, а од првата равенка се добива:

$$h_{12} = h_r = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2}; \text{ за } \Delta I_1 = 0 \dots\dots\dots(2.20)$$

Овој параметар претставува коефициент на напонска повратна спрега при отворено влезно коло и тој е неименуван број.

За краткоспоено излезно коло, од втората равенка добиваме:

$$h_{21} = h_f = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1}; \text{ за } \Delta U_2 = 0 \dots\dots\dots(2.21)$$

Овој параметар го претставува коефициентот на струјното засилување на транзисторот при краткоспоено излезно коло.

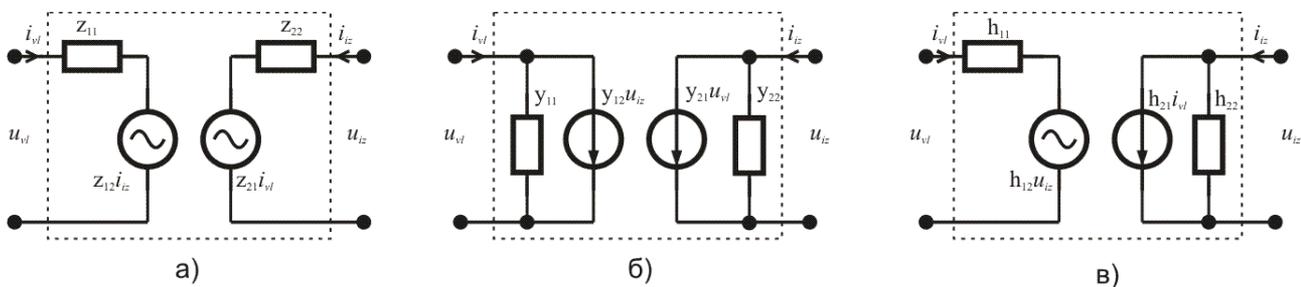
За отворено влезно коло, од втората равенка се добива:

$$h_{22} = h_o = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2}; \text{ за } \Delta I_1 = 0 \dots\dots\dots(2.22)$$

Овој параметар има димензија на спроводливост и претставува излезна спроводливост на транзистор со отворено излезно коло.

Вредностите на хибридниите параметри можат лесно да се измерат со мерење на напоните и струите на изводите на транзисторот, под услови наведени во нивните дефиниции. Во практиката, тие се мерат директно со компјутерски управувани инструменти.

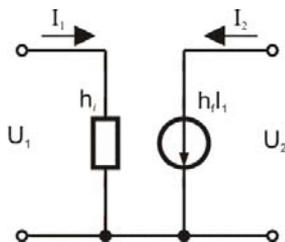
Со помош на овие равенки се формираат соодветните еквивалентни кола на транзисторот со z -параметри, y -параметри и h -параметри, како што е прикажано на **слика 2.20**.



Слика 2.20: Еквивалентни кола на транзисторот.

Во општ случај, сите параметри, дадени во равенките, се комплексни вредности со реален и имагинарен дел. Ако се ограничи режимот на работа на транзисторот на сигнали со ниски фреквенции, имагинарните делови можат да се запостават и да останат само реалните делови на вредностите на параметрите. Во таквата состојба импедансите стануваат отпорности, а адмитансите инверзни вредности на отпорностите, односно спроводности.

Од друга страна, за режим на работа со мали сигнали нема потреба да се користат сите четири параметри за да се добие прифатливо добар модел на транзисторот. Се покажува дека параметрите $h_{12} = h_r$ и $h_{22} = h_o$ имаат толку мали вредности да можат да се елиминираат. Еквивалентната шема на транзисторот со h -параметрите сега добива изглед како на **слика 2.21**.



Слика 2.21: Еквивалентна шема на транзистор со h -параметри.

Во шемата, со $h_{12}u_2$ е означен напонски, а со $h_{21}i_1$ струен генератор. Во зависност од видот на спрегата на транзисторот во колото, се менуваат и вредностите на h – параметрите. За да можат да се разликуваат, тие во индексот носат и ознака за кој спој се работи. Така параметрите h_{11b} , h_{12b} , h_{21b} , h_{22b} се однесуваат на спој со заедничка база, параметрите h_{11e} , h_{12e} , h_{21e} , h_{22e} на спој со заеднички емитер и параметрите h_{11c} , h_{12c} , h_{21c} , h_{22c} на спој со заеднички колектор.

За илустрација, во табела 1 се дадени просечни вредности на h -параметрите за транзистор BFY 67 за работната точка одредена со $U_{CE} = 5V$ и $I_C = 1,3mA$.

Табела 1

	Заедничка база	Заеднички емитер	Заеднички колектор
$h_{11} (\Omega)$	21,6	1100	1100
h_{12}	$2,9 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^{-4}$	1
h_{21}	- 0,980	50	-51
$h_{22} (S)$	$0,49 \times 10^{-6}$	24×10^{-6}	25×10^{-6}

Ако се познати еден вид параметри, како, на пример, h -параметрите, можат да се пресметаат останатите видови параметри, како y или z . Исто така, со помош на вредностите на параметрите за еден вид спрега можат да се пресметаат параметрите од некој друг вид спрега.

ЗАПАМЕТИ !!!

*Во динамичкиот режим на работа, присутни се и наизменичните компоненти на напонот и струјата на сигналот.

*Транзисторот е нелинеарен елемент, но за еквивалентните шеми се прави негов модел во линеарна форма со h -параметрите.

* h -параметрите се користат за анализа на колото на транзисторот за мали сигнали со ниски фреквенции.

*Со h -параметрите се претставени влезниот и излезниот отпор, повратната врска од излезот кон влезот и струјното засилување.

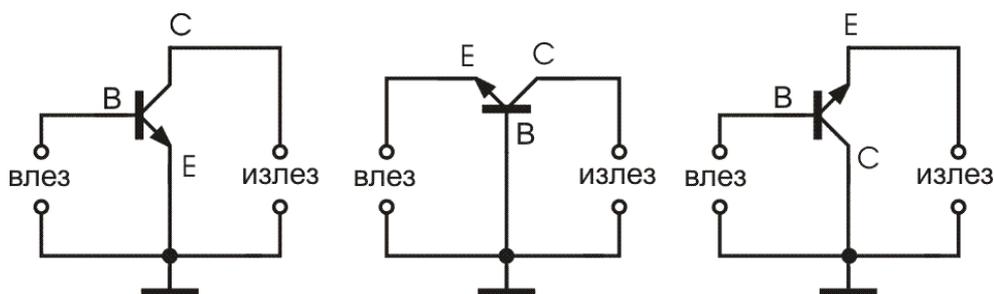
ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. При кој режим на работа транзисторот функционира како засилувач?
2. Напиши го системот со h -параметри на транзисторот и дефинирај го секој параметар поодделно.
3. Нацртај еквивалентна шема на транзистор со h -параметри.

2.6. Транзистор како засилувачки елемент

Транзисторот е активен електронски елемент со влез и излез. Во електрично коло тој се однесува како четворопол. Но, бидејќи тој има само три изводи, едниот од нив ќе биде заеднички за влезот и за излезот. Зависно од тоа кој извод е заеднички за влезот и за излезот, разликуваме три вида на транзисторски споеви (**слика 2.22**):

- транзистор во спој со заеднички емитер, во кој влезот е меѓу базата и емитерот, а излезот меѓу колекторот и емитерот;
- транзистор во спој со заедничка база, во кој влезот е меѓу емитерот и базата, а излезот меѓу колекторот и базата;
- транзистор во спој со заеднички колектор, во кој влезот е меѓу базата и колекторот, а излезот меѓу емитерот и колекторот.

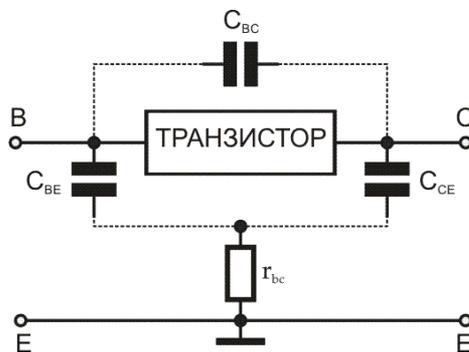


Слика 2.22: Видови спојеви на транзисторот.

Спојот со заеднички емитер е најмногу употребуван спој. Заедничкиот извод обично се врзува со маса, па се употребува и изразот: спој со заземјен емитер, заземјена база или заземјен колектор.

2.6.1. Особини на транзисторот при високи фреквенции

Параметрите на транзисторот, кои при ниски фреквенции (до 1KHz) се дадени како реални броеви, при високи фреквенции добиваат комплексен карактер. Колото на транзисторот како четворопол при високи фреквенции е дадено на **слика 2.23**. Дополнителни елементи во однос на колото на слика 2.19 се капацитивностите меѓу базата и емитерот C_{BE} и меѓу колекторот и базата C_{BC} . Капацитивноста меѓу колекторот и емитерот е мала и обично не се зема во предвид (се занемарува).



Слика 2.23: Коло на транзистор при високи фреквенции.

На високи фреквенции опаѓа вредноста на засилувањето на струјата, напонот и на моќноста. Причината за тоа се капацитивностите што се создаваат на базниот и на колекторскиот спој. За секој тип транзистори се дава гранична фреквенција до која може да се користи транзисторот.

Коефициентот на струјното засилување на транзисторот, исто така, опаѓа во областа на високите фреквенции. Паѓањето на вредноста на струјното засилување е поголемо за спој со заеднички емитер во однос на спој со заедничка база.

ЗАПАМЕТИ !!!

***Транзистор како засилувачки елемент може да работи во спој со заеднички емитер, заедничка база и заеднички колектор.**

***Најмногу употребуван е спојот со заеднички емитер.**

***При високи фреквенции, параметрите на транзисторот стануваат комплексни големини.**

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Нацртај ги трите вида транзисторски споеви.
2. Што се случува со засилувањето на транзисторот при високи фреквенции?
3. Која е разликата во параметрите при ниски и при високи фреквенции?

2.7. Транзистор како прекинувачки елемент

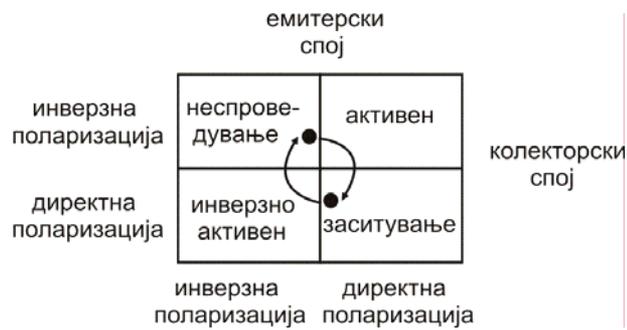
Следејќи го принципот на работа на диодата, може да се смета дека таа функционира и како прекинувач, отворен кога диодата е инверзно поларизирана, а затворен кога е директно поларизирана. Тоа се должи на карактеристиката на PN- спојот. Сепак, таа не може да изврши една од неопходните функции во дигиталната логика, а тоа е инверзија на сигналот, односно промена од 0 на 1 или од 1 на 0.

Транзисторот, кој во својата конструкција содржи два PN-споја, исто така, може, да се донесе во услови на работа како прекинувач со можност за инвертирање на сигналот. Транзисторот како прекинувач наоѓа широка примена во изработката на интегрирани дигитални кола, разни уреди за автоматика и во колата на импулсната техника.

Транзисторот како прекинувач може да се најде во три режими на работа: режим на неспроведување, заситување и преоден режим.

Биполарниот транзистор има два PN-споја: емитерски и колекторски спој. Секој од нив може да се поларизира директно или инверзно. Според тоа, постојат четири можни услови на

поларизација со кои транзисторот може да се донесе во режим на заситување, во активен режим или во режим на неспроведување.



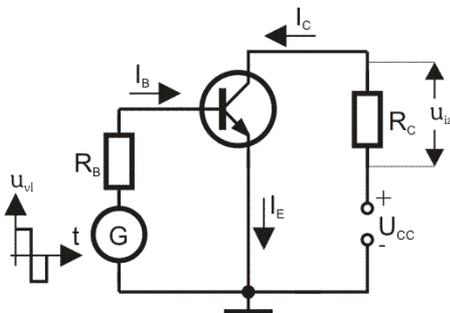
Слика 2.24: Шематски приказ на режимите на работа.

На **слика 2.24** шематски е прикажано дефинирањето на режимите на работа. Подрачјето на неспроведување се дефинира со инверзна поларизација на емитерскиот и на колекторскиот спој. Во овие услови транзисторот се однесува како отворен прекинувач. Активното подрачје се дефинира со директно поларизиран емитерски и инверзно поларизиран колекторски спој, што е во согласност со дефиницијата дадена за транзистор како засилувач. Подрачјето на заситување е одредено со директна поларизација на двата споја, а транзисторот се однесува како затворен прекинувач. Последното подрачје е спротивно на активното подрачје и се дефинира со инверзно поларизиран емитерски и директно поларизиран колекторски спој.

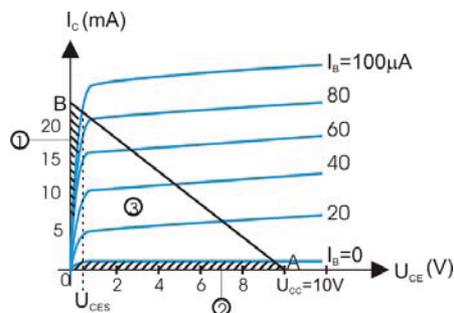
Подрачјата на прекин и на заситување се од примарна важност за транзистор како прекинувач. Кога е во состојба на прекин, излезната струја има многу мала јачина, а отпорноста меѓу излезните краеве има голема вредност. Во состојба на заситување, излезната струја има голема јачина, а излезната отпорност мала вредност. За да прејде од состојба на неспроведување во состојба на заситување, транзисторот поминува преку активното подрачје. Во тој период транзисторот се наоѓа во преоден режим во кој неговите параметри ги менуваат своите вредности.

2.7.1 Прекинувачко коло со транзистор во спој со заеднички емитер

Во прекинувачките кола обично се користи транзистор во спој со **заеднички емитер** (**слика 2.25**).



Слика 2.25: Транзистор како прекинувач.



Слика 2.26: Дијаграм на работни области.

Во колото на базата е ставен генератор на правоаголен импулс G , со кој се менува поларизацијата на базата и режимот на работа на транзисторот.

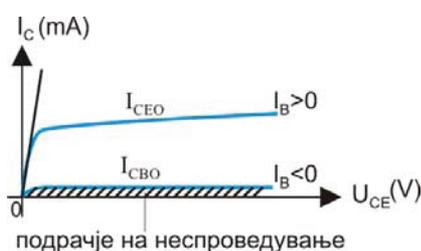
Дијаграмот на излезните карактеристики со внесена работна линија е даден на **слика 2.26**.

На дијаграмот се маркирани делови на работната линија, кои припаѓаат на три подрачја:

1 – подрачје на заситување, 2 – подрачје на неспроведување (блокирање) и 3 – подрачје на активен режим.

2.7.1.1. Режим на неспроведување

Рамниот дел на влезниот импулс со негативна вредност на напонот ја прави базата негативна во однос на емитерот, со што инверзно го поларизира емитерскиот спој. Во колото на базата ќе тече инверзна струја, која ќе ја донесе работната точка под карактеристиката $I_B = 0$ (**слика 2.27**).



Слика 2.27: Подрачје на неспроведување.

Знаеме дека кога колото на базата е отворено ($I_B = 0$) во колекторското коло тече струјата I_{CE0} . Транзисторот ќе биде во подрачје на неспроведување кога инверзната струја на базата ќе стане помала од струјата I_{CE0} .

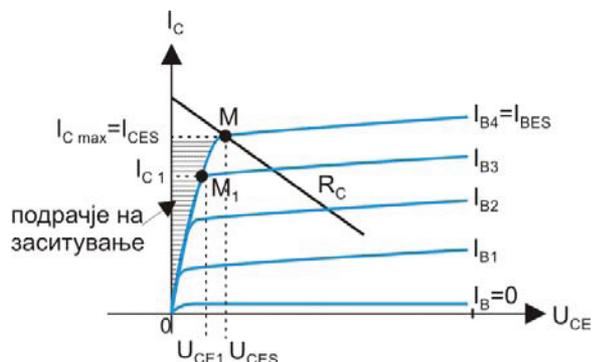
Во исто време, колекторскиот спој е инверзно поларизиран, колекторот е на повисок потенцијал од базата и во колото колектор база ќе тече инверзната струја I_{CB0} , која има многу мала јачина (за германиумски транзистор е од редот на неколку μA , а за силициумски неколку nA).

Во практиката, за премин во режимот на неспроведување, за силициумски транзистори за кои се смета дека струјата I_{CE0} е приближно еднаква на I_{CB0} , доволно е побудниот импулс да падне на нула, додека за германиумските транзистори (за NPN-тип) мора да премине во негативно подрачје за најмалку $0,1V$.

2.7.1.2. Режим на заситување

Условите за воспоставување на режимот на заситување се нешто посложени и бараат двата споја на транзисторот да бидат директно поларизирани. Транзисторот се донесува во состојба на затворен прекинувач, односно во состојба на заситување со рамниот дел на побудниот

импулс со позитивна вредност на напонот. Базата станува попозитивна од емитерот и емитерскиот спој е директно поларизиран. Во колото база емитер протекува струја I_{BES} , а во колото колектор емитер протекува струја I_{CES} . Работната точка се поместува во подрачјето на заситувањето (слика 2.28).



Слика 2.28: Подрачје на заситување.

Состојбата на заситувањето се карактеризира со мали напони U_{CES} на колекторот, при што сите излезни карактеристики се слеваат во една крива линија, наречена линија на напонско заситување. Напонот меѓу колекторот и емитерот, кој одговара на максималната дозволена вредност на колекторската струја I_{CES} , е означен како U_{CES} . Неговата вредност за силициумски транзистори изнесува околу 0,6V, а за германиумски 0,25V.

Колекторската струја се пресметува според:

$$I_{CES} = \frac{(U_{CC} - U_{CES})}{R_C} \dots\dots\dots(2.23)$$

а струјата на базата треба да го задоволи условот:

$$I_{BES} = \frac{I_{CES}}{h_{FE}} \dots\dots\dots(2.24)$$

Излезната отпорност на транзисторот во режим на заситување се пресметува според:

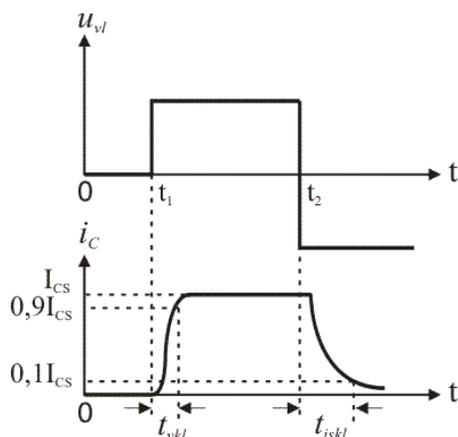
$$R_{iz} = \frac{U_{CES}}{I_{CES}} \dots\dots\dots(2.25)$$

и има мала вредност (неколку десетини ома). Со тоа се задоволени барањата на затворен прекинувач: да пропушта доволно голема струја за активирање на надворешно коло, да има мал пад на напон и мал отпор на краевите на прекинувачот, за загубите на прекинувачот да бидат мали.

2.7.1.3 Преоден режим

Транзисторот се доведува во спроводна состојба со предниот, растечки раб на влезниот импулс. Однесувањето на колекторската струја за оваа состојба е прикажано на слика 2.29. Како што се гледа од сликата, колекторската струја ја достигнува максималната вредност

I_{CES} , со задоцнување t_{vkl} . Ова задоцнување се должи на време потребно за смалување на ширината на слоевите за попречување со дифузното движење на носителите на полнежите. Нешто помало влијание имаат и сопствените капацитивности на споевите на транзисторот.



Слика 2.29: Однос помеѓу побудниот импулс и колекторската струја.

Ова време се дефинира како време на вклучување и треба да е што пократко. Тоа се постигнува со избор на транзистор со повисока гранична фреквенција и со помали сопствени капацитивности.

Додека е транзисторот во состојба на заситување, во близината на емитерскиот и на колекторскиот спој се натрупуваат носителите на полнежот. Со промената на поларизацијата на споевите не доаѓа до моментална промена на состојбата на споевите. По завршувањето на процесот на растоварување на базата од натрупаните носители на полнежот, доаѓа до паѓање на колекторската струја на минимална вредност. Времето на опаѓањето на колекторската струја t_{iskl} се вика време на исклучување. Овие времиња имаат влијание врз брзината на прекинувачкото дејство на транзисторот. Времето на формирање на излезниот импулс не може да биде помало од збирот на времето на вклучување и времето на исклучување на прекинувачкиот транзистор.

ЗАПАМЕТИ !!!

*Транзисторот како прекинувач, може да се најде во режим на неспроведување – отворен прекинувач, во режим на заситување – затворен прекинувач и во преоден режим.

*Како прекинувач транзисторот се користи во спој со заеднички емитер.

*Со поларизацијата на емитерскиот и на колекторскиот спој, транзисторот може да се донесе во режим на заситување, или во режим на активна работа.

*Режим на прекин настапува кога емитерот е на повисок потенцијал од базата.

*Режим на заситување настапува кога двата споја се директно поларизирани.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Во кои режими на работа може да се најде транзисторот како прекинувач?
2. Каква е поларизацијата на емитерскиот и колекторскиот спој на транзисторот кога е во заситување?
3. Колкава е излезната струја кога транзисторот е во прекин?
4. Означи ја областа на неспроведување во излезната карактеристика на транзисторот.
5. Во кој режим на работа транзисторот се однесува како затворен прекинувач?

2.8. Униполарни транзистори - транзистори со ефект на поле

Теоријата на **транзисторите со ефект на поле** или **FET** (**F**ield **E**ffect **T**ransistor) е разработена меѓу 1920 год. и 1930 год., што е далеку пред откривањето на биполарните транзистори. Првобитниот модел на FET имал алуминиумска плоча на која биле поставени две полупроводнички плочки. На другата страна од плочките се ставени метални контакти. Меѓу алуминиумската плоча и металните контакти се доведува напон кој формира електрично поле на површината на полупроводникот. Со овој напон се овозможува управување со течењето на струјата меѓу металните контакти. Недоволно развиената технологија на пречистување на полупроводничките материјали не овозможила идејата да се реализира до крај.

Дури во 1952 год., американскиот физичар Вилием Шокли (William Shockley) воведува споен **FET** (**JFET** - **J**unction **F**ield **E**ffect), во кој алуминиумската плоча е заменета со PN-спој. Основна карактеристика на овој транзистор е струјата, која е формирана само од еден вид носители на полнеж. Поради тоа, а за разлика од биполарните транзистори, тие се наречени и **униполарни**. Уште една разлика во однос на биполарните транзистори е во начинот на управувањето со струјата. Излезната струја на биполарниот транзистор се контролира со влезната струја, а на униполарниот со електрично поле, создадено со влезниот напон. При тоа, влезната струја има многу мала јачина. Влезниот отпор на униполарниот транзистор е многу голем, што значи дека тој бара многу мала моќност од претходниот степен.

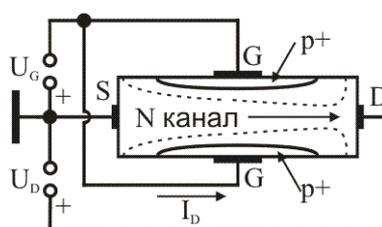
Постојат два вида униполарни транзистори: **спојни FET (JFET)** и **MOSFET (Metal – Oxide – Semiconductor FET)**.

Транзисторите со ефект на поле (JFET) имаат неколку особини што ги прават посупериорни над биполарните транзистори. Тоа се: поголемата влезна отпорност, помали сопствени шумови, помали димензии и едноставна постапка на производството. Биполарните транзистори имаат предност во брзината, како прекинувачки кола, и поголемо напонско засилување, како излезни степени.

Транзисторите со ефект на поле се применуваат во прекинувачките кола кога не се бараат специјално големи брзини, потоа во колата со високи фреквенции и во сложени дигитални кола со голем број компоненти.

2.8.1. Структура и принцип на работа на FET

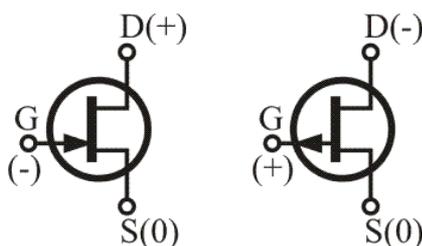
Структурата на FET е прикажана шематски на **слика 2.30**. Тој е составен од тенка плочка - основа со правоаголен пресек од силициумски полупроводник од N или од P-тип. На двете спротивни површини (на сликата спротивни по вертикала) на основата е нанесен полупроводник, спротивен од оној од кој е направена основата и се формирани два PN-споја. Тие две подрачја меѓусебно се сврзани преку металните приклучоци и претставуваат влезна електрода, наречена **гејт** (G).



Слика 2.30: Структура на FET.

На спротивните краеве на основата се поставени метални приклучоци за изводите **дрејн** (D) и **сорс** (S). Стеснетиот дел на плочката меѓу сорсот и дрејнот се вика **канал**.

Во зависност од видот на полупроводникот на основата, разликуваме FET од N-тип, со N-полупроводник на основата и FET од P-тип со P-тип, полупроводник на плочката. Графичките симболи на двата вида FET се дадени на **слика 2.31**.



Слика 2.31: Шематски симбол на FET од N-тип и P-тип.

Ако се прави паралела со биполарниот транзистор, гејт електродата одговара на базата, сорсот на емитерот, а дрејнот на колекторот. Изворот на едностранен напон U_G , врзан меѓу гејтот и сорсот, инверзно ги поларизира двата PN споја на гејтот и на каналот. Изворот U_D го поларизира дрејнот на тој начин да има спротивен знак од гејтот во однос на сорсот. Сорсот најчесто се наоѓа на потенцијал 0. Транзисторите со ефект на поле можат да работат во спој

со заеднички сорс, во спој со заеднички гејт и во спој со заеднички дрејн. Сепак, најмногу се користи спојот со заеднички сорс.

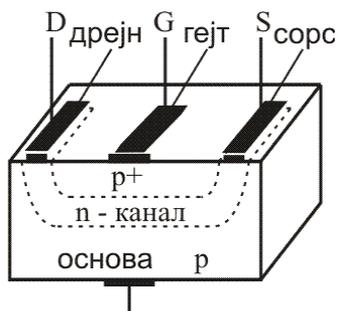
Принципот на работа на N – FET и на P – FET е ист, само што напоните на електродите се со спротивни поларитети, а струите со спротивни насоки. Во натамошната анализа ќе се ограничимо само на N – FET.

Кога нема напон меѓу гејтот и сорсот, или кога гејтот кратко е споен со сорсот, каналот е широко отворена патека за електроните да течат од сорсот кон дрејнот под влијание на изворот U_D . Јачината на струјата на дрејнот I_D тогаш зависи само од напонот на изворот U_D и отпорноста на полупроводникот на каналот.

Со приклучување на изворот U_G , како на слика 2.30, двата PN-споја инверзно се поларизираат и по должината на споевите се создава зона на попречување. Полупроводникот на каналот е формиран со мал процент на донори, а областа на гејтот е со поголем процент на акцептори, зоната на попречување повеќе се шири во областа на каналот отколку во гејтот. Електроните во каналот се оддалечуваат од границата на зоната на попречување кон средината на каналот. Каналот станува стеснет со проширувањето на зоната на попречување, а како последица се намалува неговата спроводност и јачината на струјата на дрејнот. Со промена на напонот меѓу гејтот и сорсот U_{GS} се менува и јачината на струјата на дрејнот, односно излезната струја на транзисторот.

Ширината на каналот не е еднаква по целата должина на плочката. Каналот е најширок во близината на сорсот, а најтесен во околината на дрејнот. Причината лежи во фактот дека напонот меѓу гејтот и дрејнот има најголема вредност и изнесува $U_D + U_G$, а одејќи кон сорсот опаѓа до вредноста U_G . Во каналот постои надолжно растење на напонот или градиент на напонот.

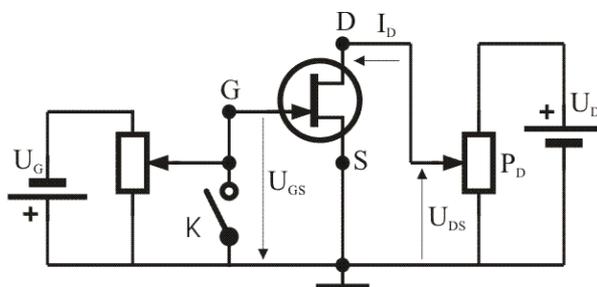
Вистинската структура на N- FET е дадена на **слика 2.32**. На основата или супстратот се додава примеса со која се создава n-регионот на каналот со мала дебелина (околу 1 микрон), потоа со следното додавање на акцепторски примеси се формира P-регионот на гејтот. На површината се ставаат метални контакти за изводите на гејтот, сорсот и дрејнот.



Слика 2.32: Структура на N-FET.

2.8.2. Статички карактеристики на FET

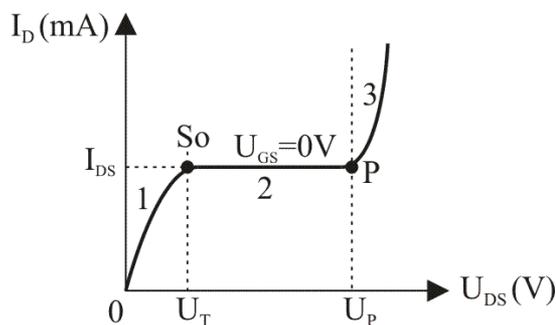
Од статичките карактеристики на FET, битни се карактеристиките $I_D - U_{DS}$ и $I_D - U_{GS}$, при што со I_D е означена излезната или струјата на дрејн, со U_{DS} напонот меѓу дрејн и сорс и со U_{GS} напонот меѓу гејт и сорс. Тие можат да се снимаат со колото дадено на **слика 2.33**.



Слика 2.33: Електрично коло за снимање на статичките карактеристики на FET.

На веќе познат начин можат да се снимаат излезните карактеристики $I_D = f(U_{DS})$ за $U_{GS} = \text{const}$. Со затворање на прекинувачот К во колото на гејтот, гејтот ќе биде заземјен, напонот U_{GS} ќе биде 0, а излезната карактеристика $I_D = f(U_{DS})$ за $U_{GS} = 0$ ќе има изглед како на **слика 2.34**.

За мали напони U_{DS} , каналот се однесува како отпорност, што придонесува карактеристиката да има линеарен тек.



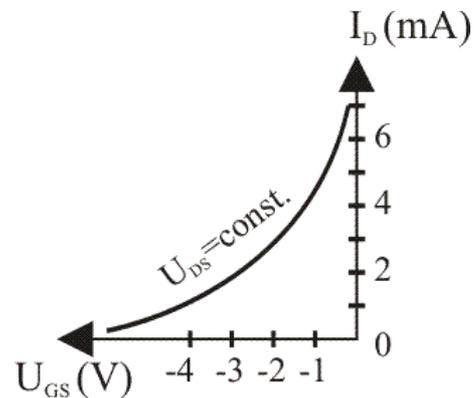
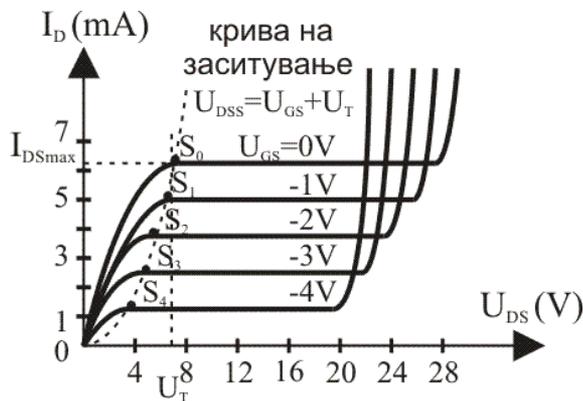
Слика 2.34: Статичка карактеристика на FET.

Тој дел од карактеристиката ја дефинира областа на активна отпорност (означена со 1 на сликата). Со натамошно зголемување на напонот U_{DS} се зголемува инверзната поларизација на PN- спојот гејт – дрејн и се проширува зоната на попречување. За вредноста U_T на напонот U_{DS} каналот е максимално стеснет, а неговиот отпор е максимален.

На карактеристиката тоа е точката S_0 и таа го дефинира напонот при кој двете зони на попречување речиси се допираат. Струјата I_D во каналот има вредност I_{DS} и не се менува со натамошното зголемување на напонот U_{DS} . На карактеристиката тоа е делот означен со 2 и е наречен област на заситување.

Третиот дел од карактеристиката, означен со 3, е област на пробив и започнува од точката P. Во оваа точка напонот U_{DS} ја надминува вредноста на пробивниот напон на PN – спојот и струјата на дрејнтот нагло се зголемува. Пробивот е од областа на зенеров ефект, што значи реверзибилен и може да се врати во претходната состојба, ако се ограничи струјата со отпорност во надворешното коло на дрејнтот.

На **слика 2.35** се дадени комплетните карактеристики $I_D = f(U_{DS})$ за $U_{GS} = \text{const.}$ Активната област на карактеристиките е одделена од областа на заситување со кривата на заситување, нацртана со испрекинатата линија.



Слика 2.35: Фамилија струјно-напонски карактеристики.

Слика 2.36: Преносна карактеристика на FET.

Преносната карактеристика $I_D = f(U_{GS})$ за $U_{DS} = \text{const.}$ е дадена на **слика 2.36**. Во поголемиот дел на карактеристиките од **слика 2.37**, струјата I_D малку зависи од напонот U_{DS} . Поради тоа, сите преносни карактеристики се на мало растојание и обично се претставуваат само со една крива.

Меѓу најважните статички карактеристики на FET спаѓаат излезниот отпор:

$$R_{iz} = \frac{U_{DS}}{I_D}, \dots\dots\dots(2.26)$$

кој има вредност од 100Ω до $100K\Omega$, и влезниот отпор:

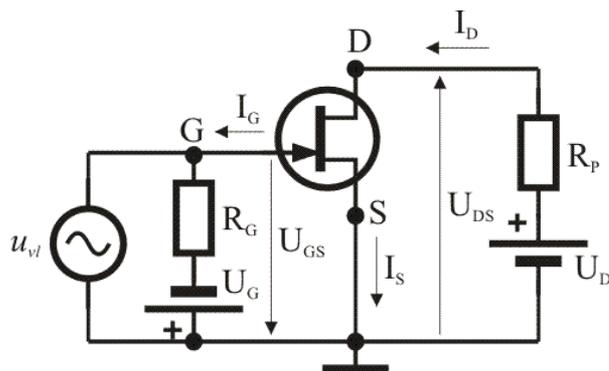
$$R_{vl} = \frac{U_{GS}}{I_G}, \dots\dots\dots(2.27)$$

кој е многу голем и достигнува вредност до $10^9\Omega$.

2.8.3. FET во динамички режим на работа

Електричната шема на **слика 2.37** го претставува колото на FET во динамички режим на работа. Транзисторот е во спој со заеднички сорс. Изворот на сигналот е ставен во колото

на гејтот, а во излезното коло е ставено отпорно оптоварување R_p . Наизменичните напони и струи на сигналот и овде се третираат како мали промени на еднонасочните вредности.



Слика 2.37: Електричната шема на колото на FET во динамички режим на работа.

Динамичката влезна отпорност на FET се дефинира како:

$$r_{vl} = \frac{\Delta U_{GS}}{\Delta I_G} \quad \text{за } \Delta U_{DS} = 0. \dots\dots\dots(2.28)$$

Таа е со многу голема вредност, од редот на неколку мегаоми, поради инверзно поларизи- раниот спој гејт – сорс.

Преносната спроводливост или кондуктанса е:

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \quad \text{за } \Delta U_{DS} = 0. \dots\dots\dots(2.29)$$

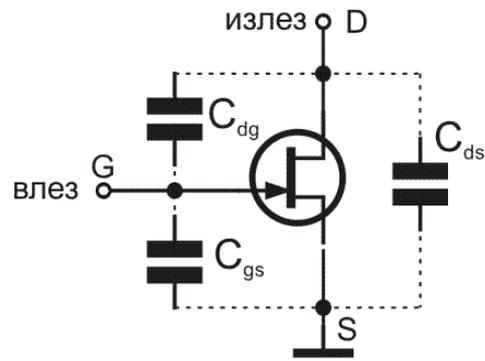
Таа се дефинира со стрмнината на преносната карактеристика и нејзините вредности се движат меѓу 0,1 и 10mA/V.

Динамичката излезна отпорност се дефинира за областа на заситување со:

$$r_{iz} = \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta I_D} \quad \text{за } \Delta U_{GS} = 0. \dots\dots\dots(2.30)$$

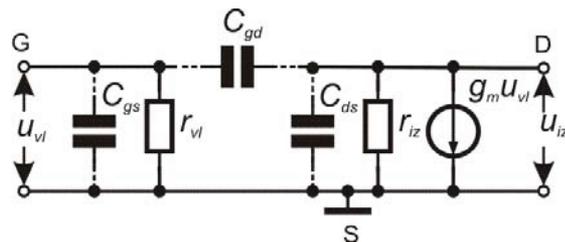
и има вредност од неколку десетини до неколку стотини килооми.

Меѓуелектродните капацитивности имаат значително влијание врз карактеристиките на FET при високи фреквенции. Тие се прикажани на **слика 2.38**. Капацитивноста меѓу гејтот и сорсот C_{gs} паралелно е врзана на влезот и ја намалува импедансата на FET на високи фреквенции. Нејзината вредност е околу 1pF. Паралелно со оптоварувањето на излезот дејствува капацитивноста C_{ds} и го намалува засилувањето при високите фреквенции. Нејзината капацитивност е многу мала и често не се зема предвид. Капацитивноста C_{dg} меѓу дрејот и гејтот учествува во враќањето на дел од сигналот од излезот на влезот. Тоа може да предизвика нестабилна работа и самоосцилирање на засилувачот. И нејзината вредност е мала, околу 0,1pF.



Слика 2.38: Распоред на меѓуелектродните капацитивности на FET.

2.8.3.1 Еквивалентна шема на FET

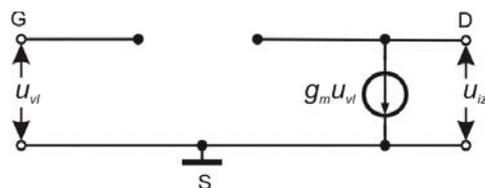


Слика 2.39: Целосна еквивалентна шема на FET.

Целосната еквивалентна шема на FET е дадена на **слика 2.39**. Во колото се внесени сите претходно дефинирани параметри. На излезот е прикажан еквивалентен струен генератор кој на излезот дава струја пропорционална на преносната спроводност и напонот на влезниот сигнал:

$$i = g_m u_{vl} .$$

Кога засилувачот работи на ниски фреквенции, неговото еквивалентно коло се упростиува со исфрлање на сите кондензатори што ги претставуваат меѓуелектродните капацитивности, како и големите паралелни отпорности r_{vl} и r_{izl} . Така, добиената шема е прикажана на **слика 2.40**.



Слика 2.40: Еквивалентна шема на FET за ниски фреквенции.

ЗАПАМЕТИ !!!

* Биполарните транзистори се струјно, а униполарните се напонски регулирани елементи.

* FET е напонски управуван, униполарен електронски елемент со три изводи: дрејн, гејт и сорс, во кој тече струја преку канал од само еден вид полупроводник.

* Според видот на полупроводникот на каналот разликуваме N-FET и P – FET.

* Кога нема напон на гејтот, или кога е гејтот кратко споен со сорсот, низ FET-от не тече струја на дрејнот.

* При поларизација на N-FET транзисторот, сорсот е на повисок потенцијал од гејтот а дрејнот од сорсот.

* При поларизација на P-FET транзисторот, гејтот е на повисок потенцијал од сорсот а сорсот од дрејнот.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Која е разликата помеѓу биполарните и униполарните транзистори?
2. Кои видови униполарни транзистори постојат?
3. Нацртај ги симболите на n-канален и p-канален FET и означи ги изводите.
4. Објасни што се случува со каналот при поларизација на FET.
5. Нацртај ја статичката излезна карактеристика на FET и објасни ги нејзините области.
6. Дефинирај преносна спроводливост на FET.
7. Нацртај еквивалентна шема на FET при ниски фреквенции.

2.9. MOSFET

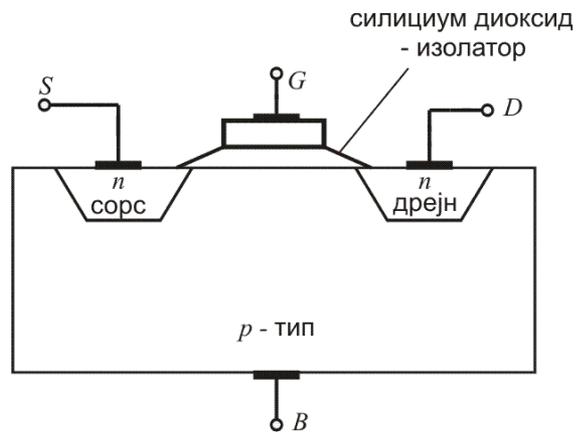
Најмногу користениот модел на транзистор со ефект на поле во областа на модерните дигитални електронски кола има структура составена од метален слој на почетокот, силициум диоксид во средината и полупроводник, најчесто силициум, во долниот дел, по што и го добил називот MOSFET (Metal – Oxide – Semiconductor FET). Така било во почетокот, а во модерната структура со нови технологии наместо метал на горниот дел се применува пласт од полисиликон. Меѓутоа, старата ознака MOS останала и понатаму да се употребува.

MOSFET можат да бидат со N–канал или со P–канал и тие можат да бидат со индуциран или со вграден канал, што ќе биде објаснето понатаму. Во анализата ќе се пови-

каме на N–канален тип со индуциран канал, којшто е и најупотребуван во практиката. Останатите видови и нивните структури лесно ќе се разберат по пат на аналогија.

2.9.1. Структура и принцип на работа на MOSFET со индуциран канал

Како изгледа структурата на еден N–канален MOSFET со индуциран канал е прикажано е на **слика 2.41**. Основата или телото е од силициумски полупроводник од P-тип, со мал процент на акцепторски примеси со дебелина од неколку стотини микрони. Со технолошка постапка, наречена извлекување, на горната површина на основата се формира тенок слој на изолација од силициумдиоксид (стакло) со дебелина од околу 0,1 микрон. Без оглед на малата дебелина, изолациските способности на силициумдиоксидот се многу добри и отпорноста на овој слој е голема.



Слика 2.41: Структурата на n – канален MOSFET.

Во натамошната постапка, на горната површина на основата, прекриена со изолацискиот слој, се отвораат два "прозорци" на растојание околу 10 микрони и во нив се внесуваат примеси на донори. На тој начин се формираат две области од n-тип со голема концентрација на донори во длабочина од неколку микрони, наменети за сорсот и дрејнот. Врз овие области се нанесува тенок слој на метал за електричните приклучоци на сорсот и дрејнот.

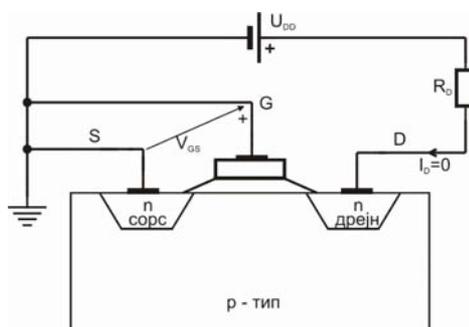
На површината на изолацискиот слој, покривајќи го просторот меѓу сорсот и дрејнот, се нанесува метален слој за изводот на гејтот. Основата, исто така, има свој електричен контакт, означен со B. За најголем број дигитални кола, овој извод е поврзан со сорсот и задачата му е да изолира еден транзистор од друг кога се на ист силиконски чип. Освен овој вид со три изводи, се среќаваат и транзистори со четири изводи, каде што изводот B служи како втор гејт.

Во оваа структура нема вграден канал меѓу сорсот и дрејнот. На патот меѓу нив стојат два PN–споја, свртени во спротивни насоки еден кон друг. Едниот PN–спој е меѓу сорсот и основата, а другиот меѓу основата и дрејнот.

Како што се гледа од слика 2.41, формирана е структура на кондензатор, составена од приклучокот на гејтот и основата, како плочи, и оксидниот слој, како диелектрик.

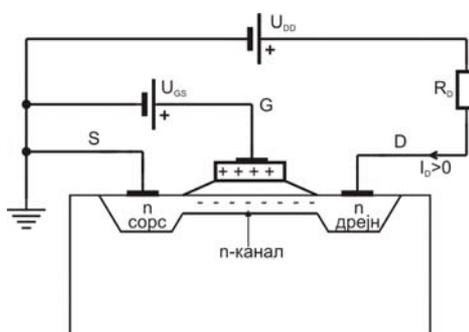
Сега ќе ја ставиме структурата од слика 2.41 во колото на **слика 2.42** во обид да ги задвижиме електроните од сорсот кон дрејнот. Напонот меѓу гејтот и сорсот е донесен на

нула со краткоспојување на гејтот и сорсот. Во оваа состојба не постои начин да протече струја меѓу дрејнот и сорсот поради присуството на двата PN-споја, кои дејствуваат како две спротивно насочени диоди врзани во серија. Кога дрејнот е на позитивен потенцијал во однос на сорсот, меѓу нив тече само инверзната струја на едниот PN-спој и таа е помала од 1nA. Овој тип на MOSFET се вика нормално неспроводен.



Слика 2.42: Однесување на n-канален MOSFET при $U_{GS}=0$.

Меѓутоа, ако се донесе доволно голем позитивен напон на гејтот (слика 2.43), струја ќе протече во колото меѓу дрејнот и сорсот. Никаква струја нема да тече преку изводот на гејтот зашто тој е целосно електрички изолиран од останатиот дел.

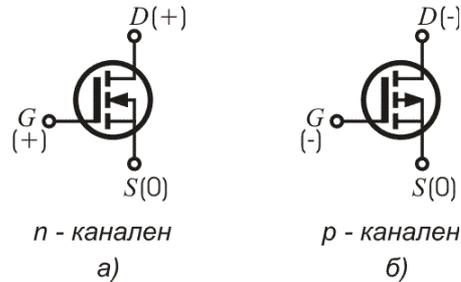


Слика 2.43: Формирање на индуциран канал.

За да се разбере што се случува, ќе се повикаме на претходно опишаната структура на кондензатор. Позитивниот напон донесен на гејтот ќе предизвика полнење на тој кондензатор, што е еднакво на натрупување позитивен полнеж на гејтот и привлекување на исто толкав, но спротивен по знак електричен полнеж на спротивната плоча, односно во подрачјето на основата меѓу дрејнот и сорсот. Тоа подрачје се збогатува со електрони, се празни од празнините и од полупроводник од P-тип преоѓа во полупроводник од N-тип и така се формира каналот. Овој принцип на работа го одредува MOSFET со индуциран канал со постапка на "збогатување". Електричниот симбол на овој вид MOSFET е даден на слика 2.44(a).

P-канален MOSFET е прецизен комплемент на N-каналниот, којшто е веќе анализиран. Тој се формира со внесување две подрачја од P-тип на основа од N-тип и со оксиден

изолирачки слој наспроти гејтот. Неговиот електричен симбол е прикажан на **слика 2.44(б)**. Сите напони и струјата се со спротивен поларитет во однос на N-каналниот MOSFET, а направената анализа останува непроменета, со тоа што носителите на полнежот се празнините.

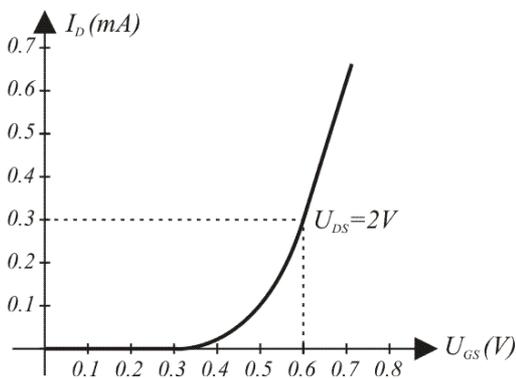


Слика 2.44: Електрични симболи на MOSFET со индуциран канал во режим на збогатување.

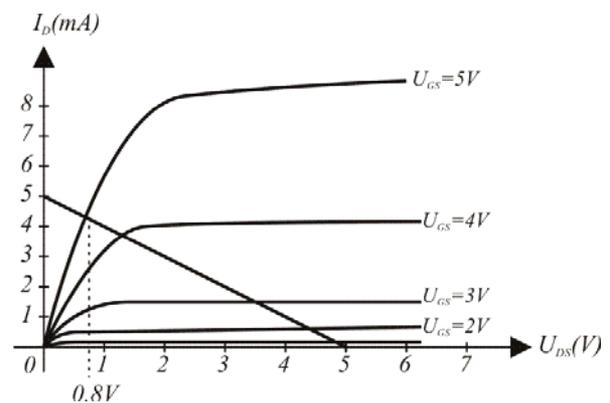
2.9.2. Статички карактеристики

Од статичките карактеристики на MOSFET со индуциран канал во режим "збогатување", најзначајни се само **преносната и излезната карактеристика**, слично како за FET.

Зависноста на струјата на дрејтот I_D од напонот меѓу гејтот и сорсот е дадена со преносната карактеристика на **слика 2.45**. За напон $U_{GS} = 0$, нема струја во колото дрејн - сорс. Со зголемувањето на напонот U_{GS} е потребно тој да достигне одредена вредност, па струјата I_D да почне да тече. Таа се зголемува линеарно со зголемувањето на позитивниот напон на гејтот, бидејќи каналот се повеќе се збогатува со мнозински носители на полнежот и неговата отпорност се смалува. Овој напон се вика напон на прагот (U_T) и за современите MOSFET од овој вид се движи во опсегот 0,3 до 0,8V.



Слика 2.45: Преносна статичка карактеристика на MOSFET.

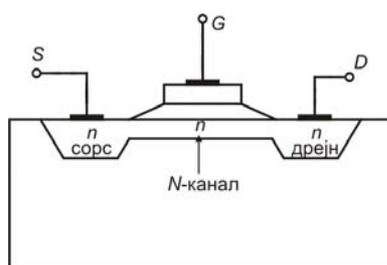


Слика 2.46: Излезна статичка карактеристика на MOSFET со индуциран канал.

Излезната карактеристика $I_D = f(U_{DS})$ за $U_{GS} = \text{const.}$ со внесена работна права е претставена на **слика 2.46**. Се забележува дека кривата за $U_{GS} = 0$ не е внесена, таа се поклопува со апсцисната оска. MOSFET со индуциран канал спроведува струја само кога $U_{GS} > U_T$.

2.9.3. MOSFET со вграден канал

Структурата на овој вид MOSFET се разликува по тоа што регионот на спроводниот канал се вградува со додавање примеси во подрачјето под гејтот за време на неговата изработка. Каналот ги поврзува подрачјата на сорсот и на дрејнот и постои без оглед на тоа каква е поларизацијата на транзисторот (**слика 2.47**).

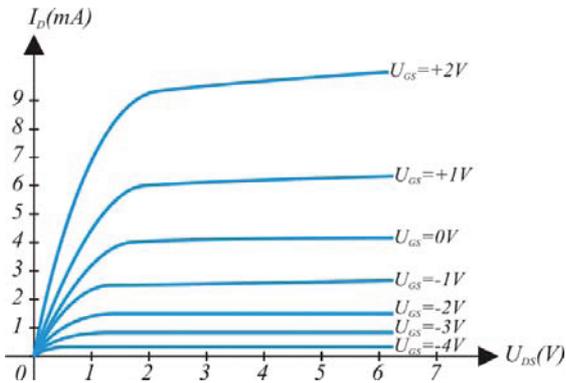


Слика 2.47: MOSFET со вграден канал.

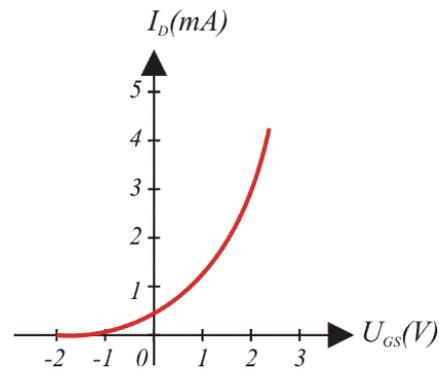
Кога ќе се стави овој транзистор во коло, како на слика 2.43, во колото ќе протече струја и при напон $U_{GS} = 0$. Јачината на таа струја зависи од напонот U_{DS} и од отпорноста на каналот. За позитивни напони на гејтот во однос на сорсот, во колото се создаваат такви услови да тече струја, какви што се веќе опишани кај MOSFET со индуциран канал. Со зголемувањето на позитивниот напон U_{GS} , се збогатува каналот со слободни електрони, се зголемува спроводноста на каналот, а со тоа и јачината на струјата на дрејнот I_D . Во тој случај, MOSFET работи во режим на "збогатување".

За негативните вредности на напонот на гејтот, според принципот на полнењето на кондензаторот, во каналот се натрупуваат празнини, што е еквивалентно на празнење на каналот од слободните електрони. Со тоа се намалува спроводноста на каналот и струјата на дрејнот I_D . При поголеми вредности на негативниот напон на гејтот каналот толку се празни од електрони што струјата престанува да тече.

Излезната карактеристика на MOSFET со вграден канал е дадена на **слика 2.48**, а преносната на **слика 2.49**. Од карактеристиките се гледа дека при $U_{GS} = 0$ тече значителна струја I_D и дека овој транзистор работи како во режимот на "збогатување", така и во режимот на "осиромашување".



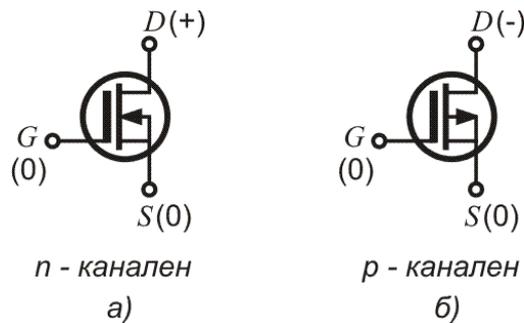
Слика 2.48 : Излезна карактеристика на MOSFET со вграден канал.



Слика 2.49: Преносна карактеристика на MOSFET со вграден канал.

Овој вид MOSFET е посложен за изработка, поради дополнителните чекори за формирање на регионот на каналот. Тоа го прави поскап и неговата примена се ограничува на некои специјални кола.

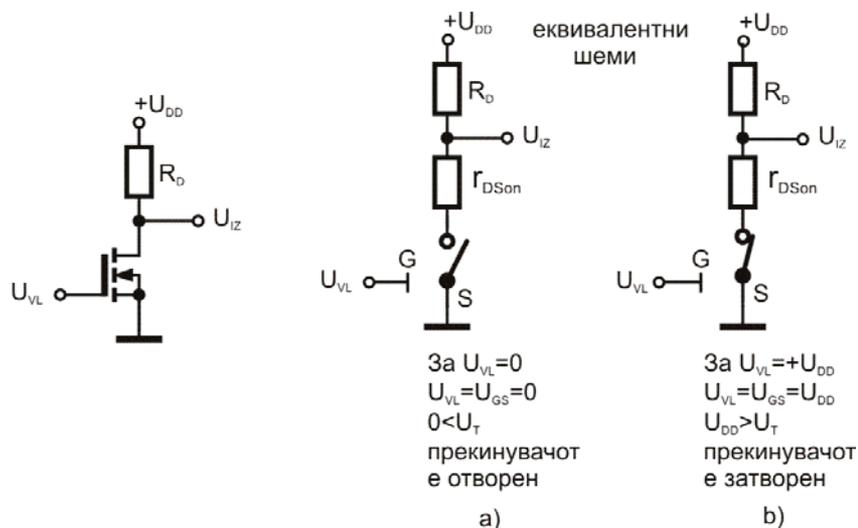
Електричните симболи на *n* и *p*-канален MOSFET со вграден канал се дадени на сликата 2.50.



Слика 2.50: Електрични симболи на MOSFET со вграден канал.

2.9.4. MOSFET како прекинувачки елемент

Преносната карактеристика на MOSFET со индуциран канал покажува дека за сите напони на U_{GS} помали од напонот U_T , меѓу сорсот и дрејнот не тече струја. Во која и да е насока се испречува област на инверзно поларизирана диода. Во овој режим на работа, MOSFET се однесува како отворен прекинувач меѓу дрејнот и сорсот.



Слика 2.51: Еквивалентна шема на MOSFET во омски и активен режим на работа.

Меѓутоа, со донесување на позитивен напон на гејтот U_{GS} , кој е поголем од напонот U_T , доаѓа до индуцирање на спроводен канал и течење на струја меѓу дрејнот и сорсот. Однесувањето на MOSFET во оваа состојба може да се прикаже на два начина, преку две еквивалентни шеми (слика 2.51):

а) работа во активно подрачје;

б) работа во "омско" подрачје.

MOSFET работи во "омско" подрачје кога е $U_{DS} < (U_{GS} - U_T)$. Еквивалентното коло на MOSFET за тој регион е составено од затворен прекинувач во серија со внатрешен отпор на спроводен MOSFET $r_{DS(on)}$. Вредноста на струјата I_D зависи од напонот на изворот U_{DD} . Овој режим се користи како "затворен прекинувач" во дигиталните кола.

За работа во "активното" подрачје е потребно да биде исполнет условот $U_{DS} > (U_{GS} - U_T)$.

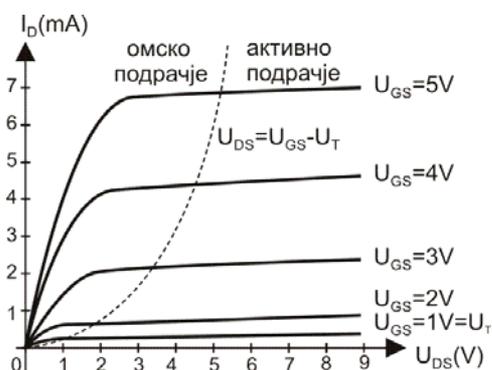
Струјата I_D сега е функција само на U_{GS} и не зависи од напонот U_{DS} , па во еквивалентната шема имаме затворен прекинувач во серија со струен извор. MOSFET се наоѓа во "активното" подрачје, користен за засилување во аналогните кола.

За импулсните прекинувачки кола MOSFET-от треба да се најде во услови на "омското" подрачје со одредување на напонот U_{DS} :

$$U_{DS} = U_{DD} - R_D I_D. \dots\dots\dots(2.35)$$

Условот за транзисторот да се најде во "омското" подрачје се добива со избор на доволно голема вредност за R_D . Од друга страна, побудниот импулс треба да биде таков што, за неспроводна состојба на отворен прекинувач, да биде $U_{GS} \ll U_T$, а за состојба на затворен прекинувач, да биде $U_{GS} \gg U_T$.

Во карактеристиките на **слика 2.52** јасно се разграничени "омското" и "активното" подрачје на работа на MOSFET.



Слика 2.52: Активно и омско подрачје во излезните карактеристики на MOSFET.

ЗАПАМЕТИ !!!

- * MOSFET е технолошки унапреден FET со примена на метал – силициум диоксид.
- * За MOSFET со индуциран канал, каналот во кој тече струјата се формира со поларизација на MOSFET.
- * Кај MOSFET со вграден канал, каналот се формира во текот на производството на MOSFET.
- * Во колото на гејтот не тече струја, влезниот отпор е бесконечно голем.
- * FET и MOSFET можат да работат како засилувачи во спој со заеднички сорс, заеднички гејт и заеднички дрејн.
- * MOSFET работи како затворен прекинувач во "омскиот" регион за дигитални кола, а во активниот регион како засилувач за аналогни кола.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Кои видови на MOSFET постојат?
2. Објасни го процесот на формирање на индуцираниот канал со постапка на збогатување во MOSFET.
3. Нацртај ги шематските ознаки на видовите MOSFET.
4. Кои се најзначајните статички карактеристики на MOSFET?
5. При кои напони U_{GS} , MOSFET со индуциран канал спроведува струја?
6. Која е разликата помеѓу MOSFET со индуциран и со вграден канал?
7. Дали при $U_{GS} = 0$ тече струја низ MOSFET со вграден канал?

2.10. Примена на транзисторите

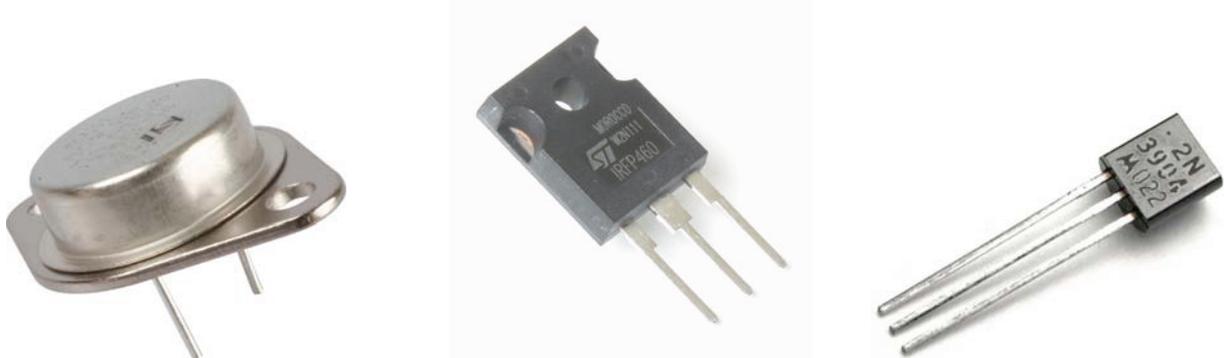
Транзисторите се применуваат во сите гранки на електрониката и електротехниката – при изработка на засилувачи, осцилатори, предавателни уреди и склопови за регулација. Освен во електрониката и електротехниката, транзисторите денес се користат речиси во сите гранки на индустријата. Големиот успех и брзиот развој се последица на малите димензии, едноставното и масовно производство и многу малата потрошувачка на енергија.

Биполарните транзистори се струјно управувани засилувачи, а униполарните се напонски управувани засилувачи. Од времето кога се пронајдени па до сега, тие се усовршувани и приспособувани за општа употреба или за специјални функции. Како засилувачи тие се изработуваат за засилување при ниски фреквенции до 1MHz, при средни фреквенции до 100MHz и при високи фреквенции преку 100MHz. Според моќноста, можат да бидат за мали моќности до 0,2W, за средни моќности до 1W и за големи моќности преку 1W.

Како прекинувачки елементи, освен за стандардните прекинувачки функции, транзисторите се применуваат во дигиталната технологија за изработка на логички порти како составни делови на комплексни дигитални системи. Така, на пример, еден полупроводнички чип може да содржи и по неколку милиони транзисторски прекинувачки елементи.

Транзисторот како елемент се употребува речиси во сите електронски уреди. Исклучок се единствено VF и NF-филтрите, кои претежно се состојат од кондензатори и калеми и од некој отпорник.

Иако во денешните уреди се повеќе се употребуваат интегрирани кола, поради бројните предности: мали димензии, поедноставно вградување и сервисирање, транзисторите не се исфрлени од употреба. Не се видливи како самостојни елементи, тие се интегрирани со други елементи и градат интегрирани кола. Транзисторите се комбинираат со отпорници, кондензатори, диоди, калеми и со други транзистори. За тоа дека можат многу добро да се интегрираат, доказ се денешните компјутерски процесори.



ТЕМАТСКО УТВРДУВАЊЕ

I Прашања со заокружување

(Заокружи ги точните одговори)

1. Главни носители на електричниот полнеж во PNP-транзисторот се:

- а) електроните
- б) празнините
- в) донорите
- г) акцепторите.

2. Мерната единица на h_{fe} параметарот е:

- а) неименуван број
- б) А
- в) V.

3. Споредни носители на електричниот полнеж во PNP-транзисторот се:

- а) електроните
- б) празнините
- в) донорите
- г) акцепторите.

4. Зависноста на струјата I_C напонот U_{ce} при константна струја I_B кај транзистор во спој со заеднички емитер е претставена со:

- а) преносната карактеристика
- б) влезната карактеристика
- в) излезната карактеристика.

5. Кај транзисторот во спој со заедничка база влезна струја е:

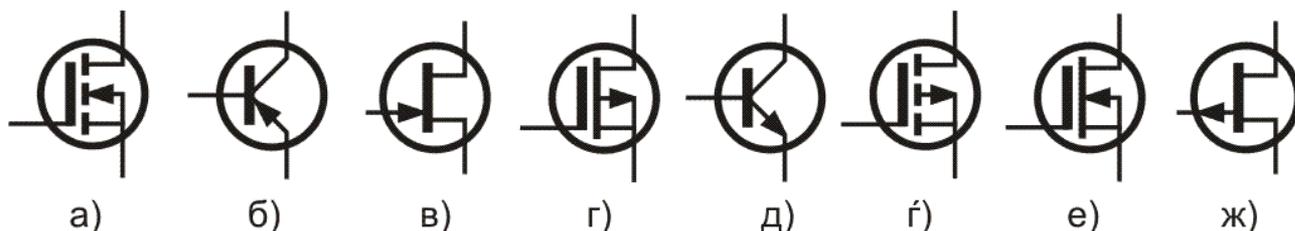
- а) I_C
 - б) I_B
 - в) I_E .
-

6. Излезната карактеристика на транзистор во спој со заеднички емитер е претставена со:

- а) $I_C = f(U_{CE})$ за $I_B = \text{const.}$
 б) $I_B = f(U_{BE})$ за $U_{CE} = \text{const.}$
 в) $U_{BE} = f(U_{CE})$ за $I_B = \text{const.}$

II Прашања со поврзување

7. Поврзи ги електричните симболи со видовите транзистори:



1. NPN – транзистор _____
2. PNP – транзистор _____
3. FET од N – тип _____
4. FET од P – тип _____
5. N – канален MOSFET со индуциран канал _____
6. P – канален MOSFET со индуциран канал _____
7. N – канален MOSFET со вграден канал _____
8. P – канален MOSFET со вграден канал _____

8. Поврзи го параметарот со релацијата:

1. Излезна спроводливост а) $h_{11} = h_i = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1}$ за $\Delta U_2 = 0$.
2. Коефициент на напонска повратна спрега. б) $h_{12} = h_r = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2}$; за $\Delta I_1 = 0$.
3. Коефициент на струјно засилување. в) $h_{21} = h_f = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1}$; за $\Delta U_2 = 0$.
4. Влезна отпорност. г) $h_{21} = h_f = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1}$; за $\Delta U_2 = 0$.

9. Поврзи ја состојбата на MOSFET-от со условот:

1. Затворен прекинувач

а) $U_{GS} \ll U_T$ _____.

2. Отворен прекинувач

б) $U_{GS} \gg U_T$ _____.

III Прашања со дополнување

10. Со односот на промената на колекторската струја ΔI_C , и промената на базната струја ΔI_B се дефинира _____.

11. Кога транзисторот е во состојба на заситување, излезната струја има _____ јачина, а излезната отпорност _____ вредност.

12. Кога емитерскиот и колекторскиот спој се инверзно поларизирани, транзисторот е во режим на _____.

13. Транзисторот се поларизира така што емитерскиот спој ќе биде _____ поларизиран, а колекторскиот _____ поларизиран.

14. При $U_{DS} > (U_{GS} - U_T)$ MOSFET-от работи во _____ режим.

15. Со релацијата $I_D = f(U_{DS})$ за $U_{GS} = \text{const.}$ дефинирана е _____ карактеристика на MOSFET во спој со заеднички сорс.

Истражувај и дознај повеќе:



- Состави табела во која ќе ги внесеш карактеристиките на видовите транзистори и анализирај ја.

- Истражувај на интернет за транзистори - шеми за практична реализација.

- Изработи проект за видови на транзисторите.

- Изработи проект за примена на транзисторите.

ЗАСИЛУВАЧИ

Со изучување на содржините од оваа тема, ќе стекнеш основни знаења за засилувачите и ќе можеш:

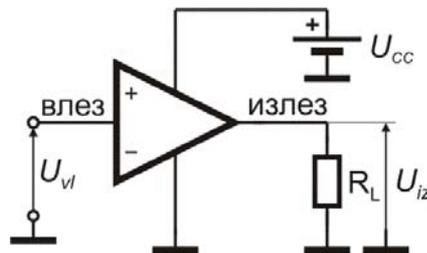
- да го дефинираш поимот засилување;
 - да ја сфаќаш улогата на засилувачот;
 - да ги разликуваш основните поделби на засилувачите;
 - да го познаваш определувањето на основните параметри на еден засилувач;
 - да го објаснуваш засилувачот како активен четворопол;
 - да ги познаваш различните конфигурации на засилувачи со биполарни и униполарни транзистори;
 - да пресметуваш напонско и струјно засилување, влезна и излезна отпорност;
 - да споредуваш карактеристики на различните конфигурации на поврзување;
 - да ги пресметуваш параметрите на Дарлингтонов спој во различна конфигурација;
 - да пресметуваш параметри на основните засилувачки споеви со FET и MOSFET
 - да објаснуваш спој на каскадно поврзани засилувачи;
 - да го толкуваш напонското и струјното засилување при каскада на засилувачи;
 - да го објаснуваш принципот на работа на диференцијален засилувач;
 - да ја толкуваш преносната карактеристика на идеален диференцијален засилувач;
 - да ја опишуваш реалната конфигурација на диференцијален засилувач;
 - да ги разбираш видовите изобличувања;
 - да ја разбираш повратната врска кај засилувачите;
 - да ги познаваш параметрите на засилувачи со повратна врска;
 - да го објаснуваш влијанието на негативната врска врз засилувачите;
 - да го сфаќаш корективното дејство на повратната врска врз работата на засилувачот;
 - да ја анализираш зависноста помеѓу видот на повратната врска и параметрите на засилувачот;
 - да анализираш шеми на еднонасочни директно спрегнати засилувачи;
 - да ги познаваш засилувачите на моќност;
 - да дефинираш фактор на корисно дејство кај засилувачите на моќност;
 - да ја разбираш основната и принципиелната шема на засилувач во класа А и во класа В/АВ со комплементарен транзисторски пар;
-

3.1. Засилување и улогата на засилувачот

Многу често е потребно да се засили амплитудата или моќноста на електричните сигнали. Засилувачот е електронски склоп кој има задача да го засили сигналот што се приклучува на неговиот влез и на неговиот излез да се добие сигнал што има ист облик како влезниот сигнал, но со поголема амплитуда. Со засилувачите се засилува напон, струја или моќност. Засилувачот е составен од активни и пасивни елементи, при тоа мора да постои дополнителен извор на електрична енергија.

Суштината на засилувањето е во тоа што не сме ги зголемиле влезната струја и влезниот напон, туку мала промена на влезниот напон и струја предизвикува голема промена на излезниот напон, што се толкува како засилен влезен напон или струја. Транзисторскиот засилувач не произведува нова електрична енергија, енергијата од еднонасочниот извор за напојување тој ја претвора во енергија на засилениот сигнал на излезот.

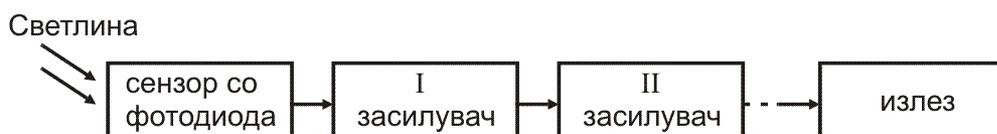
Во општ случај, засилувачите се прикажуваат со триаголник, како на **слика 3.1**, кога нивната конструкција нема важност за прикажување на функцијата на целото коло.



Слика 3.1: Општа шематска ознака на засилувач.

На влезот на засилувачот се носи влезниот сигнал U_{vl} , а на неговиот излез се добива сигнал U_{iz} со иста форма, но со зголемена вредност. Тие се дефинираат во однос на една заедничка точка на колото – масата. Едниот пол на изворот за напојување често се врзува на маса. Функцијата на колото е да се засили влезниот сигнал и да се пренесе на оптоварувањето кое има отпор R_L .

Секако дека толку големо засилување, какво што е потребно во наведениот пример на фотодиодата, не може да се оствари со еден засилувач, туку се потребни повеќе засилувачки степени, врзани во каскада (**слика 3.2**). Засилувачите во каскадата не се меѓусебно еднакви.



Слика 3.2: Каскадна врска на засилувачи.

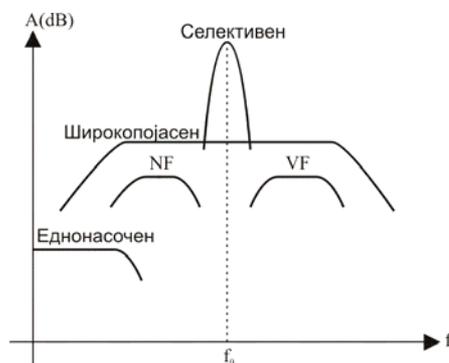
3.2. Поделба на засилувачите

Во извршувањето на одредена задача учествуваат повеќе засилувачки кола, коишто меѓусебно се разликуваат по своите можности или според своите карактеристики. Засилувачите можат да се поделат во неколку групи: според видот на засилувањето, според фреквенцискиот појас или според режимот на работа.

Првата поделба е на засилувачи на мали и засилувачи на големи сигнали. Малите сигнали се најчесто на почетокот на засилувачката каскада, а големите на крајот.

Според видот на засилувањето имаме **засилувачи на напон**, **засилувачи на струја** и **засилувачи на моќност**. Во еден синџир на засилувачи, каков што е потребен, на пример, за засилување на напонот на фотодиодата, засилувачот на напон или струја се наоѓа на самиот почеток, а на крајот доаѓа засилувачот на моќност.

Според ширината на фреквенцискиот појас и според положбата на АФК (амплитудни фреквенциска карактеристика) на фреквенциската оска, а тоа се две посебни поделби, засилувачите се делат на: широкопојасни, теснопојасни или селективни, нискофреквенциски, високофреквенциски и на засилувачи на еднонасочен сигнал. Нивните идеални фреквенциски карактеристики, за споредба, се дадени на **слика 3.3**.



Слика 3.3: Идеални амплитудно-фреквенциски карактеристики на разни засилувачи.

Широкопојасните засилувачи можат да засилат сигнали со широк фреквенциски појас, како што се видеосигналите во телевизијата или за засилување на импулсите (затоа се наречени видеозасилувачи или импулсни засилувачи).

Селективните засилувачи засилуваат сигнали со тесен фреквенциски појас околу носечката фреквенција f_0 . Најчесто се користат во телекомуникациски и радиоуреди, кога треба да направат селекција на еден од многу сигнали со различни носечки фреквенции.

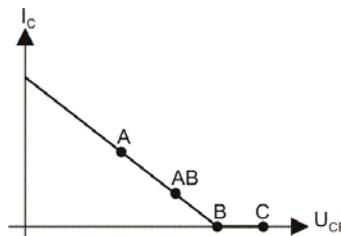
Нискофреквенциските (NF) засилувачи ги засилуваат сигналите со ниски фреквенции. Изворите на нискофреквенциските сигнали се различни. Максималната моќност на тие извори се движи меѓу 10^{-10} W до 10^{-6} W. Така, на пример, микрофон со лента може да даде околу 10^{-6} W, додека микрофон со јаглен дава до 10^{-6} W. За говорните сигнали (во теле-

фонијата), фреквенцискиот појас изнесува од 300 Hz до 3400 Hz, а за музичките сигнали од 20 Hz до 20000 Hz.

Високофреквенциските (VF) засилувачи ги засилуваат сигналите кои го заземаат горниот дел од фреквенцискиот спектар и тие се слични на селективните засилувачи, само со поширок фреквенциски опсег. Тие се користат во разни радио, радарски, сателитски и други уреди.

Засилувачите на еднонасочни сигнали служат за засилување на бавно променливи сигнали со долна гранична фреквенција еднаква на нула. Нивната примена е најчесто во мерната техника.

Режимот на работа на засилувачот е одреден со положбата на неговата работна точка. Според тоа, засилувачите се делат на засилувачи во класа А, класа АВ, класа В и класа С. Местото на работната точка на работната права во излезната, струјно-напонската карактеристика на транзисторот е прикажано на **слика 3.4**. Од сликата се гледа дека работната права, од точката В па натаму лежи на апсцисната оска.



Слика 3.4: Работна точка на засилувачи во различни режими на работа.

Засилувач во класа А има работна точка, поставена на средината на работната права, со што се добиваат најмали нелинеарни изобличувања што се создаваат со нелинеарноста на струјно-напонската карактеристика на транзисторот. Во овој режим на работа се наоѓаат напонските и струјните засилувачи.

Работната точка на засилувачот во класа В се наоѓа на почетокот на работната права. Засилувачот најчесто се изведува со два транзистора.

Засилувачот во класа АВ има работна точка која се наоѓа меѓу точките А и В. Со така поставена работна точка се добиваат помали изобличувања во однос на точката В.

Работната точка на засилувачот во класа С е поставена во областа на инверзната поларизација. Тоа значи дека засилувачот нема да реагира на сигналот се додека тој не го донесе во режимот на точката В. Во овој режим работи засилувач на моќност во тесен фреквенциски опсег, како, на пример, излезните засилувачи на радиопредавателите.

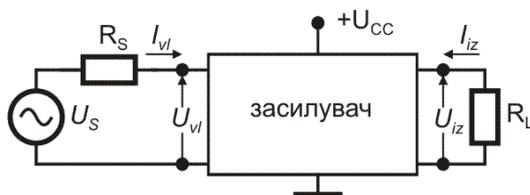
ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Какви видови засилувачи постојат според видот на засилувањето?
2. Како се делат засилувачи според ширината на фреквенцискиот појас?

3. Каде се користат широкопојасните засилувачи?
4. Каде се користат селективните засилувачи?
5. Каде се применуваат нискофреквентните, а каде високофреквентните засилувачи?
6. Каде се наоѓа работната точка на засилувачите во класа А, В, АВ и С на излезната карактеристика на засилувачот?

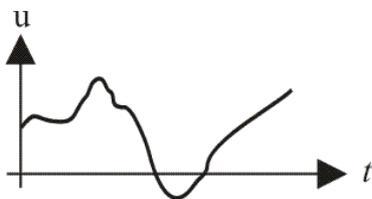
3.3. Засилувач како активен четворопол

Засилувачот може да се третира како еден четворопол, составен од една или повеќе засилувачки ќелии. Основна засилувачка ќелија се прави со биполарни и униполарни транзистори, операциски засилувачи, отпорници, кондензатори и калеми. Нејзината блок-шема со влезните и излезните приклучоци и приклучокот за напојување е дадена на **слика 3.5**.

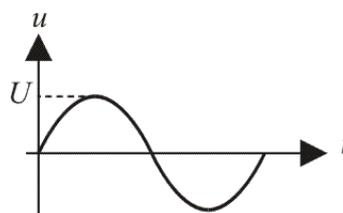


Слика 3.5: Блок-шема на основен засилувач.

На влезот од засилувачот се приклучува изворот на сигналот U_s со сопствениот отпор R_s , а на излезот отпорот на оптоварувањето R_L .



Слика 3.6: Комплексна форма на аналоген сигнал.



Слика 3.7: Синусоидална форма на сигналот.

Континуално променлив со времето сигнал се вика **аналоген сигнал** (слика 3.6), а колата за нивна обработка се викаат **аналогни кола**. Аналогниот сигнал може да има комплексна бранова форма како на слика 3.6 или да биде повторлив или периодичен, како што е синусоидалниот сигнал од **слика 3.7**. Врз основа на синусоидалниот сигнал се дефинираат карактеристиките на многу електронски кола и системи.

Напонот кој се менува синусоидално со времето може да се претстави со функцијата:

$$u(t) = U \sin(\omega t + \varphi) \dots\dots\dots (3.1)$$

Во оваа функција има три параметри кои можат да се менуваат: амплитудата U , аголната фреквенција ω и фазниот агол φ . Односот меѓу аголната фреквенција ω , дадена во радијани во секунда, наспроти фреквенцијата f , изразена во Hz, се одредува со релацијата:

$$\omega = 2\pi f \dots\dots\dots(3.2)$$

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Нацртај ја блок-шемата на засилувачот како четворопол.
2. Кои параметри на синусоидалниот сигнал може да се менуваат?

3.4. Одредување на параметрите на засилувачот

Амплитудата е еден од важните параметри. Засилувачот е електронски склоп кој треба да ја зголеми амплитудата на сигналот. Ако сигналот е претставен како напон, тогаш се дефинира напонско засилување на засилувачот како однос на излезниот наспроти влезниот напон на сигналот.

Кога напонското засилување е позитивно, излезниот и влезниот напон се во фаза, а кога е негативно, тие се фазно поместени за 180° .

$$A_U = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} \dots\dots\dots(3.3)$$

За струен сигнал имаме струјно засилување како однос на излезната према влезната струја:

$$A_I = \frac{I_{iz}}{I_{vl}} \dots\dots\dots(3.4)$$

а за засилување на моќност имаме количник на моќностите на наизменичните сигнали на излезот P_{iz} и на влезот P_{vl} на засилувачот:

$$A_P = \frac{P_{iz}}{P_{vl}} = \left| \frac{U_{iz} \cdot I_{iz}}{U_{vl} \cdot I_{vl}} \right| = |A_U \cdot A_I| \dots\dots\dots(3.5)$$

Засилувањето може да се изрази со логаритамска единица децибел (dB) како:

$$A_U(dB) = 20 \log \left| \frac{U_{iz}}{U_{vl}} \right|, \quad A_I(dB) = 20 \log \left| \frac{I_{iz}}{I_{vl}} \right|, \quad A_P(dB) = 10 \log \left| \frac{P_{iz}}{P_{vl}} \right| \dots\dots\dots(3.6)$$

Коефициентот на корисното дејство η се дефинира како однос на средната моќност на наизменичниот сигнал, предаден на потрошувачот и на моќноста што се зема од изворот за напојување, изразена процентуално како:

$$\eta = \left| \frac{P_{sig}}{P_{izv}} \right| \cdot 100(\%) \dots\dots\dots(3.7)$$

Влезната отпорност се дефинира како однос на влезниот напон и влезната струја:

$$R_{vl} = \frac{U_{vl}}{I_{vl}} (\Omega) \dots\dots\dots (3.8)$$

а излезната со:

$$R_{iz} = \frac{U_{iz}}{I_{iz}} (\Omega) \dots\dots\dots (3.9)$$

)

Во оваа дефиниција U_{iz} е излезен напон кога потрошувачот не е приклучен, а I_{iz} излезна струја кога е излезот е кусо врзан. Од влезната отпорност се бара да има поголема вредност, со што помалку ќе го оптоварува генераторот на сигналот или претходниот засилувачки степен.

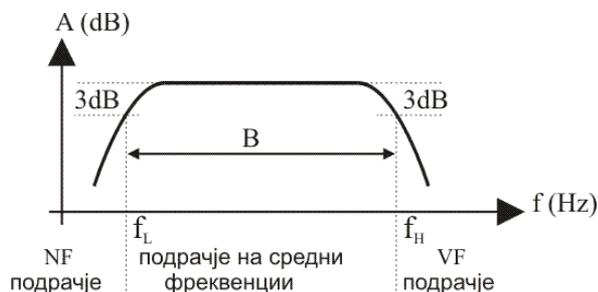
Излезната отпорност, пак, треба да има помала вредност, за да не дојде до слабеење на излезниот сигнал.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Како се дефинира струјното засилување на засилувачот?
2. Напиши равенка со која ќе го претставиш напонското засилување на засилувачот.
3. Дефинирај го коефициентот на корисно дејство.
4. Напиши релации со кои се дефинира влезната и излезната отпорност.

3.5. Фреквенциска и фазна карактеристика на засилувачот

Уште една важна карактеристика на засилувачот е неговата фреквенциска и фазна карактеристика. Фреквенциската карактеристика (слика 3.8) покажува како се менува засилувањето на засилувачот кога амплитудата на синусоидалниот напон на влезот е константна, а се менува неговата фреквенција.



Слика 3.8: Фреквенциска карактеристика на засилувач.

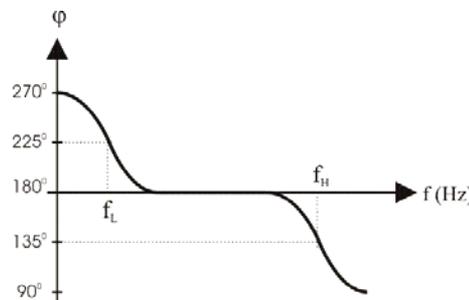
Ниеден реален засилувач не може да го засили влезниот сигнал во неограничен фреквенциски појас. Во колото на засилувачот, освен транзисторот, кој има ограничувања во однос

на фреквенциите кои може да ги засилува, постојат и капацитивности и индуктивности, кои го прават засилувањето зависно од фреквенцијата. При некои високи фреквенции, засилувачот веќе нема да биде во состојба да дава иста амплитуда на излезниот сигнал, како при средните фреквенции.

За **горна гранична фреквенција** f_H на засилувачот се смета фреквенцијата за која засилувањето паѓа за 3 dB, односно за фактор 0,707, во однос на засилувањето при средните фреквенции. До паѓање на засилувањето доаѓа и при ниските фреквенции, а на сличен начин се дефинира и **долната гранична фреквенција** f_L . Разликата меѓу горната и долната гранична фреквенција:

$$B = f_H - f_L \dots \dots \dots (3.10)$$

се вика **пропусен опсег** на засилувачот. Сигналите со фреквенции во овој опсег ќе бидат засилени без изобличување. Изобличувањето се манифестира со разлика во обликот меѓу излезниот и влезниот сигнал и се јавува кај сигналите со фреквенции надвор од пропусниот опсег.



Слика 3.9: Фазна карактеристика на засилувачот.

Фазната карактеристика (**слика 3.9**) покажува како се менува фазното поместување на излезниот во однос на влезниот сигнал со промена на фреквенцијата. Се забележува намалување на фазната разлика за високи фреквенции и зголемување за ниските фреквенции. За горната гранична фреквенција фазната разлика се намалува за 45° , а за долната се зголемува за 45° . Со зголемувањето и со намалувањето на фазната разлика во однос на 180° се јавуваат фазни изобличувања на сигналот.

ЗАПАМЕТИ !!!

***Засилувачот го засилува напонот, струјата или моќноста на аналогниот или дигиталниот сигнал.**

***Суштината на засилувањето е: мала промена на влезниот напон или струја предизвикува голема промена на излезниот напон.**

***Засилувачите се делат на неколку групи според:**

а) видот на засилувањето (напонски, струјни и засилувачи на моќност);

б) фреквенцискиот појас (широкопојасни, селективни, засилувачи на ниски фреквенции, засилувачи на високи фреквенции и еднонасочни);

в) режимот на работа, а тоа значи според положбата на работната точка (класа А, класа АВ, класа В и класа С).

* Фреквенциската карактеристика на засилувачот покажува како се менува засилувањето, а фазната како се менува фазата на сигналот со промена на фреквенцијата на сигналот.

* Изобличувањето се манифестира со разлика во формата меѓу влезниот и излезниот сигнал.

* Основните параметри на засилувачот се напонското, струјното и засилувањето на моќност, коефициентот на корисното дејство, влезната и излезната отпорност.

* Горната и долната гранична фреквенција е фреквенција за која засилувањето на засилувачот паѓа за 3dB во однос на засилувањето при средните фреквенции.

* Пропусен опсег е опсегот меѓу горната и долната гранична фреквенција на засилувачот.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Дефинирај фреквенциска карактеристика на засилувачот.
2. Нацртај фазна карактеристика на засилувачот и дефинирај ги долната и горната гранична фреквенција.
3. Како се одредува пропусниот опсег на засилувачот?

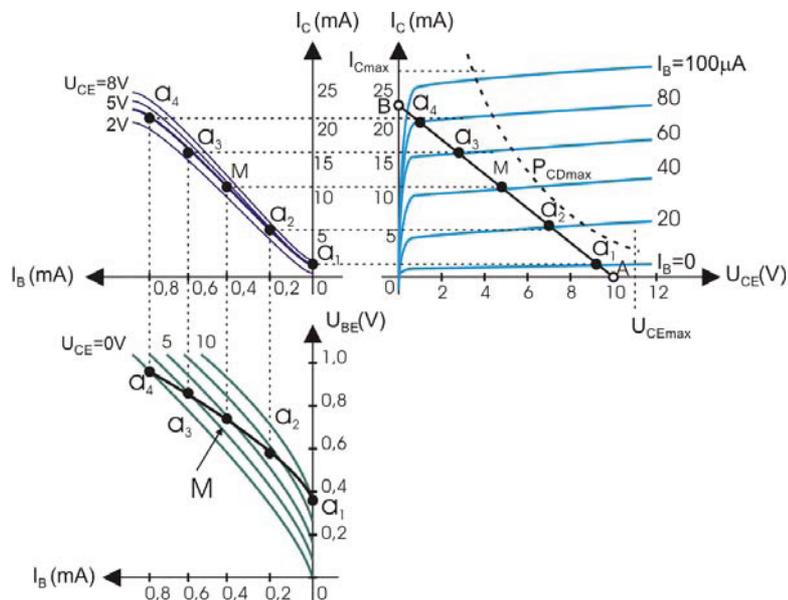
3.6. Графичка анализа на работата на транзисторскиот засилувач

Графичката анализа се применува кога имаме влезни сигнали со голема амплитуда. Со оваа метода се води сметка за нелинеарноста на карактеристиките. Целата графичка анализата е направена на транзисторски засилувач во спој со заеднички емитер.

Под влијанието на промената на сигналот во влезното коло, доаѓа до промена на напонот на излезот U_{CE} . Тоа значи дека работната точка, прикажана во влезните и во преносните карактеристики прескокнува од една на друга карактеристика, со што ја опишува влезната динамичка карактеристика.

На **слика 3.10** се претставени статичките излезни, преносни и влезни карактеристики на транзисторот, поставени така што може да се види начинот на добивањето на динамичката

преносна и влезна карактеристика. Дијаграмот на динамичките излезни карактеристики и динамичката работна линија не се разликуваат од дијаграмот на статичките карактеристики и статичката работна линија. Динамичката преносна и влезна карактеристика се добиваат со пренесување на пресечните точки a_1, a_2, a_3, a_4 и M на работната линија со излезните карактеристики за $I_B = \text{const.}$ во системот на преносните и влезните статички карактеристики.

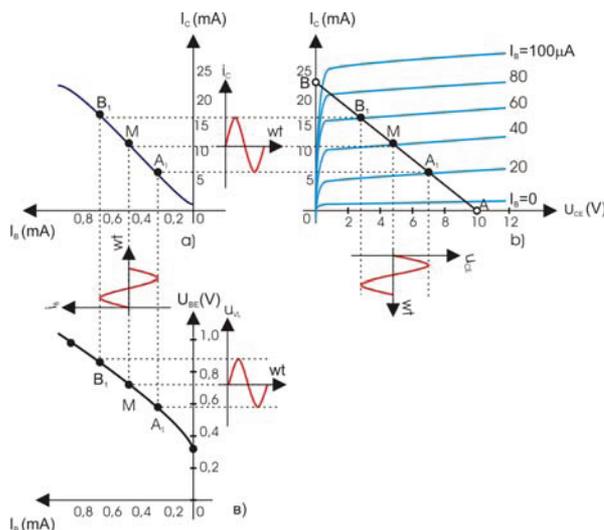


Слика 3.10: Формирање на динамичка преносна и влезна карактеристика.

На **слика 3.11** се дадени дијаграмите на динамичките карактеристики на засилувачот, пренесени од слика 3.10. На влезот на засилувачот е приклучен наизменичен напон:

$$u_{vl} = U_{vlim} \sin \omega t, \dots\dots\dots(3.11)$$

каде што: u_{vl} – моментална вредност на напонот, U_{vlim} – амплитуда, а ω – кружна фреквенција.



Слика 3.11: Графичко одредување на засилувањето.

Овој наизменичен напон му се додава на еднонасочниот напон на поларизација на базата U_{BE} , како што е прикажано на влезната карактеристика (слика 3.11в). Струјата на базата, исто така, содржи еднонасочна и наизменична компонента и има форма дадена со:

$$i_b = I_{B(M)} + I_{bm} \sin \omega t \dots\dots\dots(3.12)$$

каде што со $I_{B(M)}$ е означена еднонасочната струја на поларизација на базата во точката М, а со I_{bm} амплитудата на струјата на влезниот сигнал.

Промените на струјата на базата предизвикуваат промени на колекторската струја и таа добива форма:

$$i_c = I_{C(M)} + I_{cm} \sin \omega t \dots\dots\dots(3.13)$$

каде е со $I_{C(M)}$ означена еднонасочната компонента на работната точка, а со I_{cm} амплитудата на наизменичната компонента на струјата на колекторот (слика 3.11а).

При пренесувањето на точките од преносната на излезната карактеристика се забележува дека движењето на работната точка од М кон В1 предизвикува зголемување на колекторската струја, но и намалување на колекторскиот напон. Со други зборови, позитивната полу-периода на базната струја и базниот напон создава негативна полупериода на колекторскиот напон, а тоа значи дека меѓу напонот на базата и напонот на колекторот постои фазна разлика од 180° .

Излезниот напон на транзисторот во спој со заеднички емитер е:

$$u_{iz} = -u_{ce} = -I_{C(M)}R_C - I_{cm}R_C \sin \omega t \dots\dots\dots(3.14)$$

или

$$u_{iz} = -U_{CE(M)} - U_{cem} \sin \omega t \dots\dots\dots(3.15)$$

каде што $U_{CE(M)}$ е еднонасочната компонента на колекторскиот напон во точката М, а U_{cem} амплитудата на наизменичната компонента на колекторскиот напон.

Засилувањето на напонот, добиено со засилувачкиот степен, се дефинира како:

$$A_u = \frac{U_{izm}}{U_{vlm}} = \frac{U_{cem}}{U_{bem}} \dots\dots\dots(3.16)$$

а засилувањето на струјата како:

$$A_i = \frac{I_{izm}}{I_{vlm}} = \frac{I_{cm}}{I_{bm}} \dots\dots\dots(3.17)$$

И на крајот, засилувањето на моќноста како:

$$A_p = \frac{P_{iz}}{P_{vl}} = A_u \cdot A_i \dots\dots\dots(3.18)$$

ЗАПАМЕТИ !!!

***Графичката анализа е метод на одредување на параметрите преку динамичките карактеристики на активниот елемент за влезни сигнали со голема амплитуда.**

* Сигналот на излезот содржи еднонасочна и наизменична компонента.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. За какви влезни сигнали се користи графичката метода за одредување на засилувањето?
2. Објасно го добивањето на динамичката преносна и влезна карактеристика со помош на слика 3.10.

3.7. Видови конфигурации на засилувачи

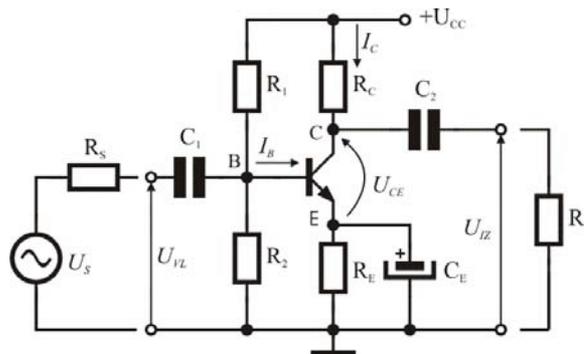
Засилувачот на мали сигнали е линеарен засилувач во кој промените на сигналот околу работната точка се доволно мали за да можат да се занемарат нелинеарните изобличувања и да се упростат пресметките на параметрите. Во практика тоа значи, промената на напонот на сигналот да не пречекори опсег од неколку стотици милivolти.

Во анализата се смета дека засилувачот работи во средниот дел на пропусниот опсег на фреквенции за кој е наменет. Овој опсег на фреквенциите на сигналот е доволно висок, така што сите кондензатори за спрега имаат ниска импеданса и се сметаат за краток спој за наизменичната компонента на сигналот. Освен тоа, импедансата на сите паразитни капацитивности на споевите на транзисторот е доволно висока, па тие претставуваат отворено коло и се запоставуваат.

Во средниот дел на пропусниот опсег, најголемиот број засилувачи има константно засилување со максимална вредност. Засилувањето опаѓа на краевите на регионот на пропусниот опсег.

3.7.1. Засилувач со конфигурација на заеднички емитер

Оваа конфигурација претставува најчесто употребуван спој на засилувач. Електричната шемата на засилувачот е дадена на **слика 3.12**.



Слика 3.12: Засилувач со биполарен транзистор со конфигурација на заеднички емитер.

Поларизација

Транзисторот ќе работи како засилувач кога неговите PN-споеви се правилно поларизирани и тоа емитерскиот спој да биде директно а колекторскиот инверзно поларизиран. Со делителот на напон, составен од отпорниците R_1 и R_2 , директно се поларизира емитерскиот PN-спој на транзисторот, односно се одредува струјата на базата, така што работната точка на транзисторот да се најде во активното подрачје и тој да работи како засилувач. Со отпорникот R_C се одредува положбата на работната права, а со отпорникот R_E се обезбедува температурна стабилизација на работната точка.

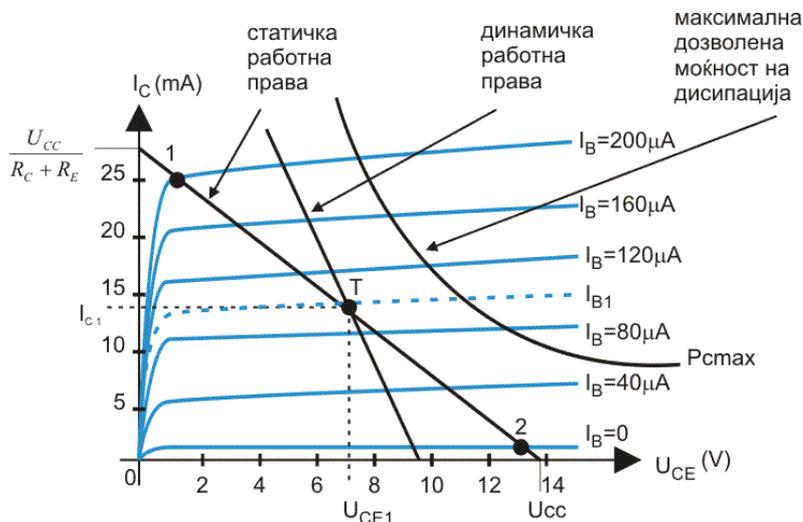
Паралелно приклучениот електролитски кондензатор C_E на отпорникот R_E прави краток спој за наизменичниот сигнал и го елиминира влијанието на овој отпорник врз засилувањето. Кондензаторите за спрега C_1 и C_2 , исто така претставуваат куса врска за наизменичниот сигнал. Од друга страна, овие кондензатори ја блокираат еднонасочната струја и се што е лево од кондензаторот C_1 и десно од кондензаторот C_2 нема влијание врз поларизацијата на транзисторот.

Со прифаќање на условот $I_C \gg I_B$, важи релацијата:

$$U_{CC} = U_{CE} + (R_C + R_E)I_C \dots\dots\dots(3.19)$$

Ова е равенката на статичката работна права. Во излезните карактеристики на транзисторот, за работната права се бира најповолната положба, а тоа е да биде под хиперболата на максималната дозволена моќност на дисипацијата и да обезбеди најголем опсег на движење на работната точка во линеарниот дел на карактеристиките (слика 3.13). Од пресечната точка на работната права со апсцисната оска се одредува потребната вредност на напонот на еднонасочниот извор U_{CC} .

На работната права се одредува местото на работната точка, а со тоа се одредуваат вредностите на базната струја I_B , напонот U_{CE} и струјата I_C .



Слика 3.13: Графичко одредување на статичката работна точка на транзисторот.

Струјата на напонскиот делител R_1 - R_2 е многу поголема од струјата на базата I_B

$$\frac{U_{CC}}{R_1 + R_2} \gg I_B \dots\dots\dots(3.20)$$

Ако се запостави базната струја, струјата на делителот ќе биде:

$$I_{R_1} \approx I_{R_2} \approx \frac{U_{CC}}{R_1 + R_2}, \dots\dots\dots(3.21)$$

а напонот на базата:

$$U_B = U_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \dots\dots\dots(3.22)$$

Напонот на емитерот U_E е:

$$U_E = U_B - U_{BE} = R_E I_E = R_E(I_C + I_B) \dots\dots\dots(3.23)$$

и така доаѓаме до вредноста на R_E :

$$R_E = \frac{U_E}{I_C + I_B} \approx \frac{U_E}{I_C} \dots\dots\dots(3.24)$$

Сега се одбира точната вредност на отпорот R_C преку напонот на колекторот:

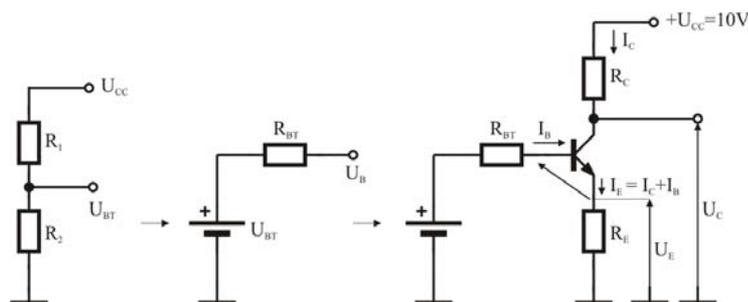
$$U_C = U_{CE} + U_E \dots\dots\dots(3.25)$$

$$R_C = \frac{U_{CC} - U_C}{I_C} \dots\dots\dots(3.26)$$

Со вака одбраните вредности за R_E и R_C се поставува работната точка, така што да ги задоволи специфицираните услови за поларизација.

Статичката работна линија се однесува само на статични услови на работа со колекторскиот и емитерскиот отпорник. За наизменична струја колекторскиот отпорник е паралелно врзан со отпорот на потрошувачот, а отпорникот R_E е кусо врзан со кондензаторот C_E , па динамичката работна права го менува аголот наспроти апцисната оска.

Ако не се применува претпоставката 3.20, колото за поларизација може да се трансформира според Тевененовата теорема (слика 3.14), за да се направи пресметката на струјата I_B .



Слика 3.14: Електрично коло на засилувачот за одредување на статичката работна точка.

$$U_{BT} = U_{cc} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \dots\dots\dots(3.27)$$

$$R_{BT} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \dots\dots\dots(3.28)$$

За контурата на колото база – емитер важи равенката:

$$U_{BT} - R_{BT} \cdot I_B - U_{BE} - I_E \cdot R_E = 0 \dots\dots\dots(3.29)$$

а за струјата I_B се добива:

$$I_B = \frac{I_E}{\beta + 1} \dots\dots\dots(3.30)$$

Стабилизацијата на работната точка при температурни промени со отпорникот R_E се одвива на следниов начин. Термичките промени во транзисторот се одвиваат бавно, промените на напонот на емитерот се бавни, и влијанието на кондензаторот C_E е незначително. Во емитерското коло кондензаторот како и да не постои. Со промената на температурата може да дојде до промена на некој од параметрите на транзисторот и да предизвика поместување на работната точка. Ако, на пример, дошло до поместување на работната точка нагоре, во насока на поголема колекторска струја, се зголемува и падот на напонот на отпорникот R_E и се намалува напонот база-емитер, затоа што напонот на базата не се менува, тој зависи само од напонот на изворот за напојување и од отпорниците R_1 и R_2 . Намалувањето на напонот U_{BE} предизвикува намалување на струјата I_B , а со тоа се намалува и струјата I_C . Краен резултат е дека струјата I_C се враќа на претходната вредност. Слична корекција се случува ако се помести работната точка и надолу по работната права. На овој начин отпорноста R_E ја држи работната точка приближно на исто место, односно ја стабилизира.

ЗАПАМЕТИ !!!

* Транзисторот работи како засилувач кога емитерскиот спој е директно, а колекторскиот инверзно поларизиран (за NPN транзистор $U_C > U_B > U_E$, за PNP транзистор $U_C < U_B < U_E$).

* За мали сигнали се сметаат сигналите кои предизвикуваат мала промена на положбата на работната точка, така што да не навлегува во нелинеарниот дел на карактеристиката.

* Во пропусниот опсег на засилувачот, кондензаторите за спрега и изворите за напојување се сметаат за краток спој во однос на наизменичната компонента на сигналот.

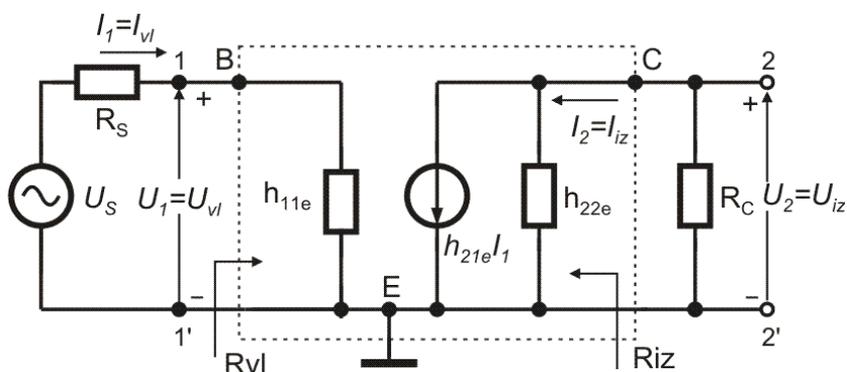
* Работната права се поставува така што да биде под хиперболата на дисипацијата.

* Со одредувањето на положбата на работната точка, се одредуваат вредностите на струјата на базата, напонот колектор – емитер и колекторската струја.

*Со отпорникот R_E , во колото на емитерот се постигнува стабилизација на работната точка при температурните промени.

3.7.2. Аналитичка метода за пресметување на параметрите на засилувачите

За пресметките на засилувањето ќе користиме еквивалентна шема на транзисторскиот засилувач на наизменични напони и струи за транзистор во спој со заеднички емитер, од сл. 3.12. Еквивалентната шема е дадена на **слика 3.15**. Во шемата не е внесен изворот за еднонасочен напон U_{CC} , кој претставува краток спој за наизменичната струја. Исто така, изоставени се отпорниците R_1 и R_2 поради тоа што нивните вредности се многу поголеми од вредноста на параметрот h_{11e} , отпорникот R_E , кој е премостен со кондензаторот C_E за наизменичната компонента на сигналот и отпорникот R_L за засилувачкиот степен да не биде оптоварен и пресметката да биде поедноставна. Знаците + и – на стрелките кои се означени на напоните ја претставуваат поларизацијата на наизменичниот напон во еден момент, во кој се гледаат сите наизменични напони во колото за да се знае дали се меѓусебно во фаза или во спротивна фаза.



Слика 3.15: Еквивалентно коло на засилувач со заеднички емитер.

Системот на равенките со хибридни параметри за колото од слика 3.15 ќе биде:

$$\begin{aligned} U_1 &= h_{11e} I_1 + h_{12e} U_2 \\ I_2 &= h_{21e} I_1 + h_{22e} U_2 \end{aligned} \dots\dots\dots (3.31)$$

Напонот на излезот U_2 е:

$$U_2 = - R_c I_2 , \dots\dots\dots (3.32)$$

па следува:

$$I_2 = - \frac{U_2}{R_c} . \dots\dots\dots (3.33)$$

Со внесување на изразот (3.33) во втората од системот равенки (3.31) и решавање на равенката по I_1 се добива:

$$I_1 = -\frac{U_2}{h_{21e}} \left(\frac{1}{R_C} + h_{22e} \right).$$

Сега овој израз за I_1 ќе го внесеме во првата равенка од системот (3.31) и по средувањето добиваме:

$$U_1 = -U_2 \left(\frac{h_{11e} + R_C(h_{11e}h_{22e} - h_{12e}h_{21e})}{h_{21e}R_C} \right).$$

Овој израз се упростиува со воведување на:

$$\Delta h_e = h_{11e}h_{22e} - h_{12e}h_{21e} \dots\dots\dots(3.34)$$

и тогаш е:

$$U_1 = -U_2 \frac{h_{11e} + R_C\Delta h_e}{h_{21e}R_C} \dots\dots\dots(3.35)$$

Од овој израз лесно може да се добие **напонското засилувањето** како:

$$A_u = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = \frac{U_2}{U_1} = -\frac{h_{21e}R_C}{h_{11e} + R_C\Delta h_e}, \dots\dots\dots(3.36)$$

Негативниот знак во изразот за засилување на напонот покажува дека излезниот и влезниот напон се поместени фазно за 180° .

Со замена на изразот (3.27) во втората равенка на системот равенки (3.26) и со повторени математички операции како претходно, се добива изразот за струјата I_2 :

$$I_2 = -\frac{h_{21e}I_1}{1 + h_{22e}R_C} \dots\dots\dots(3.37)$$

Струјното засилување ќе биде:

$$A_i = \frac{I_{iz}}{I_{vl}} = \frac{I_2}{I_1} = -\frac{h_{21e}}{1 + h_{22e}R_C} \dots\dots\dots(3.38)$$

Засилувањето на моќноста е производ на напонското и струјното засилување, па имаме:

$$A_p = A_u \cdot A_i = \frac{h_{21e}^2 R_C}{(h_{11e} + R_C\Delta h_e)(1 + h_{22e}R_C)} \dots\dots\dots(3.39)$$

За повеќето транзисторски засилувачки кола важат следниве апроксимации:

$$h_{11e} \gg R_C\Delta h_e \text{ и } h_{22e}R_C \ll 1.$$

Со овие апроксимации изразите за засилување на напонот, струјата и моќноста стануваат:

$$A_u \approx -\frac{h_{21e}}{h_{11e}} R_C = -\frac{h_{fe}}{h_{ie}} R_C \dots\dots\dots(3.40)$$

$$A_i \approx h_{21e} = -h_{fe} \dots\dots\dots(3.41)$$

$$A_p \approx \frac{h_{21e}^2 R_C}{h_{11e}} = \frac{h_{fe}^2 R_C}{h_{ie}} \dots\dots\dots(3.42)$$

Влезната отпорност на засилувачот се одредува под услов излезниот напон U_{iz} да е еднаков на нула, при што отпаѓа напонскиот генератор на влезот, па имаме:

$$R_{vl} = \frac{U_{vl}}{I_{vl}} = h_{11e} = h_{ie} \dots \dots \dots (3.43)$$

Излезната отпорност се одредува под услов влезното коло да е отворено, при што отпаѓа струјниот генератор, па имаме:

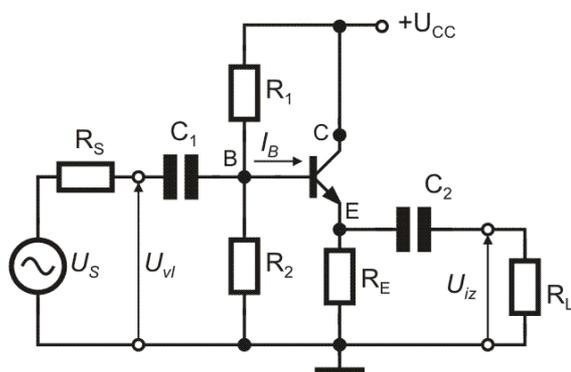
$$R_{iz} = \frac{U_{iz}}{I_{iz}} = \frac{1}{h_{22e}} = \frac{1}{h_{oe}} \dots \dots \dots (3.44)$$

Напонското засилување е линеарно зависно од вредноста на отпорот на оптоварувањето и обично има голема вредност. Струјното засилување на засилувачот е еднакво на струјното засилување на транзисторот, влезниот отпор на засилувачот е еднаков на влезниот отпор на транзисторот, а излезниот е обратно пропорционален на излезната спроводливост на транзисторот.

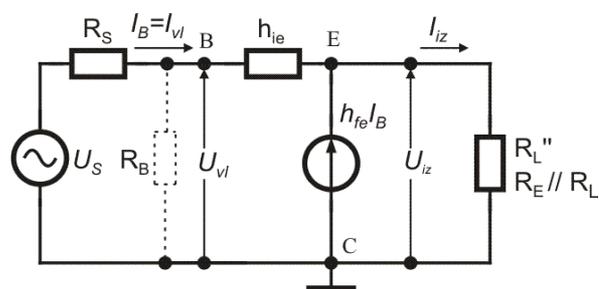
3.7.3. Засилувач со конфигурација на заеднички колектор

Во оваа конфигурација, сигналот се носи на базата на транзисторот исто како и за спојот со заеднички емитер, а излезот се добива од емитерот (**слика 3.16а**). Колекторот е директно врзан на изворот за напојување U_{CC} , кој за наизменичниот сигнал претставува краток спој. На тој начин, колекторот е поврзан на маса и претставува заедничка електрода за влезот и за излезот. Со отпорникот R_E се одредува работната права и работната точка на транзисторот, на начин кој веќе е опишан кај степенот со заеднички емитер.

Еквивалентната шема на степенот за наизменични сигнали е дадена на **слика 3.16б**. Во шемата, транзисторот е прикажан со h -параметри за спој со заеднички емитер, за да може да се прави споредба со степенот со заеднички емитер. Претпоставките од степенот за спој со заеднички емитер во однос на C_1 , C_2 , U_{CC} и R_B се земени предвид, а паралелната врска на R_E и R_L е заменета со R_L'' .



Слика 3.16а: Засилувач во спој со заеднички колектор.



Слика 3.16б: Еквивалентна шема за наизменичен сигнал.

За излезната струја, која тече во паралелната врска R_L , според II Кирхофов закон за точката E важи:

$$I_{iz} = h_{fe} I_B + I_B = (h_{fe} + 1) I_B \dots \dots \dots (3.45)$$

Струјното засилување се пресметува како:

$$A_I = \frac{I_{iz}}{I_{vl}} = \frac{(h_{fe} + 1) I_B}{I_B} = h_{fe} + 1 \dots \dots \dots (3.46)$$

Овој израз покажува, со оглед на тоа што е $h_{fe} \gg 1$, дека струјното засилување е многу поголемо од 1.

Влезниот отпор R_{vl} се одредува според I Кирхофов закон како:

$$R_{vl} = \frac{U_{vl}}{I_B} = \frac{h_{ie} I_B + U_{CE}}{I_B} \dots \dots \dots (3.47)$$

Со внесување на изразот 3.44 во равенката за U_{CE} се добива:

$$U_{CE} = R_L'' I_{iz} = R_L'' (1 + h_{fe}) I_B \dots \dots \dots (3.48)$$

и сега со внесување на (3.48) во изразот (3.47) добиваме:

$$R_{vl} = \frac{h_{ie} I_B + R_L'' (1 + h_{fe}) I_B}{I_B} = h_{ie} + R_L'' (1 + h_{fe}) \dots \dots \dots (3.49)$$

Големата вредност на h_{fe} прави влезната отпорност да има голема вредност.

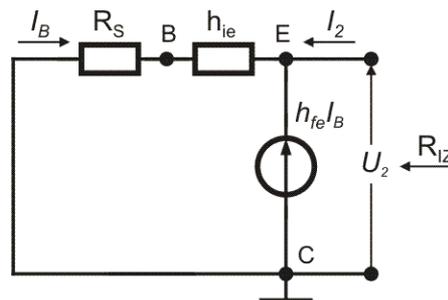
Напонското засилување може да се одреди според:

$$A_U = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = \frac{U_{CE}}{R_{vl} I_B} = \frac{R_L'' (1 + h_{fe}) I_B}{h_{ie} I_B + R_L'' (1 + h_{fe}) I_B} = \frac{R_L'' (1 + h_{fe})}{h_{ie} + R_L'' (1 + h_{fe})} \dots \dots \dots (3.50)$$

Во овој израз броителот е помал од именителот, што значи дека напонското засилување е помало од 1.

Овој засилувач не внесува фазно свртување на сигналот.

Да се одреди излезниот отпор, треба кратко да се спои изворот на сигналот U_S и да се исклучи паралелната врска R_L . Сега еквивалентната шема добива форма како на **слика 3.17**.



Слика 3.17: Еквивалентна шема за пресметување на излезниот отпор.

Повторно, преку Кирхофовите закони, доаѓаме до равенките:

$$I_2 = -I_B - h_{fe} I_B = -(1 + h_{fe}) I_B \dots \dots \dots (3.51)$$

$$U_2 = -I_B(R_S + h_{ie}) \dots \dots \dots (3.52)$$

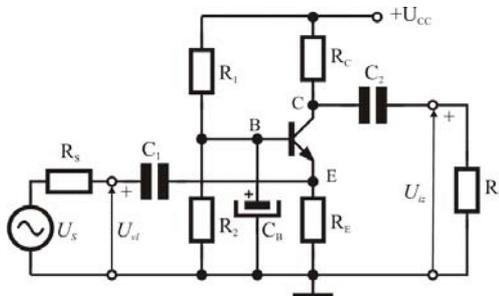
$$R_{iz} = \frac{U_2}{I_2} = \frac{R_S + h_{ie}}{1 + h_{fe}} \dots \dots \dots (3.53)$$

Излезната отпорност е многу мала, таа е со вредност од неколку десетина Ω .

Засилувачот во спој со заеднички колектор (познат и како емитерски следител) ја засилува само струјата, а напонското засилување е блиску до 1. Тој има голем влезен и мал излезен отпор.

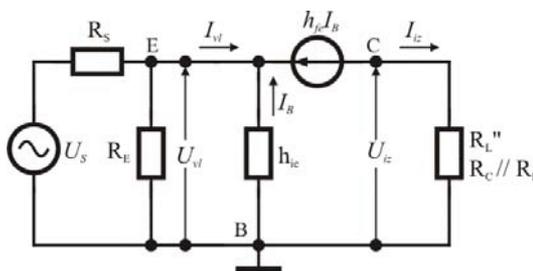
3.7.4. Засилувач со конфигурација на заедничка база

На **слика 3.18** е дадена шема на засилувачот со транзистор во спој со заедничка база. Треба да се истакне дека колото би било еквивалентно на состојбата кога на засилувач со заеднички емитер му се донесува истиот напон со спротивна фаза.



Слика 3.18: Шема на засилувач во спој со заедничка база.

Краен резултат е дека овој засилувач не внесува свртување на фазата на влезниот сигнал. Влезниот напон се приклучува меѓу емитерот и базата. Излезот се добива од колекторскиот приклучок. Базата е споена со масата за наизменичен сигнал преку електролитскиот кондензатор C_B .



Слика 3.19: Еквивалентна шема на засилувач во спој со заедничка база.

Еквивалентната шема на засилувачот е дадена на **слика 3.19**. Влезната струја овде е струјата што тече во отпорникот R_E , а излезната во паралелно врзаните отпорници R_C и R_L .

Од еквивалентната шема следува:

$$I_{iz} = -h_{fe} I_B \text{ и } I_{vl} = -I_B - h_{fe} I_B = -(1 + h_{fe}) I_B.$$

Струјното засилување се пресметува како:

$$A_I = \frac{I_{iz}}{I_{vl}} = -\frac{h_{fe} I_B}{-(1+h_{fe})I_B} = \frac{h_{fe}}{1+h_{fe}} \approx 1 \quad (3.54)$$

и е еднакво на 1.

Влезниот отпор е:

$$R_{vl} = \frac{U_{vl}}{I_{vl}} = -\frac{h_{ie} I_B}{-(1+h_{fe})I_B} = \frac{h_{ie}}{1+h_{fe}} \quad (3.55)$$

Влезниот отпор е многу мал, достигнува до неколку десетина оми.

Напонското засилување се пресметува како:

$$A_U = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = \frac{-h_{fe} I_B R_L''}{-h_{ie} I_B} = \frac{h_{fe} R_L''}{h_{ie}} \quad (3.56)$$

Напонското засилување е големо и е приближно еднакво на напонското засилување кај степенот со заеднички емитер.

Излезната отпорност е многу голема $R_{iz} \rightarrow \infty$.

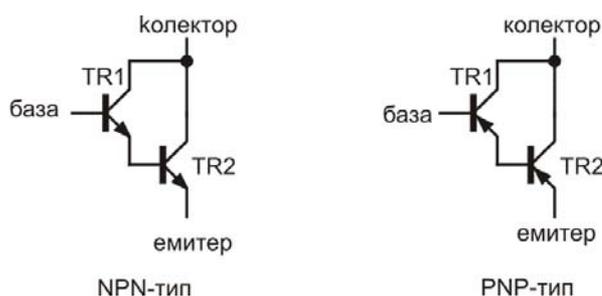
Во **табела 1** е дадено споредување на вредностите на одделни параметри за сите три конфигурации на засилувачи.

Табела 1

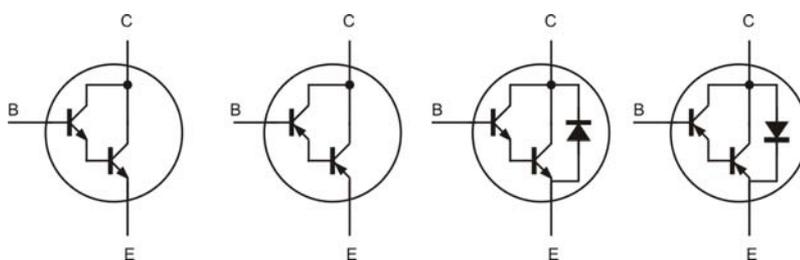
	заеднички емитер	заеднички колектор	заедничка база
Струјно засилување A_I	$-h_{fe}$ големо	$1+h_{fe}$ големо	$\frac{h_{fe}}{1+h_{fe}} \cong 1$ мало
Влезна отпорност R_{vl}	h_{ie} средно голема	$h_{ie} + R_L''(1+h_{fe})$ голема	$\frac{h_{ie}}{1+h_{fe}}$ мала
Напонско засилување A_U	$\frac{-h_{fe} R_L''}{h_{ie}}$ големо	$\frac{R_L''(1+h_{fe})}{h_{ie} + R_L''(1+h_{fe})} \cong 1$ мало	$\frac{h_{fe} R_L''}{h_{ie}}$ големо
Излезна отпорност R_{iz}	∞ голема	$\frac{h_{ie} + R_S}{1+h_{fe}}$ мала	∞ голема

3.7.5. Дарлингтонова врска

Кога од транзисторот во засилувачот се бара да има голем коефициент на струјното засилување h_{fe} (на пример, 10 000), може да се примени специјална врска на два транзистора, наречена Дарлингтонова врска. Врската може да се направи со NPN или со PNP-транзистори (слика 3.20). Оваа врска има три изводи кои претставуваат еквивалентен колектор, база и емитер. Електричниот симбол на два биполарни транзистори во Дарлингтонова врска е даден на слика 3.21.



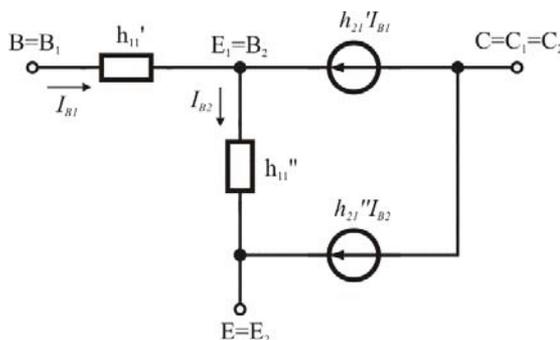
Слика 3.20: Структура на два биполарни транзистори во Дарлингтонова врска.



Слика 3.21: Електрични симболи на два биполарни транзистори во Дарлингтонова врска.

Дарлингтоновите транзистори можат да се користат во сите три конфигурации, но најчесто се употребуваат во конфигурација со заеднички емитер и заеднички колектор.

За примената на Дарлингтоновата врска важни се вкупните параметри h_{11e} и h_{21e} . Тие ќе бидат пресметани со помош на слика 3.22. За оваа пресметка се претпоставува дека струите на колекторот и на емитерот на едниот транзистор во врска се еднакви.



Слика 3.22: Еквивалентна шема на два биполарни транзистори во Дарлингтонова врска.

Струјата на базата на транзисторот TR1 е I_{B1} , а неговата колекторска струја ќе биде:

$$I_{C1} = h_{21}' I_{B1} \dots\dots\dots(3.57)$$

Тоа е едновремено и базната струја I_{B2} на транзисторот TR2, а неговата колекторска струја се пресметува според;

$$I_{C2} = h_{21}'' h_{21}' I_{B1} = h_{21e} I_{B1}$$

$$h_{21e} = h_{21}' h_{21}'' \dots\dots\dots(3.58)$$

Еквивалентниот коефициент h_{21e} на Дарлингтоновата врска е еднаков на производот на коефициентите h_{21} на одделните транзистори на спојот. Тој има голема вредност.

Влезната отпорност на Дарлингтоновата врска е голема, поголема од влезната отпорност на првиот транзистор во врска.

Дарлингтоновата врска се употребува за засилувачи од кои се бара големо засилување (струјно и напонско) и голема влезна отпорност. Од транзисторските стабилизатори се бара поголема струја и затоа се користат два биполарни транзистори во Дарлингтонова врска.

ЗАПАМЕТИ !!!

*** Засилувач во спој со заеднички емитер има:**

- големо напонско засилување;
- струјно засилување еднакво со коефициентот на струјното засилување на транзисторот;
- големо засилување на моќност;
- влезен отпор еднаков на влезниот отпор на транзисторот h_{ie} ;
- има фазно поместување на излезниот сигнал во однос на влезниот сигнал за 180° ;
- излезен отпор спротивно пропорционален на излезната спроводност на

транзисторот $\frac{1}{h_{oe}}$.

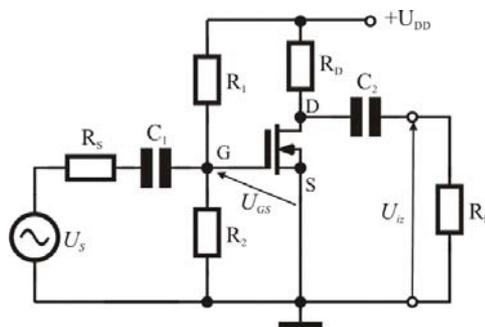
*** Засилувачот во спој со заеднички колектор (познат и како емитерски следител) ја засилува само струјата, а напонското засилување е блиску до 1. Тој има голем влезен, мал излезен отпор и не внесува фазно поместување.**

*** Напонското засилување на засилувач во спој со заедничка база е големо и приближно е еднакво на напонското засилување кај степенот со заеднички емитер. Струјното засилување е 1, влезниот отпор многу мал, излезниот многу голем и не внесува фазно поместување.**

*** Со Дарлингтонова врска се постигнува голем коефициент на струјното засилување h_{fe} .**

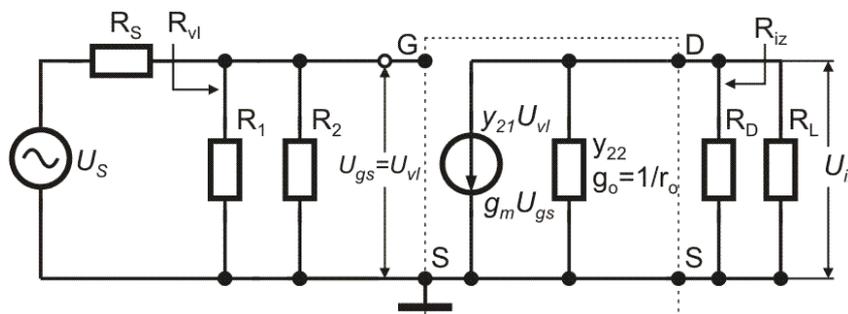
3.7.6. Засилувач со конфигурација на заеднички сорс

Електрична шема на еден засилувач со конфигурација на заеднички сорс со N -канален MOSFET е дадена на **слика 3.23**. Влезниот сигнал се приклучува на гејтот, излезот се зема од дрејнот, а сорсот е на потенцијалот на масата. Со отпорниците R_1 и R_2 се поларизира гејтот, а со R_D дрејнот, така што работната точка да се најде во активниот регион, во подрачјето на линеарниот дел на излезната карактеристика. За така поставената работна точка се одредуваат параметрите за мали сигнали.



Слика 3.23: Електрична шема на засилувач со MOSFET во конфигурација со заеднички сорс.

За еквивалентната шема на овој засилувач најпогодни се у-параметрите. Еквивалентната шема има форма како на **слика 3.24**.



Слика 3.24: Еквивалентна шема на засилувач во конфигурација со заеднички сорс.

Таа е нацртана врз база на веќе познатите однесувања на спрежните кондензатори C_1 и C_2 и на изворот на еднонасочен напон U_{DD} за наизменичната струја. MOSFET-от е претставен со неговиот модел за мали сигнали, во кој фигурира зависниот струен генератор:

$$y_{21}U_{vl} = g_m U_{gs} \dots\dots\dots (3.59)$$

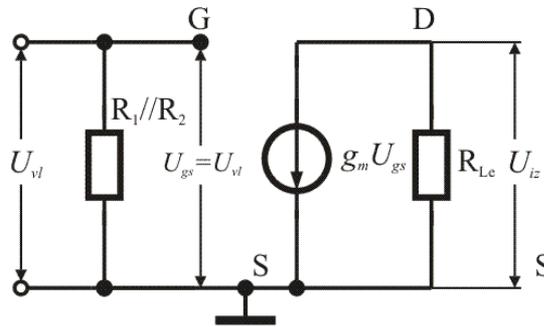
и излезната адмитанса

$$y_{22} = g_o = \frac{1}{r_o} \dots\dots\dots (3.60)$$

Со оглед на фактот дека струјата на гејтот е нула, влезното коло станува отворено и шемата добива уште поедноставна форма (слика 3.25).

Напонот на поларизацијата на гејтот се одредува според:

$$U_{GS} = U_{DD} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \dots\dots\dots(3.61)$$



Слика 3.25: Упростена еквивалентна шема.

Работната точка лежи некаде на карактеристиката U_{GS} , одредена со оваа равенка и таа ја одредува вредноста на струјата I_D . Сега може да се одреди напонот на дрејнот U_D :

$$U_D = U_{DD} - R_D I_D \dots\dots\dots(3.62)$$

со што прецизно е одредена положбата на работната точка.

Параметрите g_m и g_0 на MOSFET за мали сигнали можат да се мерат според дефинициите:

$$g_m \approx \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} / \Delta U_{DS} = 0 \quad \text{и} \quad g_0 = \frac{1}{r_0} \approx \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{DS}} / \Delta U_{GS} = 0$$

или да се извадат од каталозите на производителот.

Од еквивалентната шема следува:

$$U_{iz} = -g_m U_{gs} R_{Le} \quad \text{и} \quad \dots\dots\dots(3.63)$$

$$A_U = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = \frac{-g_m U_{gs} R_{Le}}{U_{gs}} = -g_m R_{Le} \dots\dots\dots(3.64)$$

Со овој засилувач се внесува фазно поместување од 180° .

Влезниот отпор на засилувачот R_{vl} е вкупниот еквивалентен отпор гледано во влезот на засилувачот. Тој изнесува:

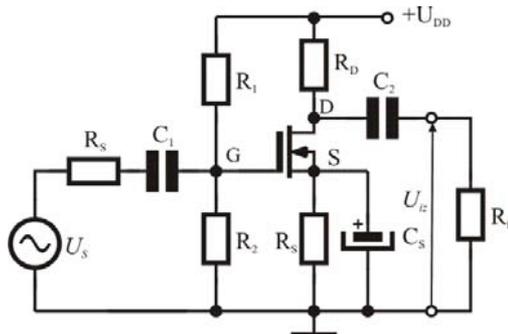
$$R_{vl} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \dots\dots\dots(3.65)$$

Излезниот отпор на засилувачот R_{iz} е вкупниот отпор гледан наназад во излезните краеве на засилувачот, без да се опфатени какви и да е надворешни отпори:

$$R_{iz} = \frac{r_0 R_D}{r_0 + R_D}.$$

.....(3.66)

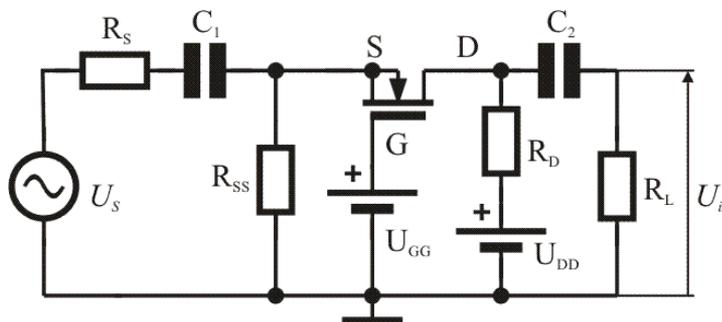
Во колото на сорсот може да се стави отпорник паралелно со електролитски кондензатор, со задача да врши температурна стабилизација на работната точка на начин кој веќе е опишан за засилувач со заеднички емитер (слика 3.26). Овој начин на поларизација се применува за MOSFET со вграден канал.



Слика 3.26: Електрична шема со температурна стабилизација на работната точка.

3.7.7. Засилувач со конфигурација на заеднички гејт

Принципиелната шема на засилувачот е дадена на слика 3.27. Одредувањето на местото на работната точка се прави исто како за засилувачот во спој со заеднички емитер, со тоа што сега гејтот е на потенцијалот на маса. Влезот е меѓу сорсот и гејтот, а излезот се зема од дрејнот.



Слика 3.27: Принципиелна шема на засилувач во спој со заеднички гејт.

Работната точка ќе ја поставиме во излезните карактеристики, одбирајќи ја вредноста на струјата I_D . Патеката на струјата I_D е од изворот U_{DD} , преку R_D , преку делот дрејн - сорс на мосфетот и преку R_{SS} . Падот на напонот на R_{SS} е:

$$U_{R_s} = I_D R_{SS} \dots\dots\dots(3.67)$$

а напонот на гејтот ќе биде:

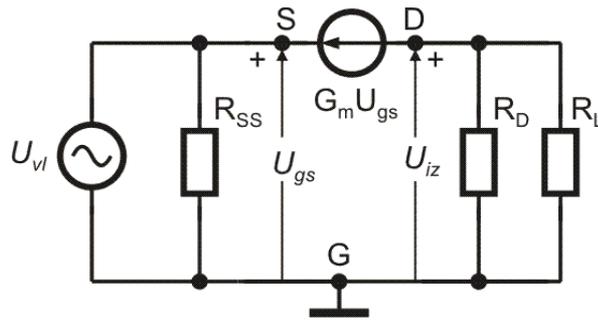
$$U_{GS} = U_{GG} - U_{R_{SS}} \dots\dots\dots(3.68)$$

Напонот U_{GG} може да се добие со напонски делител R_1, R_2 од напонот U_{DD} како:

$$U_{GG} = U_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \dots\dots\dots(3.69)$$

а напонот U_{DS} како:

$$U_{DS} = U_{DD} - (R_D + R_{SS})I_D.$$



Слика 3.28: Еквивалентна шема на засилувач во спој со заеднички гејт.

Со тоа е поставена работната точка и можат да се одредат и параметрите за мали сигнали на засилувачот со помош на еквивалентната шема на **слика 3.28**. Влезниот U_{vl} и излезниот U_{iz} сигнал се одредуваат според:

$$U_{vl} = -U_{gs} \text{ и } U_{iz} = -g_m U_{gs} R_{Le}, \dots\dots\dots(3.70)$$

$$\text{при што : } R_{Le} = \frac{R_D R_L}{R_D + R_L} \dots\dots\dots(3.71)$$

Напонското засилување е:

$$A_U = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = g_m R_{Le}. \dots\dots\dots(3.72)$$

Влезната отпорност во оваа конфигурација не е бесконечна. Од дефиницијата на зависниот струен извор $g_m U_{gs}$ произлегува дека промената на влезниот напон $U_{vl} = U_{gs}$ предизвикува промена на влезната струја искажана со $g_m U_{gs}$. Односот на влезниот напон и влезната струја го дава влезниот отпор на MOSFET како:

$$R_{mosfet} = \frac{-U_{gs}}{-g_m U_{gs}} = \frac{1}{g_m}. \dots\dots\dots(3.73)$$

Влезниот отпор на засилувачот е паралелна врска на R_{mosfet} и R_{SS} :

$$R_{vl} = \frac{R_{SS} \frac{1}{g_m}}{R_{SS} + \frac{1}{g_m}}. \dots\dots\dots(3.74)$$

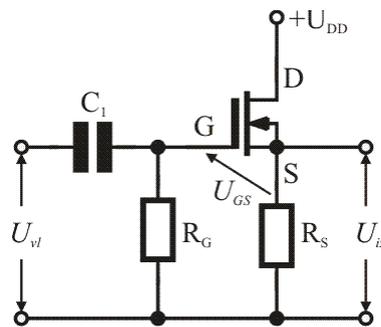
За засилувачот во спој со заеднички гејт, засилувањето е позитивно, значи не внесува фазно поместување од 180° и има мал влезен отпор. Колото на засилувачот може да се користи за приспособување на некој степен со мал излезен отпор со некој друг степен со голем влезен отпор, ако се стави меѓу нив.

3.7.8. Засилувач во конфигурација со заеднички дрејн

Електричната шема на овој засилувач со n-канален MOSFET е дадена на **слика 3.29**. Напонското засилување на ова коло е нешто помало од 1. Со ставање на моделот на MOSFET во еквивалентната шема за мали сигнали, како што претходно е веќе опишано, се добива :

$$A_U = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = \frac{g_m R_{Le}}{1 + g_m R_{Le}} \dots \dots \dots (3.75)$$

Овој засилувач има многу висока влезна и мала излезна отпорност и не го инвертира сигналот (не внесува фазно поместување).



Слика 3.29: Електрична шема на засилувач со n-канален MOSFET.

ЗАПАМЕТИ !!!

*Засилувач со MOSFET со конфигурација на заеднички сорс има напонско засилување кое зависи од вредноста на отпорот на оптоварувањето, влезниот отпор има голема вредност, а излезниот зависи од вредноста на излезниот отпор на MOSFET и фазно го свртува излезниот сигнал за 180° .

*Засилувач со MOSFET со кофигурација на заеднички гејт не внесува фазно поместување на сигналот и влезниот отпор има мала вредност.

*Засилувач со заеднички дрејн има напонско засилување единица, висока влезна и мала излезна отпорност, не внесува фазно поместување на сигналот.

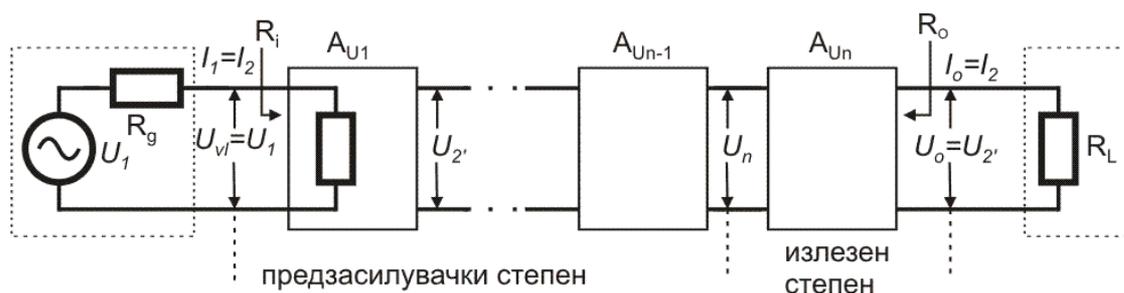
ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Како треба да бидат поларизирани PN-споевите на транзисторот за тој да работи како засилувач?
2. Со кој отпорник се одредува положбата на работната права?
3. Со кој отпорник се обезбедува температурна стабилизација на работната точка?
4. Која е улогата на кондензаторите C_1 и C_2 ?
5. Напиши ја равенката на статичката работна права.
6. Објасни ја стабилизацијата на работната точка со отпорникот R_E при температурни промени.
7. Изведи го аналитички изразот за напонското и струјното засилување на транзисторот во спој со заеднички емитер, заедничка база и заеднички колектор.
8. Изведи го аналитичкиот израз за напонското засилување на транзисторот во спој со заеднички сорс, заеднички гејт и заеднички дрејн.

3.8. Каскадно поврзани засилувачи

Еден засилувачки степен се дефинира како засилувачко коло кое користи еден транзистор. Кога системот бара поголемо засилување од засилувањето што го дава еден засилувачки степен, потребно е да се користи повеќестепен засилувач. Во повеќестепен засилувач, излезниот сигнал од претходниот степен се приклучува на влезот од следниот степен. Сигналот поминува по ред преку секој степен, при што секој степен придонесува за зголемувањето на засилувањето.

Примерот на засилувањето на нискофреквенциските сигнали од опсегот 20 Hz до 20 KHz е даден на **слика 3.30**. Изворот на сигналот U_1 , дава сигнал со моќност $10^{-6} W$ до $10^{-10} W$.



Слика 3.30: Каскадна врска на засилувачи.

Првиот степен на каскадата треба да обезбеди приспособување на изворот на сигналот со влезниот отпор на каскадата. Сигналот потоа се засилува во каскадно врзаните засилувачки степени 1 до n . Последниот засилувач во каскадата треба да се приспособи на отпорот на потрошувачот R_L во вид на звучник, глава за снимање, релеј и слично. Засилувачките степени во овој синџир, кои работат со сигнали со помала моќност се викаат предзасилу-

вачи и нивна задача е да се добие засилување на напонот со што е можно помали изобличувања. Излезните засилувачи даваат засилување на моќност. Излезната моќност може да се разликува за разни видови потрошувачи, како, на пример, за мали звучници од 1W, до разгласни станици од неколку стотини вати.

Ако се означи напонското засилување на засилувачките степени со $A_{U1}, A_{U2}, A_{U3}, \dots A_{Un}$, вкупното напонско засилување на каскадата ќе биде:

$$A_{U_{TOT}} = A_{U_1} A_{U_2} A_{U_3} \dots A_{U_n}, \dots \dots \dots (3.76)$$

каде што n претставува вкупен број на засилувачки степени.

За струјното засилување се добива:

$$A_{I_{TOT}} = A_{I_1} A_{I_2} A_{I_3} \dots A_{I_n} \dots \dots \dots (3.77)$$

Засилувањето на засилувачите често претставува голема бројка. Во тој случај, поповолно е напонското засилување да се искажува во децибели според релацијата:

$$A_U(dB) = 20 \log \left| \frac{U_{iz}}{U_{vl}} \right| = 20 \log |A_U| .$$

Кога засилувањето на одредени степени е изразено во децибели, за вкупното засилување се добива:

$$A_{TOT} = A_{U_1}(dB) + A_{U_2}(dB) + A_{U_3}(dB) + \dots A_{U_n}(dB). \dots \dots \dots (3.78)$$

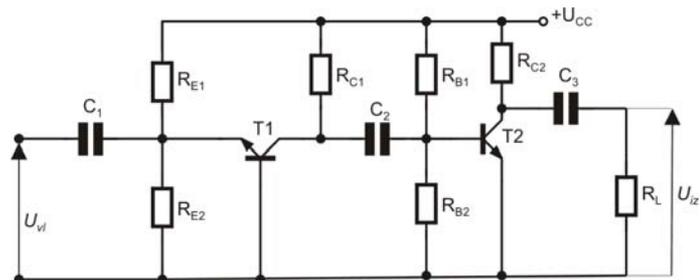
ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Каква конфигурација се користи кога системот бара поголемо засилување од засилувањето што го дава еден засилувачки степен?
2. Што треба да обезбеди првиот степен на каскадата?
3. Каков засилувач треба да биде последниот засилувач во каскадата и што треба да обезбеди?

3.9. Видови спреги меѓу засилувачи

Засилувачите во каскадата можат меѓусебно да се поврзуваат на три начини:

- со капацитивна спрега;
- со директна спрега;
- со трансформаторска спрега.



Слика 3.31: RC-спрега на два засилувача.

Капацитивната спрега се остварува со кондензатор приклучен меѓу излезот на претходниот и влезот на следниот степен. На **слика 3.31** е прикажана капацитивна спрега со кондензаторот C_2 меѓу степен со заедничка база со транзисторот T1 и степен со заеднички емитер со транзисторот T2. Освен што обезбедува пренос на наизменичниот сигнал од степен со T1 на степен со T2, кондензаторот C_2 овозможува работните точки на засилувачките степени да се поставуваат независно една од друга.

Во опсегот на средните и високите фреквенции на засилувачите, кондензаторот за спрега има многу мала импеданса и ги пропушта без слабеење. Неговата импеданса се зголемува за ниските фреквенции и тој ќе ги пропушта сигналите само до одредена граница кога засилувањето на сигналот ќе се намали за повеќе од половина.

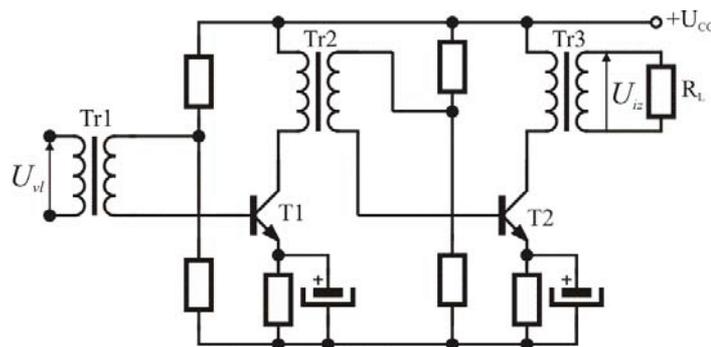
На формата на фреквенциската карактеристика најголемо влијание имаат RC-членовите присутни на влезот, на излезот и на другите места во засилувачот. Секој од овие членови дејствува како високопропусен филтер и ја ограничува карактеристиката при ниските фреквенции. Долната гранична фреквенција на таков филтер е одредена со вредностите на капацитивноста и сите паралелно врзани отпорности според:

$$f_L = \frac{1}{2\pi R_{ekv} C_{ekv}} \dots \dots \dots (3.79)$$

За засилувач со повеќе RC-членови, како на слика 3.31, долната гранична фреквенција е одредена со највисоката гранична фреквенција на едниот од нив.

Истата анализа се применува и за засилувачите со MOSFET.

За **трансформаторската спрега** самото име кажува дека сигналот меѓу два соседни засилувачки степени се пренесува со трансформатор (**слика 3.32**).

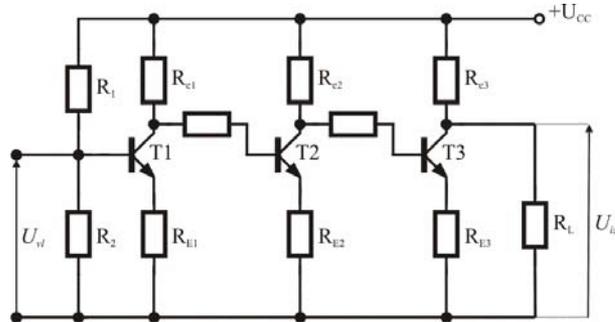


Слика 3.32: Трансформаторска спрега.

Трансформаторската спрега, исто како и капацитивната, обезбедува независно поставување на работните точки на засилувачите, бидејќи не дозволува пренос на едностраната компонента, а обезбедува пренос на наизменичната компонента на сигналот. Со изборот на бројот

на навивките се постигнува приспособување на влезниот или излезниот отпор на засилувачот.

Директна спрега меѓу засилувачите се обезбедува со отпорник или со зенер диода на местото на кондензаторот за спрега (слика 3.33). Со оваа спрега е овозможено пренесување на еднонасочната компонента, како и на сигналите со многу ниска фреквенција.



Слика 3.33: Директна спрега.

Спрежниот отпорник внесува пад на напонот на сигналот и сигналот се ослабува пред да се пренесе на следниот степен. Освен тоа, промената на работната точка се однесува како нискофреквенциски сигнал кој се пренесува на следниот степен и претставува сигнал на пречка.

Отстапувањето на работната точка може да биде предизвикано од промена на температурата на транзисторот, кое се менува по одреден закон, или отстапувања со случаен карактер, предизвикани од промената на напонот на напојувањето, или од промената на параметрите на елементите со време (старење).

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

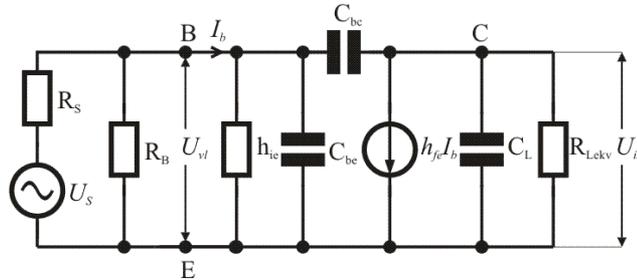
1. Кои се начините на меѓусебното поврзување на засилувачите во каскадата?
2. Која е улогата на кондензаторот за спрега при различни фреквенции?
3. Од што зависи долната гранична фреквенција на засилувач со капацитивна спрега?
4. Како се обезбедува директната спрега?

3.10. Засилувач при високи фреквенции

Во средниот и повисокиот дел од фреквенцискиот појас на засилувачот, реактансите на спрежните и на кондензаторите за премостување се мали и тие се сметаат за кратки споеви. Но, со натамошното зголемување на фреквенцијата, се јавуваат други капацитивности кои имаат влијание врз фреквенциската карактеристика. Капацитивностите кои ја ограничуваат работата при високите фреквенции се малите капацитивности на споевите на

транзисторот или MOSFET, како и другите мали паразитни капацитивности. Нивните вредности обично се изразени во pF, за разлика од спрежните, кои достигнуаат вредности и до неколку μF .

Засилувач со заеднички емитер



Слика 3.34: Еквивалентна шема на засилувач со заеднички емитер при високи фреквенции.

Еквивалентната шема на колото на засилувачот со заеднички емитер за високи фреквенции е дадена на **слика 3.34**. Напонското засилување во опсегот на средните фреквенции изнесува:

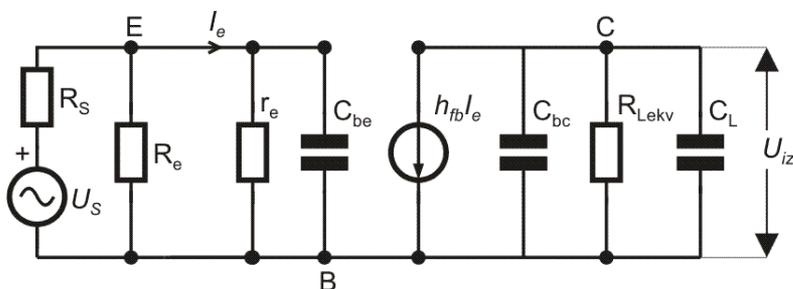
$$A_U = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = \frac{-h_{fe} R_{Lekv}}{h_{ie}} \quad \dots \dots \dots (3.80)$$

Горната гранична фреквенција е одредена со најниската горна гранична фреквенција на еден од RC-членовите на колото. Доминантна улога овде има капацитивноста C_{bc} , која игра улога на повратна врска.

Засилувач со заедничка база

Карактеристиката на засилувачот на мали сигнали во спој со заедничка база е повеќе проширена во областа на високите фреквенции во однос на карактеристиката на спојот со заеднички емитер. **Засилувачот во спој со заедничка база не ја свртува фазата на сигналот и нема капацитивност која создава повратна врска.** Влезната отпорност е релативно мала, r_e е помало од r_b за факторот $1 + h_{fe}$. Тоа ја прави влезната временска константа $r_e C_{be}$ помала, а горната гранична фреквенција повисока.

Еквивалентното коло на засилувачот во спој со заедничка база е дадено на **слика 3.35**.

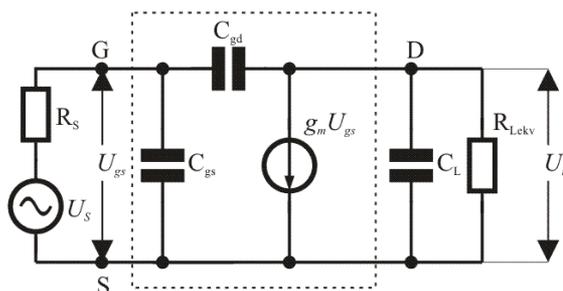


Слика 3.35: Еквивалентна шема на засилувач со заедничка база при високи фреквенции.

Засилувач со заеднички сорс

Еквивалентната шема на колото на засилувачот на мали сигнали во спој со заеднички сорс е дадено на **слика 3.36**. Во шемата е внесен моделот на MOSFET од слика 2.42, а засилувањето при средните фреквенции изнесува:

$$A_U = -g_m R_{Lekv} \dots\dots\dots(3.81)$$

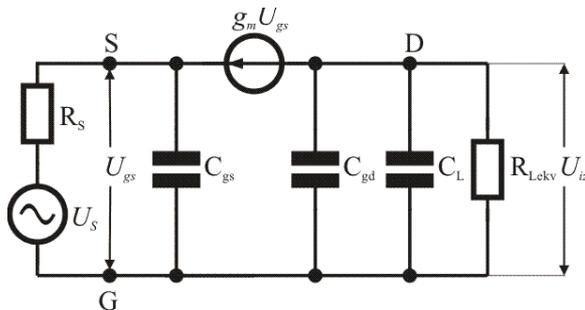


Слика 3.36: Еквивалентна шема на засилувач со заеднички сорс при високи фреквенции.

Во шемата е внесена и капацитивноста на оптоварувањето C_L во паралела со R_L . Најголемиот број реални оптоварувања имаат капацитивна компонента. Горната гранична фреквенција е одредена со колото на гејтот.

Засилувач со заеднички гејт

Еквивалентното коло на засилувачот со заеднички гејт е дадено на **слика 3.37**. Во оваа конфигурација нема капацитивност со улога на повратна спрега и колото на дрејнот ја одредува горната гранична фреквенција. Пропусниот опсег на овој засилувач е поширок од оној на претходниот со заеднички сорс.



Слика 3.37: Еквивалентна шема на засилувач со заеднички гејт при високи фреквенции.

Засилувач со заеднички колектор и со заеднички дрејн

Главна карактеристика на овие конфигурации е малата излезна отпорност и тие често се нарекуваат напонски следители, зашто нивното напонско засилување е приближно единица. Излезниот дел на овие кола има многу висока горна гранична фреквенција, речиси еднаква на граничната фреквенција на транзисторот, односно MOSFET. Влезниот дел може да има висока влезна отпорност, но влезната капацитивност е мала и тој овозможува доста висока горна гранична фреквенција. Како заклучок, овие кола не ја ограничуваат вкупната фреквенциска карактеристика за високите фреквенции во повеќестепени засилувачки кола.

ЗАПАМЕТИ !!!

* Каскадната врска содржи повеќе засилувачки степени со приспособување на изворот на сигналот на влезот, на излезот кон оптоварувањето и со меѓусебното приспособување на засилувачките степени.

* Вкупното засилување на каскадата е производ на засилувањата на одделните засилувачки степени. Ако се мерат во dB, вкупното засилување е збир на поединечните засилувања искажани во dB.

* Засилувачките степени во каскадата меѓусебно се поврзуваат: капацитивно, директно или со трансформаторска врска.

* Капацитивностите на PN-споевите на трансформаторот и MOSFET ја одредуваат горната гранична фреквенција на засилувачите при високи фреквенции.

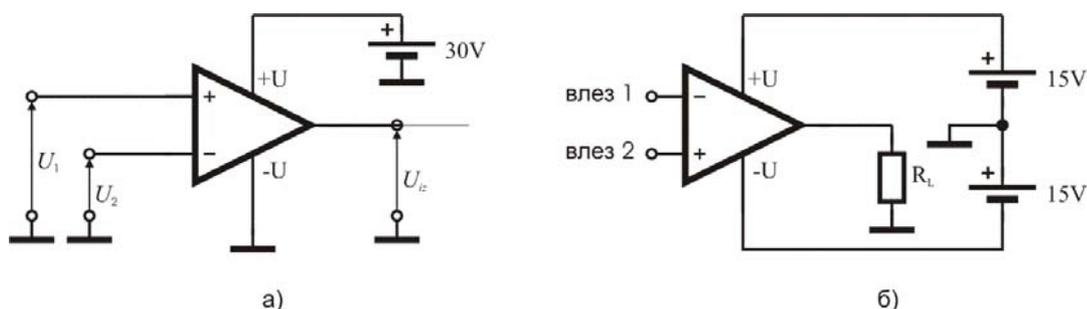
ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Која капацитивност има доминантна улога кај транзистор во спој со заеднички емитер при високи фреквенции?
2. Дали транзистор во спој со заедничка база при високи фреквенции има капацитивност која создава повратна врска?
3. Кое коло ја одредува горната гранична фреквенција кај транзистор во спој со заеднички сорс, а кое кај транзистор во спој со заеднички гејт?
4. Кои конфигурации се нарекуваат напонски следители и зошто?

3.11. Диференцијален засилувач

Диференцијален засилувач е засилувач со два влеза, едниот се вика инвертирачки и се означува со "-", а другиот неинвертирачки и се означува со "+". На двата влеза се носат два различни сигнала, U_1 и U_2 . Засилувачот има само еден излез.

Блок-шема на диференцијален засилувач е дадена на **слика 3.38а**. Напонот за напојување може да биде единечен, како на слика 3.1, или двоен, како на **слика 3.38б**. Точката на масата "електрички" се одредува меѓу вредностите $+U$ и $-U$.



Слика 3.38: Блок-шема на диференцијален засилувач.

На двата влеза се приклучуваат два влезни сигнали и диференцијалниот засилувач ја засилува нивната разлика.

Разликата на двата влезни напони се нарекува **диференцијален напон** и се означува со U_d .

Влезниот диференцијален сигнал е:

$$U_d = U_2 - U_1, \dots\dots\dots(3.82)$$

а диференцијалното засилување A_d :

$$A_d = \frac{U_{iz}}{U_d}. \dots\dots\dots(3.83)$$

Истофазен сигнал U_c се дефинира како средна вредност на двата влезни напони:

$$U_c = \frac{U_1 + U_2}{2}, \dots\dots\dots(3.84)$$

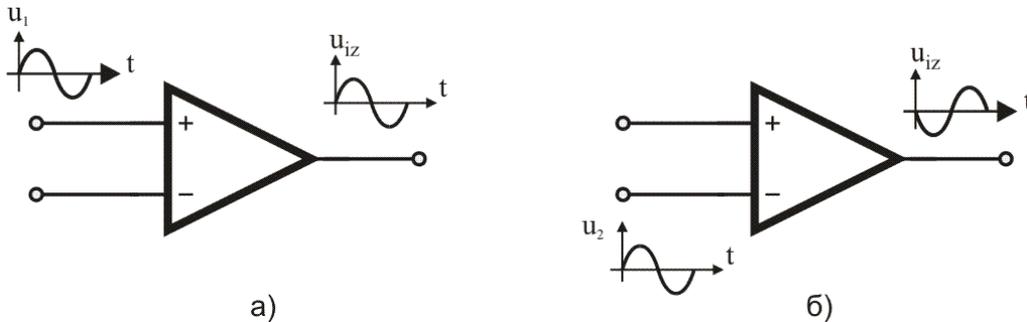
а истофазното засилување A_c како:

$$A_c = \frac{U_{iz}}{U_c}. \dots\dots\dots(3.85)$$

Излезниот напон на диференцијалниот засилувач U_{iz} зависи од двата вида влезни сигнала според релацијата:

$$U_{iz} = U_d A_d + U_c A_c. \dots\dots\dots(3.86)$$

Секој од влезовите има спротивно влијание врз излезот. На слика 3.39 графички се прикажани влезните и излезните сигнали за диференцијален засилувач.



Слика 3.39: Графичко прикажување на влезните и излезните сигнали.

Поради промената на фазата, (-) влезот се вика **инвертирачки**, а (+) влезот **неинвертирачки**. Анализата може да се сумира на следниов начин: кога поларитетот на диференцијалниот напон се совпаѓа со влезните ознаки, излезот ќе биде позитивен, а кога е спротивен, излезот е негативен.

Задачата на диференцијалниот засилувач е да ја засили диференцијата – разликата на напоните на влезните сигнали и да не реагира на напонските промени кои се јавуваат во иста насока на двата влеза. За идеален диференцијален засилувач, истофазното засилување е нула, излезниот напон не зависи од истофазниот сигнал. Добар реален засилувач треба да има многу мало истофазно засилување, а факторот на потиснувањето на истофазниот сигнал, изразен како:

$$\rho = \frac{|A_d|}{|A_c|}. \dots\dots\dots(3.87)$$

треба да биде што е можно поголем.

Овој фактор може да се изрази и во децибели како:

$$\rho(dB) = 20 \log \frac{|A_d|}{|A_c|} \dots\dots\dots(3.88)$$

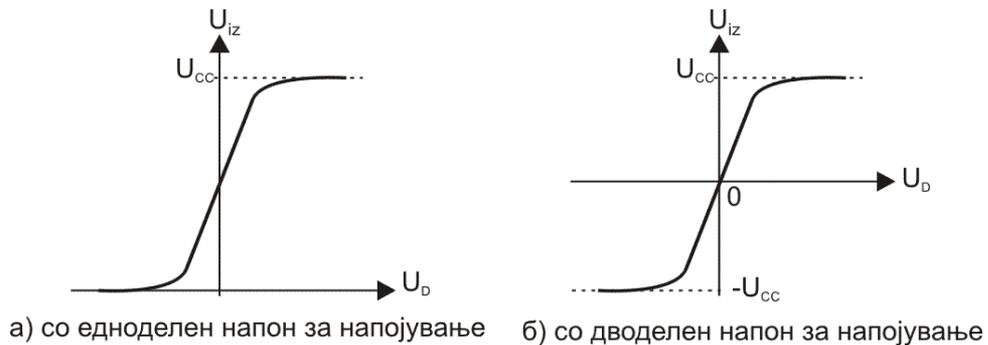
или

$$\rho(dB) = A_d(dB) - A_c(dB). \dots\dots\dots(3.89)$$

Важна особина на диференцијалниот засилувач е што ги елиминира несаканите сигнали и шумот. Кога се носи диференцијален сигнал од оддалечено место, во двете доводни жици може да се индуцира несакан сигнал како истофазен сигнал. Ако истофазното засилување е мало, тој ќе биде елиминиран, а бараниот диференцијален сигнал ќе биде засилен за факторот A_d .

3.11.1. Преносна карактеристика на диференцијален засилувач

Преносната карактеристика на диференцијалниот засилувач е дадена на **слика 3.40**.



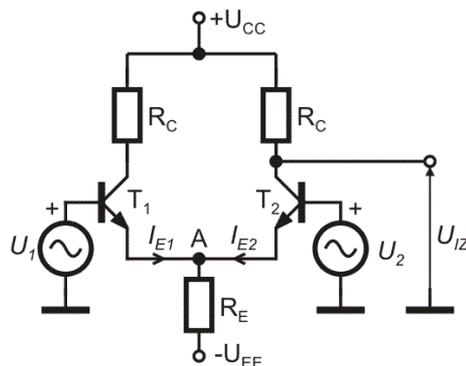
Слика 3.40: Преносна карактеристика на диференцијален засилувач.

Работното подрачје, одредено со положбата на работната точка, се наоѓа на стрмниот дел од карактеристиката. За подрачјето надвор од работното подрачје, засилувачот е во состојба на заситување, што значи колку и да се зголемува диференцијалниот влезен напон, излезниот напон не може да ја пречекори вредноста на напонот на напојувањето во негативната или во позитивната насока.

3.11.2. Реална конфигурација на диференцијален засилувач

Колото на основниот диференцијален засилувач со биполарен транзистор е дадено на **слика 3.41**. Колото е симетрично околу вертикалната линија преку средината. Слично е и колото изведено со MOSFET.

За одредување на положбата на работната точка се користат два извора за напојување $+U_{CC}$ и $-U_{EE}$. Ако нема сигнали на влезовите, U_1 и U_2 се нула и базите на двата транзистора се на потенцијалот на масата.



Слика 3.41: Електрична шема на диференцијален засилувач.

Емитерските споеви се директно поларизирани, а емитерите се на напон $-0,7\text{ V}$. Струјата преку отпорникот R_E се одредува според:

$$I_{RE} = \frac{-0,7V - (-U_{EE})}{R_E} \dots\dots\dots(3.90)$$

Ако транзисторите се симетрични (со еднакви карактеристики), може да се напише:

$$I_{E1} = I_{E2} = \frac{1}{2} I_{RE} \dots\dots\dots(3.91)$$

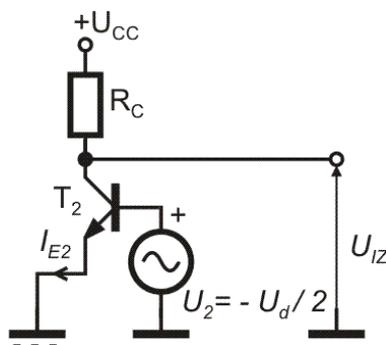
Ова претставува важен момент за разбирањето на диференцијалниот засилувач. Со напонот $-U_{EE}$ и отпорникот R_E се одредува базната струја во работната точка на секој транзистор, а со влезните напони U_1 и U_2 се одредува како базната струја ќе се распореди меѓу двете страни на засилувачот.

3.11.3. Диференцијално засилување

Идеален диференцијален засилувач има само диференцијално засилување, а засилувањето на истофазните сигнали е еднакво на нула. Во таков случај имаме:

$$U_1 = \frac{U_d}{2} \text{ и } U_2 = \frac{-U_d}{2} \text{ и со зголемувањето на диференцијалниот сигнал } U_1 \text{ се зголемува во}$$

позитивната, а U_2 во негативната насока. Емитерската струја I_{E1} на едниот транзистор ќе се зголеми, а I_{E2} на другиот ќе се намали. Вкупната струја преку R_E не се менува, напонот на точката А не се менува, како да е на маса. Поради тоа, точката А се вика виртуелна маса за наизменичен сигнал.



Слика 3.42: Половина од диференцијален засилувач во спој со заеднички емитер.

Сега анализата се упростува, така што половината од диференцијалниот засилувач станува обичен емитерски засилувач, прикажан на **слика 3.42**. Неговото засилување е големо, тоа е диференцијалното засилување на целиот засилувач:

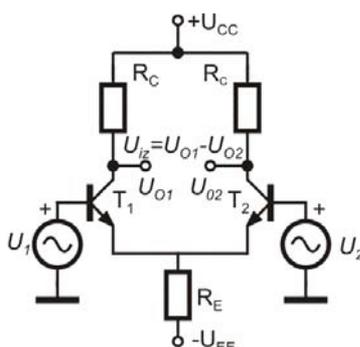
$$A_d \approx \frac{R_C}{2h_{ie}}. \quad \dots\dots\dots(3.92)$$

За одредени намени, излезот може да биде приклучен на двата колектора, како што е прикажано на **слика 3.43**. Со ова коло се добива диференцијален излезен напон, дефиниран со:

$$U_{iz} = U_{iz1} - U_{iz2} \quad \dots\dots\dots(3.93)$$

и тој е два пати поголем од претходниот пример. Засилувањето на ова коло е:

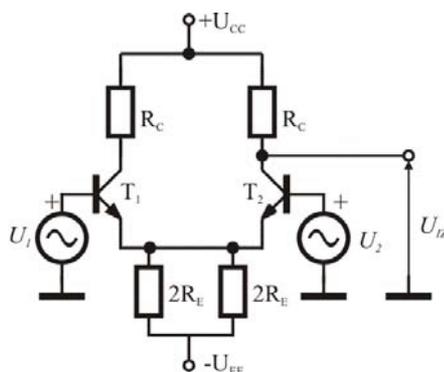
$$A_d \approx \frac{R_C}{h_{ie}}. \quad \dots\dots\dots(3.94)$$



Слика 3.43: Диференцијален засилувач со излез помеѓу два колектора.

3.11.4. Истофазно засилување

За анализа на истофазното засилување отпорноста R_E од шемата од слика 3.40 може да се подели на два еднакви дела, секој со вредност $2R_E$, како што е дадено на **слика 3.44**.



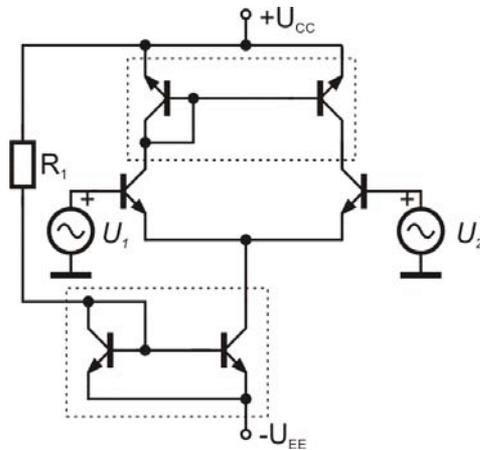
Слика 3.44: Диференцијален засилувач за пресметка на истофазното засилување.

Повторно, секоја половина од колото е засилувач со заеднички емитер, а под услов вредноста на R_E да е многу поголема од h_{ie} , истофазното засилување ќе биде:

$$A_C \approx \frac{R_C}{2R_E}. \dots\dots\dots(3.95)$$

За поголема вредност на факторот на потиснување треба да се зголеми A_d со зголемување на h_{fe} и R_C , или да се намали A_C со зголемување на отпорноста R_E .

Отпорноста на R_E не може да се зголемува неограничено, со тоа се намалува струјата низ транзисторите и диференцијалното засилување. Подобро решение се добива ако на местото на R_E и на R_C се вгради струен генератор, како на **слика 3.45**. Оваа конфигурација често се користи во модерни интегрирани диференцијални засилувачи или во операциски засилувачи.

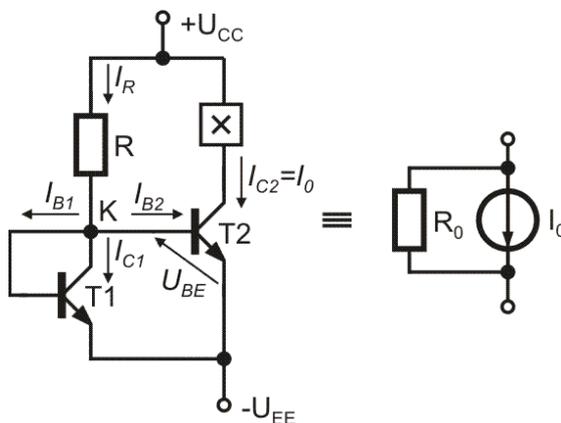


Слика 3.45: Диференцијален засилувач со струјни генератори.

3.11.5. Струен генератор

Струен генератор е извор на константна струја. Во модерните интегрирани аналогни системи со примена на струјниот генератор за поларизација на транзисторот, се постигнува поголема стабилност на статичката работна точка, а со неговата голема динамичка отпорност се зголемува факторот на потиснување ρ на диференцијалниот засилувач.

Шемата на струјниот генератор со биполарни транзистори е дадена на **слика 3.46**.



Слика 3.46: Електрична шема на струен генератор.

Употребените транзистори T_1 и T_2 се идентични, што значи дека имаат исти струи:

$$I_{B1} = I_{B2} = I_B, \quad I_{C1} = I_{C2} = I_C \quad \text{и} \quad U_{BE1} = U_{BE2} = U_{BE}.$$

Струјата I_R низ отпорникот R се пресметува според:

$$I_R = \frac{(U_{CC} + U_{EE} - U_{BE})}{R}. \quad \dots\dots\dots(3.96)$$

За јазелот, означен со K важи:

$$I_R = 2I_B + I_C \quad \dots\dots\dots(3.97)$$

и ако се земе дека $I_C = \beta I_B$, за струјата I_C се добива:

$$I_C = \frac{I_R}{1 + \frac{2}{\beta}} = I_0. \quad \dots\dots\dots(3.98)$$

Со бирање на транзистори со големо β , струјата I_C станува еднаква со струјата низ отпорникот I_R , односно $I_C = I_R$. Од двете страни на вертикалните испрекинати линии се добиваат идентични струи, по што ова коло се вика струјно огледало. Струјата I_R има константна вредност и може да се заклучи дека транзисторот T_2 претставува извор на константна струја за колото содржано во блокот со испрекинати линии. Еквивалентната шема на ова коло се претставува како струен генератор со паралелно приклучена динамичка отпорност R_0 .

3.11.6. Напон на корекција

Производните процеси на транзисторите не овозможуваат да се направи точно балансирано коло и да се добие излезен напон 0, кога на влезот се носат еднакви, а фазно спротивни сигнали. Поради тоа, потребен е одреден еднонасочен напон за дополнително балансирање на влезовите на диференцијалниот засилувач, наречен напон на корекција (**офсет напон**). Тој напон има мала вредност и се добива со дополнителни елементи надвор од диферентниот засилувач.

Диференцијалниот засилувач претставува една од важните конфигурации со голем број примени. Тој претставува засилувачко коло на влезот на операциските засилувачи, потоа во многу инструментални засилувачи и компаратори.

ЗАПАМЕТИ !!!

***Диференцијалниот засилувач е засилувачко коло со два влеза кој ја засилува разликата на напоните на влезните сигнали и не реагира на истофазните напонски промени кои се јавуваат едновременно на двата негови влеза.**

***Влезниот сигнал е диференцијален кога двата влезни сигнала се менуваат во спротивни насоки.**

***Истофазен сигнал имаме кога двата влезни сигнала се менуваат во иста насока.**

***Идеален диференцијален засилувач има само диференцијално засилување, а истофазното засилување е нула.**

***Со примена на струен генератор се подобрува факторот на потиснување на истофазното засилување.**

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Нацртај блок-шема на диференцијален засилувач и дефинирај: влезен диференцијален сигнал, диференцијално засилување, истофазен сигнал и истофазно засилување.
2. Колкаво е истофазното засилување кај идеален диференцијален засилувач?
3. Дефинирај го факторот на потиснувањето на истофазниот сигнал?
4. Кои извори се користат за одредување на положбата на работната точка?
5. Колкаво е истофазното засилување кај идеален диференцијален засилувач?
6. Што се постигнува со примена на струјниот генератор за поларизација на транзисторот?

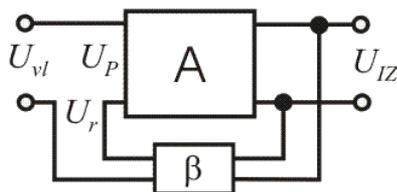
3.12. Засилувачи со повратна врска

Под поимот повратна врска се подразбира пренесување на еден дел од излезната енергија на засилувачот на неговиот влез. Тоа значи, еден дел од излезниот напон или излезната струја се враќа од излезот кон влезот, каде што заедно со влезниот сигнал се побудува засилувачот.

Повратните врски можат да бидат паразитни или конструктивни. Паразитните врски се воспоставуваат по отпорни, капацитивни или индуктивни патишта, независно од нашите

желби. Конструктивните врски се реализираат свесно, со цел да се подобрат по квалитет некои особини и параметри на засилувачот.

Принципиелна блок-шема на засилувач со повратна врска е прикажана на **слика 3.47**.



Слика 3.47: Блок-шема на засилувач со повратна врска.

Колото на повратната врска е означено со β . Напонот на повратната врска U_r го означува делот на излезниот сигнал, вратен на влезот преку колото на повратната врска. Со U_p е означен побудниот сигнал, добиен како резултантен сигнал на заедничкото дејство на влезниот напон U_{vl} и напонот на повратната врска U_r .

Во општ случај, засилувачот A не мора да биде едностепен засилувач. Тој може да биде составен од повеќе степени. Фазата на вратениот сигнал U_r може да се совпаѓа со фазата на влезниот сигнал U_{vl} , или може да се разликува за 180° . Ако фазите на влезниот и на вратениот сигнал се совпаѓаат имаме **позитивна повратна врска**. Кога фазите на влезниот и на вратениот сигнал се разликуваат за 180° , повратната врска се вика **негативна повратна врска**.

Позитивната и негативната повратна имаат различно влијание врз карактеристиките на засилувачот.

3.12.1. Засилување со повратна врска

За засилувач со **негативна повратна врска**, побудниот сигнал претставува разлика меѓу влезниот и сигналот на реакција:

$$U_p = U_{vl} - U_r, \dots\dots\dots(3.99)$$

а засилувањето со повратна врска е:

$$A_r = \frac{U_{iz}}{U_{vl}}. \dots\dots\dots(3.100)$$

Засилувањето на засилувачот без колото за повратна врска изнесува:

$$A = \frac{U_{iz}}{U_p}, \dots\dots\dots(3.101)$$

а од овој израз се добива вредноста на побудниот сигнал како:

$$U_p = \frac{U_{iz}}{A}. \dots\dots\dots(3.102)$$

Колото на повратната врска се дефинира со коефициентот на реакција β , како однос на вратениот и излезниот сигнал:

$$\beta = \frac{U_r}{U_{iz}}, \dots\dots\dots(3.103)$$

а за вратениот напон U_r имаме:

$$U_r = \beta U_{iz}. \dots\dots\dots(3.104)$$

Коефициентот на повратната врска β е помал од 1, затоа што напонот U_r е дел од излезниот напон. Во практиката, вредноста на коефициентот на негативната повратна врска β се движи во граници 0,05 до 0,2.

Со замена на изразите за напоните U_p (3.94) и U_r (3.96) во (3.92) се добива:

$$\frac{U_{iz}}{A} = U_{vl} - \beta U_{iz}$$

или

$$U_{vl} = \frac{U_{iz}}{A} + \beta U_{iz} = \left(\frac{1}{A} + \beta \right) U_{iz} = \frac{1 + A\beta}{A} U_{iz}, \dots\dots\dots(3.105)$$

и конечно, изразот за засилување на засилувачот со негативна повратна врска е:

$$A_r = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = \frac{A}{(1 + A\beta)}. \dots\dots\dots(3.106)$$

Именителот на овој израз е поголем од 1, па следува:

$$A_r < A,$$

односно засилувањето на засилувач со негативна повратна врска е помало од засилувањето на истиот засилувач без применета негативна повратна врска.

Засилувањето на засилувач со **позитивна** повратна врска може да се пресмета на сосема еднаков начин, ако се појде од изразот:

$$U_p = U_{vl} + U_r, \dots\dots\dots(3.107)$$

при што на крајот се добива:

$$A_r = \frac{A}{(1 - A\beta)}, \dots\dots\dots(3.108)$$

и бидејќи именителот е помал од 1, следува:

$$A_r > A.$$

Засилувањето на засилувач со позитивна повратна врска е поголемо од засилувањето на истиот засилувач без позитивна повратна врска.

Именителот во изразите за засилување со повратна врска се вика функција на повратната врска. Нејзината вредност ја одредува производот $A\beta$:

$$A\beta = \frac{U_{iz}}{U_p} \cdot \frac{U_r}{U_{iz}} = \frac{U_r}{U_p}. \dots\dots\dots(3.109)$$

Побудниот сигнал U_p , што дејствува на влезните приклучоци на засилувачот, се засилува A пати во самиот засилувач. Потоа, тој се пренесува преку колото за повратна врска множејќи се со коефициентот на реакцијата β . На тој начин е направена една кружна патека, а производот $A\beta$ е наречен кружно засилување.

Често, јачината на повратна врска се изразува во dB како:

$$N = 20 \log \frac{A_r}{A} (dB) \dots \dots \dots (3.110)$$

За негативната повратна врска имаме:

$$N = 20 \log \frac{1}{1 + A\beta} < 0,$$

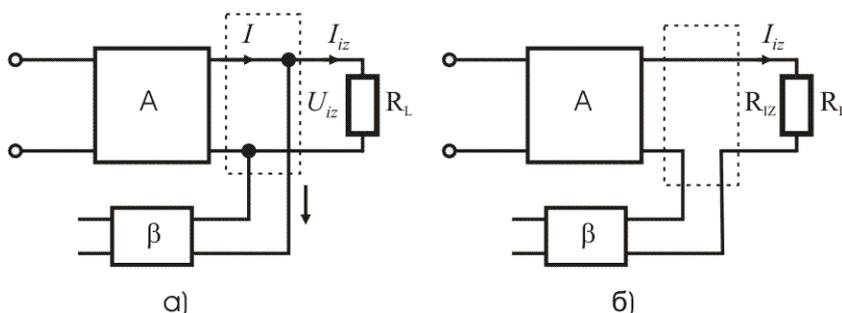
а за позитивната:

$$N = 20 \log \frac{1}{1 - A\beta} > 0.$$

Така, на пример, ако јачината на повратна врска е изразена со бројката -20 , се работи за негативна повратна врска и засилувањето е намалено за 20 dB во однос на засилувањето на истиот засилувач без применета повратна врска.

3.12.2. Видови на негативна повратна врска

Според начинот на приклучување на колото за повратна врска на излезот, разликуваме напонска и струјна негативна повратна врска.

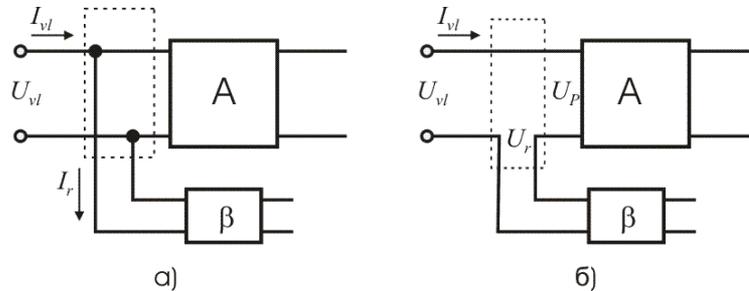


Слика 3.48: Напонска и струјна негативна повратна врска.

Напонска повратна врска имаме кога напонот на повратна врска е пропорционален на излезниот напон (слика 3.48а). Влезната импеданса на колото за повратна врска треба да биде поголема од импедансата на потрошувачот (R_L), за да не го оптоварува излезот на засилувачот. **Струјна повратна врска** имаме кога напонот на повратната врска е пропорционален на излезната струја (слика 3.48б). Влезната импеданса на колото за повратна врска треба да биде помала од импедансата на потрошувачот, за да не ја

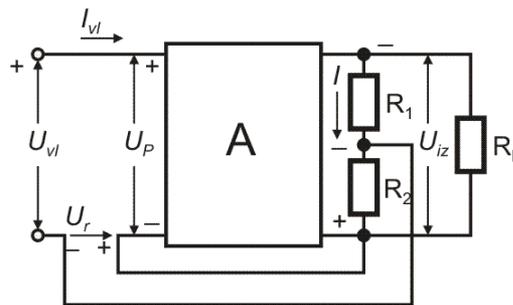
намалува излезната струја. **Паралелна негативна повратна врска** имаме кога напонот на повратна врска U_r се приклучува паралелно на влезниот побуден напон (слика 3.49а).

Сериска негативна повратна врска имаме кога напонот на повратна врска U_r се приклучува сериски со влезниот сигнал U_{vl} (слика 3.49б).



Слика 3.49: Паралелна и сериска негативна повратна врска.

Колото за повратна врска, преку кое се враќа дел од излезниот напон на влезот, може да има различна форма и да биде составено од активни и пасивни елементи. Најчесто се среќаваат пасивни кола за повратна врска.



Слика 3.50: Сериско-напонска повратна врска.

На слика 3.50 е прикажана сериска повратна врска во однос на влезот, а напонска во однос на излезот. Колото за повратна врска е составено од напонскиот делител R_1 , R_2 , а напонот на неговите краеве е:

$$U_{iz} = (R_1 + R_2)I . \dots\dots\dots(3.111)$$

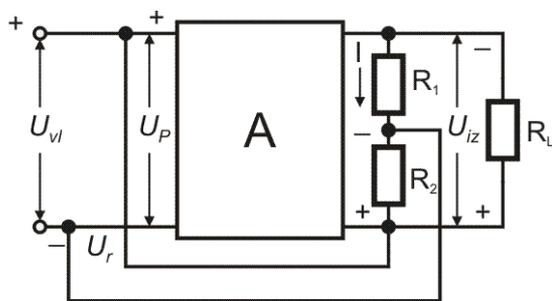
Напонот на повратната врска е:

$$U_r = R_2 I . \dots\dots\dots (3.112)$$

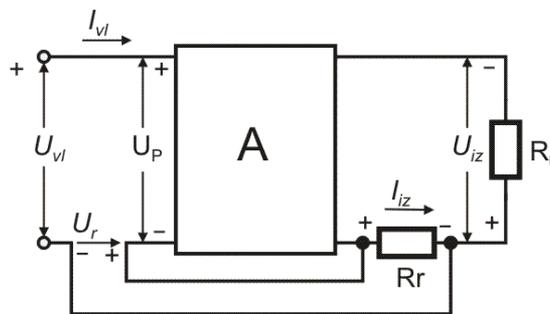
Овде се претпоставува дека струјата на делителот I не тече преку влезното коло, поради неговиот голем влезен отпор. Коефициентот на повратната врска е:

$$\beta = \frac{U_r}{U_{iz}} = \frac{R_2 \cdot I}{(R_1 + R_2) \cdot I} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} . \dots\dots\dots(3.113)$$

На слика 3.51, колото за повратна врска е приклучено паралелно во однос на влезот, што значи дека имаме напонска – паралелна повратна врска.



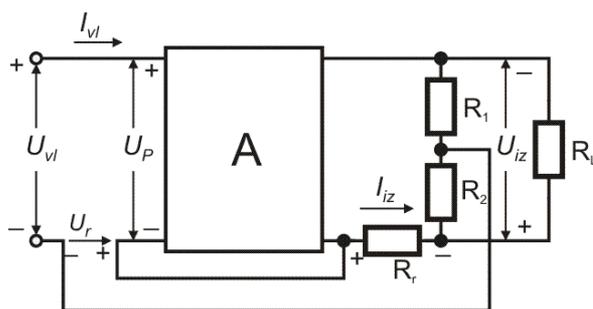
Слика 3.51: Напонско-паралелна повратна врска.



Слика 3.52: Струјно-сериска повратна врска.

На **слика 3.52**, колото на повратна врска е претставено со отпорникот R_r , врзан во серија со оптоварувањето R_L . Во двата отпорника тече истата излезна струја, што значи дека во однос на излезот имаме струјна повратна врска, а во однос на влезот сериска повратна врска. Коефициентот на повратна врска е:

$$\beta = \frac{R_r \cdot I_{iz}}{R_L \cdot I_{iz}} = \frac{R_r}{R_L} \dots \dots \dots (3.114)$$



Слика 3.53: Комбинирана напонска – струјна – сериска повратна врска.

Слика 3.53 претставува комбинирана реакција во однос на излезот. Овде постои напонска – струјна – сериска повратна врска. Напонот на повратната врска е составен од напоните на краевите на отпорниците R_2 и R_r :

$$U_r = U_{R2} + U_{Rr} \dots \dots \dots (3.115)$$

За напонот U_{R2} имаме:

$$U_{R2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{iz} \dots \dots \dots (3.116)$$

а за U_{Rr} :

$$U_{Rr} = R_r I_{iz} = R_r \frac{U_{iz}}{R_L} = \frac{R_r}{R_L} U_{iz} \dots \dots \dots (3.117)$$

Со замена на (3.115) и (3.116) во (3.117) добиваме:

$$U_r = U_{iz} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_r}{R_L} \right),$$

а за коефициентот на повратната врска:

$$\beta = \frac{U_r}{U_{iz}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_r}{R_L} \dots \dots \dots (3.118)$$

3.12.3. Стабилност на засилувач со повратна врска

Со примена на позитивна повратна врска се зголемува засилувањето, што на прв поглед може да претставува предност во однос на примената на негативната повратна врска. Но, скриената опасност од позитивната повратна врска лежи во можност за појава на самоосцилирање на засилувачот, што го прави несоодветен за намената за која е поставен.

Ако именителот во изразот за засилувањето со позитивна повратна врска $(1 - A\beta)$ добие вредност нула, а тоа се случува кога е $A\beta = 1$, засилувањето станува бесконечно големо.

Гледано од изразот 3.92: $A_r = \frac{U_{iz}}{U_{vl}}$ напонот U_{vl} станува еднаков на нула, што значи дека

засилувачот дава излез и без влезен сигнал. Тоа е карактеристично за работа на осцилаторот.

Како што е познато, излезниот сигнал на еден засилувач фазно е поместен за π (180°) во однос на влезниот сигнал. Фазната зависност меѓу излезниот и влезниот напон, дадена на слика 3.9, покажува дека за ниските и за високите фреквенции од пропусниот опсег, доаѓа до поголемо отстапување на фазната разлика во однос на средните фреквенции. Кај повеќестепени засилувачи, отстапувањата на фазните разлики на секој степен се собираат, што може да доведе до состојба во која тие ќе изнесуваат 2π или 4π итн. За засилувач со применета негативна повратна врска тоа значи премин во режим со позитивна повратна врска и појава на самоосцилирање.

Освен намалувањето на засилувањето, ова е уште еден сериозен недостаток на негативната повратна врска.

3.12.4. Постојаност на засилувањето на засилувач со негативна повратна врска

Кога вредноста на кружното засилување $A\beta$ е многу голема ($A\beta \gg 1$), засилувањето со повратна врска станува:

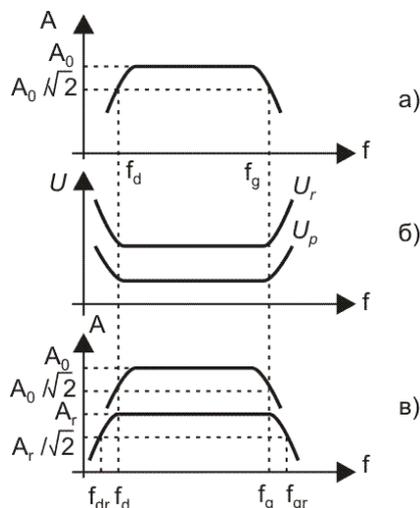
$$A_r = \frac{A}{A\beta} = \frac{1}{\beta} \dots \dots \dots (3.119)$$

Засилувањето A_r , во овој случај, станува независно од засилувањето на истиот засилувач без негативна повратна врска A . Тоа значи дека засилувањето на засилувачот со негативна повратна врска нема да зависи од променливите параметри и елементи на засилувачот, туку само од особините на колото за повратна врска.

Ова е важна предност, постигната со негативната повратна врска, зашто стареењето, температурата, замената на активните или пасивните елементи може да предизвика промена на засилувањето на засилувач без негативна повратна врска. Засилувањето сега зависи само од карактеристиките на колото за повратна врска, а тоа најчесто се изведува со пасивни елементи кои можат да бидат со стабилни карактеристики.

3.12.5. Проширување на пропусниот опсег

Амплитудната карактеристика на секој засилувач, во општ случај, покажува дека засилувањето е помало за пониските фреквенции од долната гранична фреквенција f_d и за повисоките фреквенции од горната гранична фреквенција f_g (**слика 3.54а**). Според тоа, ако на влезот дејствува константен сигнал при која и да е фреквенција, на излезот ќе се добие сигнал што е рамномерно и најмногу засилен при средните фреквенции, а при ниските и високите ќе биде помал. Ако во овој засилувач се вклучи коло за негативна повратна врска, преку тоа коло се враќа дел од излезниот сигнал U_r , кој има спротивна фаза од влезниот сигнал. Амплитудата на овој сигнал се зголемува за ниските и високите фреквенции. По одземањето од влезниот сигнал, се добива побуден сигнал како на **слика 3.54б**. Конечниот резултат, прикажан на **слика 3.54в** покажува дека дошло до поместување на долната и горната гранична фреквенција, така што се добива проширен пропусен опсег на засилувачот.



Слика 3.54: Проширување на пропусниот опсег.

3.12.6. Видови изобличувања

Изобличување е промена на формата на излезниот сигнал на засилувачот во однос на влезниот сигнал. Изобличувањата можат да бидат **линеарни** и **нелинеарни**.

Линеарните изобличувања претставуваат промена на амплитудата и на фазата на сигналот, што значи дека постојат амплитудни и фазни линеарни изобличувања. Во пропусниот опсег засилувањето на засилувачот е константно и амплитудата на излезниот сигнал за која и да е фреквенција од тој опсег треба да биде А-пати поголема. До линеарно изобличување на амплитудата доаѓа кај сигналите чиешто фреквенции се надвор од пропусниот опсег. Отстапувањето на фазата на излезниот сигнал во однос на влезниот, прикажано со фазната карактеристика на слика 3.9, претставува линеарни фазни изобличувања.

Нелинеарните изобличувања настапуваат поради нелинеарноста на карактеристиките на активниот засилувачки елемент. Тие се манифестираат со нееднакво засилување на позитивната и негативната полупериода на сигналот. Кога еден засилувач без негативна повратна врска се побудува со чист синусоиден сигнал, кој навлегува во нелинеарниот дел на карактеристиките на засилувачот, покрај основниот хармоник на засилениот влезен сигнал, на излезот ќе се појават и други хармониски компоненти. Хармониските компоненти можат да бидат поголеми или помали, што зависи од нелинеарниот дел на карактеристиката.

Моментната вредност на сложениот периодичен напон има форма:

$$u = U_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1) + U_{2m} \sin(2\omega t + \varphi_2) + U_{3m} \sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots \quad (3.120)$$

при што :

U_{1m} е амплитуда на напонот на првиот хармоник со фреквенција f ,

U_{2m} е амплитуда на напонот на вториот хармоник со фреквенција $2f$ итн.

Ефективната вредност на сложениот периодичен напон U_{ef} е:

$$U_{ef} = \sqrt{U_{1ef}^2 + U_{2ef}^2 + U_{3ef}^2 + \dots} \quad (3.121)$$

Големината на нелинеарните изобличувања се изразува со вкупниот фактор на нелинеарните изобличувања или клир фактор K како:

$$K = \frac{\sqrt{U_{2ef}^2 + U_{3ef}^2 + \dots}}{U_{1ef}} \quad (3.122)$$

Најголемо влијание врз клир факторот има напонот на вториот хармоник, напоните на останатите повисоки хармоници можат да се запостават. Ако се задржиме само на вториот хармоник, поради упростување, за клир факторот на вториот хармоник K_2 добиваме:

$$K_2 = \frac{U_{2m}}{U_{1m}} \dots\dots\dots(3.123)$$

Напонот на вториот хармоник постои само на излезот, а на влезот го нема. Неговата амплитуда не зависи од засилувањето, туку само од нелинеарноста на карактеристиката на засилувачот.

3.12.7. Намалување на нелинеарните изобличувања

Ако се изведе негативна повратна врска, излезниот сигнал ќе се намали, што значи дека и напонот на вториот хармоник ќе се намали и ќе стане:

$$U_{2mr} = U_{2m} - A\beta U_{2mr}, \dots\dots\dots(3.124)$$

односно:

$$U_{2mr}(1 + A\beta) = U_{2m} \text{ или}$$

$$U_{2mr} = \frac{U_{2m}}{1 + A\beta} \dots\dots\dots(3.125)$$

Вториот, како и секој друг хармоник кај засилувач со повратна врска се намалува во однос на вториот хармоник кај засилувач без повратна врска, исто како што се намалува и засилувањето.

Ако се подели равенката 3.109 со U_{1m} се добива клир фактор на вториот хармоник:

$$K_{2r} = \frac{K_2}{(1 + A\beta)} \dots\dots\dots(3.126)$$

или за n-тиот хармоник:

$$K_{nr} = \frac{K_n}{(1 + A\beta)} \dots\dots\dots(3.127)$$

при што со K_2 се означува клир факторот на вториот хармоник без повратна врска, а со K_{2r} клир факторот со негативна повратна врска.

3.12.8. Влијание на негативната повратна врска врз шумовите

Шумовите кои се јавуваат на излезот од засилувачот, потекнуваат од изворот на побудниот сигнал (од претходните степени) и од елементите на самиот засилувач.

Напонот на шумот U_N , кој оди заедно со напонот на корисниот сигнал U_s , се засилува исто како и корисниот сигнал. Под претпоставка засилувачот да не внесува никаков шум, односот

сигнал-шум: $\frac{U_s}{U_N}$, кој постои на влезот на засилувачот, ќе остане непроменет и на излезот:

$$\frac{U_{Siz}}{U_{Niz}} = \frac{U_{Svl}}{U_{Nvl}} \dots\dots\dots (3.128)$$

Со внесување на негативна повратна врска се намалува корисниот сигнал за $(1 + A\beta)$ -пати. Истото ќе важи и за сигналот на шумот. Според тоа, за односот сигнал-шум на излезот ќе се добие:

$$\frac{U_{Siz}}{1 + A\beta} = \frac{U_{siz}}{U_{Niz} (1 + A\beta)}$$

што покажува дека овој однос и со примена на негативната повратна врска не се менува.

Меѓутоа, истиот заклучок не важи за шумовите создадени во самиот засилувач. Тоа ќе бидат сигнали што не постојат на влезот, а се јавуваат на излезот. За нив ќе важи истиот заклучок, како и за нелинеарните изобличувања.

Кај засилувач без негативна повратна врска, при одредена вредност на влезниот сигнал, на излезот ќе постои A -пати поголем сигнал, но ќе постои и некоја вредност на шумот, која на влезот не постоела. Во овие услови на излезот постои одредена вредност на односот сигнал-шум $\frac{U_{Siz}}{U_N}$. Со внесување на негативна повратна врска, излезниот сигнал

се намалува $(1 + A\beta)$ – пати, па за односот сигнал-шум се добива:

$$\frac{U_{Siz}}{1 + A\beta} = \frac{U_{Siz}}{U_N (1 + A\beta)}$$

што наведува на заклучок дека и овој однос останува непроменет. Но, не треба да се заборава дека корисниот сигнал на влезот може да се зголеми на онаа вредност што е потребна да се добие на излезот U_{iz} со иста вредност како без повратна врска. Притоа, сигналот на шумот и натаму останува за $(1 + A\beta)$ – пати помал, а односот сигнал-шум станува поголем.

3.12.9. Влијание на негативната повратна врска врз влезната и врз излезната импеданса на засилувачот

Колото на повратна врска има своја влезна и излезна импеданса. Таа се приклучува сериски или паралелно на влезната, односно на излезната импеданса на засилувачот. Поради тоа, се менува влезната и излезната импеданса на засилувачот. Каква ќе биде таа

промена, односно дали импедансата ќе расте или ќе опаѓа, зависи од начинот на кој колото на повратна врска е приклучено во однос на влезот и на излезот.

Влезната импеданса на засилувачот со реакција од слика 3.53, Z_{vlr} , се дефинира како:

$$Z_{vlr} = \frac{U_{vl}}{I_{vl}} = \frac{(U_p + U_r)}{I_{vl}} = \frac{(U_p + \beta U_{iz})}{I_{vl}} = \frac{(U_p + A\beta U_p)}{I_{vl}} = \left(\frac{U_p}{I_{vl}} \right) (1 + A\beta). \quad \dots\dots\dots(3.129)$$

Влезната импеданса на засилувачот без повратна врска Z_{vl} е:

$$Z_{vl} = \frac{U_p}{I_{vl}}.$$

Па со замена се добива:

$$Z_{vlr} = Z_{vl}(1 + A\beta). \quad \dots\dots\dots(3.130)$$

Со примена на сериска повратна врска влезната импеданса се зголемува за износот на функцијата на повратна врска.

За исто толкав износ се зголемуваат или се намалуваат влезните и излезните импеданси за другите видови на изведби на негативната повратна врска. Затоа, во натамошното разгледување ќе биде доволно само да се заклучи дали соодветната импеданса се зголемува или се намалува, па потоа веднаш да се напише нејзиниот математички израз.

Во случајот на паралелната негативна повратна врска, доаѓа до намалување на напонот меѓу влезните приклучоци и до зголемување на влезната струја, затоа што излезната импеданса на колото за повратна врска е приклучена во паралела. Како резултат, се намалува влезната импеданса на засилувачот со повратна врска во однос на влезната импеданса на тој засилувач кога нема повратна врска:

$$Z_{vlr} = \frac{U_{vl}}{I_{vl}} = \frac{Z_{vl}}{(1 + A\beta)}. \quad \dots\dots\dots(3.131)$$

Излезната импеданса на засилувач со напонска негативна повратна врска се намалува во однос на излезната импеданса без повратна врска:

$$Z_{izr} = \frac{Z_{iz}}{(1 + A\beta)}. \quad \dots\dots\dots(3.132)$$

Излезната импеданса на засилувачот со струјна негативна повратна врска се зголемува во однос на излезната импеданса без повратна врска:

$$Z_{izr} = Z_{iz}(1 + A\beta). \quad \dots\dots\dots(3.133)$$

ЗАПАМЕТИ !!!

*** Повратната врска претставува пренесување на дел од излезниот сигнал на засилувачот на неговиот влез.**

*** Кога влезниот и вратениот сигнал се фазно поместени за 180° се добива негативна повратна врска.**

*** Кога влезниот и вратениот сигнал се во фаза се добива позитивна повратна врска.**

*Со примена на негативна повратна врска:

- се намалува засилувањето на засилувачот,
- се подобрува постојаноста на засилувањето,
- се проширува пропусниот опсег,
- се намалуваат нелинеарните изобличувања,
- се намалува шумот кој се внесува со засилувачот.

*Со примена на сериска негативна повратна врска се зголемува влезната импеданса на засилувачот.

*Со примена на паралелна негативна повратна врска се намалува влезната импеданса на засилувачот.

*Со примена на напонска негативна повратна врска се намалува излезната импеданса на засилувачот.

*Со примена на струјна негативна повратна врска се зголемува излезната импеданса на засилувачот.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Што подразбираш под поимот повратна врска?
2. Кога повратната врска е негативна а кога позитивна?
3. Дефинирај го коефициентот на повратна врска β ?
4. Какво е засилувањето на засилувач со негативна повратна врска во однос на засилувањето на истиот засилувач без применета негативна повратна врска?
5. Како се нарекува производот $A\beta$?
6. Кој е условот засилувањето со повратна врска да биде независно од засилувањето на истиот засилувач без негативна повратна врска?
7. Објасни го проширувањето на пропусниот опсег на засилувач со повратна повратна врска.
8. Што е изобличување и какви изобличувања има?
9. Какви видови на негативна повратна врска постојат според начинот на приклучување на колото за повратна врска на излезот?
10. Какво може да биде приклучувањето на колото за повратна врска во однос на влезот?
11. Какво е влијанието на повратната повратна врска врз влезната и врз излезната импеданса?

3.13. Засилувачи на моќност

Засилувачите на моќност најчесто се излезни степени во нискофреквенциските засилувачи. Тие треба да дадат корисна моќност за побудување на звучник, магнетофонска глава, електромагнетно реле и слични отпори на оптоварување.

Засилувачот на моќност работи во режим на големи сигнали и неговата анализа се прави со графоаналитичката метода со користење на статички карактеристики на транзисторот.

Пред засилувачот се поставуваат следниве основни барања:

а) да обезбеди потребна корисна моќност за потрошувачот. За засилувачите на тонските сигнали корисната моќност се движи во граници од стотина mW до стотина W.

б) максималната моќност на засилувачот се поврзува со одреден коефициент на нелинеарните изобличувања. Во еден повеќестепен засилувач, најголемите нелинеарни изобличувања ги создава излезниот степен. Така, на пример, за преносливи радиоприемници нелинеарните изобличувања достигнуаат до 10%, поквалитетните радиоприемници и засилувачи за озвучување од 2 до 6%, а високквалитетните (Hi – Fi High Fidelity) засилувачи до 1% и помалку.

в) да обезбеди соодветна фреквенциска карактеристика. Во повеќестепен засилувач, излезниот засилувач во најголема мера ги ограничува високите фреквенции. Поради тоа, во квалитетните засилувачи се применува негативна повратна врска.

г) да обезбеди економичност во однос на потрошувачката на електричната енергија од изворот за напојување. Економичноста се дефинира со **факторот на корисно дејство**:

$$\eta = \frac{P_k}{P_0},$$

каде што со P_k се означува излезната, а со P_0 потрошената моќност од изворот на еднонасочната струја.

д) да обезбеди сигурна и стабилна работа во однапред зададениот температурен интервал на околината.

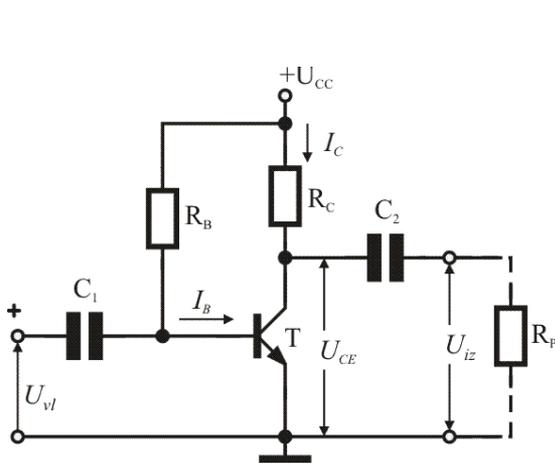
Излезниот степен може да работи во класа А, класа В и класа АВ и во сите три вида споеви, со заеднички емитер, заедничка база, заеднички колектор, односно со заеднички сорс, заеднички гејт и заеднички дрејн. Најмногу е во употреба спојот со заеднички емитер, односно заеднички сорс, затоа што има поголемо засилување на моќност во однос на другите два вида споеви.

3.13.1. Излезен степен во класа А со биполарен транзистор

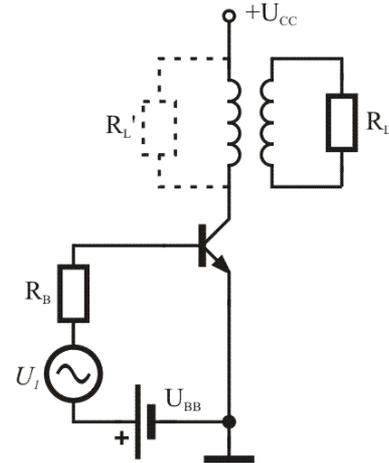
Излезниот степен во класа А се применува таму каде што се дозволени мали изобличувања. Сепак, овој степен со еден транзистор во класа А поретко се среќава како излезен, а најчесто како побуден или претстепен кој му претходи на излезниот степен.

Во енергетскиот однос, овој степен се карактеризира со најмал фактор на корисно дејство, што значи најмало искористување на транзисторот во однос на неговата моќност. Работните услови диктираат низ транзисторот постојано да тече струја, без оглед на тоа дали на влезот има побуден сигнал.

Принципиелна шема на засилувач во класа А со транзистор во спој со заеднички емитер е дадена на **слика 3.55**. За анализа на овој степен може да се примени комплетната анализа направена во поглавјето 3.6- Графичка анализа на транзисторски засилувач.



Слика 3.55: Засилувач на моќност во класа А.



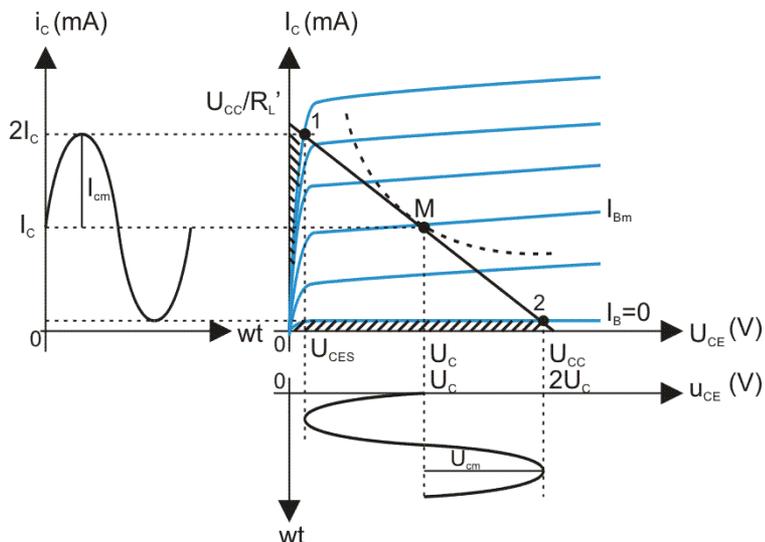
Слика 3.56: Засилувач на моќност во класа А со трансформатор.

Кај одреден број излезни засилувачи, врската со оптоварувањето или со следниот краен излезен степен се изведува преку трансформатор, како што е прикажано на **слика 3.56**. Со примена на трансформаторот се постигаат поповолни услови за работа. Како прво, се одбегнува еднонасочната струја да тече преку потрошувачот, со што се подобрува факторот на корисно дејство на транзисторот. Отпорот на намотките на трансформаторот за еднонасочната компонента на струјата е мал и загубите на еднонасочниот напон и моќност се незабележливи. Како второ, трансформаторот дава можност за подобро приспособување на оптоварувањето со излезниот отпор на транзисторот, за да се пренесе максимална корисна моќност кон потрошувачот. Тоа се однесува на големи системи за озвучување кај кои звучниците се распоредени на оддалечени места (стадиони, спортски сали, железнички и автобуски станици и сл.).

Отпорот на оптоварувањето R_L се пресликува на примарната страна на трансформаторот според формулата:

$$R_L' = R_L \cdot n_p^2 = R_L \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2, \dots\dots\dots(3.134)$$

каде што со n_1 и n_2 се означени броевите на намотките на примарот и на секундарот, а со n_p односот на трансформацијата.



Слика 3.57: Работна точка и работна права на засилувач во класа А.

Со еквивалентниот отпор на оптоварувањето R_L' се дефинира аголот на динамичката работна права. Најповолниот агол е претставен со линијата за која се добиваат симетрични полупериоди на синусоидалната промена на колекторскиот напон (слика 3.57).

Во тој случај имаме максимална неизобличена корисна моќност за дадената работна точка М.

Корисната моќност се пресметува според:

$$P_k = \frac{1}{2} \cdot I_{cm} \cdot U_{cm}, \dots\dots\dots(3.135)$$

а потрошената моќност од изворот е:

$$P_0 = U_{CC} I_{CM}. \dots\dots\dots(3.136)$$

За избраниот режим на работа имаме:

$$I_{cm} = I_{CM} \text{ и } U_{cm} = U_{CC}.$$

Сега за факторот на корисното дејство имаме:

$$\eta = \frac{P_k}{P_0} \cdot 100 = \frac{\frac{1}{2} \cdot I_{cm} \cdot U_{cm}}{I_{CM} \cdot U_{CC}} \cdot 100 = 0,5 \cdot 100 = 50\%.$$

.....(3.137)

Максималната теориска вредност на факторот на корисното дејство изнесува 50%, што значи моќноста развиена во транзисторот како топлина (дисипација) е еднаква со корисната моќност создадена во оптоварувањето.

Кога амплитудата на базната струја е двојно помала, се добиваат и двојно помали амплитуди на колекторскиот напон и на колекторската струја. Во тој случај, корисната моќност P_k ќе биде четири пати помала, а со тоа и факторот на корисното дејство ќе биде четири пати помал, затоа што потрошената моќност P_0 останува иста.

Разликата меѓу вкупно потрошената моќност од изворот и корисната моќност се претвора во топлина на споевите на транзисторот. Најголемиот дел се распределува на колекторскиот спој и за дисипацијата на колекторот може да се напише:

$$P_D = P_O - P_K. \dots\dots\dots(3.138)$$

Максимална дисипација имаме кога корисната моќност е еднаква на нула. Тоа е еден од суштествените недостатоци на излезниот степен во класа А. За овој степен се потребни транзистори со голема моќност, но нивната искористеност е лоша.

3.13.2. Симетрични засилувачи на моќност

Со врзување на два транзистора може да се добие поголема моќност на излезот со поголем фактор на корисно дејство. Поврзувањето на транзисторите може да биде паралелно или симетрично. Симетричните засилувачи се познати како противтактни или пуш-пул засилувачи.

Симетричните засилувачи можат да работат во класа А, класа АВ и класа В и во трите можни конфигурации: во спој со заеднички емитер, со заедничка база и со заеднички колектор. Побудувањето на транзисторите се прави со напони, фазно свртени за 180° . Ако побудниот сигнал има синусоидална форма, на базата на едниот транзистор ќе дојде позитивната полупериода, а едновременно на базата на другиот транзистор ќе дојде негативната полупериода. Фазната спротивност на побудните сигнали се овозможува со трансформатор со поделен секундар, при што по една половина од секундарот се приклучува на базата на секој транзистор или со транзисторски степен со отпорник во колекторското и емитерското коло, при што се користат едниот излез од колекторот, а другиот, фазно спротивен, од емитерот.

Симетричниот засилувач со транзистори во спој со заедничка база има неколку добри особини. Тој може да даде одредена излезна моќност со мали изобличувања, при тоа да има поголем фактор на корисно дејство од засилувачот со еден транзистор во спој со заеднички емитер. Употребата на транзистори со мала разлика на коефициентите h_{21b} дава помали асиметрии од употребата на коефициентите h_{21e} .

Основен недостаток на спојот со заедничка база е малото засилување на моќност, тоа е h_{21e} пати помало од засилувањето во спој со заеднички емитер. Тоа значи, за иста излезна моќност степенот со заедничка база бара од 20 до 100 пати поголема побудна моќност, зависно од вредноста на параметарот h_{21e} .

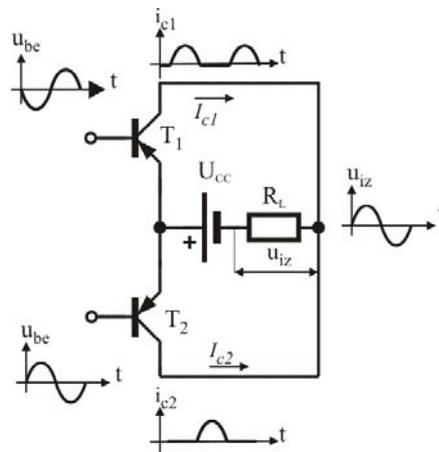
Наведените добри особини, во споредба со недостатокот се незначителни, па затоа спојот со заедничка база нема практична примена. Истото важи и за спојот со заеднички колектор. Со симетричната врска се намалуваат нелинеарните изобличувања на тој начин што се поништуваат парните хармонични компоненти.

3.13.3. Симетрични засилувачи во класа В

Кога засилувачкиот степен работи во класа В, во колекторското коло тече струја само за време на едната полупериода на влезниот сигнал, што обезбедува поголема излезна моќност и подобар фактор на корисно дејство. Но, во класа В изобличувањата се многу поголеми отколку во класа А. Од таа причина, засилувачите во класа В се прават само во симетрична врска.

Принципиелна шема на симетричен засилувач во класа В е дадена на **слика 3.58**. Шемата е дадена со PNP-транзистори, а за шема со NPN-транзистори треба само да се сменат поларизацијата на изворот U_{CC} и насоките на колекторските струи.

Во отсуство на сигналот на влезот, во колекторското коло тече струја I_{CE01} , односно I_{CE02} . Ако транзисторите имаат еднакви карактеристики, струите I_{CE01} и I_{CE02} низ отпорот на оптоварувањето се еднакви.



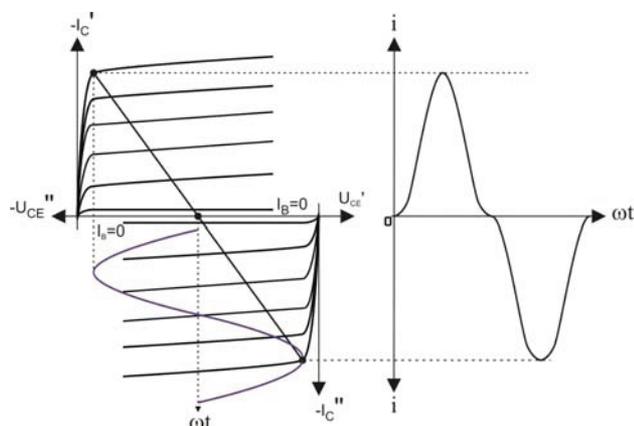
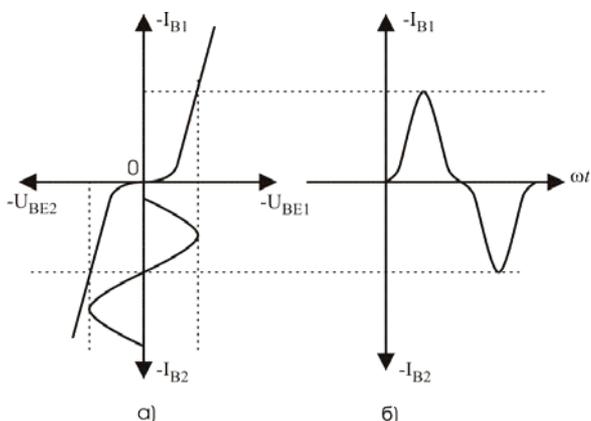
Слика 3.58: Симетричен засилувач во класа В.

Побудувањето се врши со два еднакви напона со спротивна фаза за влезовите на двата транзистора.

Работата на овој засилувач за време на една периода на побудниот синусоидален сигнал се одвива на следниот начин: за време на негативната полупериода на влезниот сигнал, споведува транзисторот T_1 . Во колекторското коло на T_1 тече струја I_{C1} . Во исто време, транзисторот T_2 ќе биде неспроводен.

За време на позитивната полупериода на побудниот напон, се случува како и за негативната само во спротивна насока: транзисторот T_2 ќе споведува, а транзисторот T_1 ќе биде неспроводен. Краен резултат е засилен напон, еднаков по форма со влезниот напон.

Принципот на работата на симетричниот степен во класа В графички се прикажува преку спрегнати влезни и излезни карактеристики. Спрегнатите влезни карактеристики се прикажани на **слика 3.59а**.



Слика 3.59: Спрегнати влезни карактеристики. Слика 3.60: Спрегнати излезни карактеристики.

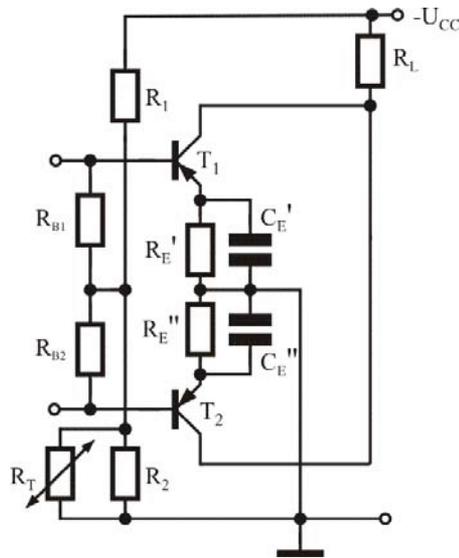
Влезната карактеристика на транзисторот T1 е во координатен систем $-I_{B1} = f(-U_{BE1})$, а на транзисторот T2 во $-I_{B2} = f(-U_{BE2})$. Координатниот почеток на двата система е заеднички, а самите системи се цртаат во спротивни насоки. Побудниот напон u_{be1} е еднаков по амплитуда, а спротивен по фаза од побудниот напон u_{be2} . Овие два напона можат да се прикажат во системот на спрегнатите карактеристики со цела периода.

Поради нелинеарноста на влезната карактеристика, базната струја ќе има изобличена форма (слика 3.59б). Колекторската струја, исто така, ќе биде изобличена, ако се претпостави дека статичките карактеристики се линеарни. На слика 3.60 се прикажани спрегнатите излезни карактеристики. Истите изобличувања се јавуваат и во излезниот напон.

3.13.4. Симетрични засилувачи во класа АВ

За намалување на изобличувањата, во симетрични засилувачи за говор и музика, на базите се доведува мал негативен напон, со што транзисторите работат во класа АВ.

Работната точка во класа АВ е поставена така што за мали побудни сигнали во колекторското коло на едниот транзистор тече струја за време на целата периода. Кога на влезот ќе дојде поголем сигнал, струјата на колекторското коло ќе тече за време подолго од една полупериода, а пократко од целата периода. Тоа значи дека, за мали сигнали, засилувачот работи во класа А, а за големи во класа В.



Слика 3.61: Шема на засилувач во класа АВ.

Шемата на симетричниот засилувач во класа АВ (слика 3.61) се разликува од шемата на засилувачот во класа В по тоа што во емитерските кола се ставени паралелно врзани отпорник R_E и кондензатор C_E . Со отпорниот делител R_1 , R_2 , R_T се одредува положбата на работната точка, така што да се најде на карактеристиката на дозволената дисипација.

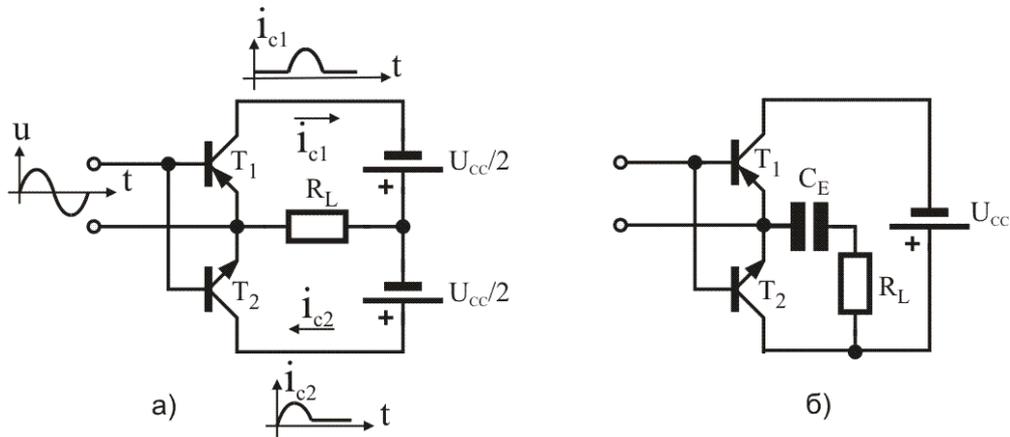
3.13.5. Комплементарни симетрични засилувачи

Излезниот трансформатор во симетричните засилувачи има такви карактеристики што внесува линеарни и нелинеарни изобличувања во сигналот, особено при ниски фреквенции. Симетричниот засилувач може да се направи и со употреба на комплементарни транзистори. Најчесто употребуван спој е спојот на комплементарни излезни засилувачки парови.

Комплементарен транзисторски пар се два транзистора со идентични карактеристики. Едниот е од NPN, а другиот од PNP-тип.

Принципиелна шема на таков засилувач во две варијанти е дадена на слика 3.62. Во шемата по првата варијанта под а) се користат два извора, едниот со позитивен, а другиот со негативен напон, или извор за напојување со среден извод. Во шемата по втората варијанта под б) се користи еден извор за напојување, а отпорот на оптоварувањето се врзува преку кондензатор.

За време на позитивната полупериода на побудниот сигнал, емитерскиот спој на транзисторот T_2 се поларизира директно и преку отпорот на оптоварувањето тече колекторска струја i_{C2} . За тоа време, транзисторот T_1 е блокиран, затоа што неговиот емитерски спој е инверзно поларизиран со позитивната полупериода на побудниот напон.



Слика 3.62: Принципиелна шема на комплементарни симетрични засилувачи.

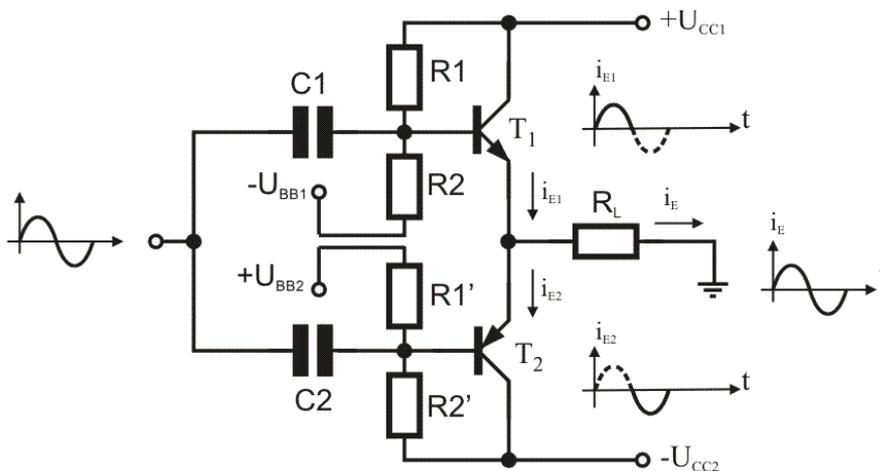
За време на негативната полупериода, транзисторот T_1 станува спроводен и неговата колекторска струја i_{c1} ќе протече преку отпорот на оптоварувањето. За тоа време, транзисторот T_2 е блокиран.

Ако двата транзистора имаат еднакви параметри, нивните колекторски струи ќе бидат симетрични, а нелинеарните изобличувања минимални. Со противфазната работа на комплементарните транзистори отпаѓа потребата од свртувач на фаза.

Факторот на корисното дејство на комплементарните симетрични засилувачи може да изнесува и до 78%.

Излезните засилувачки транзисторски степени денес се изработуваат во интегрирана форма со мал број надворешни елементи.

На **слика 3.63** е прикажан засилувач во комплементарно-симетрична спрега што може да работи во класа B, односно во класата AB, зависно од изборот на отпорниците $R1$ и $R2$ односно $R1'$ и $R2'$.

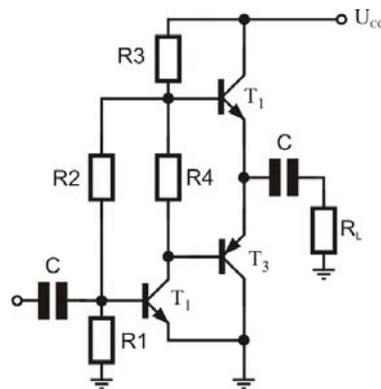


Слика 3.63: Засилувач во класа B во комплементарно-симетрична спрега.

Називот комплементарно-симетрична двоаѓа од потребата за транзистори од различен тип, PNP и NPN-тип но со исти карактеристики. Во спротивно, позитивната и негативната полупериода на излезниот сигнал нема да бидат со исти карактеристики. За реализација на колото потребни се четири извори. Бројот на изворите може да се сведе на два доколку за напојување на $R1'$ се користи изворот $+U_{CC1}$, а за напојување на $R1$ се користи изворот $-U_{CC2}$.

Принципот на работа на засилувачот е ист со основниот засилувач во класата B. При позитивните полупериоди на влезниот напон ќе спроведува транзисторот $T1$ и на потрошувачот R_L ќе се оствари позитивната полупериода на излезниот напон. При негативната полупериода на влезниот напон, транзисторот $T2$ ќе спроведува, па на потрошувачот ќе се оствари негативната полупериода на излезниот напон.

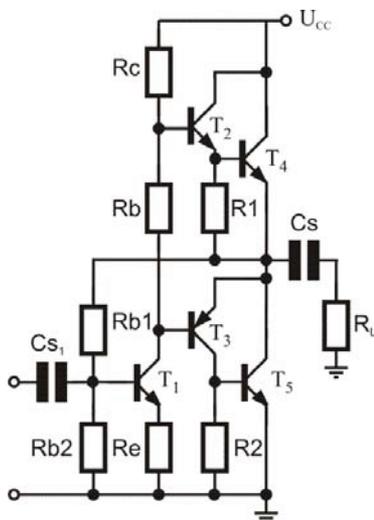
Можна е и изведба на комплементарно-симетрични засилувачи и со еден извор на напојување. Во овој случај, за обезбедување на една од полупериодите на излезниот напон се користи изворот, а за остварување на другата полупериода кондензаторот што е сериски поврзан меѓу засилувачот и потрошувачот, како што е прикажано на **слика 3.64**.



Слика 3.64: Засилувач во комплементарно-симетрична спрега со еден извор за напојување за работа во класата AB.

Тука треба да напоменеме дека, наместо отпорникот $R4$, којшто обезбедува работа на засилувачот во класа B, може да се употребат и две диоди од ист материјал како и транзисторите $T2$ и $T3$ и со исти карактеристики како и споевите база-емитер на овие транзистори. Покрај создавањето на потребните напони на поларизација на излезните транзистори, овие диоди имаат и задача да обезбедат температурна стабилизација на емитерските струи на излезните транзистори. Затоа тие треба да бидат поставени на исто ладилно тело како и транзисторите со што се обезбедува сите тие да работат на иста температура. Кондензаторот C треба да има доволно голема капацитивност за да може да ја обезбеди соодветната енергија за создавање на негативната полупериода на напонот, односно струјата, на потрошувачот.

На **сликата 3.65**, прикажан е засилувач на моќност со NPN-транзистори на излезот во таканаречена квазикомплементарна спрега (слична на комплементарната од класа B). Кај колото употребена е една Дарлингтонова врска која ја сочинуваат транзисторите T_2 и T_4 и една комплементарна Дарлингтонова врска која ја сочинуваат транзисторите T_3 и T_5 .



Слика 3.65: Засилувачи со квазикомплементарен пар на транзистори.

ЗАПАМЕТИ !!!

- * Засилувачите на моќност се најчесто излезните степени во засилувачката каскада.
- * Засилувач во класа A со еден транзистор најчесто работи како претстепен, има помали изобличувања, но и помал степен на корисно дејство (до 50%).
- * Со симетричните засилувачи на моќност се намалуваат нелинеарните изобличувања и се добива поголема моќност со поголем степен на корисно дејство.
- * Симетричните засилувачи користат два транзистора со идентични карактеристики.
- * Симетричен засилувач во класа AB за мали влезни сигнали работи во класа A, а за големи во класа B.
- * Со комплементарен симетричен засилувач се одбегнува користење на излезен трансформатор, а степенот на корисно дејство изнесува 78%.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Кои се основните барања пред засилувачот на моќност?

2. Кои се недостатоците на излезниот степен во класа А?
3. Која конфигурација најмногу одговара за симетричните засилувачи на моќност?
4. Од која причина засилувачите во класа В се прават само во симетрична врска?
5. Објасни го принципот на работата на симетричниот степен во класа В?
6. Во што се разликува шемата на симетричниот засилувач во класа АВ од шемата на засилувачот во класа В?

ТЕМАТСКО УТВРДУВАЊЕ

I Прашања со заокружување (Заокружи ги точните одговори)

1. Голема вредност на напонското и струјното засилување има засилувачот во спој со:
 - а) заеднички емитер
 - б) заедничка база
 - в) заеднички колектор.

2. Излезниот и влезниот напон се фазно поместени за 180° кај засилувач во спој со:
 - а) заеднички гејт
 - б) заеднички дрејн
 - в) заеднички сорс.

3. Засилувањето на засилувач со негативна повратна врска е:

- а) поголемо
- б) еднакво
- в) помало

од засилувањето на истиот засилувач без применета негативна повратна врска.

4. Кружното засилување е дадено со изразот:

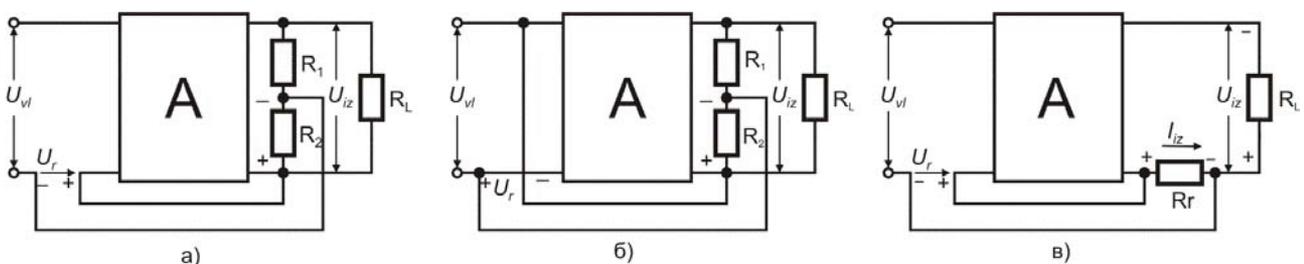
- а) β
- б) βA
- в) $1 + \beta A$.

II Прашања со поврзување

5. Поврзи ја големината на засилувањето со конфигурацијата на засилувачот:

- | | | |
|-----------|--|-------|
| 1. Мало | а) Засилувач во спој со заеднички емитер | _____ |
| 2. Големо | б) Засилувач во спој со заедничка база | _____ |
| | в) Засилувач во спој со заеднички колектор | _____ |

6. Поврзи ги колата со повратна врска со видовите повратна врска:



-
1. Напонско-паралелна _____
 2. Сериско-напонска _____
 3. Сериско-струјна _____ .

7. Поврзи ја конфигурацијата на засилувачот со фазното поместување на излезниот напон во однос на влезниот:

1. Засилувач во спој со заеднички сорс а) нема _____
2. Засилувач во спој со заеднички дрејн б) 180° _____
3. Засилувач во спој со заеднички гејт.

III Прашања со дополнување

8. Кога напонското засилување е негативно, излезниот и влезниот напон се фазно поместени за _____ .

9. Разликата меѓу горната и долната гранична фреквенција се нарекува _____ и се бележи со _____ .

10. Фреквенцијата на која засилувањето паѓа за 3 dB во однос на засилувањето при средни фреквенции се нарекува _____ .

11. Засилувачот во спој со заеднички колектор има напонско засилување со _____ вредност а струјно со _____ вредност.

12. Емитерски следител се нарекува засилувачот во спој со заеднички _____ .

13. Ако фазите на влезниот и на вратениот сигнал се совпаѓаат, повратната врска е _____, а ако се разликуваат за 180° повратната врска е _____.

14. Со релацијата $A_r = \frac{A}{(1 - A\beta)}$, дефинирано е засилување на засилувач со _____ повратна врска.

Вежби за активно учење:



- Состави табела во која ќе ги внесеш вредностите на параметрите на различните конфигурации на засилувач и анализирајќи ја, одреди ја примената.
 - Истражувај на интернет за засилувачи.
 - Изработи проект на тема видови засилувачи.
 - Изработи проект за практичната примена на засилувачите.
-

ИНТЕГРИРАНИ КОЛА

Се што треба да знаеш за интегрираните кола ќе дознаеш со изучување на содржините од оваа тема од електрониката и ќе можеш:

- да ја истакнеш потребата од развојот на интегрираните кола;
- да ги објаснуваш карактеристиките на одделните видови интегрирани кола;
- да ги разликуваш основните постапки при изработка на интегрирани кола;
- да ги познаваш предностите при масовната употреба на интегрираните кола;
- да ја познаваш примената на интегрираните кола.



Потребата од минијатуризација, намалување на димензиите на електричните кола и елементите и напредокот во областа на микроелектрониката, довеле до појава на интегрираните кола, во кои повеќе електронски елементи, меѓусебно поврзани и сместени во заедничко куќиште, извршуваат одредена функција. Со појавата на интегрираните кола и на плочките со печатени врски, во значителна мерка е изменет начинот на проектирањето и изработката на електронските кола.

Во ова поглавје е направен обид да се разјаснат некои постапки во изработката на интегрираните кола, со цел да се добие општа слика какви интегрирани кола има и што се содржи еден "чип", назив за интегрирано коло, кој се среќава во стручната терминологија.

4.1 Карактеристики на одделни видови интегрирани кола

Интегрираните кола можат да се поделат, според нивните функции, на две големи групи: **аналогни и дигитални**. Според технологијата на применетите активни елементи во колата, имаме интегрирани кола со биполарни транзистори и MOS интегрирани кола.

Аналогните кола во основа се прават со биполарни транзистори. MOS аналогните кола се со релативно понов датум. Тие овозможуваат интегрирање на аналогните функции заедно со дигиталните кола.

Многу добро познати **дигитални интегрирани кола** се произведени со биполарни кола пред дваесетина години. Така, на пример, интегрираните кола од серијата 7400 користат биполарни транзистори. Колата со биполарни транзистори имаат поголема потрошувачка од колата со MOS транзистори и не ги задоволуваат барањата на сложените дигитални интегрирани кола. За такви кола, во кои спаѓаат микропроцесорите и големите мемории и кои содржат милиони активни елементи, исклучиво се користи MOS-технологијата. Интегрираните кола се делат на два основни вида: дигитални и линеарни. **Сите интегрирани кола, во кои се содржани дигитални кола, почнувајќи од најпрости логички порти па се до најсложените микропроцесори, се класифицираат во дигитални, а сите останати во линеарни интегрирани кола.**

Пстојат повеќе видови фамилии на логички кола:

- RTL (RESISTOR-TRANSISTOR LOGIC): отпорничко-транзисторска логика;
- DTL (DIODE-TRANSISTOR LOGIC): диодно-транзисторска логика;
- TTL (TRANSISTOR-TRANSISTOR LOGIC): транзисторско-транзисторска логика;
- ECL (EMITTER COUPLED LOGIC): емитерско-спрегната логика;
- IIL (I^2L) (INTEGRATED INJECTION LOGIC): интегрирано-инјекторска логика;
- MOS (METAL-OXIDE-SEMICONDUCTOR LOGIC): логика со MOSFET транзистори;
- CMOS (COMPLEMENTARY METAL-OXIDE-SEMICONDUCTOR LOGIC): логика со комплементарни MOSFET транзистори.

TTL – фамилијата е позната како серија 74, кои претставуваат први две бројки во нивната ознака, по што следуваат две или три бројки. Нејзината основна карактеристика е да работи со напон на напојување од 5V. Првата серија носи ознака 74xx, но таа набргу станува застарена и е заменета со друга TTL – фамилија со додадени две букви LS, па добиваме кола со ознака 74LSxx. Со буквите LS се означуваат малумоќни Шоткиеви кола, карактеристични по големата брзина на воспоставување на предниот и задниот раб на импулсите. Така, на пример, оригиналното коло 7432 се наоѓа како 74LS32.

Првата серија **CMOS** кола носи ознака 40xx и таа работи со напон на напојување од 3 до 15V. Од серијата 74 со HC се означуваат CMOS кола со голема брзина и со HCT коло со CMOS кое работи со нормални TTL – нивоа. Серијата 74 CMOS кола има поголема брзина од серијата 40xx, а нивниот излез може да даде струја и до 25mA, што, на пример, е доволно да активира LED. Меѓутоа, колата 74HC можат да работат со напон на напојување само од 2 до 6V. Колата 74HC и 74HCT имаат еднаков распоред на ножички како колата од серијата 74LS.

Една од карактеристиките на CMOS интегрираните кола е можност за нивно оштетување со дејство на статички електрицитет. Кога сме во движење, нашето тело и алиштата постојано се набиваат со статички електрицитет. Јачината на струјата на празнење на тој електрицитет не е толку голема за да предизвика оштетување, но напонот може да достигне и до неколку стотици волти..

Кога ракуваме со обични компоненти, како што се отпорници и биполарни транзистори, мала е можноста со овој напон тие да бидат оштетени. Но, CMOS колата се изградени со фетови за кои знаеме дека се подложни на оштетување со такви напони. Поради тоа, кога се ракува со CMOS колата, претходно мора да се испразни статичкиот електрицитет, така што со раката ќе се допре некој заземјен метален објект.

Кога се работи со скапи интегрирани кола, се препорачува на рацете да се носат ремени за заземјување. Тие имаат голем отпор кој ја ограничува струјата на празнењето и овозможува големите статички напони безбедно да се одведат од телото на заземјувањето.

Голем број интегрирани кола, кои не спаѓаат во овие две серии, како што се микроконтролери, микропроцесори и разни интерфејс кола, се наредени во две или три подкатегории.

Во категоријата **линеарни интегрирани кола** спаѓаат разни аудио, видеокола, радио и комуникациски кола, тајмери, осцилатори и голем број уреди со специјална намена.

4.2. Хибридни интегрирани кола

Постојат два основни вида на интегрирани кола: **хибридни и монолитни**.

Хибридните интегрирани кола се изработуваат со микроелектронски активни и пасивни елементи, прицврстени на заедничка подлога. Врските меѓу елементите се изработуваат во техниката на тенок филм. Тоа е техника на нанесување спроводен материјал на керамичка

подлога, на која е поставена маска со празнини на оние места каде што треба да бидат врските, или пасивните елементи. Спроводниот материјал се наоѓа во состојба на метална пареа и се нанесува на плочката во загреана комора со таложење. Дебелината на наталожениот филм изнесува околу 1 μm .

Активните елементи се изработуваат во дифузиона или епитаксијална планарна техника и се вградуваат на веќе подготвената керамичка плочка. На крајот, сето тоа се затвора во пластично или керамичко куќиште.

Хибридните интегрирани кола имаат подобри карактеристики од соодветните електронски кола со дискретни елементи. Густината на пакувањето на елементите се движи меѓу 30 и 100 елементи по 1cm^2 и најчесто се користат како излезни степени со поголема излезна моќност.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Како се делат интегрираните кола според нивните функции?
2. Какви транзистори се користат за производство на дигитални интегрирани кола?
3. Во која техника се изработуваат активните елементи на хибридните кола?
4. Објасни ја потребата од развојот на интегрираните кола.
5. Објасни ги карактеристиките на аналогните интегрирани кола.

4.3. Монолитни интегрирани кола

Монолитните интегрирани кола се изработуваат на единствен кристален или монолитен материјал, со што е постигната голема густина на пакување на составните делови. Во производството на овие кола се применуваат неколку десетина операции. Повеќето операции се изведуваат автоматски на поголем број интегрирани кола, нивниот број достигнува и до 1000.

Производството на интегрираните кола мора да се одвива во идеално чист простор, без присуство на честички од прашина, полен или други примеси во воздухот. Обична честичка од прашина, присутна на површината за обработка со димензија помала од 1 μm , изгледа како карпа.

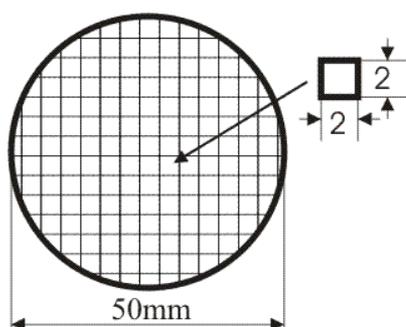
4.3.1. Изработка на основата

Во технологијата на полупроводниците се потребни многу чисти полупроводнички материјали во монокристален облик. Целото парче на полупроводникот мора да потекнува од еден кристал со хомогена кристална структура. Основните сировини за добивање на

германиум и силициум се германиум диоксид и силициум диоксид. Тие се пречистуваат до тој степен што на 10^{10} атоми германиум или силициум доаѓа само еден атом на примеса.

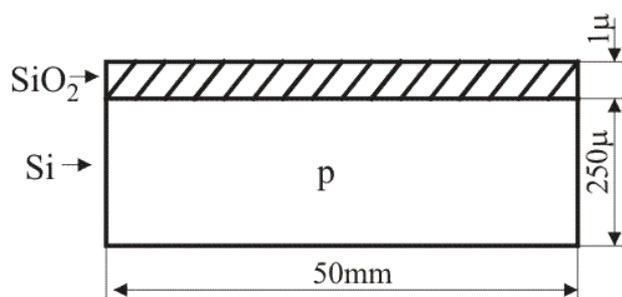
Постапката на пречистувањето се спроведува со растопен полупроводник кој постепено се лади, а нечистотиите се собираат во растопениот дел. На тој начин, во оладениот материјал процентот на примесите станува многу мал. Монокристалите се формираат со постапката на извлекување. Во уредот за извлекување, пречистениот полупроводник повторно се топи во околина исполнета со некој инертен гас, со парче кристал се допира површината на истопената маса и постепено се врти и се извлекува нагоре и така расте монокристалот на полупроводникот со форма на цилиндар.

Во процесот на изработката на интегрираните кола, монокристалните цилиндри се сечат на тенки дискови со пречник од околу 50-70mm и дебелина од 250 до 400 μm . На површината на дискот се формира мрежа од квадратчиња со димензии 2 x 2mm (слика 4.1).



4.1: Диск исечен од монокристал на силициум.

Секое од овие квадратчиња служи како подлога или основа на која се формираат идентични интегрирани кола, бидејќи сите операции се изведуваат истовремено на целиот диск. Потоа се прави оксидација на површината на дискот со што се формира тенок слој на силициум диоксид. Тоа се изведува во комора која се загрева на висока температура од 800 до 1200°C . Силициум диоксидот, кој претставува стакло, има особини на добар електричен изолатор, а служи и како заштитен слој од хемиски влијанија врз дискот. Пресекот на дискот после оксидацијата е прикажан на слика 4.2.



4.2: Пресек на дискот по оксидацијата.

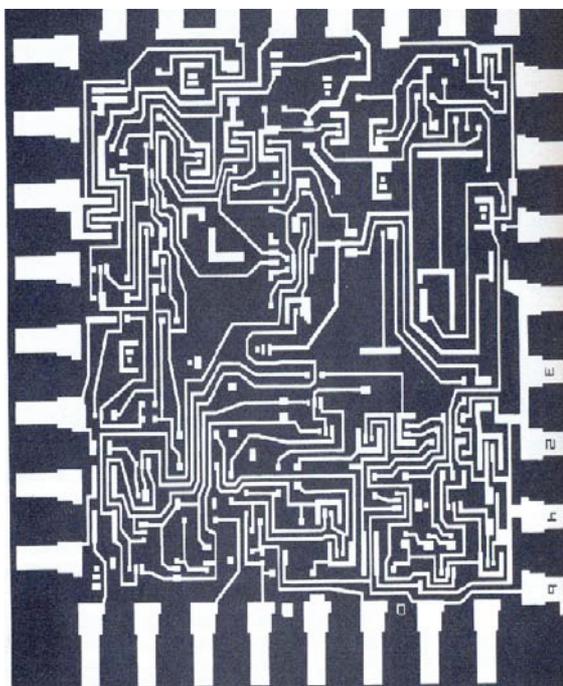
4.3.2. Фотолиитографија

Да се сместат милион транзистори на мал простор, меѓусебно да се поврзат во комплексно коло, за да функционираат како мемориски чип или микропроцесор, потребен е специјален процес, наречен фотолиитографија.

Структурата на интегрираното коло е составена од повеќе слоеви, секој слој се нанесува на одредено место со соодветен чекор во процесот на производството на колото. Распоредот на тие места се одредува со таканаречена маска. Маската е аналогна на фотографски негатив и содржи слика на распоредот на полињата за нанесување на слоевите. Таа најчесто се прави на стаклена плочка, па потоа се намалува на површина од 2 x 2mm и се повторува за да се добие истиот распоред како на слика 4.1.

Фотолиитографскиот процес е многу сличен на изработка на црно бели фотографии.

Еден пример на типична маска за формирање на еден слој е прикажан на **слика 4.3**.



4.3: Маска за формирање на еден слој од интегрираното коло.

Фотолиитографскиот процес започнува со ставање една капка течен фотоосетлив материјал, наречен фоторезист во средината на дискот. Потоа, дискот се завртува со голема брзина и фотоосетливата емулзија се распространува рамномерно по површината на дискот, при што се добива слој со дебелина околу 700 μm . Овој слој понатаму се суши и се пече пред да биде изложен на светлина.

Маската се става врз дискот, така што полињата на маската и на дискот да се поклопат. Светлина со голема јачина се пропушта преку маската на фотоосетливиот слој на дискот. Со маската се одредува кои делови од дискот ќе бидат осветлени, а кои ќе останат во темно.

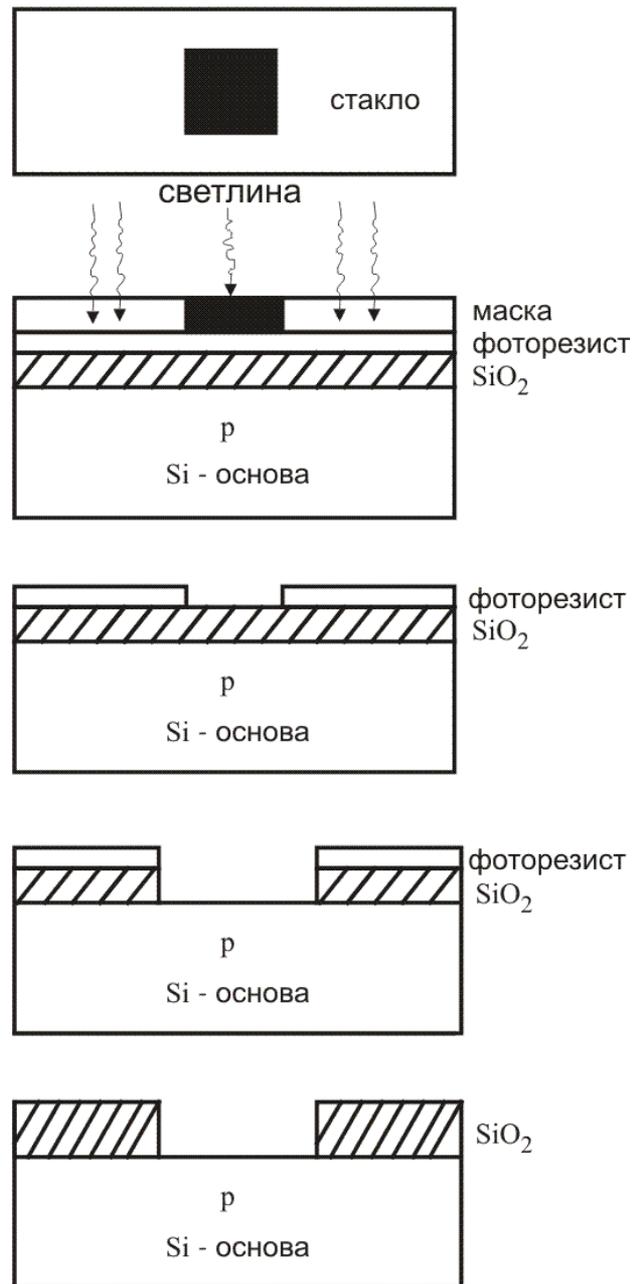
Фоторезистот е органски полимер, кој може да биде позитивен или негативен. Со негативниот фоторезист, областите изложени на светлина стануваат полимеризирани и цврсти. По развивањето, овие области остануваат на површината на дискот, а неекспонираните делови се отстрануваат. Со оваа постапка, на дискот се добива распоред спротивен од оној на маската. Позитивниот фоторезист реагира на спротивен начин.

Изложувањето на фоторезистот на светлина може да се направи преку маска ставена директно во контакт со дискот, или маската да се оддалечи на некое растојание, со што се заштитува од гребење. Во поново време се применува експонирање со проекција, со што сликата од маската се проектира преку прецизни оптички системи на површината на дискот. На овој начин може да се постигне натамошно намалување на димензиите на сликата од маската преку оптиката за проекција.

Во проектирањето на распоредот на елементите на маската се оди на максимално смалување на растојанието меѓу составните делови дури дотаму што димензиите се доближуваат до брановата должина на видливата светлина, што претставува основна пречка. Поради тоа, фотолитографските системи користат ултравиолетова светлина, па дури и X-зрачења кои имаат помали бранови должини.

Развивањето на осветлениот фоторезист преку маската се прави со киселини во неколку наврати. Со првото развивање се отстрануваат деловите од фоторезистот кои не биле осветлени. Потоа дискот се потопува во друга киселина, која не реагира со преостанатиот фоторезист, туку го раствара слојот на силициум диоксид, кој е откриен со претходното развивање. Со третото развивање се отстранува и преостанатиот дел на фоторезистот.

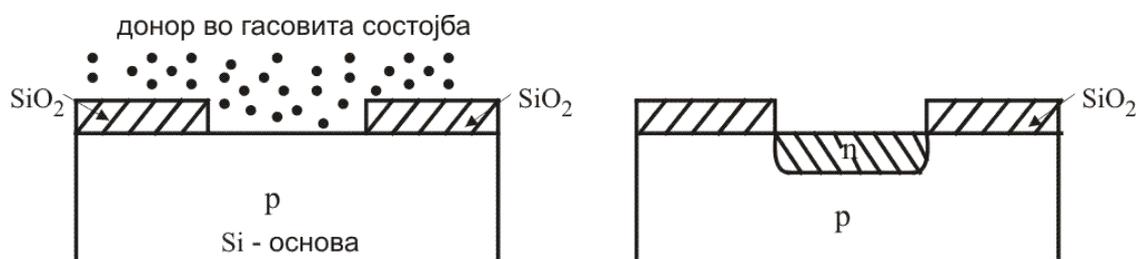
Литографската постапка на формирање на "прозорец", само како илустрација е прикажана на **слика 4.4**.



4.4: Литографска постапка на формирање на "прозорец".

4.3.3. Дифузија

Процесот на дифузија претставува процес на внесување примеси на површината на дискот. Дискот се загрева на висока температура, 800°C за германиумот и 1200°C за силициумот, а примесите во течна состојба или во форма на пара, се доведуваат на површината на дискот. По пат на дифузија, атомите на примесите продираат во површинскиот слој преку подготвените отвори на дискот и формираат PN-спој. Длабочината на која дифузираат примесите е дефинирана со температурата и времето за кое дискот е оставен во печката за дифузија. Со повторување на процесот повеќе пати се добива повеќеслојна полупроводничка структура. Дифузијата преку оксидниот слој не е можна. Шематскиот приказ на дифузијата е претставен на **слика 4.5**. По завршената дифузија, во основата од p-тип се формира област од n-тип. После оваа прва, следува втора, трета итн. дифузија за добивање сложено интегрирано коло.



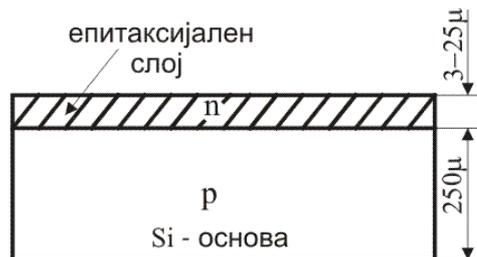
4.5: Шематски приказ на дифузија.

Со процесот на дифузија, најголемата концентрација на примесите е секогаш на површината на дискот. Подлабоко контролирано продирање на атомите на примесите во силициумскиот диск се постигнува со јонска имплантација. Тоа е процес на формирање млаз од забрзани јони на примеса и негово насочување кон површината на дискот. Забрзаните јони удираат во површината како куршуми и го збогатуваат основниот слој со потребната количина на примеси. На овој начин се контролира количината и продирањето на примесите со поголема прецизност.

4.3.4. Епитаксијален раст

Операција на додавање на силициумската основа на дискот на дополнителен слој полупроводник од спротивен тип се вика епитаксијален раст. Тоа се прави во специјална епитаксијална печка во која се загрева дискот и се пушта гас кој содржи две или повеќе соединенија на силициум со примесите. Тие се разложуваат, а силициум со примеси од p или од n-тип се таложи на површината на дискот. Наталожениот слој од силициум има иста кристална структура како основата и со неа претставува единствен монокристал. Со

оваа постапка може точно да се контролира дебелината и составот на епитаксијалниот слој (слика 4.6).



4.6: Пресек на силициумски диск по завршена постапка на епитаксијален раст.

Врските меѓу елементите на интегрираното коло се прават со нанесување тенок пласт – филм од спроводен материјал. Постапката на нанесување се вика таложење и се изведува во комора со висок вакуум. Во комората се воведува алуминиум, загреан до испарување, заедно со инертен гас и со струењето на гасот алуминиумот се распространува преку дискот и се таложи на подготвени отвори на површината на дискот, создавајќи спроводни врски меѓу елементите.

На сличен начин се прават тенкослојни отпорници со големи вредности на отпорноста. Наместо алуминиум, како материјал за нанесување се користи никел-хром, хром-силициум или молибден-силициум.

По завршувањето на процесот на формирање на интегрираното коло, следуваат завршните операции во кои спаѓаат: контрола, раздвојување и ставање во куќиште.

Во текот на еден технолошки циклус на еден диск се произведуваат до 150, па и повеќе идентични монолитни интегрирани кола. После завршената обработка на дискот, се прави испитување на секое поединечно интегрирано коло, а неисправните кола се обележуваат. Со дијамантска пила се засекуваат линиите на разделувањето на поединечните кола и тие можат да се разделат со кршење, слично на сечење на стакло. Интегрираното коло се става на подлога, метализираните контакти се поврзуваат со соодветните изводи со тенки спроводници и сето тоа се затвора во метално, керамичко или пластично куќиште. Куќиштата можат да бидат со разни форми и со различен број на изводи.

4.4. Примена на интегрираните кола

Интегрираното коло претставува мал електронски уред, направен од полупроводнички материјал. Првото интегрирано коло се појавува во 1950 година. Со интегрираните кола се

отвора нова ера во светот на електрониката. **Интегрираното коло се јавува под назив: микроколо, микрочип, силициумски чип или само чип.**

Интеграцијата на голем број ситни транзистори во еден мал чип претставува голем напредок во однос на рачната изработка на електронски кола со електронски дискретни кола. Предностите на интегрираните кола во однос на колата со дискретни елементи се нивната цена и карактеристиките. Чиповите со сите компоненти се печатат на една подлога, со што компонентите се на поблиско растојание, имаат пократко време за промена на режимот на спроведување и имаат помала потрошувачка на енергија. Површината на чипот се движи од неколку десетини до 350 mm^2 , со густина од 10^6 транзистори на mm^2 .

Според бројот на интегрираните транзистори и други електронски компоненти, интегрираните кола можат да се поделат на следниве групи:

- **кола со низок степен на интеграција (SSI)**, во ова група спаѓаат кола до 100 компоненти по чип, што обезбедува, на пример, неколку логички порти;

- **кола со среден степен на интеграција (MSI)** од 100 до 3000 компоненти, со кои се обезбедува градба на покомплексни системи за нешто малку повисока цена, како на пример RAM мемории од 1Kb, чипови за електронски калкулатори и првите микропроцесори со помалку од 4000 компоненти;

- **кола со висок степен на интеграција (LSI)** од 3000 до 100 000 компоненти каде што спаѓаат основните мемории на компјутерите со околу 10 000 транзистори и следната генерација микропроцесори;

- **кола со многу висок степен на интеграција (VLSI)** за чипови со 1 Mbit RAM мемории со повеќе од 1 милион транзистори.

Освен овие групи, се јавуваат и нови, како што е “сè на еден чип” на кој се наоѓаат сите компоненти потребни за еден компјутер, или микроконтролери, како и “тридимензионални интегрирани кола” со два или поголем број пластови на електронски компоненти, интегрирани вертикално и хоризонтално во едно коло.

Интегрираните кола се изработуваат за стандардни примени по стандардни спецификации или за специфични намени, како што е, на пример, мобилен телефон. Колата по одредени стандарди се применуваат во областа на компјутерите, комуникациите, производствените процеси, транспортни системи, интернетот и други.

Чиповите на интегрираните кола се пакуваат во керамички или во пластични куќишта. Изводите можат да бидат наредени во еден ред на едната страна на куќиштето, во две редици на две спротивни страни или како решетка околу сите страни на куќиштето. Решеткаста форма на изводите имаат колата од групацијата VLSI.

Меѓу попознатите интегрирани кола можат да се наведат:

NE 555, тајмер и мултивибратор, UA741 операциски засилувач, TTL логичката серија 7400, CMOS серијата 4000 (тука спаѓа и серијата 74HC00), првиот микропроцесор INTEL 4004, претходник на 8080CPU и други, микропроцесор во MOS технологија 6502 и 380,

микропроцесори Моторола 6800 серија, претходници на 68000 и 88000. За значењето на интегрираните кола може да послужи информацијата дека првиот дигитален компјутер направен со 18000 вакумски електронски цевки, познат под називот ENIAC, имал тежина од преку 30 t и потрошувачка од 200KW.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Која е основната особина на монолитните интегрирани кола?
2. Која постапка се користи за формирање на монокристалите?
3. Како се прави оксидација на површината на дискот?
4. Каква е постапката на фотолитографијата?
5. Што претставува процесот на дифузијата?
6. Што е епитаксијален раст?
7. Кои се основните постапки при изработка на интегрирани кола?
8. Каде се применуваат интегрираните кола?
9. Како се делат интегрираните кола според нивните функции?

ЗАПАМЕТИ !!!

* Интегрираните кола содржат голем број електронски елементи кои меѓусебно се поврзани и сместени во заедничко куќиште и извршуваат одредена функција.

* Интегрираните кола, според нивните функции, можат да се поделат на: аналогни и дигитални.

* Интегрираните кола, според составот, можат да се поделат на: хибридни и монолитни.

* Хибридните интегрирани кола се изработуваат со микроелектронски активни и пасивни елементи.

* Основните операции при изработка на монолитните интегрирани кола се: подготовка и оксидација на основата, фотолитографија, дифузија, епитаксијален раст и завршни операции.

ТЕМАТСКО УТВРДУВАЊЕ

I Прашања со заокружување

(Заокружи ги точните одговори)

1. Интегрирани кола осетливи на статички електрицитет се:
- а) CMOS колата
 - б) TTL колата
 - в) RTL колата.

II Прашања со поврзување

2. Поврзи ги ознаките со видовите фамилии на логички кола:

- | | |
|---------|--|
| 1. RTL | а) Логика со MOSFET транзистори_____ |
| 2. DTL | б) Емитерско-спрегната логика_____ |
| 3. TTL | в) Транзисторско-транзисторска логика_____ |
| 4. ECL | г) Диодно-транзисторска логика_____ |
| 5. IIL | д) Интегрирано-инјекторска логика_____ |
| 6. MOS | ѓ) Отпорничко-транзисторска логика_____ |
| 7. CMOS | е) Логика со комплементарни MOSFET транзистори_____. |

3. Поврзи го степенот на интеграција на интегрирани кола со бројот на интегрираните транзистори:

- | | |
|--|-----------------------------|
| 1. Кола со низок степен на интеграција | а) од 100 до 3000 _____ |
| 2. Кола со среден степен на интеграција | б) повеќе од 10^6 _____ |
| 3. Кола со многу висок степен на интеграција | в) од 3000 до 100000 _____. |
| 4. Кола со висок степен на интеграција | г) до 100 _____. |

III Прашања со дополнување

4. Првата серија на TTL-фамилијата има ознака _____.
5. Првата серија на CMOS-фамилијата има ознака _____.
6. Процесот на внесување примеси на површината на дискот се нарекува _____.
7. Операција на додавање на силициумската основа на дискот на дополнителен слој полупроводник од спротивен тип се нарекува _____.

Истражувај и дознај повеќе:



- Истражувај на интернет за видови и карактеристики на интегрирани кола и врз основа на истражувањето изработи проект.
 - Во каталог за интегрирани кола пронајди ја фамилијата на логички интегрирани TTL кола и анализирај ги нивните ознаки.
 - Во каталог за интегрирани кола пронајди ја фамилијата на логички интегрирани CMOS кола и анализирај ги нивните ознаки.
-

ОПЕРАЦИСКИ ЗАСИЛУВАЧИ

Со изучување на содржините од оваа тема ќе стекнеш основни знаења за операциските засилувачите и ќе можеш:

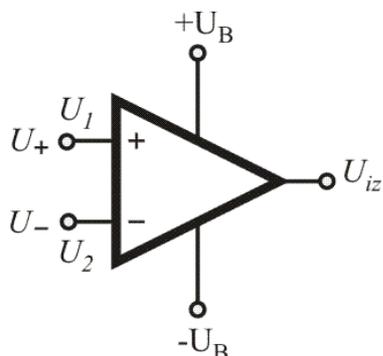
- да ја сфаќаш улогата на операциски засилувач;
 - да ги опишуваш основните карактеристики на операцискиот засилувач;
 - да разликуваш реален и идеален операциски засилувач;
 - да го разбираш терминот виртуелна куса врска;
 - да ја толкуваш блок-шемата на реален операциски засилувач;
 - да ја анализираш електричната шема на реален засилувач ($\mu A741$);
 - да ги пресметуваш параметрите кај различни конфигурации на операциски засилувач;
 - да ја објаснуваш повратната врска на операцискиот засилувач;
 - да ја познаваш практичната примена на операцискиот засилувач.
-

5. Операциски засилувачи

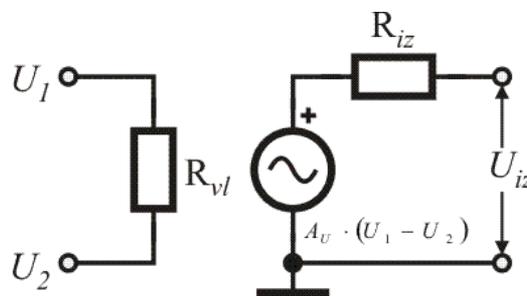
Операцискиот засилувач е еден од основните склопови кој може да задоволи голем број барања за градба на аналогни електронски системи. Во комбинација со разни надворешни елементи, операцискиот засилувач може да извршува голем број аналогни функции, како што се засилување, собирање, интегрирање, диференцирање и други. Широката употреба на операцискиот засилувач е овозможена со негово интегрирање во еден чип.

Операцискиот засилувач е повеќестепен напонски засилувач со директна спрега, со диференцијален влез и со многу големо засилување.

Неговиот електричен симбол е даден на **слика 5.1**, а еквивалентната шема на **слика 5.2**. Еквивалентната шема е составена од еден идеален напонски засилувач и конечни вредности на влезен и излезен отпор на засилувачот.



Слика 5.1: Електричен симбол на операциски засилувач.



Слика 5.2: Еквивалентна шема на реален операциски засилувач.

Влезовите на операцискиот засилувач се два приклучоци означени со "+", како неинвертирачки, и со "-", како инвертирачки влез а излезниот напон U_{iz} е директно пропорционален на напонската разлика на влезните напони U_- и U_+ (исто како кај диференцијалните засилувачи):

$$U_{iz} = A_U (U_1 - U_2) = A_U (U_+ - U_-), \dots\dots\dots(5.1)$$

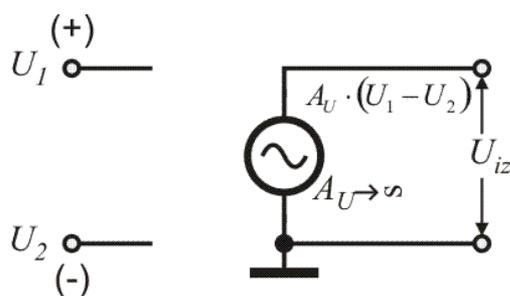
каде што со A_U се означува засилувањето на операцискиот засилувач со отворена јамка (без негативна реакција). Излезниот напон е фазно поместен за 180° во однос на напонот U_- кој доаѓа на "-" влезот и затоа тој се вика инвертирачки влез. Влезниот напон U_+ на влезот со ознака "+" е во фаза со излезниот напон и поради тоа е наречен неинвертирачки влез.

5.1. Идеален операциски засилувач

За упростување на математичките операции за утврдување на изразот за засилување се користи идеален операциски засилувач. Еден идеален операциски засилувач ги има следниве карактеристики:

1. Бесконечно големо напонско засилување $A_U = \infty$. Примарна функција на засилувачот е засилувањето да биде што е можно поголемо. Засилувањето секогаш може да се намали со надворешно коло за негативна реакција.
2. Бесконечно голема влезна отпорност, $R_{vi} \rightarrow \infty$, за побудниот степен да не биде оптоварен, што значи струите на двата влеза да бидат нула.
3. Излезниот отпор е нула, $R_{iz} = 0$, операцискиот засилувач тогаш може да дава толку голема струја, колку е потребно за оптоварувањето.
4. Времето на доцнење меѓу влезот и излезот да биде нула, излезот да се јави во исто време со инвертирачкиот влез. Фазното поместување да биде 180° . Фреквенциската карактеристика да биде рамна, а пропусниот опсег да биде бесконечен, наизменичниот влезен сигнал е само променливо еднонасочно ниво.
5. Идеален баланс – офсет (за $U_+ = U_-$, $U_{iz} = 0$). Излезот на засилувачот да биде нула кога меѓу инвертирачкиот и неинвертирачкиот влез се носи нулти сигнал.

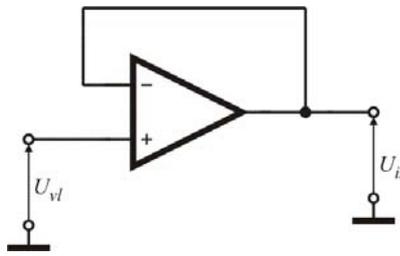
Еквивалентната шема на идеалниот операциски засилувач е дадена на **слика 5.3**.



Слика 5.3: Еквивалентна шема на идеален операциски засилувач.

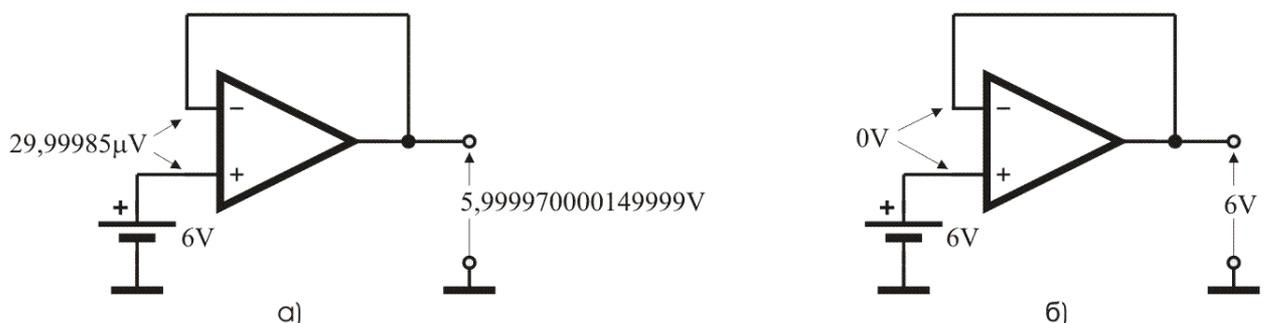
Во практиката напонското засилување на операцискиот засилувач се прави да биде поголемо, тоа се движи во границите од неколку илјади до неколку стотини илјада пати. Во анализите, секогаш се претпоставува бесконечно големо засилување на операцискиот засилувач, а со надворешните компоненти за негативна реакција се постигнуваат бараните карактеристики. Излезната отпорност е нула, па операцискиот засилувач може да дава потребна струја за оптоварувањето, како што е потребно. Освен засилувањето, кај реалниот операциски засилувач и другите карактеристики отстапуваат во одредена мера од оние на идеалниот операциски засилувач, но со цел да се упрости анализата на колото, реалниот засилувач се разгледува како да е идеален операциски засилувач.

5.2. Повратна врска на операцискиот засилувач



Слика 5.4: Повратна врска на операциски засилувач.

Ако се поврзе излезот на операцискиот засилувач со неговиот инвертирачки влез, а на неинвертирачкиот влез се приклучи напонски сигнал (слика 5.4), излезниот сигнал верно ќе го следи влезниот сигнал. Со зголемувањето на влезниот сигнал се зголемува и излезниот сигнал, согласно со дефиницијата на диференцијалното засилување. Меѓутоа, во исто време се зголемува и вратениот сигнал на инвертирачкиот влез, а неговото дејство е намалување на диференцијалната разлика меѓу влезовите, со што се намалува излезниот напон. За некоја дадена вредност на напонскиот влез U_{vl} , напонот на излезот ќе стане многу близок по вредност со U_{vl} (принцип на напонски следител), но доволно помал, така што ќе постои напонска разлика меѓу U_{vl} и инвертирачкиот влез, која се засилува и се добива излезен напон. Колото бргу ќе ја достигне точката на стабилност, во која излезниот напон ја добива точната вредност со која се одржува диференцијалната разлика на влезот. На пример, ако операцискиот засилувач има засилување од 200 000 пати и ако е $U_{vl} = 6V$, излезниот напон ќе биде $5,999970000149999V$, а диференцијалниот напон на влезот ќе биде: $6 - 5,999970000149999V = 29,99985\mu V$. За практичните пресметки вредноста од $29,99985\mu V$ не е голема и може да се смета дека диференцијалниот напон меѓу двата влезата се држи со примена на негативна реакција точно на нула (слика 5.5).



Слика 3.5.5: Ефект на негативната реакција и упростување.

За пресметка на напонското засилување на колото, потребни се две претпоставки:

1. Влезниот отпор на операцискиот засилувач е бесконечен и никаква струја не тече во неговите влезови.

2. Засилувањето на операцискиот засилувач е бесконечно и со повратната врска напоните U_+ и U_- стануваат еднакви.

Овие претпоставки ќе се користат во решавањето на сите проблеми во кои се применува идеален операциски засилувач.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

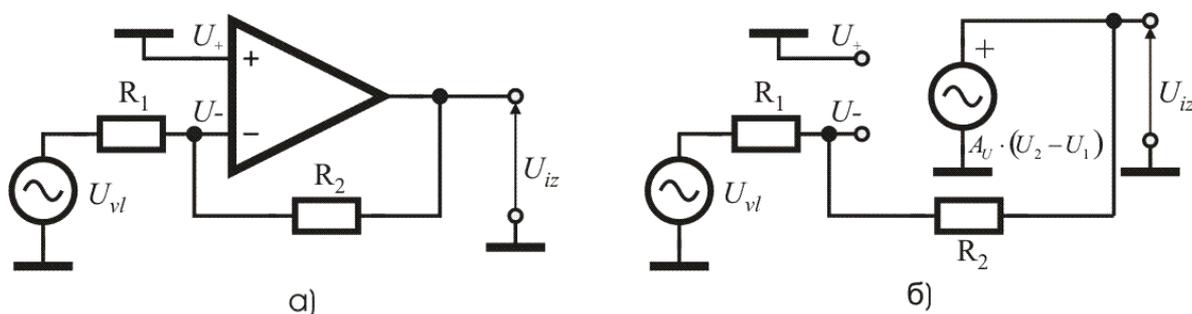
1. Дефинирај операциски засилувач.
2. Кој влез се нарекува инвертирачки а кој неинвертирачки?
3. Кои карактеристики ги има идеалниот операциски засилувач?

5.3. Различни конфигурации на операциски засилувачи

Една од најмногу користените примени на операцискиот засилувач е примената како инвертирачки засилувач.

5.3.1. Инвертирачки засилувач

Со приклучување на два отпорника, како на **слика 5.6а**, направено е засилувачко коло со засилување кое зависи само од односот на вредностите на двата отпорника. Со отпорникот R_2 се остварува негативна повратна спрега со која се враќа дел од излезниот напон на инвертирачкиот влез. Неинвертирачкиот влез е врзан на маса.



Слика 5.6: Инвертирачки засилувач и неговата еквивалентна шема.

Напонското засилување на ова коло е:

$$A_{inv} = \frac{U_{iz}}{U_{vl}}$$

Со замена на операцискиот засилувач со неговата еквивалентна шема, се добива конфигурација како на **слика 5.6б**. Колото се анализира под претпоставка на конечна вредност на

засилувањето A_U на операцискиот засилувач, а потоа резултатот се искажува со беско-
нечната вредност на A_U ($A_U \rightarrow \infty$).

За струјата на повратната спрега на отпорникот R_2 може да се напише равенката:

$$I_{R_2} = \frac{U_{iz} - U_{vl}}{R_1 + R_2}, \dots\dots\dots(5.2)$$

а за напонот на инвертирачкиот влез:

$$U_- = U_{vl} + R_1 \cdot I_{R_2}. \dots\dots\dots(5.3)$$

со замена на изразот за I_{R_2} (5.2) во (5.3) се добива:

$$U_- = U_{vl} + R_1 \frac{U_{iz} - U_{vl}}{R_1 + R_2}. \dots\dots\dots(5.4)$$

Неинвертирачкиот влез е врзан на маса, па имаме:

$$U_+ = 0 \text{ и } U_{iz} = -A_U \cdot U_-, \text{ или } U_- = -\frac{U_{iz}}{A_U} \text{ и со замена на овој израз во 5.4 добиваме:}$$

$$U_{iz} = -A_U \left(U_{vl} + R_1 \frac{U_{iz} - U_{vl}}{R_1 + R_2} \right). \dots\dots\dots(5.5)$$

Сега за напонското засилување на колото се добива:

$$A_{inv} = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = -\frac{1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2}}{\frac{1}{A_U} + \frac{R_1}{R_1 + R_2}}. \dots\dots\dots(5.6)$$

Ако во овој израз се внесе претпоставката за $A_U \rightarrow \infty$, односно $\frac{1}{A_U} \rightarrow 0$ се добива едноста-

вен израз:

$$A_{inv} = -\frac{R_2}{R_1}. \dots\dots\dots(5.7)$$

Може да се забележи дека напонското засилување на комплетното коло се регулира со односот на вредностите на двата отпорника во колото и дека не зависи од засилувањето на операцискиот засилувач A_U , под услов A_U да има многу голема вредност. Знакот "-" покажува дека излезниот напон е фазно поместен за 180° во однос на влезниот и затоа овој засилувач се вика инвертирачки.

Одредувањето на засилувањето на колото се прави со односот на вредностите на отпорнос-
тите на двата отпорника. Влијанието на сите фактори кои предизвикуваат промена на
отпорност, како што е температурата на околината се елиминираат, затоа што промените се
случуваат во двата отпорника едновремено и пропорционално се еднакви, при што односот
останува непроменет.

Со замена на резултатот $\frac{U_{iz}}{U_{vl}} = -\frac{R_2}{R_1}$ (5.7) во равенката за напонот на инвертирачкиот влез U_- (3.134) се добива интересен резултат: $U_- = 0$. Напонот на инвертирачкиот влез, во овие услови, станува еднаков на напонот на неинвертирачкиот влез, во овој случај 0. На овој начин, на влезните краеве на операцискиот засилувач како да постои куса врска наречена **виртуелна куса врска**.

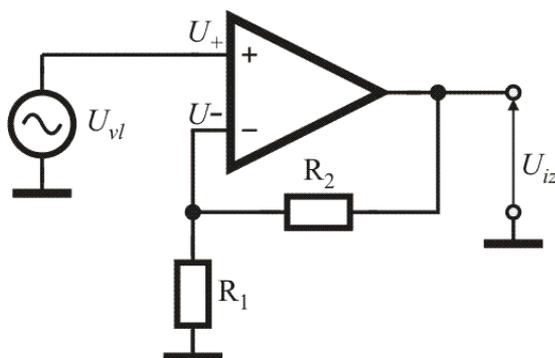
Сега лесно може да се одреди влезниот отпор на колото R_{vl} , како отпор гледан кон колото на местото на влезниот напон U_{vl} :

$$R_{vl} = R_1.$$

Виртуелната куса врска на влезот од операцискиот засилувач постои само ако тој има вградена повратна врска. Ако се оствари повратна врска од излезот со инвертирачкиот влез, имаме негативна повратна спрега, а ако се направи тоа со неинвертирачкиот влез се добива позитивна повратна спрега.

5.3.2. Неинвертирачки засилувач

Ако се комбинира идеален операциски засилувач со два отпорника, како на **слика 5.7** се добива неинвертирачко засилувачко коло, во кое излезниот и влезниот сигнал се во фаза. Влезниот сигнал се приклучува на неинвертирачкиот влез на операцискиот засилувач.



Слика 5.7: Неинвертирачки засилувач.

Под услов да не тече струја во инвертирачкиот влез и при појава на виртуелна куса врска поради постоење на негативна повратна спрега, изразот за напонот на инвертирачкиот и на неинвертирачкиот влез ќе биде:

$$U_+ = U_- = U_{vl} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{iz}, \dots\dots\dots(5.8)$$

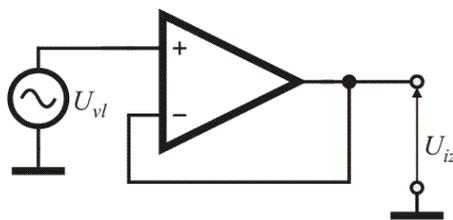
а засилувањето на колото:

$$A_{noninv} = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \dots \dots \dots (5.9)$$

И овде напонското засилување A_{noninv} се одредува со односот на вредностите на отпорите во колото, се елиминираат промените на отпорите со промена на температурата на околината, а со тоа и на засилувањето. Минималната вредност на засилувањето е 1, што се добива кога е $R_2 = 0$, за разлика од инвертирачкиот засилувач, кој може да има засилување и помало од 1, што не се практикува често.

5.3.3. Операциски засилувач со единично засилување

Во аналогните системи има ситуации кога е потребен меѓустепен за приспособување или разделување и од него не се бара засилување. За таква намена може да се примени операциски засилувач со конфигурација како на **слика 5.8**.



Слика 5.8: Операциски засилувач со единично засилување.

Излезниот напон на ова коло е еднаков со влезниот. Сепак, меѓу влезот и излезот на ова коло постои многу важна разлика. Влезниот отпор е екстремно голем, а излезниот многу мал, што овозможува приспособување на голема излезна отпорност на претходниот степен на мала влезна отпорност на следниот степен.

По својата суштина, операцискиот засилувач со единично засилување е специјален случај на неинвертирачки операциски засилувач во кој целиот излезен напон U_{iz} се враќа на инвертирачкиот влез U_{-} . Негова основна функција е да трансформира голема импеданса на мала импеданса, односно да прима сигнал од извор со висока импеданса и на излезот да обезбеди ист такъв сигнал за следното коло со мала влезна импеданса. Тој дава струјно засилување и најчесто се користи како "линиски" засилувач кој дава сигнал за долги линии или кабли.

ЗАПАМЕТИ !!!

***Операциски засилувач е повеќестепен напонски засилувач со директна спрега, со диференцијален влез и со големо засилување.**

*Со операцискиот засилувач се извршуваат голем број аналогни функции, како што се: засилување, собирање, интегрирање, диференцирање и други.

*Идеален операциски засилувач има: бесконечно големо напонско засилување, бесконечно голем влезен отпор и излезен отпор еднаков на нула.

*Реален операциски засилувач се добива со примена на надворешни елементи за негативна реакција во идеалниот операциски засилувач.

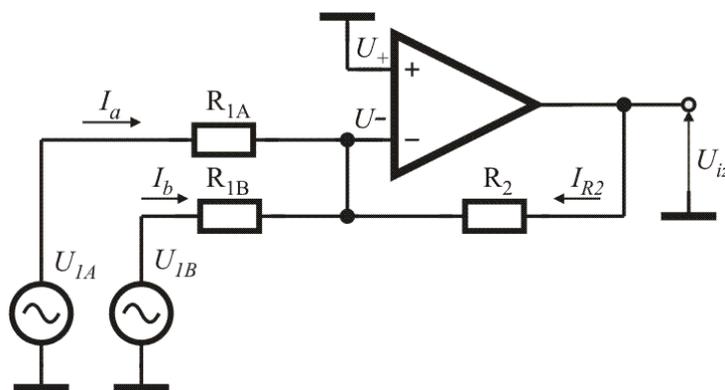
*Со инвертирачки операциски засилувач, на неговиот излез се добива засилен влезен сигнал со фазно поместување од 180° .

*Со неинвертирачки операциски засилувач, на неговиот излез се добива засилен влезен сигнал без фазно поместување.

*Операциски засилувач со единично засилување служи како трансформатор на големата излезна импеданса на изворниот засилувач на малата импеданса на оптоварувањето. Тој има големо струјно и единично напонско засилување.

5.3.4. Коло за сумирање

Колото прикажано на **слика 5.9**, е слично на колото на инвертирачкиот операциски засилувач. Разликата е во тоа што ова коло има два влезна напона U_{1A} и U_{1B} со соодветните отпорници R_{1A} и R_{1B} . Колото функционира како суматор – собирач и дава излезен напон пропорционален на збирот на двата влезни напони.



Слика 5.9: Шема на коло за собирање.

Во анализата на колото претпоставуваме идеален операциски засилувач со негативна реакција, што значи постоење на виртуелна куса врска меѓу неговите влезови ($U_- = U_+ = 0$).

Изразите за струите во колото се:

$$I_A = \frac{U_{1A}}{R_{1A}}, \quad I_B = \frac{U_{1B}}{R_{1B}}, \quad I_{R_2} = \frac{U_{iz}}{R_2} \dots (5.10)$$

За јазолот на инвертирачкиот влез, според II Кирхофов закон, може да се напише:

$$I_A + I_B = -I_{R_2}, \dots (5.11)$$

а со замена на (5.10) во (5.11) се добива:

$$\frac{U_{1A}}{R_{1A}} + \frac{U_{1B}}{R_{1B}} = -\frac{U_{iz}}{R_2},$$

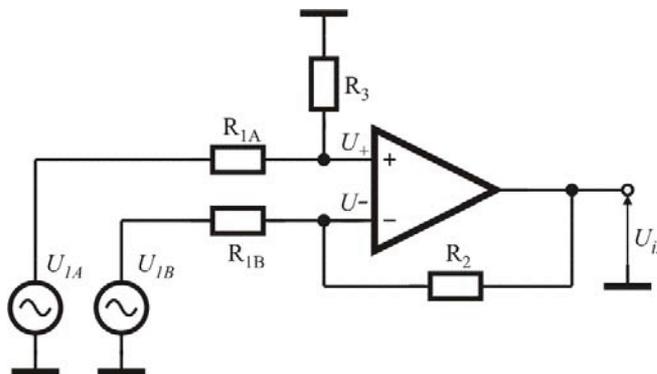
а понатаму:

$$U_{iz} = -\left(\frac{R_2}{R_{1A}}U_{1A} + \frac{R_2}{R_{1B}}U_{1B}\right) \dots (5.12)$$

Оваа равенка го дефинира излезот на колото за сумирање со два влезе и два соодветни отпорника. Коло за сумирање на три или повеќе влезни напони и отпорници може да се формира со директно проширување на овој резултат. Релативното засилување на секој од влезните напони во сумата се одредува со односот на вредностите на отпорите.

5.3.5. Диференцијален операциски засилувач

Шемата на диференцијалниот операциски засилувач, со кој се засилува разлика на сигнали, е дадена на **слика 5.10**. Едниот влезен напон U_{1A} се приклучува преку отпорникот R_{1A} на неинвертирачкиот влез, а другиот U_{1B} преку отпорникот R_{1B} на инвертирачкиот влез на операцискиот засилувач. Идеалниот операциски засилувач има виртуелна куса врска меѓу влезовите.



Слика 5.10: Диференцијален операциски засилувач.

Напонот на неинвертирачкиот влез U_+ претставува дел од напонот U_{1A} , добиен со напонскиот делител R_{1A} и R_3 :

$$U_+ = \frac{R_3}{R_{1A} + R_3}U_{1A} \dots (5.13)$$

Струјата на повратната спрега тече преку отпорниците R_2 и R_{1B} и таа изнесува:

$$I_{R2} = \frac{U_{1B} - U_-}{R_{1B}} = \frac{U_- - U_{iz}}{R_2}. \quad (5.14)$$

Од овие две равенки се пресметува:

$$U_{iz} = -\frac{R_2}{R_{1B}} \left(U_{1B} - \frac{R_3}{R_2} \frac{R_{1B} + R_2}{R_{1A} + R_3} U_{1A} \right). \quad (5.15)$$

Вредностите на отпорот на отпорниците можат да се одберат така што да биде:

$$\frac{R_{1B}}{R_2} = \frac{R_{1A}}{R_3}. \quad (5.16)$$

и за излезниот напон ќе добиеме:

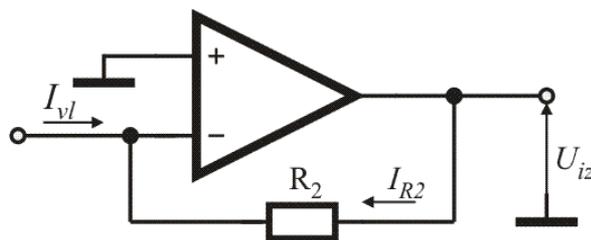
$$U_{iz} = -\frac{R_2}{R_{1B}} (U_{1B} - U_{1A}). \quad (5.17)$$

Излезниот напон е пропорционален на разликата на влезните напони, а факторот на пропорционалноста е одреден со односот на отпорот за реакција R_2 кон отпорот на изворот на сигналот за инвертирачкиот влез R_{1B} .

5.3.6. Претворувач на струја во напон

Колото на претворувачот на струја во напон е познато и под називот **струјно-напонски конвертор**.

Постојат неколку примени за кои е потребно коло за претворање на влезната струја во напон. За таа цел може да се користи едноставно коло со операциски засилувач со отпорник за негативна повратна спрега (слика 5.11).



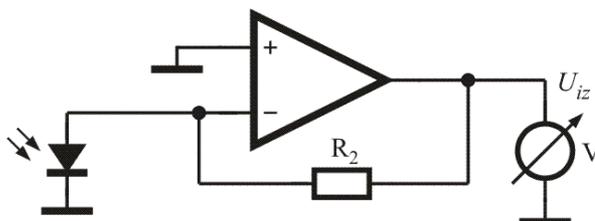
Слика 5.11: Претворувач на струја во напон.

Влезната струја не тече преку операцискиот засилувач поради неговата бесконечна влезна отпорност, таа тече само преку отпорникот за реакција R_2 . Излезниот напон е:

$$U_{iz} = I_{vl} R_2. \quad (5.18)$$

За ова коло не може да се дефинира "напонско засилување" ни "струјно засилување", зашто на влезот имаме струја, а на излезот напон. Параметрот со кој се опишува колку се менува излезниот напон со промена на влезната струја би можел да се дефинира како преносна

отпорност, при што "преносна" означува дека напонот и струјата не се мерат на исто место. Еден пример на практична примена на овој засилувач е во електронскиот мерач на осветленост. Фотодиода поврзана на влезот на претворувачот на струја во напон (слика 5.12) дава струја пропорционална на јачината на светлината која паѓа на нејзиниот објектив. Оваа струја со конверторот се претвора во напон, пропорционален на упадната светлина, кој се мери со соодветен инструмент.



Слика 5.12: Мерач на светлина со претворувач на струја во напон.

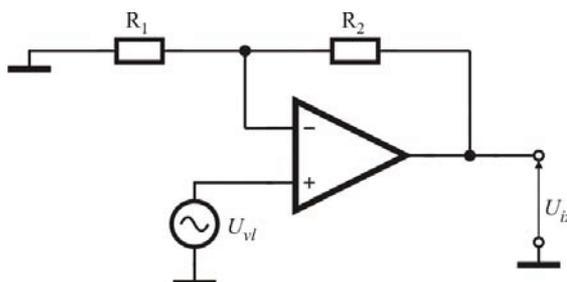
5.3.7. Претворувач на напон во струја

И овој, како и претходниот претворувач, најчесто се користи во мерна техника при пренос на мерниот сигнал на далечина. За таков вид на пренос, сигналот кој се пренесува има помали изобличувања ако се пренесува како струен сигнал. Колото на овој претворувач (слика 5.13) е познато и како напонско-струен конвертор.

Влезниот напон се приклучува на неинвертирачкиот влез на операцискиот засилувач а излезната струја тече во отпорниците R_1 и R_2 . Виртуелната куса врска и тука е присутна, што ја одредува излезната струја како:

$$I_{iz} = \frac{U_{vl}}{R_1} \quad \dots\dots\dots(5.19)$$

Излезната струја е пропорционална на влезниот напон и не зависи од вредноста на отпорникот R_2 , кој овде ја има улогата на оптоварувањето.



Слика 5.13: Претворувач на напон во струја.

5.3.8. Поместувач на фаза

Ако наместо отпорници во инвертирачки операциски засилувач се постават импеданси, коишто покрај активните содржат и реактивни компоненти, тогаш засилувањето ќе биде комплексна величина. Ако модулите на импедансите имаат иста вредност, $|Z_1| = |Z_2|$, тогаш модулот на засилувањето ќе биде единица:

$$|A| = \left| -\frac{Z_2}{Z_1} \right| = 1$$

а фазната разлика меѓу излезниот и влезниот напон ќе биде:

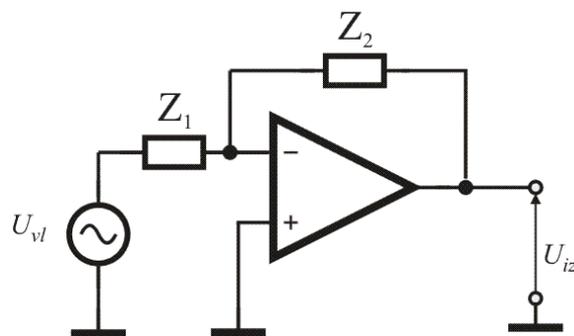
$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{A_{IM}}{A_{RE}} \dots\dots\dots(5.20)$$

каде што:

A_{IM} е имагинарниот дел од засилувањето,

A_{RE} е реалниот дел од засилувањето.

Шемата на поместувач на фаза е прикажана на **сликата 5.14**.



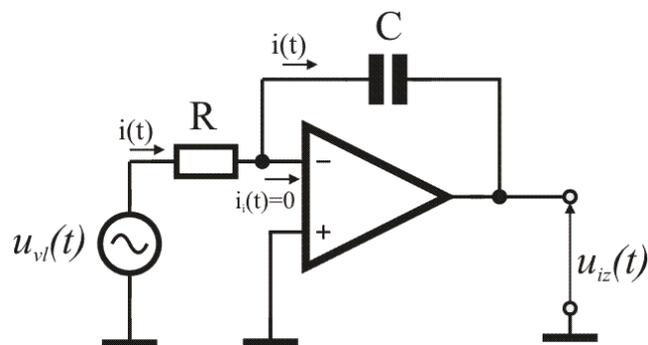
Слика 5.14: Поместувач на фаза.

5.3.9. Интегратор

Во колата за автоматско управување потребно е да се изврши функцијата интегрирање на еден наизменичен напон.

Под поимот интегрирање се подразбира промена на обликот на излезниот напон во однос на влезниот напон према математичката операција интеграл.

Шемата на едноставно коло за интегрирање е прикажана на **сликата 5.15**.



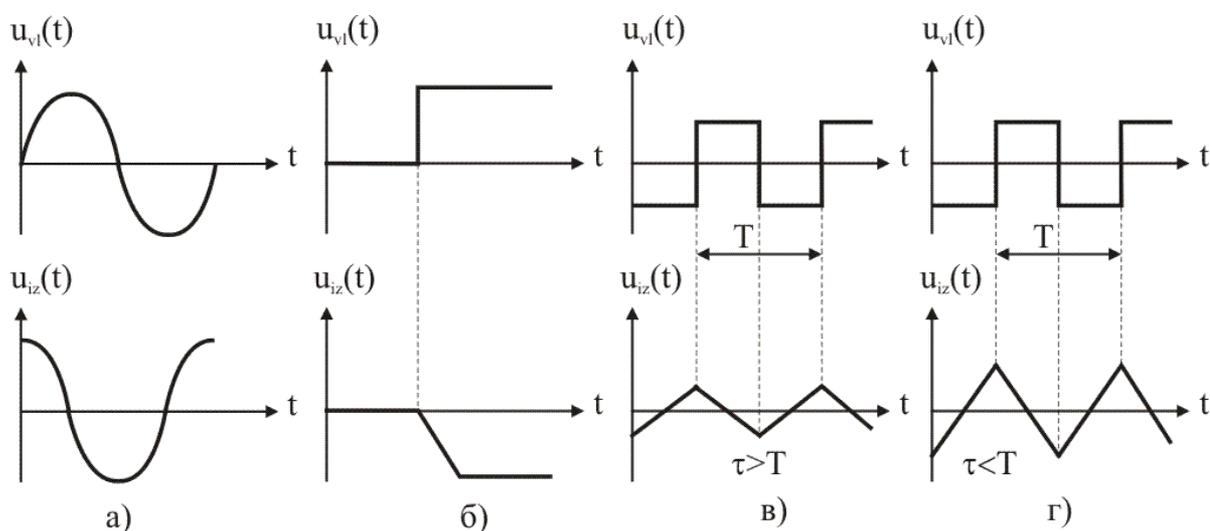
Слика 5.15: Интегратор.

Кондензаторот C е приклучен меѓу инвертирачкиот влез и излезот и со него е остварена негативна повратна врска. Поради постоењето на виртуелна куса врска ($U_+ = U_-$, $i_i(t) = 0$) на влезот од операцискиот засилувач, струјата низ отпорникот R и низ кондензаторот C ќе биде иста. Притоа, таа нема да зависи од капацитивноста на кондензаторот C ниту пак од вредноста на излезниот напон. Таа струја е одредена со равенката:

$$i(t) = \frac{u_{vl}}{R}.$$

Напоните и струите се означени како функции од времето t , со цел да се потенцира дека тие се временски променливи. Излезниот напон $u_{iz}(t)$ е еднаков на напонот на краевите од кондензаторот C , но со спротивен предзнак, гледано во однос на струјата која тече низ кондензаторот. Со течење на струја низ кондензаторот, се менува електричното оптоварување на кондензаторот, а со тоа се менува и напонот на неговите краevi.

На **слика 5.16** се дадени неколку примери кои покажуваат како се менува излезниот напон од интеграторот за различни влезни напони.



Слика 5.16: Временска промена на излезниот напон кај интегратор за различни влезни напони.

Ако на влезот од интеграторот се приклучи синусоиден напон како на слика 5.16а, на излезот ќе се добие ист бранов облик како и влезниот напон само што е фазно поместен.

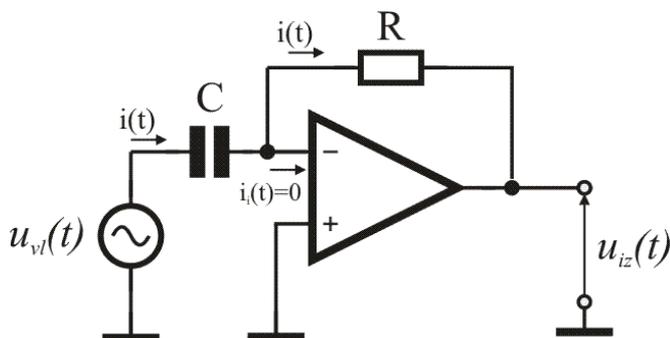
На сликата 5.16б е прикажан пример кога влезниот напон има скоковит облик. Додека влезниот напон е нула и излезниот напон е нула. Кога ќе дојде до скок на влезниот напон, излезниот напон нема да се промени моментално.

На сликата 5.16в и 5.16г е даден пример кога влезниот напон има правоаголен бранов облик, за две различни временски константи на интеграторот τ во однос на периодата на правоаголниот напон, $\tau > T$ (слика 5.16в), и $\tau < T$ (слика 5.16г).

Со производот $\tau=RC$ е дефинирана временската константа на интеграторот која го одредува факторот на пропорционалност на интеграторот.

5.3.10. Диференцијатор

Шемата на диференцијаторот е дадена на **слика 5.17**. Влезниот напон е приклучен меѓу инвертирачкиот влез од опарацискиот засилувач и маса преку кондензаторот C . Во гранката на повратната врска е приклучен отпорникот R . Поради постоењето на виртуелна куса врска ($U_+=U_-$, $i_i(t)=0$) на влезот од опарацискиот засилувач, струјата која тече низ кондензаторот C ќе биде иста со струјата низ отпорникот R .

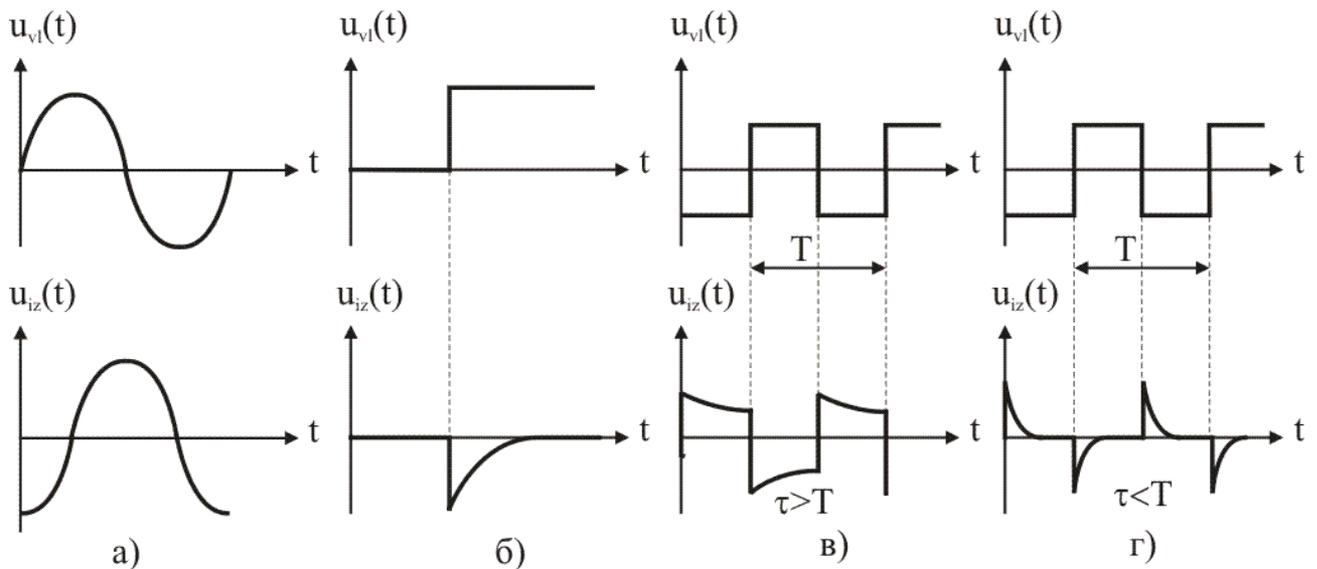


Слика 5.17: Диференцијатор.

Излезниот напон е пропорционален со брзината на промената на влезниот напон. Со производот $\tau=RC$ е дефинирана временската константа на диференцијаторот.

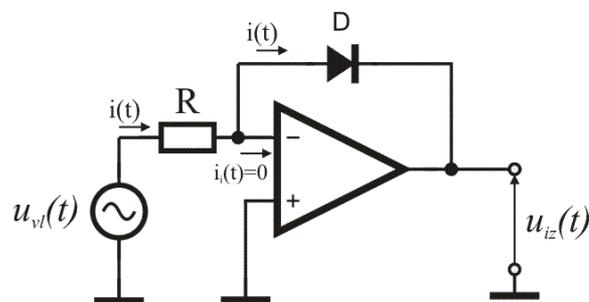
На **сликата 5.18** се прикажани промените на излезниот напон кај диференцијаторот за различни влезни напони. Ако влезниот напон кај диференцијаторот е синусоиден напон (слика 5.18а), излезниот напон ќе го има истиот бранов облик како што е влезниот напон, само што е фазно поместен. Ако влезниот напон има скоковит бранов облик (слика 5.18б), во моментот на скок на влезниот напон, на излезот ќе се појави скок со спротивен предзнак со иста амплитуда како и скокот на влезот. Потоа излезниот напон експоненцијално опаѓа до вредност нула. На сликите 5.18в и 5.18г, се дадени примери кога влезниот напон има

правоаголен бранов облик. Ако временската константа на диференцијаторот е поголема од периодата на правоаголниот напон ($\tau > T$), (слика 5.18в), на излезот ќе се појават скокови на напонот кои со тек на времето постепено опаѓаат, но не до вредност нула. Ако временската константа $\tau < T$ (слика 5.18г), на излезот ќе се појават тенки шпицеви во моментот кога влезниот напон брзо се менува и тие паѓаат на вредност нула. Колото е добар диференцијатор ако има помала временска константа во однос на времето на промена на влезниот напон (слика 5.18г).



5.3.11. Логаритамски засилувач

Логаритамски засилувач е коло во кое постои логаритамска зависност меѓу излезниот и влезниот напон. Ваков засилувач се добива кога во повратната врска на еден операциски засилувач ќе се постави елемент кој има експоненцијална струјно-напонска карактеристика како што е полупроводничката диода. Шемата на логаритамски засилувач е прикажана на сликата 5.17.



Слика 5.17: Логаритамски засилувач.

Влезниот напон е приклучен меѓу инвертирачкиот влез и маса преку отпорникот R. Со диодата D, која е приклучена меѓу излезот и инвертирачкиот влез, е остварена негативна повратна врска кај операцискиот засилувач.

Од условот за виртуелна куса врска на влезот од операцискиот засилувач ($U_+ = U_-$, $i_i(t) = 0$), струјата низ отпорникот R и низ диодата D се еднакви.

Струјата низ отпорникот R е дадена со равенката:

$$i(t) = \frac{u_{vl}(t)}{R} \dots\dots\dots(5.21)$$

а струјата низ диодата D со равенката:

$$i(t) = I_S \left(e^{\frac{u_d(t)}{U_T}} - 1 \right); \dots\dots\dots(5.22)$$

каде што:

I_S е инверзна струја на заситување на диодата,

$u_d(t)$ е напонот на краевите на диодата,

U_T е напонски еквивалент на температурата (при собна температура $U_T = 26\text{mV}$).

Ако влезниот напон е позитивен, диодата е директно поларизирана, членот $e^{\frac{u_d(t)}{U_T}}$ е многупати поголем од единица притоа единицата може да се занемари. За струјата низ диодата D се добива:

$$i(t) = I_S e^{\frac{u_d(t)}{U_T}}.$$

Ако во оваа равенка се изрази преку напонот u_d , се добива:

$$u_d(t) = U_T \ln \left| \frac{i(t)}{I_S} \right|. \dots\dots\dots(5.23)$$

Поради виртуелната куса врска, излезниот напон $u_{iz}(t)$ е еднаков на напонот на диодата D, но со спротивен знак:

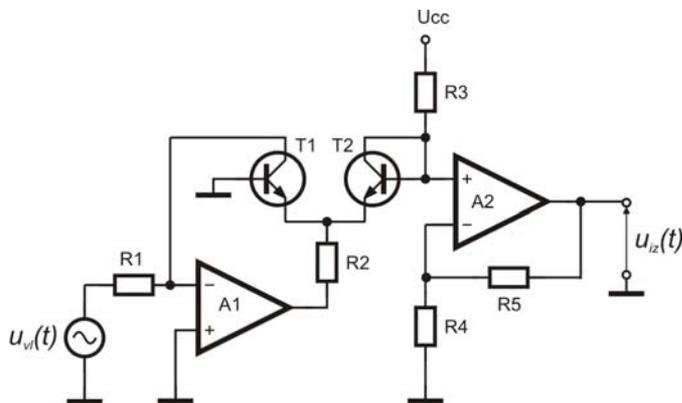
$$u_{iz}(t) = -u_d(t). \dots\dots\dots(5.24)$$

Со замена на равенките (5.25) и (5.23) во равенката (5.26) се добива:

$$u_{iz}(t) = -U_T \ln \left| \frac{u_{vl}(t)}{RI_S} \right|. \dots\dots\dots(5.25)$$

Излезниот напон е пропорционален на логаритам од влезниот напон па затоа ова коло се нарекува логаритамски засилувач.

Излезниот напон од логаритамскиот засилувач е температурно зависен преку параметрите I_S и U_T . Со промена на температурата на диодата се менува излезниот напон и без промени на влезниот напон. За да се компензира оваа зависност, се користи шема на експоненцијален засилувач изведена со биполарни транзистори како на **слика 5.18**.



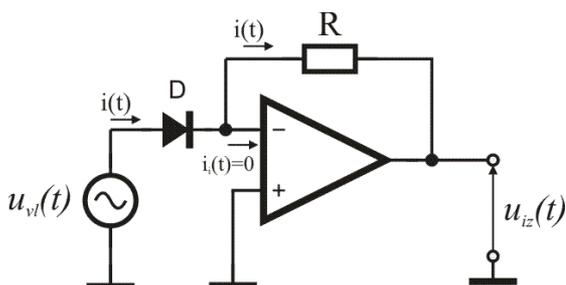
Слика 5.18: Логаритамски засилувач со температурна компензација.

Засилувачот A1 и транзисторот T1 ја вршат основната операција логаритмирање, додека засилувачот A2 и транзисторот T2 служат за компензација.

Логаритамскиот засилувач се користи во колата за обработка на сигналите.

5.3.12. Експоненцијален засилувач

Експоненцијален засилувач е коло во кое постои експоненцијална зависност меѓу излезниот и влезниот напон. Шемата на логаритамски засилувач е прикажана на **сликата 5.19**.



Слика 5.19: Експоненцијален засилувач.

Влезниот напон е приклучен меѓу инвертирачкиот влез и маса преку диодата D. Со отпорникот R, кој е приклучен меѓу излезот и инвертирачкиот влез, е остварена негативна повратна врска кај операцискиот засилувач.

Ако влезниот напон е позитивен, диодата е директно поларизирана и за струјата низ неа важи:

$$i(t) = I_S \left(e^{\frac{u_d(t)}{U_T}} - 1 \right) \approx I_S e^{\frac{u_d(t)}{U_T}} \dots \dots \dots (5.26)$$

Поради виртуелната куса врска на влезот од операцискиот засилувач, влезниот напон $u_v(t)$ е еднаков на напонот на диодата $u_d(t)$:

$$u_{vl}(t) = u_d(t) . \dots\dots\dots(5.27)$$

Исто така, струјата што тече низ диодата D тече и низ отпорникот R. Излезниот напон е еднаков на падот на напонот на отпорникот R но со спротивен знак:

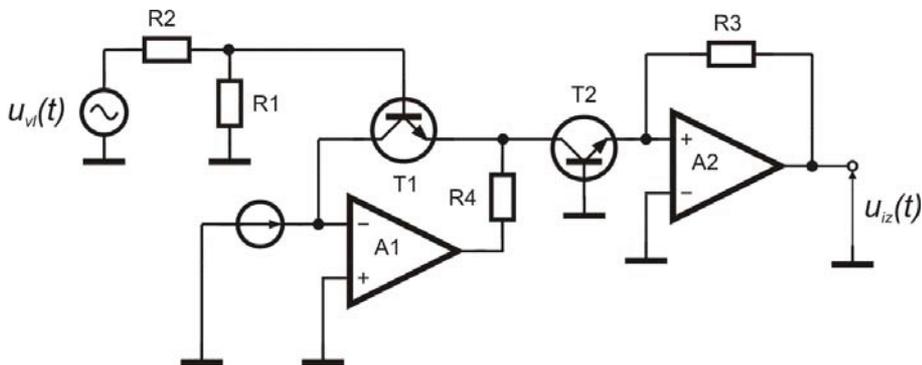
$$u_{iz}(t) = -Ri(t) . \dots\dots\dots(5.28)$$

Со замена на равенката (5.28) и (5.29) во равенката (5.30) се добива:

$$u_{iz}(t) = -RI_S e^{\frac{u_{vl}}{U_T}} .$$

Излезниот напон експоненцијално зависи од влезниот напон па затоа ова коло се нарекува експоненцијален засилувач.

Излезниот напон од експоненцијалниот засилувач е температурно зависен преку параметрите I_S и U_T . За да се елиминира оваа зависност, се користи шемата на експоненцијален засилувач изведена со биполарни транзистори како на **слика 5.20**.



Слика 5.20: Експоненцијален засилувач со температурна компензација.

Основната функција на антилогаритмирање ја вршат транзисторот T2 и засилуваќот A2, додека засилувачот A1 и транзисторот T1 служат за компензација.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Нацртај инвертирачки засилувач и изведи го изразот за напонското засилување со претпоставката за $A_U \rightarrow \infty$.
2. Дефинирај го поимот "виртуелна куса врска".
3. Каде се применува операцискиот засилувач со единично засилување?
4. Изведи ја равенката за излезниот напон кај колото за сумирање.
5. Кој операциски засилувач засилува разлика на сигнали?
6. Која е практичната примена на претворувачот на струја во напон?

7. Кој операциски засилувач се користи во мерната техника при пренос на мерниот сигнал на далечина?
8. Иведи ја зависноста на излезниот напон од влезниот напон кај експоненцијалниот засилувач.
9. Кој операциски засилувач се користи во колата за обработка на сигналите?
10. Да се нацрта шема на интегратор и да се опише принципот на работа.
11. Кој е недостатокот на логаритамскиот и експоненцијалниот засилувач и како се елиминира?

ЗАПАМЕТИ !!!

- * Со операцискиот засилувач за сумирање се добива излез пропорционален на збирот на влезните напони.
- * Диференцијалниот операциски засилувач ја засилува разликата на влезните сигнали.
- * Претворувачите на струја во напон и напон во струја се операциски засилувачи со примена во мерната техника.
- * Интегратор се добива кога во повратната врска на еден операциски засилувач ќе се постави кондензатор.
- * Кај логаритамскиот засилувач излезниот напон е пропорционален на логаритам од влезниот напон.
- * Логаритамски засилувач се добива кога во повратната врска на еден операциски засилувач ќе се постави елемент кој има експоненцијална струјно-напонска карактеристика како што е полупроводничката диода.
- * Кај експоненцијалниот засилувач излезниот напон експоненцијално зависи од влезниот напон.

5.4. Реален операциски засилувач

Реалниот операциски засилувач, по своите карактеристики отстапува од идеалниот. Од друга страна тој има сложена структура составена од повеќе степени и голем број активни елементи. Поважни карактеристики на реалниот операциски засилувач се:

1) Засилување на диференцијален влезен сигнал (Differential open-loop voltage gain)

Реалниот операциски засилувач има засилување што се движи во рамките на 105-106. Карактеристичното засилување за еден од најпознатите операциски засилувачи (741) изнесува $A_d \approx 200000$ (106dB), додека минималната вредност на засилувањето на

диференцијалниот влезен сигнал е 5000 (74dB). Затоа најчесто може да се смета дека карактеристичното засилување $A_d \rightarrow \infty$.

2) Преносната карактеристика не е целосно линеарна (не е права), па како резултат на тоа доаѓа до изобличување на сигналот.

3) Ограничување на фреквенциската карактеристика

Фреквенцискиот опсег ќе се движи од $f_d=0$, до некоја горна гранична фреквенција.

4) Фактор на потиснување на истофазниот сигнал (Common mode rejection ratio – CMRR)

Тоа е број кој покажува колку пати засилувањето на влезниот диференцијален напон е поголемо од засилувањето на влезниот истофазен напон. Кај реалните засилувачи тој има вредност од 70dB до 100dB.

5) Влезна отпорност (Input resistance)

Влезната отпорност кај реалните операциски засилувачи не е бесконечно голема. Обично се движи меѓу 100K Ω и 1M Ω . Сепак, поради постоење повратна врска, влезната отпорност може да се занемари. Тука многу повеќе сметка треба да се води за односот меѓу влезната отпорност и отпорноста во повратната врска. Имено, ако влезната струја во самиот операциски засилувач, е многу помала од струјата низ повратната гранка, односно ако е влезната отпорност многу пати поголема од отпорноста во повратната гранка (најмалку 10 пати), може да се смета дека влезната отпорност не влијае врз засилувањето. Операциските засилувач и со MOS транзистори, во основа, имаат бесконечно голема влезна отпорност. Меѓутоа, во практика, поради потребата од заштита на гејтот на MOSFET-от во однос на статички електрицитет, што обично се прави со инверзно поларизирани диоди, оваа отпорност може да биде помала.

6) Излезна отпорност (Output resistance)

Помало влијание на излезната отпорност врз засилувањето ќе има ако отпорноста во повратната гранка е многу пати поголема од излезната, што е спротивно од барањето во однос на влезната отпорност. Затоа, при проектирање на засилувачот отпорноста во повратната гранка треба да се одбере така што да има оптимална вредност, како во однос на влезната, така и во однос на излезната отпорност. Притоа, самиот употребен операциски засилувач треба да има што е можно поголема влезна и што е можно помала излезна отпорност. Транзисторските операциски засилувачи за општа намена имаат излезна отпорност 40 до 100 Ω .

7) Струјна ненагоденост на влезот – струен офсет (input offset current)

За да се обезбеди излезниот напон да биде нула кога на влезот нема сигнал, за да се компензираат несиметричностите во карактеристиките на елементите, најчесто треба да се обезбеди различна струја на поларизација на влезните транзистори. Струјниот офсет се дефинира како разлика на влезните струи на поларизација под услов излезниот напон да биде нула.

8) Дрифт на влезниот струен офсет (Input offset current drift)

Претставува количник од промената на влезниот струен офсет и промена на температурата. За операцискиот засилувач $\mu\text{A} 741$ тој изнесува $0,1 \text{ nA}^\circ\text{C}$.

9) Напонска ненагоденост на влезот – напонски офсет (input offset voltage)

Се дефинира како диференцијален напон што треба да се приклучи меѓу двата влеза (при симетричен влез), или меѓу влезовите и маса (при несиметричен влез), на операциски засилувач за излезниот напон да прими вредност нула. Се нарекува и напонско отстапување на влезот а зависи и од температурата.

Обично, кај биполарните структури изнесува од $0,1$ до 2 mV , додека кај MOS-колата од 1 до 20 mV .

10) Потиснување на промената на напонот на напојување (PSRR-power supply rejection ratio)

Поради зависноста на параметрите на активните елементи од напонот на напојување, особено ако се менува напонот на само еден од изворите, при промена на напонот на напојување ќе се менува и излезниот напон. За да се компензира оваа промена на излезниот напон, најчесто е потребно да се изврши и соодветна промена на влезниот напон. Односот меѓу промената на еден од изворите за напојување и соодветната промена на влезниот напон за излезниот напон да не се промени се нарекува фактор на потиснување на промената на напонот на напојување. Типична вредност е $20\mu\text{V}/\text{V}$.

11) Брзина на промена на напонот на излезот (Slew rate)

Поради постоење на паразитни капацитивности во активните елементи и врските во колото, излезниот напон не е во состојба моментално да ги следи промените на влезниот напон. Брзината на пораст на напонот на излезот (slew rate) се дефинира како однос на промената на излезниот напон во единица време при побуда на влезот со правоаголен импулс. Типична вредност е од $1\text{V}/\mu\text{s}$ до $15\text{V}/\mu\text{s}$. Доколку засилувачот има мала брзина на промената на излезниот напон лесно може правоаголните импулси на влезот, на излезот да се појават со трапезен облик, а високофреквенциски синусен сигнал да се изобличи и на излезот да добие приближно триаголна форма.

12) Компензација на ненагоденоста на операциски засилувач

Компензација на ненагоденоста на влезот (нагодување на “нулата”) најлесно се врши ако операцискиот засилувач, со самата конструкција, има предвидено можност за таква операција. На пример, операцискиот засилувач од типот 741 има вградена можност за нагодување на нулата. Кај него постојат изведени приклучоци за компензација. Предвидено е меѓу овие приклучоци да се постави потенциометар, при што неговиот лизгач се поврзува на маса. Со нагодување на положбата на лизгачот може да се остварува излезниот напон да има вредност нула кога на влезот нема сигнал. Доколку операцискиот засилувач нема вградено можност за нагодување на нулата тоа може да се оствари со поврзување на

одделни елементи за оваа намена. Притоа е потребно да се обезбеди дополнителен извор за создавање на напонот, односно струјата, за компензација.

13) Максимален опсег на промена на влезниот синфазен напон

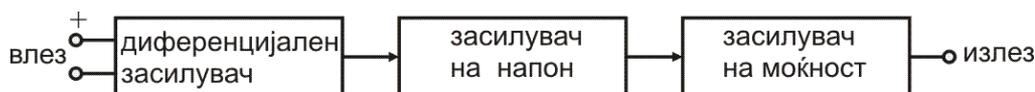
Опсегот на промена на влезниот синфазен напон е ограничен со состојбата на транзисторите во влезниот степен на еден операциски засилувач. Имено, сите транзистори од влезниот степен мора да бидат во нормално активно подрачје во опсегот меѓу минималниот и максималниот влезен синфазен напон.

14) Влезен напон на шум и струја на шум (Input noise voltage, Input noise current)

Тоа се ефективните вредности на изворите на напон и струја на шум на влезот од засилувачот, со што се ограничува најниското ниво на влезниот напон што може да се засилува. Типична вредност за напонот на шум е $\frac{10nV}{\sqrt{Hz}}$, а за струјата на шум е $\frac{0,2pA}{\sqrt{Hz}}$.

5.4.1. Блок-шема на реален операциски засилувач

Операциските засилувачи имаат сложена интерна структура сместена во едно интегрирано коло. Основните блокови од кои е составен еден операциски засилувач се: диференцијален засилувач на влезот, засилувач на напон и засилувач на моќност на излезот (слика 5.21). Ова е основа на која е изграден денес најпознатиот операциски засилувач 741 (UA741 или $\mu A741$).



Слика 5.21: Блок-шема на операциски засилувач.

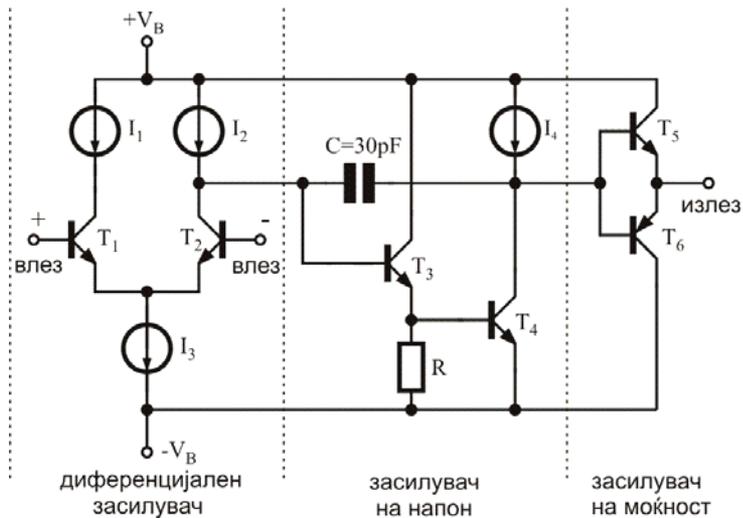
Диференцијалниот засилувач има два влеза и еден излез, а изведен е на начин со кој се постигнува голем фактор на потиснување на истофазниот влезен напон, мала влезна струја и голема влезна отпорност, големо и стабилно засилување независно од промена на температурата на околината.

Во вториот блок се наоѓа засилувач на напон со големо напонско засилување. Во овој дел се применува и компензација на фреквенциската карактеристика на засилувачот.

Третиот блок е засилувач на моќност во класа АВ. Тој обезбедува потребна излезна струја и мала излезна отпорност на целиот операциски засилувач, минималното изобличување и мала дисипација до 300mW.

Упростената шема на операцискиот засилувач 741 е дадена на слика 5.22.

Влезниот диференцијален засилувач е изведен со транзисторите T_1 и T_2 . Во заедничкото емитерско и во колекторските кола се ставени струјните генератори I_1 , I_2 и I_3 .



Слика 5.22: Упростена шема на операциски засилувач 741.

Со струјниот генератор се обезбедува струјата на базите да биде многу мала од редот на наноампери, што обезбедува голема влезна отпорност на операцискиот засилувач. Струјните генератори обезбедуваат и голема температурна стабилност.

Засилувачот на напон е формиран со транзисторите T_3 , кој работи во спој со заеднички колектор, и T_4 , кој е во спој со заеднички емитер. На местото на колекторскиот отпор, транзисторот T_4 во колекторското коло има струен генератор I_4 . Со кондензаторот C се реализира повратната врска од колекторот на транзисторот T_4 на базата на транзисторот T_3 . Со оваа негативна повратна врска е извршена фреквенциска компензација, односно проширување на пропусниот опсег на засилувачот. Бидејќи се работи за еднонасочен засилувач, неговата горна гранична фреквенција изнесува 10Hz. Останува и можност за вградување на надворешна повратна врска.

Засилувачот на моќност е изведен со комплементарен пар транзистори T_5 и T_6 , во класа В. Напонското засилување на овој степен е единица, но тој обезбедува засилување на излезната струја.

Комплетната шема на операцискиот засилувач 741, составена од 24 биполарни транзистори, 11 отпорници и еден кондензатор, сите сместени на силициумска плочка со површина од 1mm^2 , ставена во метално цилиндрично куќиште или во стандарден интегриран чип, е дадена во прилогот 1 на крајот од ова поглавје.

ЗАПАМЕТИ !!!

- * Реалниот операциски засилувач има засилување што се движи во рамките на 105-106.
- * Влезната отпорност кај реалните операциски засилувачи обично се движи меѓу $100\text{K}\Omega$ и $1\text{M}\Omega$.

- * Струјниот офсет се дефинира како разлика на влезните струи на поларизација под услов излезниот напон да биде нула.
- * Дрифт на влезниот струен офсет претставува количник од промената на влезниот струен офсет и промена на температурата.
- * Напонска ненагоденост на влезот се дефинира како диференцијален напон што треба да се приклучи меѓу двата влеза (при симетричен влез), или меѓу влезовите и маса (при несиметричен влез), на операциски засилувач за излезниот напон да прими вредност нула
- * Односот меѓу промената на еден од изворите за напојување и соодветната промена на влезниот напон за излезниот напон да не се промени се нарекува фактор на потиснување на промената на напонот на напојување
- * Брзината на пораст на напонот на излезот (slew rate) се дефинира како однос на промената на излезниот напон во единица време при побуда на влезот со правоаголен импулс.
- * Основните блокови од кои е составен еден операциски засилувач се: диференцијален засилувач на влезот, засилувач на напон и засилувач на моќност на излезот.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Дефинирај ϕ параметрите на реалниот засилувач.
2. Кои се основните блокови од кои е составен еден реален операциски засилувач?
3. Анализирај ја електричната шема на реален засилувач ($\mu A741$).
4. Во која класа работи комплементарниот пар транзистори T5 и T6 во упростената шема на операцискиот засилувач 741?
5. Која е улогата на кондензаторот C во упростената шема на операцискиот засилувач 741?

ТЕМАТСКО УТВРДУВАЊЕ

I Прашања со заокружување (Заокружи ги точните одговори)

1. Параметри на операциски засилувачи со бесконечна голема вредност се:
 - а) напонско засилување
 - б) излезна отпорност
 - в) влезна отпорност.

III Прашања со дополнување

8. Кога напонот на инвертирачкиот влез е еднаков со напонот на неинвертирачкиот влез тогаш на влезните краеве на операцискиот засилувач постои куса врска наречена _____.

9. Кај инвертирачкиот операциски засилувач излезниот напон е фазно поместен за _____ во однос на влезниот напон.

10. Колото во кое постои логаритамска зависност меѓу излезниот и влезниот напон се нарекува _____.

11. Со изразот $u_{iz}(t) = -RC \frac{du_{vl}(t)}{dt}$ е даден излезниот напон на _____ операциски засилувач.

12. _____ е број кој покажува колку пати засилувањето на влезниот диференцијален напон е поголемо од засилувањето на влезниот истофазен напон.

13. _____ засилувач се користи во колата за обработка на сигналите.

Истражувај и дознај повеќе:

- Истражувај на интернет за операциски засилувачи.
- Изработи проект на тема операциски засилувачи.
- Истражувај на интернет за шеми со операциски засилувачи и за нивната практична примена.



ПРИЛОГ 1

Комплетната шема на операцискиот засилувач 741

ИЗВОРИ НА ЕДНОНАСОЧЕН НАПОН

Со изучување на содржините од оваа тема ќе стекнеш основни знаења за извори за напојување и ќе можеш:

- да препознаваш различни конструкции на извори за напојување;
 - да го објаснуваш принципот на напонска стабилизација;
 - да разликуваш стабилизирани и нестабилизирани извори на напојување;
 - да ја познаваш примената на операцискиот засилувач како извор за еднонасочен напон;
 - да читаш електрични шеми на стабилизирани извори на напојување со транзистори, операциски засилувач и интегрирани стабилизатори;
 - да ја познаваш примената на изворите на еднонасочен напон.
-

За функционирање на електронските уреди се потребни еднонасочни напони за напојување. Еднонасочните напони се добиваат од уреди наречени извори за напојување. Разликуваме три вида извори за напојување, кои се во масовна употреба за сите електронски уреди:

- а) батерии и акумулатори;
- б) уреди за напојување од мрежа на наизменичен напон со мрежен трансформатор;
- в) уреди со прекинувачки систем на напојување;
- г) уреди за удвојување или умножување на напон.

Напојување од батерии или акумулатори се користи најмногу за преносни уреди и за уреди за кои не се дозволува никаков прекин на напојувањето.

Уредите со прекинувачки систем на напојување (SMPS – Switch Mode Power Supply) се применуваат за напојување на разни апарати почнувајќи некаде од средината на минатиот век и со време наоѓаат се поширока примена.

6.1. Уреди за напојување од мрежен напон

До сега најмасовна употреба имаат уредите за напојување од градската мрежа на наизменичен напон, која е на располагање речиси на секој чекор. Напонот на градската мрежа, во најдобар случај, кај нас е 220V - 240V.

На **слика 6.1** е дадена блок-шема на еден комплексен уред за напојување од мрежа со наизменичен напон со примена на мрежен трансформатор.



6.1: Блок-шема на извор за напојување од мрежен напон.

Со овој уред се извршуваат три основни функции: промена на мрежниот напон со трансформатор, насочување и стабилизација на излезниот напон.

За поедноставни системи (како што се уреди за напојување познати како "адаптери") може да отпадне последниот блок за стабилизација на напонот.

Со мрежниот трансформатор се намалува, а поретко се зголемува, вредноста на мрежниот напон на вредност која одговара на потребниот напон на излезот. Трансформаторот има една примарна и една или повеќе секундарни навивки, од кои се добиваат разни секундарни напони. Секундарните напони се добиваат као производ на примарниот напон и на односот

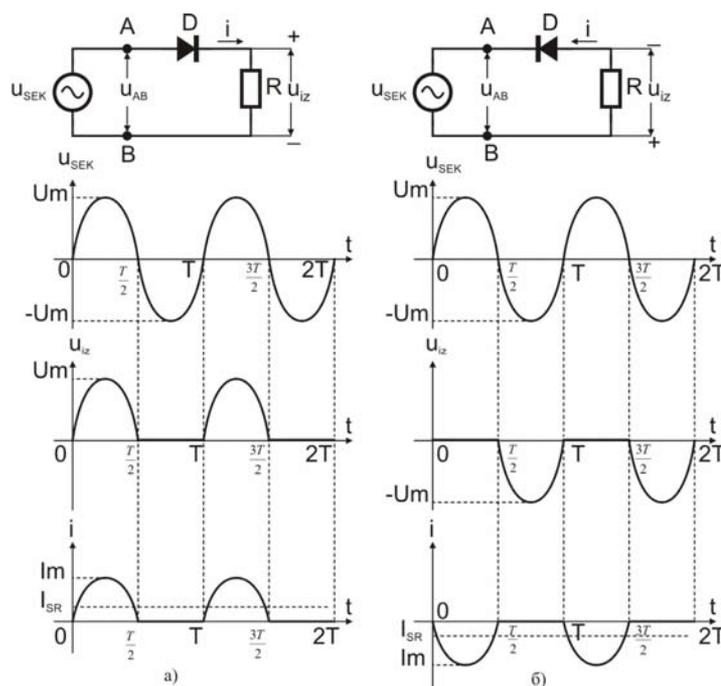
на трансформацијата $n = \frac{N_{SEK}}{N_{PRIM}}$, каде што со N се означува бројот на навивките.

Трансформаторот има уште една задача, а тоа е да направи галванско разделување меѓу уредот кој се напојува и мрежата.

Секундарниот напон е наизменичен и тој со блокот на насочувачот се насочува и станува еднонасочен. Така добиен еднонасочен напон не може веднаш да се користи како напон за напојување, тој претходно треба да се филтрира со филтерско коло. Овој напон се вика нестабилизиран напон за напојување. Многу електронски уреди бараат напонот за напојување да има константна вредност и за тоа се применува коло за стабилизација.

6.1.1. Полубранов насочувач

Полубрановото насочување е наједноставниот процес со кој наизменичниот напон се претвора во еднонасочен.



6.2: Полубранов насочувач.

Тоа се прави со коло во кое една насочувачка диода ја пропушта само едната полупериода на наизменичниот напон, а другата полупериода ја блокира.

Колото на полубрановиот насочувач е дадено на **слика 6.2**.

Во оваа шема напонот на секундарот е прикажан со шематска ознака на едноставен извор на наизменичен напон. За колото на сликата под а), кога точката А е на повисок потенцијал од точката В, а тоа е за време на позитивната полупериода на наизменичниот напон, диодата е директно поларизирана и низ отпорот R тече струја во насоката, како што е прикажано на шемата.

За овој пример, струјата i има иста форма со напонот u_{iz} . За времето на негативната полупериода, точката А е на понизок потенцијал од точката В (слика 6.2 б), диодата е инверзно

поларизирана и низ отпорот R не тече струја. Во колото, во времетраење на една периода, тече некоја средна вредност на еднонасочна струја, која се пресметува според:

$$I_{SR} = \frac{I_m}{\pi} = 0.32I_m, \dots\dots\dots(6.1)$$

при што I_m е амплитуда на струјата, а еднонасочниот напон според:

$$U_{IZ} = \frac{U_m}{\pi}; \dots\dots\dots(6.2)$$

при што U_m е амплитуда на наизменичниот напон на секундарот.

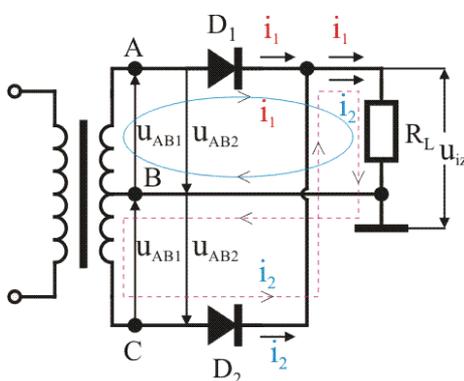
Оваа струја може да се претстави како да е составена од една еднонасочна компонента I_{SR} и од повеќе хармониски компоненти, од кои првата има најголема амплитуда. Односот на овие две компоненти го одредува **факторот на брановитост** како мерка за квалитетот на уредот за напојување. За добар насочувач, факторот на брановитост треба да биде што е можно помал.

Полубрановиот насочувач има фактор на брановитост 1,21 и мала средна струја што го прави насочувач од пониска класа и затоа служи најчесто само за полначи на оловни акумулатори. Средната струја, како еднонасочна компонента, го магнетизира јадрото на трансформаторот и го носи во заситување со што се зголемуваат загубите во железото.

6.1.2. Целобранов насочувач

Целобрановиот насочувач може да се направи во две варијанти: со 2 насочувачки диоди и со 4 насочувачки диоди меѓусебно поврзани во конфигурација на мост, познат како **Грецов спој**.

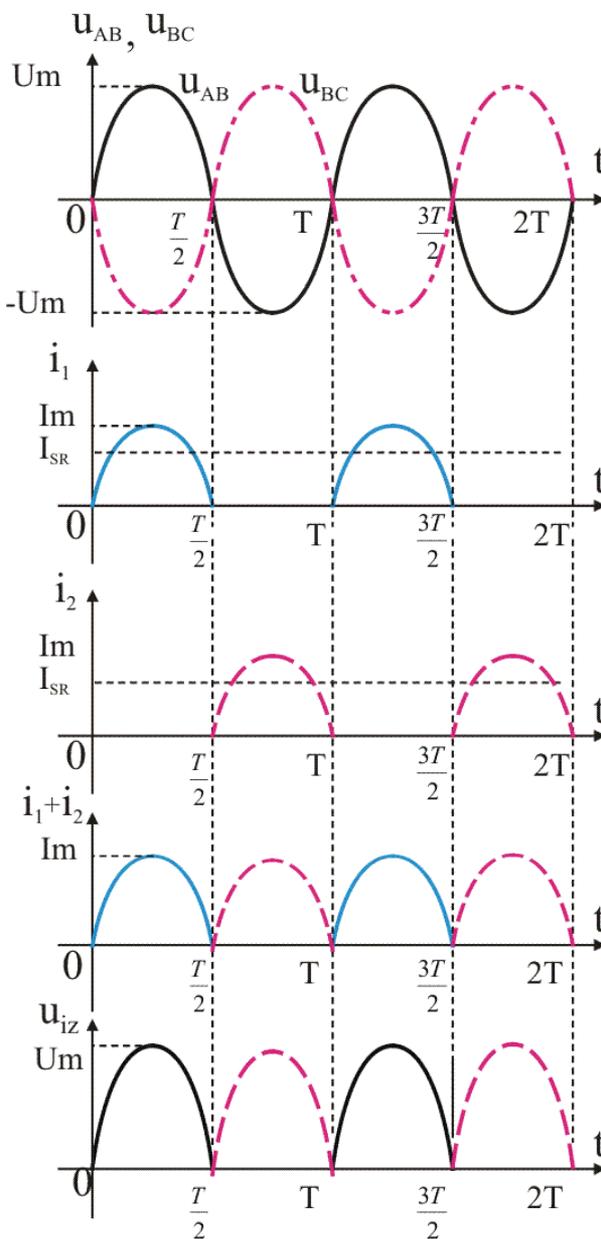
На **слика 6.3** е прикажан целобранов насочувач со 2 диоди. За оваа конфигурација се користи трансформатор со секундар кој има среден извод B , врзан на маса.



6.3: Целобранов насочувач со две диоди.

Секундарните напони u_{AB} и u_{CB} имаат иста амплитуда и спротивна фаза, така што кога е во точката А позитивната полупериода, во исто време, во точката С имаме негативна полупериода на наизменичниот напон на секундарот.

За време на позитивната полупериода на напонот u_{AB} , диодата D1 е директно поларизирана и спроведува струја i_1 преку отпорот R_L . Во исто време, во точката С е негативната полупериода на напонот u_{CB} , за која диодата D2 е инверзно поларизирана и струјата i_2 е нула. Во следната полупериода ситуацијата се менува, така што на точката А имаме негативна полупериода и инверзно поларизирана диода D1, а во точката С позитивна полупериода и директно поларизирана диода D2 со струја i_2 која тече во отпорот R_L . Двете струи i_1 и i_2 течат во иста насока, по една во секоја полупериода (слика 6.4).



6.4: Бранови форми на целобранов насочувач.

Средна вредност на струјата низ потрошувачот изнесува:

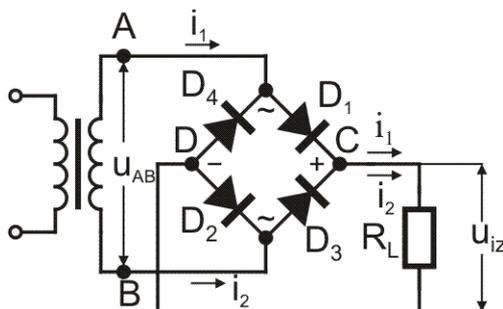
$$I_{sr} = \frac{2I_m}{\pi} = 0,64I_m \dots \dots \dots (6.3)$$

Оваа струја е два пати поголема од средната струја на полубрановиот насочувач, што значи и подобар фактор на брановитост, кој изнесува 0,48.

Овие карактеристики покажуваат дека целобрановиот насочувач е многу подобар од полубрановиот, со таа разлика што користи нешто поскап секундар со среден извод. Но, затоа, пак, трансформаторот нема "празен од", во секундарот на трансформаторот тече струја во текот на двете полупериоди и тоа во спротивни насоки, со што јадрото на трансформаторот се магнетизира со едната и се магнетизира во спротивна насока со другата струја во текот на секоја периода на напонот. На тој начин се намалуваат загубите во железото и за иста

моќност овој трансформатор има помали димензии и тежина во однос на трансформаторот на полубрановиот насочувач.

Другата варијанта на целобранов насочувач со 4 диоди е прикажана на **слика 6.5**.



6.5: Целобранов насочувач со четири диоди.

Предноста на овој насочувач е во тоа што има само еден секундар. Диодите се врзани во мост, при што во едната дијагонала на мостот се приклучуваат краевите на секундарот на трансформаторот, а во другата дијагонала отпорот на оптоварувањето R_L .

За време на позитивната полупериода во точката A, диодата D1 е директно поларизирана и спроведува струја i_1 во едниот крај на отпорникот R_L . Колото на струјата се затвора преку отпорникот R_L и диодата D2, која исто така, е директно поларизирана. Другите две диоди се инверзно поларизирани.

За време на негативната полупериода во точката A, диодите D3 и D4 се директно поларизирани и во колото тече струјата i_2 , а диодите D1 и D2 се инверзно поларизирани.

Графикот на струјата низ потрошувачот е истиот како и на слика 6.5, а иста е и нејзината средна вредност и факторот на брановитост, како кај насочувачот со две диоди.

Мостната конфигурација на диодите е позната како Грецов спој и таа се сместува во едно куќиште со четири изводи: два се означени со знакот "~", а другите два со "+" и "-". На изводите со знакот "~" се приклучува наизменичниот напон, а меѓу изводите со знакот "+" и "-" се добива еднонасочен напон.

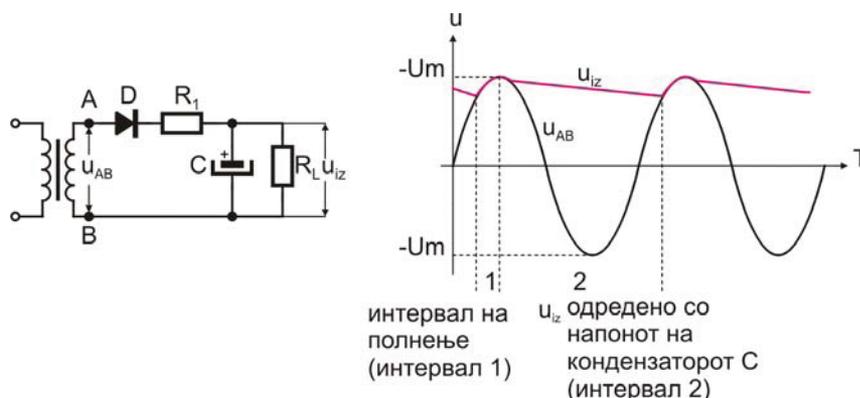
6.1.3. Капацитивен филтер за насочувач

Излезниот напон од полубрановиот насочувач во текот на една полупериода се зголемува од нула до U_m и потоа опаѓа на нула. Оваа состојба се повторува 50 пати во секунда. Ова може да биде прифатливо за некои кола за полнење на батерии, но не и за најголем број електронски системи. За напојување на електронските системи е потребен еднонасочен напон, сличен на напонот од батерија, а тоа е константен напон кој има многу мали промени со времето, или воопшто ги нема.

Реалните системи за напојување од мрежа не даваат целосно изедначен напон. Со примена на филтерски кола, еднонасочниот напон може да се доближи до таквото барање.

Филтрите за насочувачи се изведуваат со реактивни компоненти: кондензатори и калеми. Овие елементи имаат својство да акумулираат енергија, а потоа да ја вратат во колото во соодветен момент.

Најчесто употребуван филтер за насочувач е RC-филтер, претставен со еден кондензатор со голема капацитивност (електролитски кондензатор), приклучен паралелно на отпорот на оптоварувањето R_L . Електрична шема на полубранов насочувач со капацитивен филтер е прикажана на **слика 6.6**.



6.6: Полубранов насочувач со капацитивен филтер.

За време на позитивната полупериода на напонот u_{AB} , диодата спроведува и го полни кондензаторот на вредност приближно еднаква на U_m (интервал 1 на графикот). Отпорникот R_1 е со релативно мала вредност и има задача да ја заштити диодата од преголема струја која протекува во моментот на вклучувањето, поради тоа што во тој момент кондензаторот е празен и претставува краток спој. Во натамошната анализа тој нема да се зема предвид.

Од моментот кога кондензаторот C е наполнет до вредноста на напонот U_m , тој го држи напонот на излезот висок се до следната позитивна полупериода и следниот циклус на полнење. Кога напонот u_{AB} ќе падне под вредноста на напонот на кондензаторот, диодата станува инверзно поларизирана и се исклучува од колото до следниот циклус, кога напонот u_{AB} повторно ќе ја надмине вредноста на напонот на кондензаторот. Во тој период, струјата низ оптоварувањето ја дава кондензаторот и тој, поради конечната вредност на отпорноста на R_L , полака се празни. Напонот на кондензаторот полака опаѓа меѓу двата циклуса на полнење (интервал 2 на графикот). Празнењето оди практично по права линија, а брзината на празнењето е одредена со временската константа τ :

$$\tau = R_L C . \dots\dots\dots(6.4)$$

Факторот на брановитост за полубранов насочувач со капацитивен филтер се пресметува според:

$$FB = \frac{0,0058}{CR_L} . \dots\dots\dots(6.5)$$

Да се добие поголем фактор на брановитост, потребно е да се зголеми капацитивноста C . Но, и тука постои ограничување, затоа што се зголемува струјата на полнењето на кондензаторот и е поголема можноста за прегорување на диодата.

За капацитивниот филтер кај целобрановиот насочувач важи истата анализа со тоа што интервалот 2π е пократок два пати и факторот на брановитост е подобар во однос на оној кај насочувач без филтер.

ЗАПАМЕТИ !!!

- * Напојувањето на електронските уреди може да се прави од батерии и акумулатори, од мрежа на наизменичен напон со трансформатор и од мрежа со прекинувачки систем;
- * Полубраново насочување се прави со една насочувачка диода;
- * Целобраново насочување се прави со две или четири насочувачки диоди во Грецов спој;
- * Со целобраново насочување се добива подобро искористување на трансформаторот и помал фактор на брановитост;
- * Со примена на капацитивни филтри за насочувачи се подобрува факторот на брановитост, се намалува присуството на наизменичната компонента на напонот на излезот од насочувачот.

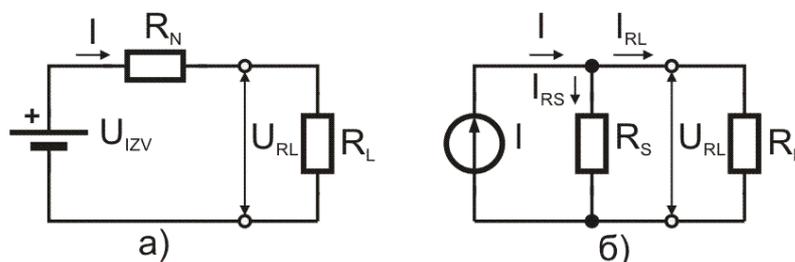
ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Кои видови извори за напојување постојат?
2. Кои се основните функции на уредите за напојување од мрежа со наизменичен напон?
3. Која е задачата на мрежниот трансформатор?
4. Нацртај полубранов насочувач и објасни го неговиот принцип на работа.
5. Дефинирај го поимот "фактор на брановитост".
6. Колкава е вредноста на факторот на брановитост кај полубранов, а колкава кај целобранов насочувач?
7. Нацртај Грецов спој и објасни како работи.
8. Која е предноста на целобрановиот насочувач со четири диоди во однос на целобрановиот насочувач со две диоди?
9. Која е функцијата на капацитивниот филтер за насочувач?

6.2. Стабилизација и регулација на напонот

Уред за напојување, составен од трансформатор, насочувач и филтер претставува нестабилизиран извор за напојување.

Идеален уред за напојување може да има внатрешен отпор нула (идеален напонски извор), или бесконечно голем внатрешен отпор (идеален струен извор). Кај идеалниот извор за напојување излезниот напон или излезната струја не зависат од отпорот на оптоварувањето.



6.7: Реален напонски и струен извор за напојување.

Реален уред за напојување има конечна вредност на внатрешниот отпор и тој може да се претстави со еден идеален напонски извор и со внатрешниот отпор R_N (слика 6.7а).

Ако во оптоварувањето тече струја I , напонот на оптоварувањето ќе биде:

$$U_{R_L} = U_{IZV} - R_N I . \dots\dots\dots(6.6)$$

Секаква промена на отпорноста на оптоварувањето R_L ќе предизвика промена на струјата I , а со тоа и на напонот на оптоварувањето U_{R_L} . Во крајниот случај на краток спој на излезот, струјата I ја добива максималната вредност, што може да предизвика оштетување на некој од елементите на уредот за напојување.

Ако реалниот уред за напојување го претставиме со еден идеален струен извор, кој дава константна струја и паралелно врзан внатрешен отпор R_S , го добиваме колото претставено на слика 6.7б. Со каква и да е промена на вредноста на отпорот на оптоварувањето, се менува струјата I_{R_L} за сметка на струјата I_{R_S} според изразот:

$$I = I_{R_S} + I_{R_L} . \dots\dots\dots(6.7)$$

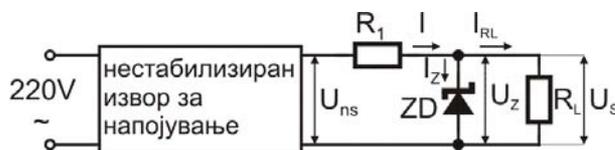
Струјните извори за напојување поретко се среќаваат во практиката.

Ова покажува дека кај реалниот извор за напојување излезниот напон или излезната струја се менуваат со промена на отпорот на оптоварувањето.

Како што е речено, речиси секое електронско коло бара константен напон за напојување. Тоа значи дека на излезот од нестабилизираниот извор за напојување треба да се стави коло за стабилизација и да се добие стабилизиран извор за напојување.

6.2.1. Стабилизација на напон со зенер диода

Наједноставен стабилизатор на напон користи зенер диода, како елемент кој во карактеристиката во подрачјето на пробив има особина на краевите да држи константен напон. Начинот на нејзиното приклучување е даден на **слика 6.8**.



6.8: Стабилизатор на напон со зенер диода.

На сликата имаме нестабилизиран извор за напојување, стабилизатор на напон, изведен со отпорникот R_1 и зенер диодата ZD и отпор на оптоварување R_L . Нестабелизираниот напон U_{ns} треба да биде поголем од напонот на стабилизација на зенер диодата U_z . Преку отпорникот R_1 ќе протече струја I , а преку зенер диодата струја I_z , при што

$$I = I_z + I_{R_L}, \dots\dots\dots(6.8)$$

а стабилизираниот напон е:

$$U_S = R_L I_{R_L}, \dots\dots\dots(6.9)$$

До промена на напонот U_S може да дојде со промена на нестабилизираниот напон U_{ns} или поради промена на струјата I_{R_L} , предизвикана со промена на отпорот на оптоварувањето R_L .

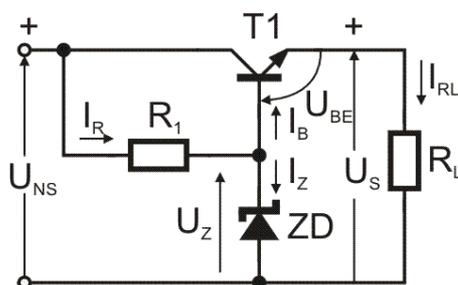
Ако дојде до зголемување на нестабилизираниот напон U_{ns} , ќе се зголеми струјата I на отпорникот R_1 . Сега стапува во дејство зенер диодата, така што ќе се зголеми нејзината струја I_z , а струјата I_{R_L} и напонот U_S остануваат непроменети. Во случај на намалувањето на нестабилизираниот напон, процесот се одвива во спротивната насока, така што се намалува струјата на зенер диодата.

Кога доаѓа до промена на отпорноста на оптоварувањето R_L , обидот за промена на струјата I_{R_L} се надоместува со промена на струјата на зенер диодата I_z . Ако се намали R_L , се намалува струјата I_z , за струјата I_{R_L} да остане непроменета и обратно. Во двата примера напонот U_S останува непроменет, односно тој е стабилизирани.

Употребата на овој стабилизатор е ограничена со дозволената струја на зенер диодата, а најчесто за струја од неколку mA дава добри резултати. Што се однесува до напонот, зенер диодите со иста дозволена јачина на струјата можат да се врзуваат сериски и со соодветна комбинација да се добие бараниот напон.

6.2.2. Сериски стабилизатор на напон со транзистор

Кај стабилизаторот со зенер диода секогаш има некој пад на напонот на отпорникот R_1 и моќност која се претвора во топлина. Ограничувањето на струјата може да се избегне со примена на активен елемент – транзистор, во серија со оптоварувањето. Колото на еден таков стабилизатор е дадено на **слика 6.9**.



6.9: Сериски стабилизатор на напон со транзистор.

Колото е составено од стабилизатор на напон со зенер диода, кој влече струја од десетина милиампери и со кој се стабилизира напонот на базата на транзисторот T1. Транзисторот работи како засилувач во спој со заеднички колектор или емитерско следило и може да спроведе струја и до неколку ампери. Со струјата I_B , транзисторот се држи во состојба на спроведување и обезбедува струја I_{R_L} за оптоварувањето. Напонот U_Z и напонот на емитерскиот спој на транзисторот U_{BE} се константни, па за излезниот напон U_S може да се напише:

$$U_S = U_Z - U_{BE}, \dots\dots\dots(6.10)$$

и тој е константен. Дејството на стабилизацијата може да се анализира за промена на отпорот на оптоварувањето и за промена на нестабилизираниот напон.

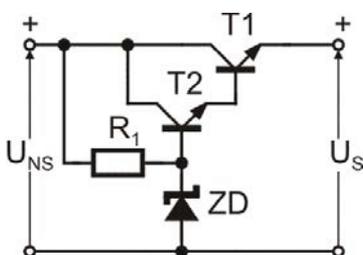
Ако се намали отпорот на оптоварувањето R_L , ќе се зголеми струјата на базата I_B , која тече преку тој отпор и ќе предизвика промена за $(1 + \beta)$ пати на колекторската струја. Едноставно речено: паралелно приклучен уште еден потрошувач бара поголема струја од стабилизаторот и ја добива на опишаниот начин автоматски. Во случај на зголемување на отпорот на оптоварување (исклучување на еден од потрошувачите), се намалува базната, односно колекторската струја и се добива истиот стабилизирани напон како и пред тоа.

Ако се намали нестабилизираниот напон U_{NS} , со дејството на зенеровиот стабилизатор струјата I_B останува непроменета, работната права се поместува паралелно во насоката на помал напон U_{CE} на транзисторот, при што се добива помала колекторска струја и помал напон U_{CE} во еднаков износ колку што се намалил нестабилизираниот напон U_{NS} . Бидејќи:

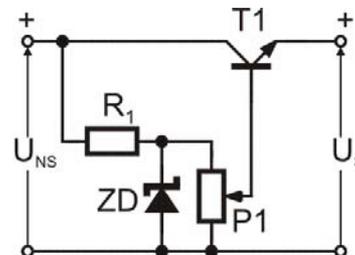
$$U_S = U_{RL} = U_{ns} - U_{CE}, \dots\dots\dots(6.11)$$

излезниот напон U_{RL} останува непроменет. За зголемен напон U_{ns} , дејството е исто, само во спротивната насока. Серискиот транзистор во овој стабилизатор има најтешки работни услови кога нема оптоварување, кога е изложен на максимален напон и при голема струја на оптоварување, кога има голема дисипација. Во тој случај се применуваат мерки за дополнително ладење со вградување на ладилници на куќиштето на транзисторот.

За стабилизатори со поголема струја на серискиот транзистор се користи Дарлингтонова врска, како што е прикажано на **слика 6.10**. Без приклучено оптоварување, тече само струја на зенер диодата.



6.10: Стабилизатор на напон со Дарлингтонова врска.

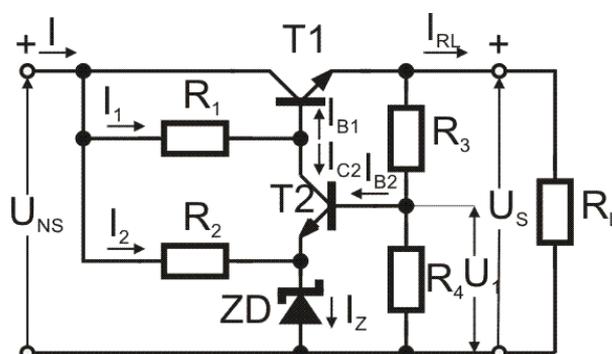


6.11: Стабилизатор со регулација на излезниот напон.

Со приклучување потенциометар паралелно на зенер диодата, како на **слика 6.11**, може да се добие стабилизирани напон со регулација.

6.2.3. Сериски стабилизатор на напон со повратна врска

Недостаток на претходно опишаниот стабилизатор е во тоа што колото на стабилизаторот нема никаква повратна информација за тоа како е извршена стабилизацијата. Таква информација може да се реализира со коло на повратна спрега, како на **слика 6.12**.



6.12: Стабилизатор на напон со повратна спрега.

Со напонскиот делител $R3 - R4$ се добива податокот за големината на излезниот напон и тој се носи на базата на транзисторот $T2$. Емитерот на $T2$ се држи на фиксен и стабилизирани напон, добиен со зенер диодата. Каква и да е промена на стабилизираниот напон U_s предизвикува промена на напонот $U1$. Таква промена се вика напон на грешка и се носи на влезот на транзисторот $T2$, кој работи како еднонасочен засилувач. Засилениот напон на грешка на излезот од степенот за регулација на стабилизацијата доаѓа на базата на серискиот транзистор и ја менува неговата струја, согласно со напонот на грешката. Тоа значи, ако грешката е во негативна насока (намалување на напонот U_s) се намалува струјата I_{c2} , се намалува падот на напонот на отпорникот $R1$, напонот во точката B , односно напонот на базата на $T1$ се зголемува, а со тоа и струјата на серискиот транзистор, со што се компензира почетното намалување на напонот U_s . Истото се однесува и за грешка во позитивна насока, кога доаѓа до намалување на струјата на серискиот транзистор и враќање на стабилизираниот напон на претходната вредност.

Овој вид стабилизатор се вика компензационен стабилизатор на еднонасочниот напон. Во практиката ова коло дава подобрување во стабилизацијата и до 10 пати поголемо од претходното коло.

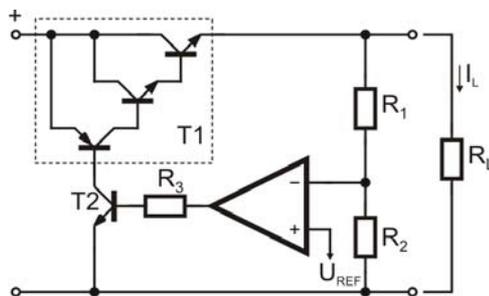
ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Кои се составните елементи на нестабилизираниот извор за напојување?
2. Што се случува со излезниот напон и излезната струја кај реалниот извор за напојување?
3. Зошто се користи зенер диодата во стабилизаторите на напон?
4. Која е предноста на стабилизаторот на напон со транзистор во однос на стабилизаторот на напон со зенер диода?
5. Кој е недостатокот на стабилизаторот на напон со транзистор кој е надминат со серискиот стабилизатор на напон со повратна врска?
6. Кој стабилизатор се нарекува компензационен стабилизатор на еднонасочен напон?

6.3. Интегрирани линеарни стабилизатори на напон

Линеарните интегрирани стабилизатори на напон содржат сериски регулатор на излезната струја и контролно коло со кое се надгледува излезниот напон и се управува со серискиот регулатор да го држи излезниот напон на бараната вредност.

Упростена шема на еден интегриран стабилизатор на напон е дадена на **слика 6.13**.



6.13: Упростена шема на интегриран стабилизатор на напон.

Излезниот напон се контролира со јамка на повратна спрега со одреден степен на компензација, за да се обезбеди стабилност на јамката (да не се јавуваат самоосцилации). Најголем број линеарни стабилизатори имаат вградена компензација и целосно се стабилни без примена на надворешни компоненти. Компензацијата најчесто се прави со капацитивност врзана на излезниот крај кон маса.

Со T1 и со испрекинатите врски е означен серискиот регулатор, составен од два NPN-транзистори во дарлингтонова тврска, побудуван со PNP-транзистор. Струјата на серискиот регулатор, која излегува од емитерот на транзисторот во дарлингтоновата врска транзисторот, се управува со транзисторот T2 и со напонскиот засилувач на грешка. Струјата на напонскиот делител R1 - R2 е многу помала од струјата на оптоварувањето I_{RL} . Јамката на повратната врска, која управува со излезниот напон, започнува со напонскиот делител R1 – R2, кој треба да го "прочита" излезниот напон. "Прочитаниот" напон се носи на инвертирачкиот влез на напонскиот засилувач на грешка. Неинвертирачкиот влез е врзан на референтен напон, што значи дека напонскиот засилувач на грешка постојано го нагудува својот излез (струјата низ T1) да ги направи напоните на неговите влезови да бидат еднакви. На тој начин, со дејството на јамката на повратната врска се држи излезниот напон на фиксна вредност, без оглед на промените на струјата на оптоварувањето.

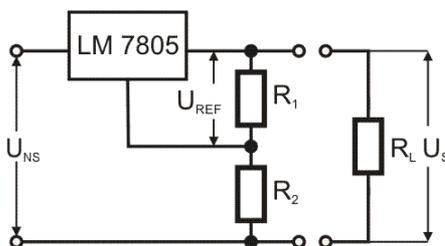
Интегрираните линеарни стабилизатори на напон се пакуваат во куќиште со три изводи, а начинот на нивното поврзување е даден на **слика 6.14**.



6.14: Приклучување на интегриран стабилизатор на напон.

На сликата е прикажан еден конкретен стабилизатор за +5V, кој припаѓа на фамилијата стабилизатори 78xx за позитивен и 79xx за негативен напон (под ознаките xx се внесу-

ваат вредностите на стабилизираниот напон за кој е наменет стабилизаторот, како на пример, 05).



6.15: Стабилизатор на напон со напонски делител.

На **слика 6.15** е дадена шема како да се поврзе стабилизаторот на напон за да се добие вредност на излезниот напон, која не е во стандардните вредности на производителите. Со надворешен напонски делител R_1 , R_2 се одредува вредноста на излезниот напон како:

$$U_S = \frac{U_{REF}(R_1 + R_2)}{R_1} \dots\dots\dots(6.12)$$

Од податоците, наведени на слика 6.15, се гледа дека на самиот стабилизатор (на неговиот сериски регулатор) постои одреден пад на напонот, одреден како разлика меѓу влезниот нестабилизирани и излезниот стабилизирани напон. Постои минимална вредност на тој пад на напонот, под која регулаторот не може да ја врши функцијата на стабилизација и регулација.

Вредноста на минималниот пад на напонот зависи од конфигурацијата на серискиот регулатор во стабилизаторот, па според тоа разликуваме:

- стандарден стабилизатор (со транзистори во Дарлингтонова врска како сериски регулатор) и
- батериски стабилизатор (со еден PNP-транзистор за сериски регулатор).

За стандардниот стабилизатор, минималниот пад на напонот изнесува 2,5V - 3V, што значи дека за стабилизатор за +5V, влезниот напон треба да биде поголем од +8V. Колку е поголем падот на напонот, поголема е интерната дисипација во стабилизаторот, што бара дополнителни мерки за ладење на телото на стабилизаторот. Стандардниот стабилизатор е најдобар за примена со мрежни извори за напојување.

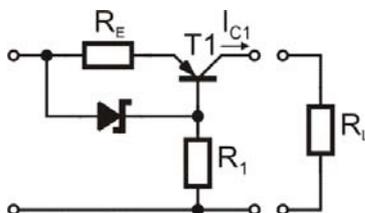
Батерискиот стабилизатор има помал пад на напонот со минимална вредност од 0,7V до 0,8V и тој директно зависи од струјата на оптоварувањето. За мали вредности на струјата може да постигне и до 50mV. Најчесто се користи за батериско напојување.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Како се означува фамилијата интегрирани стабилизатори на напон за позитивен, а како за негативен напон?
2. Што означуваат последните две цифри во ознаката?
3. Кој стабилизатор користи Дарлингтон транзистор како сериски регулатор?
4. Кој стабилизатор користи еден PNP-транзистор за сериски регулатор?

6.4. Струен стабилизатор

Струјниот стабилизатор претставува извор на константна струја низ оптоварувањето и при промена на неговата отпорност. Регулацијата е можна за промена на отпорот на оптоварувањето во одредени граници.

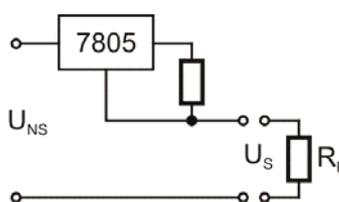


6.16: Извор на константна струја – коло на струен стабилизатор.

Едноставно коло на струен стабилизатор е дадено на **слика 6.16**. Со помош на зенер диодата и отпорникот во колото на емитерот се држи константна струјата на колекторот на транзисторот. Струјата на емитерот се дели на две компоненти: струја на колекторот и базна струја. Ако со промената на отпорот на оптоварувањето дојде до зголемување на колекторската струја, се зголемува и падот на напонот на емитерскиот отпорник и до намалување на напонот база – емитер, зашто напонот на базата се држи на константно ниво со зенер диодата. Со намалувањето на напонот U_{BE} се намалува и базната струја, која, пак, ја намалува колекторската струја и ја враќа на претходната вредност.

Овој принцип на стабилизација на струјата широко се користи во интегрираните кола, каде што е потребен струен извор со висока импеданса.

Струен регулатор со примена на интегрирано коло на стабилизатор на напонот е прикажан на **слика 6.17**.



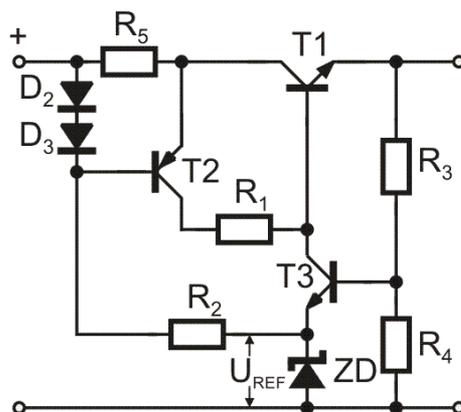
6.17: Струен регулатор со интегриран стабилизатор на напон.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Објасни го процесот на стабилизација на струјниот стабилизатор.
2. Каде се користи стабилизација на струјата?

6.5. Стабилизатор на напон со ограничување на струјата

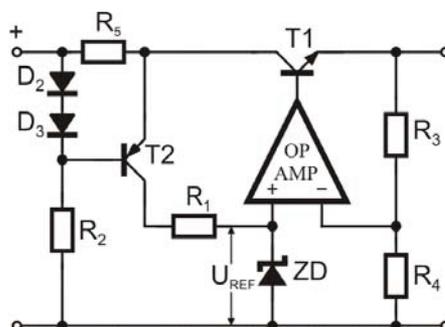
Ако се донесе, од која и да е причина, излезот на стабилизаторот на напон во краток спој, низ серискиот транзистор ќе протече голема струја која може да го уништи транзисторот. Во таков случај, потребно е да се ограничи струјата на оптоварувањето на претходно одредена вредност, која серискиот транзистор ќе може да ја издржи без да се оштети.



6.18: Стабилизатор на напон со ограничување на струјата.

На **слика 6.18** е прикажана електрична шема на стабилизатор на напон во која се додадени елементи за ограничување на струјата. Со диодите D2 и D3 се добива стабилен напон од 1,4V за базата на T1, за овој степен да работи како струен ограничувач. Ако струјата на оптоварувањето се зголеми толку за падот на напонот на R5 да стане поголем од 0,7V, стартува колото за ограничување. Вредноста на отпорот на R5 изнесува 0,7Ω за ограничување на струја од 1A, 0,35Ω за струја од 2A итн.

На **слика 6.19** е прикажано користење на операциски засилувач како стабилизатор на напон, заедно со коло за ограничување на струјата.

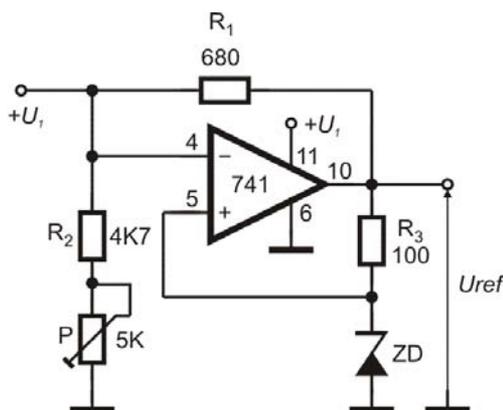


6.19: Стабилизатор на напон со операциски засилувач.

6.6. Прецизен стабилизатор со операциски засилувач

Зенер диодата како стабилизатор не го дава целосно стабилизираниот напон на излезот, со промена на струјата се менува и напонот на излезните приклучоци на колото за стабилизација.

Со комбинација на зенер диода и операциски засилувач (слика 6.20) се добива извор на многу постабилен напон.



6.20: Прецизен стабилизатор на напон со операциски засилувач.

Основен услов е напонот на влезот на колото да биде за 5 V поголем од стабилизираниот излезен напон:

$$U_1 = U_{ref} + 5 \text{ V.}$$

Напонот на излезот е малку поголем од номиналниот напон на зенер диодата и може да се прави прецизна регулација на излезниот напон со потенциометарот P во граници од 0,5 до 1 V. Така, на пример, за зенер диода со номинален напон 5,6V на излезот може да се добие напон од 6 V.

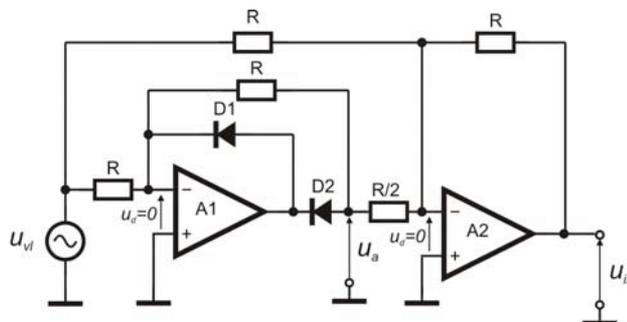
Напонот на влезот може да се движи до 30 V, со услов за 5 V да биде поголем од излезниот, а максималната струја што ја дава овој извор на напон е 20 mA.

6.7. Прецизен целобранов насочувач со операциски засилувач

Прецизниот целобранов насочувач е даден на слика 6.21.

Операцискиот засилувач A1 со диодите D1 и D2 претставува прецизен полубранов насочувач, а операцискиот засилувач A2 е суматор на напоните u_{v1} и u_a . Кога влезниот напон е позитивен, напонот на излезот од насочувачот е $u_a = u_{iz}$. Излезниот напон од суматорот A2 изнесува:

$$u_{iz} = -u_{v1} - 2u_a = -u_{v1} + 2u_{v1} = u_{v1}.$$



6.21: Прецизен целобранов насочувач со операциски засилувач.

Додека влезниот напон u_{vl} е негативен, излезот од прецизниот полубранов насочувач $u_{iz}=0$.

Сега излезниот напон од суматорот A2 изнесува:

$$u_{iz} = -u_{vl}.$$

Бидејќи влезниот напонот е негативен, излезниот напон е позитивен.

Со тоа се покажува дека излезниот напон е апсолутна вредност од влезниот напон, или

$$u_{iz} = |u_{vl}|.$$

ЗАПАМЕТИ !!!

- * Уред за напојување, составен од трансформатор, насочувач, филтер и стабилизатор претставува стабилизирани извор за напојување.
- * Со промена на отпорот на оптоварувањето се менува излезниот напон или излезната струја на насочувачот.
- * Стабилизатор на напон се прави со зенер диода со сериски врзан транзистор и со линеарни стабилизатори на напон.
- * Струен стабилизатор е извор на константна струја која не се менува со промена на оптоварувањето.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Што се случува ако излезот на стабилизаторот на напон е во краток спој и што треба да се ограничи?
2. Нацртај стабилизатор на напон со коло за ограничување на струјата кој содржи операциски засилувач.

ТЕМАТСКО УТВРДУВАЊЕ

I Прашања со заокружување

(Заокружи ги точните одговори)

1. На излезот од интегрираниот стабилизатор на напон со ознака 7905 се добива стабилизирани напон со вредност:

- а) 79V
- б) 5V
- в) 7905V.

2. На излезот од интегрираниот стабилизатор на напон со ознака 78xx се добива:

- а) Позитивен напон
- б) Негативен напон
- в) Наизменичен напон.

II Прашања со поврзување

3. Поврзи го насочувачот со големината на факторот на брановитост:

- 1. Полубранов насочувач _____ а) 1,21
- 2. Целобранов насочувач со две диоди _____ б) 0,48
- 3. Грецов спој _____

4. Поврзи ги редоследно степените од блок шемата на извор за напојување:

- 1. I-степен _____ а) Филтер _____
- 2. II-степен _____ б) Насочувач _____
- 3. III-степен _____ в) Стабилизатор на напон _____

5. Поврзи ги идеалните извори со големината на нивната внатрешна отпорност:

- 1. Идеален струен извор _____ а) Нула _____
- 2. Идеален напонски извор _____ б) Бесконечно голема _____

III Прашања со дополнување

6. За стабилизација на напон се користи Зенер диода во подрачје на _____ .
7. Мрежниот трансформатор во изворите за напојување покрај трансформацијата на напон имаат и улога на _____.
8. Уред за напојување, составен од трансформатор, насочувач и филтер претставува _____.

Истражувај и дознај повеќе:



-Изработи полубранов и целобранов насочувач во програмскиот пакет electronic workbench и на осцилоскопот спореди го излезниот напон со влезниот.

- Истражувај на интернет за насочувачи и врз основа на истражувањето изработи проект.

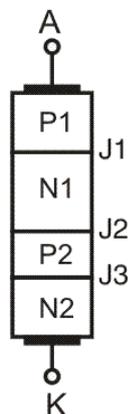
- Изработи стабилизирани извор на напон во програмскиот пакет electronic workbench и на осцилоскопот спореди го добиениот излезен напон со излезниот напон од нестабилизирани извор на напон.

ТИРИСТОРИ

Основни познавања за тиристорите ќе стекнеш со изучување на содржините од оваа тема од електрониката и ќе можеш:

- да го опишуваш начинот на работа на тиристорите;
 - да ги познаваш основните карактеристики на тиристорите;
 - да ја разликуваш поделбата на тиристорите;
 - да ја познаваш практичната примена на тиристорите.
-

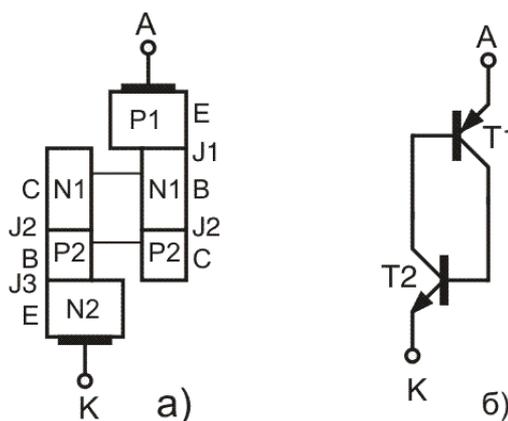
Тиристорите се група елементи со конфигурација од четири или повеќе полупроводни материјали, наредени такашто да прават најмалку три PN-споеви и имаат најмалку два извода (слика 7.1). Меѓусебно, тиристорите се разликуваат според бројот на изводите, насоката на спроведувањето и формата на статичките карактеристики.



Слика 7.1: Основна конфигурација на тиристорот.

7.1. Динистор

Елементот со структура како на слика 7.1 е наречен **динистор** или **Шоклиева диода**. Неговите изводи се означени со A – анода и K- катода.

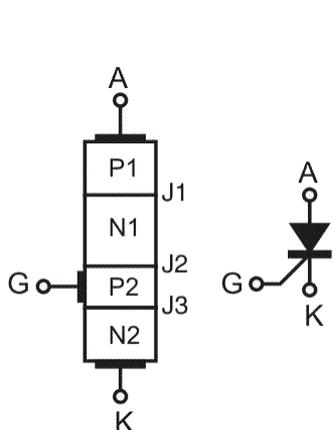


Слика 7.2: Структура и еквивалентна шема на динисторот.

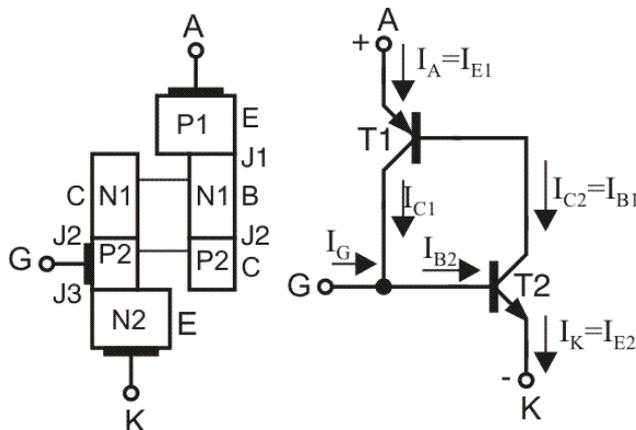
Оваа структура може да се претстави и на друг начин, разделена на две структури PNP и NPN, како на **слика 7.2**. Полупроводничките слоеви не се со иста ширина и концентрација на примесите. Најголема ширина има слојот N1, а најголема концентрација на примеси имаат крајните слоеви P1 и N2.

7.2. Тиристор

Со додавање на уште еден извод, приклучен на средниот P-слој на структурата од слика 7.1, се добива тиристорски елемент со три изводи, познат како SCR (Silicon Controlled Rectifier) – контролиран силициумски насочувач или едноставно тиристор, како што најчесто се среќава во практиката. Неговите приклучоци се означени како A - анода, K - катода и G - гејт или порта (слика 7.3). Анодата и катодата имаат иста улога како и кај динисторот, а гејтот има улога на управувачка електрода за вклучување на тиристорот.



Слика 7.3: Структура и електричен симбол на тиристорот.



Слика 7.4: Еквивалентна шема на тиристорот.

За анализа на работата на тиристорот ќе се послужи́ме, со еквивалентна шема со два транзистора (слика 7.4).

Кога колото на гејтот е отворено, тиристорот се однесува исто како и динисторот.

Да видиме какво е влијанието на гејтот кога тиристорот е во состојба на директна неспроводливост. Ако се овозможи течење на струјата на гејтот, таа струја ќе ја зголеми и базната струја на вториот транзистор I_{B2} и преку патеката на позитивната спрега: зголемена I_{B2} дава зголемена I_{B1} , таа дава зголемена I_{C1} итн., се зголемува и анодната струја I_A и падот на напонот на тиристорот U_{AK} , се до моментот кога тој напон не ја достигне вредноста на напонот на вклучување U_{B0} , а тиристорот преоѓа во состојба на директно спроведување. Во таа состојба, на тиристорот има мал пад на напон (околу 1V) и низ тиристорот тече голема струја, одредена со напонот на тиристорот U_{AK} и отпорот на оптоварувањето приклучен во анодното коло.

Од овој момент, колото на гејтот нема повеќе никакво влијание врз струјата на тиристорот. Струјата на гејтот може да се прекине, а струјата низ тиристорот продолжува да тече. Тоа значи дека струјата на гејтот има улога само да го поттикне процесот на позитивната реакција и спроведувањето на тиристорот и таа може да има импулсен карактер. Тиристорот може да се вклучува со краток позитивен напонски импулс.

ЗАПАМЕТИ !!!

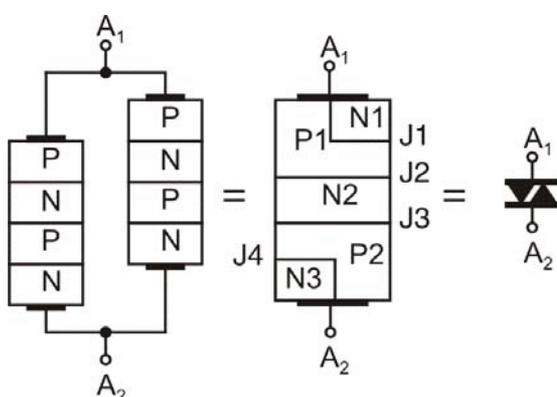
- * Тиристорите се група елементи со конфигурација од четири или повеќе полупроводни слоеви.
- * Динистор е четирислоен тиристорски елемент со три PN споеви и со два изводи (анода и катода).
- * Тиристорот или контролиран силициумски насочувач е елемент со три изводи: анода, катода и гејт.
- * Тиристорот се побудува со позитивен напон на гејтот.
- * Тиристорот може да се исклучи ако се прекине анодното коло, или ако се намали напонот анода – катода под вредноста на напонот на вклучувањето на тиристорот.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

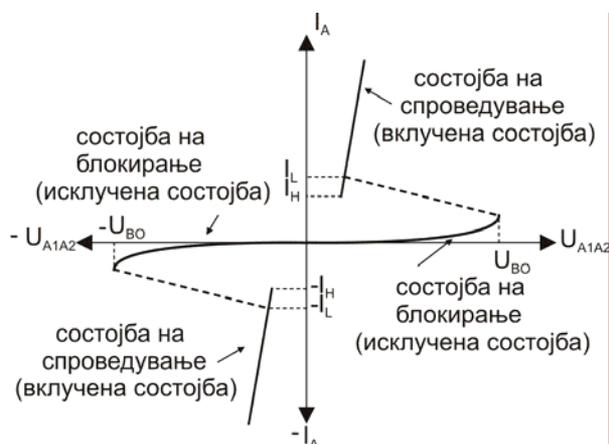
1. Како се добива структурата на тиристорот?
2. Како се исклучува тиристорот?
3. Дефинирај ги состојбите на директно блокирање, директно спроведување и инверзно блокирање на тиристорот.
4. Како се побудува тиристорот?

7.4. Дијак

Со паралелно врзување на два динистора, поставени во спротивни насоки, се добива еден од елементите на групацијата тиристори, наречен дијак. Еквивалентното коло и електричниот симбол на диакот се дадени на **слика 7.7**. Направен на една силициумска плочка, дијакот претставува елемент со петослојна NPNPN-структура.



Слика 7.7: Структура и електричен симбол на дијакот.



Слика 7.8: Струјно-напонска карактеристика на дијакот.

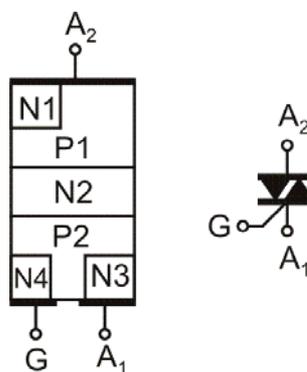
Кога е приклучен на еднонасочен напон, дијакот се однесува како стандарден динистор, тој ќе спроведува во една насока од позитивниот кон негативниот крај на напонот на изворот. Ако се променат краевите на дијакот, тој пак ќе спроведува, што значи дека неговите краеве не се однесуваат како анода и катода. Бидејќи дијакот спроведува во двете насоки, неговите краеве се обележуваат со A1 и A2 или со MT1 и MT2.

Како и сите други тиристоры, дијакот ќе почне да спроведува откако напонот на неговите краеве ја достигне вредноста на пробивниот напон. По тоа тој се разликува од стандардните диоди, кои стануваат спроводни при вредности на напонот од околу 0,6 V, за дијакот тој изнесува околу 30 - 35 V. Струјно-напонската карактеристика на дијакот е дадена на **слика 7.8**.

Дијакот ретко се користи самостојно, најчесто е во придружба на друг тиристорски елемент.

7.5. Тријак

Со врзување два тиристора паралелно, слично на врзување на два динистора, се добива нов тиристорски елемент, познат како тријак. Тријакот може да се дефинира како двонасочен тиристор кој спроведува во двете насоки. Неговото еквивалентно коло и електричниот симбол се дадени на **слика 7.9**. Тријакот спроведува во двете насоки и изводите на тријакот се означуваат како анода 1, анода 2 и гејт. Управувачкиот сигнал на гејтот може да биде и позитивен и негативен во однос на A1. Исто така, и напонот меѓу A1 и A2 може да биде позитивен и негативен.



Слика 7.9: Структура и електричен симбол на тријакот.

И тријакот се доведува во спроводлива состојба ако се овозможи течење на струјата на гејтот. Струјата на гејтот може да има иста или спротивна насока со главната струја. Главната струја се смета за позитивна ако тече од анодата 2 кон анодата 1, а негативна ако тече од анодата 1 кон анодата 2.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Што претставува дијак?
2. Во што се разликува дијакот од стандардните диоди?
3. Како изгледа струјно-напонската карактеристика на дијакот?
4. Како може да се дефинира тријакот?
5. Која е разликата помеѓу тријакот и тиристорот?
6. Зошто не можат изводите анода 1 и анода 2 меѓусебно да се заменат?

7.6. Примена на тиристорите

Основната функција на тиристорите е да управуваат со струја на излезот со голема јачина со помош на мала струја во побудното коло.

Малата отпорност и пад на напон, а со тоа и мали загуби на моќност во спроводна состојба и многу големата отпорност и издржливост на големи напони во неспроводна состојба, ги прават тиристорите погодни за употреба како **бесконтактни прекинувачи во кола за регулација на струјата и моќноста**, особено за големи потрошувачи.

Освен за прекинувачи, овие компоненти се користат и за **континуирана регулација на електричната моќност, најчесто како насочувачи, инвертори (за претворање на еднонасочната во наизменична струја) или фреквенциски претворувачи за континуирана регулација на брзината на електромоторите.**

Само за споредба, одредени типови транзистори можат да работат со моќности над 500W, со струја поголема од 50A и напон поголем од 500V. За разлика од нив, тиристорите можат да работат со моќност поголема од 250KW, со струја над 1000A и со напон над 2500V. Карактеристично е што побудната моќност за активирање на транзистор е поголема од онаа што е потребна за тиристор со иста излезна моќност. Неповолноста на тиристорите е помалата брзина на прекинување и поради тоа тие не можат да се користат за прекинување и регулација на сигнали со високи фреквенции.

Тиристорите имаат голема примена во индустриската електроника и автоматика за контрола на моќноста на големи потрошувачи, како што се електромотори, грејачи, електрични рефлектори, а во секојдневниот живот за регулација на јачината на светлото на електричните светилки, за регулација на брзината на електричните мотори во разни апарати во домаќинствата, за регулација и автоматика на полнење на акумулаторски станици и многу други примени.

Тријакот се користи за поедноставни примени со мала моќност, најмногу во апарати за домаќинство, разни електрични алати за регулација на брзината, додека тиристорите наоѓаат примена најмногу за регулација на моќни еднонасочни мотори во индустријата.

ЗАПАМЕТИ !!!

- * Дијакот е елемент со петослојна структура и спроведува во двете насоки.
- * Дијакот се користи најчесто во придружба на друг тиристорски елемент.
- * Тријак е двонасочен тиристор кој спроведува во двете насоки и се користи во кола со наизменичен напон.
- * Тријакот се доведува во спроводна состојба со струјата на гејтот.
- * Тиристорите се користат за управување на струја со голема јачина со помош на мала струја на гејтот.
- * Тиристорите имаат најголема примена за контрола на моќноста на електромотори, греачи и електрични рефлектори, а тријаците во апарати за домаќинства.

ТЕМАТСКО УТВРДУВАЊЕ**I Прашања со заокружување****(Заокружи ги точните одговори)**

1. Тиристорот е во исклучена состојба кога се наоѓа во:
 - а) Директно спроведување
 - б) Директно блокирање
 - в) Инверзно блокирање.

2. За регулација на моќни еднонасочни мотори во индустријата се користи:
 - а) Тиристор
 - б) Дијак
 - в) Тријак.

II Прашања со поврзување

3. Поврзи ги шематските симболи со елементите:



а)



б)



в)

1. Тиристор _____
2. Дијак _____
3. Тријак _____.

III Прашања со дополнување

4. Електронските елементи со конфигурација од четири или повеќе полупроводни материјали, наредени такашто да прават најмалку три PN-споеви и имаат најмалку два извода се нарекуваат _____ .
5. Карактеристиките кои ја покажуваат зависноста на струјата на гејтот од напонот меѓу гејтот и катодата U_{GK} се _____ карактеристики.
6. Двонасочен тиристор кој спроведува во двете насоки се нарекува _____ .

Истражувај и дознај повеќе:



- Истражувај на интернет за видови тиристори и направи споредба и анализа на нивните струјно-напонски карактеристики.
 - Дознај повеќе од друга литература и побарај помош од професор за практичната примена на тиристорите.
-

СПЕЦИФИЧНИ ЕЛЕКТРОНСКИ ЕЛЕМЕНТИ

Со изучување на содржините од оваа тема ќе стекнеш основни знаења за градбата, карактеристиките и примената на различни видови специфични електронски елементи и ќе можеш:

- да го објаснуваш начинот на работа на термисторите;
 - да го објаснуваш значењето на температурниот коефициент на термисторот;
 - да разликуваш PTC и NTC-отпорници;
 - да го објаснуваш начинот на работа на фотоелектричните елементи;
 - да ги разликуваш елементите кои спаѓаат во групата на фотоелектрични елементи и да ги опишуваш нивните основни карактеристики;
 - да ја познаваш практичната примена на фотоелектричните елементи;
 - да го разбираш начинот на работа на релеите;
 - да разликуваш видови на релеи;
 - да ја познаваш практичната примена на релеите, особено во областа на телекомуникациите како комутационен елемент.
-

8.1. Термистори

Термисторите претставуваат група температурно осетливи отпорни елементи, од каде што и потекнува нивниот назив, составен од кратенки на зборовите "**термички (thermal)**" и "**отпорни (resistor)**". Постојат два вида термистори: **NTC** и **PTC**. **NTC (Negative Temperature Coefficient)** се термистори со негативен температурен коефициент, што значи дека нивниот отпор се намалува со зголемувањето на температурата. Поради тоа, тие се користат како температурни сензори. **PTC (Positive Temperature Coefficient)** се термистори со позитивен температурен коефициент, при што нивниот отпор се зголемува со зголемувањето на температурата. Оваа карактеристика овозможува нивна примена во кола за регулација на електричната струја.

Зависноста меѓу отпорноста на термисторот и температурата има линеарен карактер и може да се изрази како:

$$\Delta R = k\Delta T ; \dots\dots\dots(8.1)$$

каде што:

ΔR - промена на отпорноста

ΔT - промена на температурата

k - температурен коефициент на отпорот.

Електричниот симбол на термисторот е даден на **слика 8.1**.



Слика 8.1: Електричен симбол на термисторот.

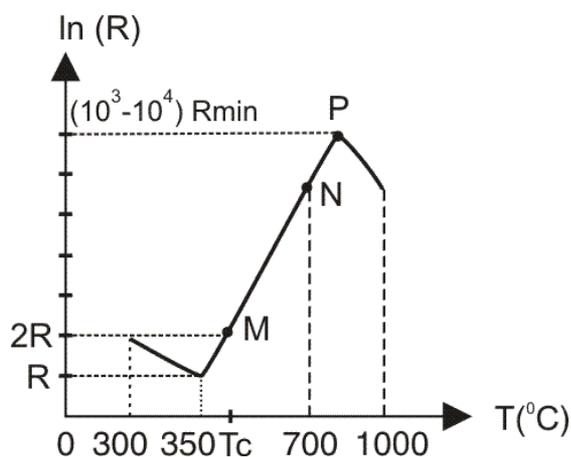
Температурниот коефициент k на термисторот претставува релативна промена на отпорот при промена на температурата за 1К(келвин). Овој коефициент е во зависност од линеарниот температурен коефициент α . Отпорот на термисторот се дефинира со:

$$R(T) = R(T_0)(1 + \alpha\Delta T) ; \dots\dots\dots(8.2)$$

Во оваа формула со R е претставена отпорноста на термисторот при мерената температура T, T_0 е референтна температура, а ΔT е разликата меѓу температурите T и T_0 . Со α е претставен линеарниот температурен коефициент.

8.1.1. NTC-термистори

Термисторите со негативен температурен коефициент достигнуваат најголем развој и примена во средината на минатиот век. Како претворувачи на температурата во електрична информација, се карактеризираат со голема осетливост. Најголема примена наоѓаат во електричните мерења на температурата, во медицината, биологијата, геологијата и др. Карактеристиката на зависност на отпорот од температурата е прикажана на **слика 8.2**.



Слика 8.2: Карактеристиката на зависност на отпорот од температурата на NTC-термистор.

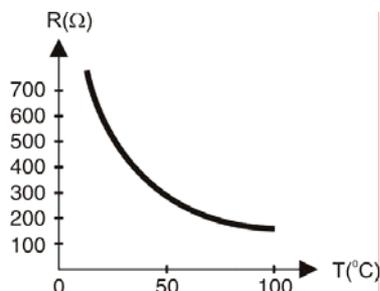
Со зголемување на температурата до вредноста означена на графикот со T_c , отпорноста се намалува во незначителна мера. Во областа од точката M до точката N , отпорноста расте по експоненцијален закон, а над точката N забавува и достигнува максимум и повторно опаѓа. NTC-термисторите се произведуваат од оксиди на железо, хром, манган, кобалт, никел, бакар и др. Со комбинирање на неколку видови оксиди се прави смеса од која со процес на синтерување на температура над 1000°C се формираат отпорници со форма на топка, диск или цилиндар. Максималната работна температура изнесува од 300°C до 350°C , а во поново време се изработуваат термистори и за температура од 700°C до 1000°C . Во областа на ниски температури, термисторите се применуваат до неколку десетици Келвинови степени.

8.1.2. PTC-термистори

Термисторите со позитивен температурен коефициент не се користат за мерење на температурата. Сензори со PTC-термистор за одредена температура даваат дискретни сигнали. Опсегот на мерењето на PTC-термисторот е тесен, а осетливоста е десет пати поголема во однос на NTC-термисторот. Материјал за производство на PTC-термистори е бариум-титанат, кој спаѓа во материјали со феромагнетни својства. Бариум-титанат

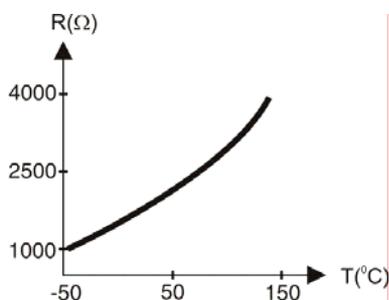
претставува изолатор, а неговата отпорност се намалува со внесување на донорски примеси.

Карактеристиката на зависност на отпорот од температурата, до 100°C е дадена на **слика 8.3**.



Слика 8.3: Карактеристиката на зависност на отпорот од температурата на NTC-термистор.

Силициумските отпорни PTC-сензори имаат релативно тесен опсег на мерење (од -50 °C до 150 °C). Во овој опсег работат голем број уреди од прехранбена индустрија, климатизација, метеорологија, домашни уреди, автомобили и др. Нивната карактеристика е дадена на **слика 8.4**.



Слика 8.4: Карактеристиката на зависност на отпорот од температурата на силициумските отпорни PTC-сензори.

Термисторите се изработуваат од ситни делови на специјални керамички материјали (разни метални оксиди), а во поново време за нивното производство се користат и силициум и германиум. Промената на електричниот отпор на термисторот може да биде предизвикана од промената на температурата на околината или поради течење на струја во самиот термистор. Термисторите како температурни сензори се користат како електроди осетливи на топлината на околината во која се наоѓаат. Тие ја мерат температурата на околината преку електрични импулси. Исто така, тие учествуваат во контролирањето на топлината, така што прават уредите на кои се приклучени да се грееат побавно. Термисторските сензори обично се составени од повеќе пластови од полупроводнички материјали поврзани со телото на термисторот. Овие материјали претставуваат отпор во колото во кое е приклучен термисторот и така ја регистрираат топлината создадена со струјата. Термисторите имаат

голем отпор за мали температурни промени и најголем број од нив се направени од оксиди на манган, кобалт, никел и бакар. Освен со овие материјали, за производство на термисторите се користи и силициумот и германиумот. Термисторите се користат за заштита на електронските кола од преоптоварување до кое доаѓа кога "ладен" уред се вклучува за да се постигне постепено затоплување.

Како температурни сензори, тие работат со голема прецизност во релативно мал температурен опсег, во споредба со другите температурни сензори. Термисторските сензори се среќаваат во дигитални термометри, телефони, автомобили, стерео и ТВ уреди. Нивните мали димензии овозможуваат нивна примена во многу други уреди за автоматска контрола и управување во науката и индустријата.

ЗАПАМЕТИ !!!

- * Термисторите претставуваат температурно осетливи отпорни елементи.
- * Кај NTC (Negative Temperature Coefficient) термисторите отпорот се намалува со зголемување на температурата.
- * Кај термисторите со позитивен температурен коефициент отпорот се зголемува со зголемување на температурата.
- * Температурниот коефициент k на термисторот претставува релативна промена на отпорот при промена на температурата за 1К.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

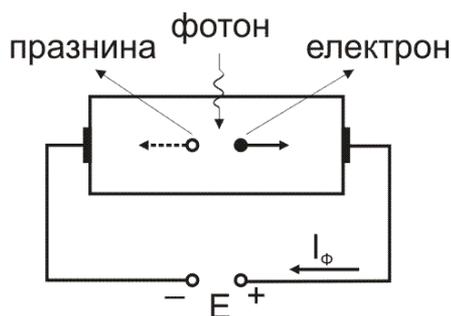
1. Дефинирај го поимот термистор.
2. Какви видови термистори постојат?
3. Како се дефинира температурниот коефициент на термисторот?
4. Каде имаат најголема примена NTC-термисторите?
5. Каде се применуваат PTC-термисторите?
6. Како се изразува зависноста меѓу отпорноста на термисторот и температурата?
7. Нацртај ја карактеристиката на зависност на отпорот од температурата кај NTC-термисторите и објасни ја.
8. Какви видови термистори постојат?
9. Што се случува во термисторот при промена на температурата на околината?

8.2. Фотоелектрични елементи

Фотоелектрични елементи се елементи чии електрични својства зависат од промената на енергијата на светлосното зрачење.

8.2.1. Фотоотпорници

Фотоотпорниците се електронски елементи изработени од полупроводнички материјали. Основната карактеристика на фотоотпорниците е промена на нивната електрична отпорност при промена на светлосниот флукс кој паѓа на нивната површина.



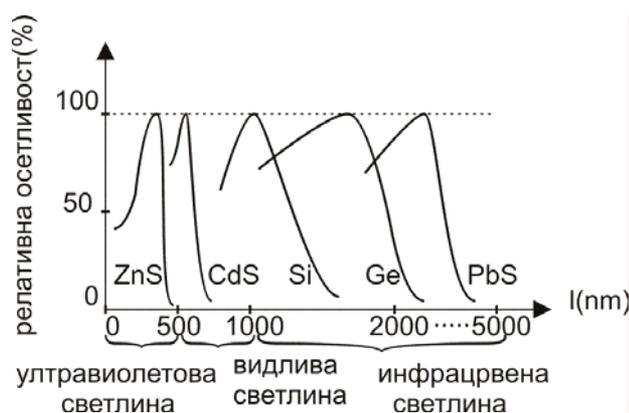
Слика 8.5: Фотоотпорник во електрично коло со извор за напојување.

Кога е ставен во електрично коло со извор за напојување, фотоотпорникот пропушта струја I_ϕ пропорционална на вредноста на неговиот отпор (слика 8.5). Ако фотоотпорникот не е осветлен, во колото во кое се наоѓа тече струја I_{ϕ_0} која се нарекува "струја на темно". Кога на површината на фотоотпорникот паѓа светлина, светлосните кванти – фотони ја предаваат својата енергија на атомите на полупроводниот материјал од кој е направен отпорникот и предизвикуваат раскинување на валентните врски, создавајќи еднаков број на слободни електрони и празнини. Слободните електрони и празнините паѓаат под влијание на електричното поле на изворот за напојување, создадено во отпорникот. Слободните електрони се насочуваат кон позитивниот, а празнините кон негативниот крај на напонот на отпорникот, со што се создава струја пропорционална на промената на светлосниот флукс. Оваа струја се додава на "струјата на темно" и се добива вкупната струја на фотоотпорникот. Тоа значи дека промената на светлосниот флукс предизвикала промена на отпорноста на фотоотпорникот и на тој начин е претворена во електричен сигнал.

Процедурата на производство на фотоотпорникот се состои во нанесување фотоосетлив полупроводнички материјал на подлога од керамичка плочка. Нанесувањето се прави со таложење на испарлив материјал или со синтерување на полупроводнички прав на висока температура. На краевите на плочката се ставаат метални контакти и на нив се прицврстуваат изводи со кои отпорникот се поврзува во електричното коло. Така добиената плочка се

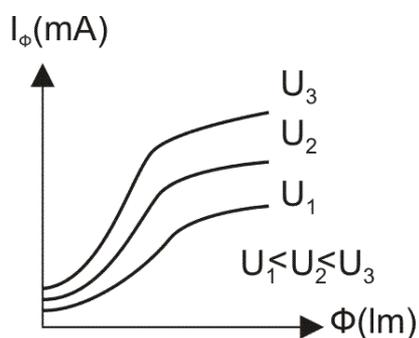
става во пластично или во метално куќиште со вграден просирен дел од стакло или пластика кој ја пропушта светлината да паѓа на фотоосетливата површина.

Фотоотпорниците се прават од неколку вида полупроводнички материјали, секој со сопствена спектрална карактеристика. Фотоотпорници од цинк – сулфид имаат најголема осетливост во областа на ултравиолетовото зрачење, оние од германиум и оловен сулфид во областа на инфрацрвеното зрачење, силициумските за зрачење од околу 1000nm, а кадмиум – сулфидните во областа на видливото зрачење (**слика 8.6**).

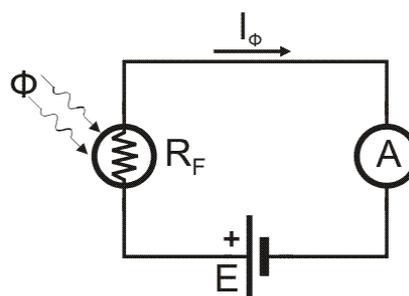


Слика 8.6: Спектрални карактеристики на фотоотпорникот за различни полупроводнички материјали.

Зависноста на струјата I_Φ од светлосниот флукс за разни вредности на напонот на фотоотпорникот е прикажана на **слика 8.7**. Оваа карактеристика не е линеарна, таа покажува струјно заситување за големи вредности на светлосниот флукс.



Слика 8.7: Дијаграм за осетливоста на фотоотпорникот.



Слика 8.8: Електрична шема на светломер.

Фотоотпорниците се применуваат во едноставни инструменти за мерење на осветленоста, таканаречени светломери (**слика 8.8**) и како детектори на светлината во разни алармни и командни уреди.

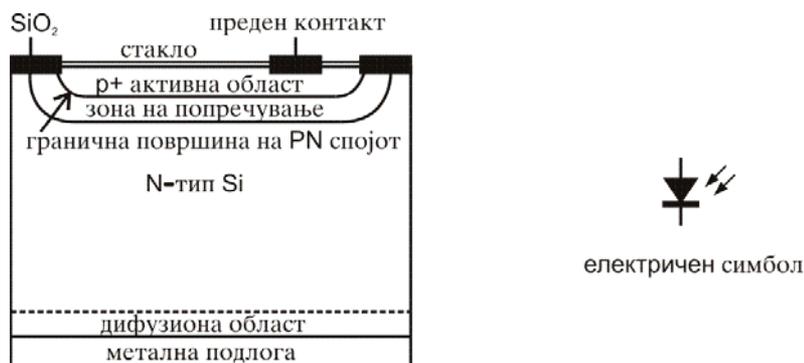
ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Што се случува во фотоотпорникот кој е приклучен во електрично коло со извор за напојување, кога на неговата површина ќе падне светлина?
2. Кога низ фотоотпорникот тече "струја на темно"?
3. Објасни ја постапката на производство на фотоотпорникот.
4. Кои фотоотпорници имаат најголема осетливост во областа на видливото зрачење?
5. Каде се применуваат фотоотпорниците?
6. Објасни ја градбата и карактеристиките на фотоотпорниците.

8.2.2. Фотодиоди

Фотодиодата, како и другите фотодетектори, има задача да ја претвори светлосната радијација во електричен сигнал. Во идеален случај, електричниот сигнал треба да биде пропорционален на јачината на светлината која паѓа на диодата. Една од најпознатите примени е соларната ќелија.

Како материјал за изработка на фотодиодите најчесто се користи силициум или галиум арсенид (GaAs), индиумантимонид (InSb), индиумарсенид (InAs), оловен селенид (PbSe) и оловен сулфид (PbS). Овие материјали апсорбираат светлина од одреден опсег на бранови должини, на пр., од 250nm до 1100nm за силициумот, од 800nm до 2µm за галиумарсенид. Модел и симбол за електрични шеми на фотодиода се дадени на **слика 8.9**.



Слика 8.9: Модел и електричен симбол за електрични шеми на фотодиода.

Знаеме дека еден фотон на апсорбирана светлина создава еден електрон и една празнина. Ако тие се разделат, пред да имаат можност да се рекомбинираат и да почнат да се движат во спротивни насоки, ќе се добие електрична струја, наречена фотоструја, а на надворешните приклучоци напон, наречен фотонапон.

Фотодиода без надворешна поларизација

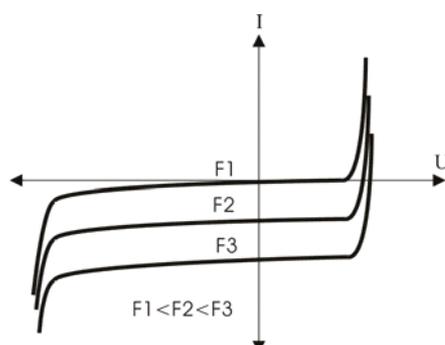
Кај фотодиоди без надворешна поларизација светлината влегува во елементот преку тенок слој од Р-тип. Како влегува подлабоко во материјалот нејзиниот интензитет се намалува и тоа по експоненцијален закон. Фотон на светлина, кој навлегол во бариерата, создава слободен електрон и празнина. Електронот и празнината паѓаат под влијание на внатрешното електрично поле на спојот и поминуваат преку спојот. Електроните и празнините создадени надвор од бариерата се движат хаотично, многу од нив влегуваат во бариерата, а други се рекомбинираат и се губат без да стигнат до неа. Колку е поголем бројот на електроните и празнините во бариерата, а тоа значи дека е поголем интензитетот на светлината што паѓа врз диодата, толку е поголема и фотострујата.

Ширината на бариерата може да се зголеми со нивото на внесените примеси во полупроводникот. Диода од овој вид работи во фотонапонски режим, таа претставува извор на фотонапон и фотоструја без помош од надворешен извор за напојување. Такви диоди се применуваат во фотоапарати за мерење на осветлувањето на објектот што се снима и во соларни ќелии.

Фотодиода со надворешен извор за поларизација

Сепак, полесен начин за проширување на зоната е со примена на надворешна поларизација. Тука диодата работи во фотоспроводлив режим со помош на надворешен извор за напојување. Фотодиодата работи во режим со инверзна поларизација. Кога фотодиодата не е осветлена, во колото тече само инверзната струја на диодата, наречена струја на црно. Фотострујата на диодата се менува од вредноста на струјата на црно (неосветлена диода) до вредноста на максималната осветленост. Нејзината карактеристика на зависноста на струјата од напонот на поларизацијата при различни нивоа на осветлување е дадена на **слика 8.10**.

Фотодиодите најмногу се среќаваат во алармни системи.



Слика 8.10: Струјно-напонска карактеристика на фотодиода.

8.2.3. Фототранзистори

Фототранзисторот е биполарен транзистор со колекторска струја пропорционална на светлосниот флуks, кој паѓа на површината на колекторскиот спој. Неговата специфичност е во тоа што на горната страна има светлопропусен (просирен) слој, во кој може да биде вградена и леќа со цел да му се зголеми осетливоста.

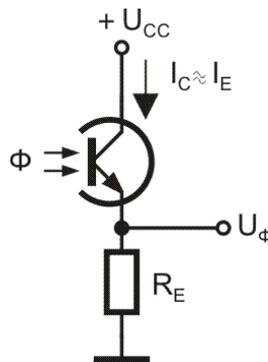
Карактеристиката на релативната осетливост на фототранзисторот, дефинирана како однос на фотострујата I_{ϕ} за која и да е бранова должина на светлината наспроти максималната вредност $I_{\phi\max}$ е дадена на **слика 8.11**. Таа покажува како фототранзисторот реагира на светлина со разни бранови должини.



Слика 8.11: Карактеристика на релативна осетливост на фототранзистор.

Кој и да е биполарен моќен транзистор со метално куќиште може да се направи да стане фототранзистор, ако му се пресече горниот дел на куќиштето и така отворен се изложува на сончева светлина или на светлина на отворен пламен. Светлината паѓа на колекторскиот PN-спој, којшто е инверзно поларизиран и има најголема ширина.

Начинот на приклучувањето на фототранзисторот во електрично коло е прикажан на **слика 8.12**.



Слика 8.12: Фототранзистор во електрично коло.

Колекторот е врзан на позитивниот крај на изворот U_{CC} , емитерот преку отпорникот R_E на негативниот крај, а базата не е вклучена во надворешното коло, таа е слободна. За овој начин на поларизација, зоната на попречување на колекторскиот спој е многу поширока

од онаа на емитерскиот спој. Со светлина создадените парови електрони – празнини во зоната на попречување во колекторскиот спој се разделуваат, електроните се упатуваат кон колекторот, а празнините кон емитерот. Нивното движење ја претставува фотострујата, која на отпорникот R_E создава излезен фотонапон. Фотострујата I_ϕ е составена од две компоненти: едната е резултат на светлината што паѓа на фототранзисторот, а другата е инверзната струја I_{CE0} од колекторот кон емитерот. Кога транзисторот не е осветлен, ќе тече само инверзната струја и таа ја претставува струјата на "темно". Нејзини типични вредности се движат околу 10nA и таа се зголемува со зголемувањето на температурата.

Физичкиот приклучок на базата може да се остави отворен, а може да се користи и за поларизација да се добие стабилно ниво на сигналот.

Фототранзисторите најчесто се употребуваат во прекинувачки кола, каде што нивната нелинеарност не создава проблеми.

ЗАПАМЕТИ !!!

* Фототранзисторот е биполарен транзистор со колекторска струја пропорционална на светлосен флукс.

* Колото на базата на транзисторот е отворено, а фотострујата се создава во зоната на попречување во колекторскиот спој.

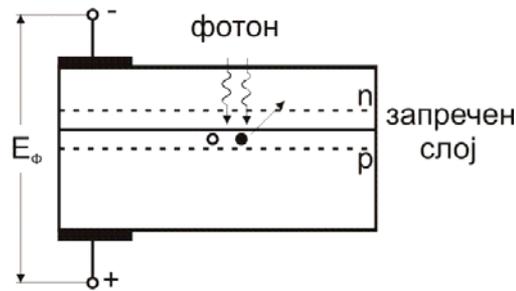
* Во неосветлен фототранзистор тече инверзна струја, наречена "струја на темно".

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Со што е пропорционална колекторската струја на фототранзисторот?
2. Дефинирај ја карактеристиката на релативната осетливост на фототранзисторот?
3. Од кои компоненти е составена фотострујата?
4. Каде се употребуваат фототранзисторите?

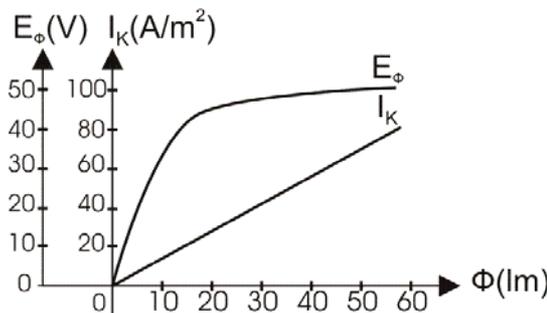
8.2.4. Фотогенератори

Полупроводнички елементи со способност да ја претвораат енергијата на светлосното зрачење директно во електрична се нарекуваат фотогенератори. Составени се од еден PN-спој и имаат два извода. Пресек на фотогенераторот е претставен на **слика 8.13**. Запречниот слој има многу мала ширина (околу 20 nm), додека површината на PN-спојот е зголемена, со цел поголема апсорпција на фотони од светлосниот зрак. P и N-областите се со поголема концентрација на слободни носители на електричниот полнеж.



Слика 8.13: Структура на фотогенераторот.

Фотогенераторите работат без надворешен извор за напојување. Фотоните од светлинскиот зрак што паѓа на површината на PN-спојот од фотогенераторот, ја предаваат својата енергија на валентните електрони со што се создаваат парови електрон-празнина. При тоа се зголемува бројот на споредните носители во запречниот слој од PN-спојот. Контактната потенцијална разлика создава електростатско поле кое им овозможува на споредните носители слободно се движат низ запречниот слој и го напуштаат, додека главните носители остануваат во своите области. При тоа во P и во N областите се создава многу голема концентрација на главните носители, која индуцира електромоторна сила E_ϕ на изодите на фотогенераторот. Оваа електромоторна сила E_ϕ се нарекува напон во празен од кога на изодите на фотогенераторот не е приклучен отпорник. Ако се приклучи отпорник, низ него ќе протече електрична струја пропорционална на светлосниот флуks кој паѓа на површината на фотогенераторот.



Слика 8.14: Светлосни карактеристики на фотогенераторот.

На **слика 8.14** се дадени светлосните карактеристики на фотогенераторот кои претставуваат зависност на напонот во празен од, E_ϕ , и струјата на краток спој, I_k , од светлосниот флуks Φ .

Фотогенераторите се основен извор на електрична енергија во космичките летала. Тие се нарекуваат **соларни ќелии**, бидејќи енергијата од сончевото зрачење ја претвораат во електрична.

Голема е и примената на соларните ќелии на земјината површина како алтернативни извори на електрична енергија.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Кои полупроводнички елементи се нарекуваат фотогенератори?
2. Објасни го принципот на работа на фотогенераторот.
3. Дефинирај ги светлосните карактеристики на фотогенераторот и нацртај го дијаграмот.
4. Каде се применуваат фотогенераторите?
5. Нацртај го електричниот симбол на фотодиода!
6. Објасни ги карактеристиките на фотогенераторите.

ЗАПАМЕТИ !!!

- * **Фотоотпорниците се фотоелектрични елементи чија електрична отпорност се менува со промена на светлосниот флукс кој паѓа на нивната површина.**
- * **Фотоотпорниците се применуваат во едноставни инструменти за мерење на осветленоста, така наречени светломери и како детектори на светлината во разни алармни и командни уреди.**
- * **Фотодиодата ја претвара светлосната радијација во електричен сигнал, пропорционален на јачината на светлината која паѓа на диодата. Таа работи во режим на инверзна поларизација.**
- * **фотогенератори се фотоелектрични елементи со способност енергијата на светлосното зрачење да ја претвараат директно во електрична.**
- * **Фотогенераторите се нарекуваат соларни ќелии бидејќи енергијата од сончевото зрачење ја претвараат во електрична енергија.**

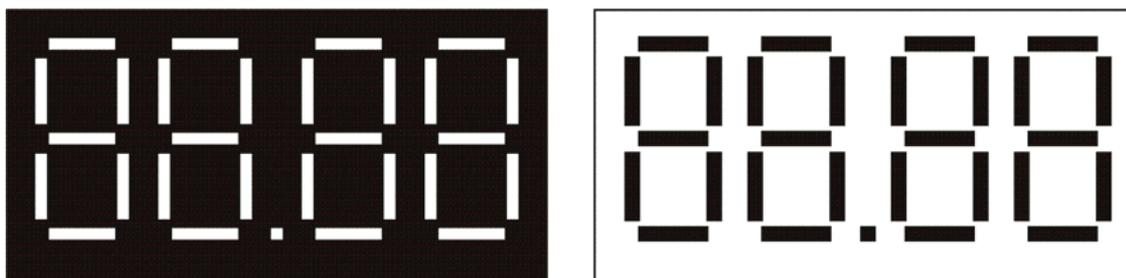
8.2.5. Дисплеј со течен кристал



Течен кристал - LCD (Liquid Crystal Display) претставува материја која на одредена температура има особини и на течност и на кристал. Таа може да се прелева од едно место на друго, а светлината ја прекршува во разни насоки исто како кристалот. Таква особина имаат некои органски хемиски материји (група холестерини). Молекулите на тие материји имаат издолжена форма на стапчиња. Едниот крај на молекулите е со позитивен, а другиот со негативен полнеж, а самиот молекул е неутрален. Поради тоа, тие се нарекуваат поларни молекули. Ако се најдат во електрично поле, молекулите се насочуваат во насоката на полето.

Течните кристали работат на принципот на одбивање и нееднакво прекршување на светлина од надворешен извор. Тие не се активни извори на светлина.

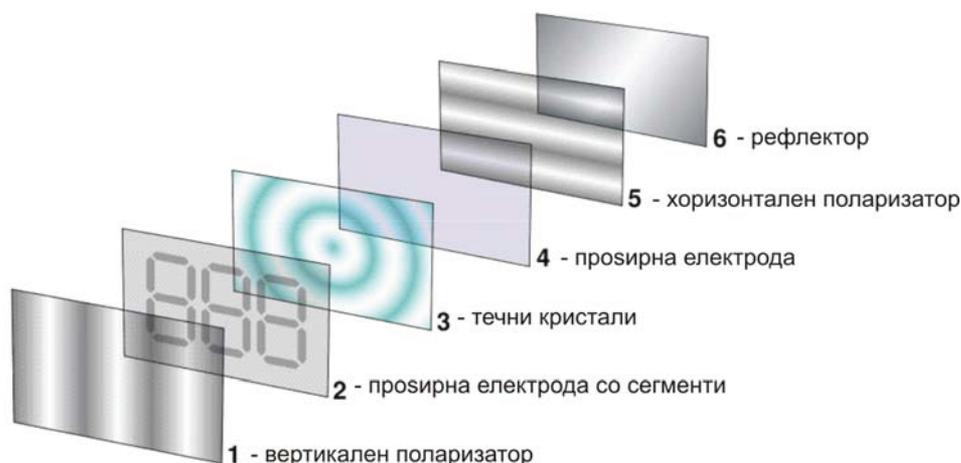
Дисплејот може да биде со темни карактери на светла заднина или со светли карактери на темна заднина (слика 8.15), односно со принцип на динамичка дисперзија на светлината или со принцип на ефект на електрично поле.



Слика 8.15: Видови на LCD дисплеи.

Конструкцијата на дисплејот со течен кристал е составена од две стаклени плочи и тенок слој на течен кристал меѓу нив. Надворешната страна на долната стаклена плоча е пресвлечена со метален слој од алуминиум или никел и претставува огледало. Таа е поврзана со негативниот крај на напојувањето. На внатрешните страни на двете стаклени плочи, на иста позиција, се направени сегменти со кои се формираат карактерите на дисплејот. Сегментите се оформени од просирен спроводен материјал, како што е оловниот оксид, и се споени со соодветни метални контакти на рабовите на плочите.

Молекулите на течниот кристал се распоредени во слоеви (слика 8.16). Сите молекули во еден слој се со иста ориентација. Секој соседен молекул од следниот слој е завртен за одреден агол и така се добива низа молекули со форма на спирала.



Слика 8.16: Распоредот на молекулите во течниот кристал.

Еден сегмент на течниот кристал е составен од еден вертикален поларизатор, прва просирна електрода (сегмент), повеќе слоеви на течни кристали, втора просирна електрода

(сегмент), хоризонтален поларизатор и рефлектор. Светлосните зраци што доаѓаат до вертикалниот поларизатор, осцилираат во сите насоки. Преку поларизаторот поминуваат само оние што осцилираат во вертикална насока. Овој вертикално поларизиран светлосен зрак поминува преку првата просирна електрода и навлегува во низата спирално поставени молекули на течниот кристал. Во секој слој на течниот кристал тој станува завртен на десно се до последниот слој, од каде излегува со хоризонтална поларизација и поминува преку втората просирна електрода и хоризонталниот поларизатор се до рефлекторот. Одбиениот светлосен зрак од рефлекторот се враќа по истата патека, поминува преку хоризонталниот поларизатор, се завртува со слоевите на течниот кристал се до вертикалната положба, поминува преку вертикалниот поларизатор и излегува на истата страна со влезниот светлосен зрак. На овој начин, кога на патот на светлината нема никакви пречки, се добива светла заднина.

Кога на металните сегменти се приклучува мал напон од 3 до 5V, меѓу нив се создава електрично поле и молекулите на течниот кристал се подредуваат во насоката на тоа поле. Така наредени, тие повеќе не го свртуваат светлосниот зрак, не му ја менуваат рамнината на поларизацијата и тој со вертикална поларизација доаѓа до хоризонталниот поларизатор. Светлосен зрак со вертикална поларизација не може да помине преку хоризонталниот поларизатор и тој се губи во течниот кристал како во дупка. На местото на сегментот нема вратен светлосен зрак и тој станува темен.

Дисплеј со течни кристали работи на наизменичен напон со фреквенција од 30 до 300Hz. Тој има импулсна форма со амплитуда меѓу 1 и 18V и се прави со дигитални кола. Еднонасочен напон може да прави електролиза на течниот кристал и да му го скратува работниот век на дисплејот.

Густијата на струјата на дисплејот е многу мала, околу $\frac{1nA}{cm^2}$, што значи мала

потрошувачка. Тоа го прави дисплејот со течни кристали употреблив за минијатурни уреди, како што се рачни часовници, за кои нема место за батерии со поголем капацитет. Најмногу се користи за преносни калкулатори, дигитални часовници, дигитални мерни инструменти и екрани за монитори и ТВ-приемници.

ЗАПАМЕТИ !!!

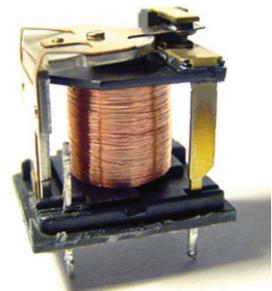
- * **LED дисплеј претставува индикатор, составен од седум сегменти, осветлени со LED диоди.**
- * **Еден сегмент на течниот кристал е составен од еден вертикален поларизатор, прва просирна електрода (сегмент), повеќе слоеви на течни кристали, втора просирна електрода (сегмент), хоризонтален поларизатор и рефлектор.**
- * **Дисплеј со течни кристали се користи за преносни калкулатори, дигитални часовници, дигитални мерни инструменти и екрани за монитори и ТВ-приемници.**

ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

1. Кои се најважните одлики на течните кристали?
2. Објасни ја конструкцијата на дисплејот со течен кристал.
3. Од што е составен еден сегмент на течниот кристал?
4. Зошто дисплејот со течен кристал не се приклучува на еднонасочен напон?
5. Каде се применува дисплејот со течен кристал?

8.3. Релеи

Реле е електричен прекинувач кој се користи за прекинување или воспоставување на струјно коло. Ако прекинувањето се врши со електромагнет, станува збор за електромагнетно реле. Но, постојат и електронски релеа, кај кои отворањето и затворањето на струјните контакти го вршат полупроводнички елементи. Релеите овозможуваат електрични кола со мала струја да управуваат со течењето на големи струи.

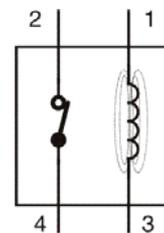
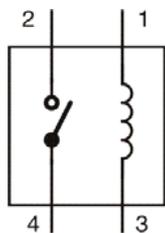


8.3.1. Начин на работа на електромагнетните релеи

Постојат повеќе видови на конструкции на релеи со 3, 4, 5 и 6 изводи, со единечно или двојно прекинување.

Сите релеи работат на еднаков принцип. Во релеите постојат две кола: управувачко и коло за оптоварување. Во управувачкото коло се наоѓа мал електромагнетен калем со железно јадро, а во колото на оптоварувањето се прекинувачките контакти. Со електромагнетот се управува отворањето и затворањето на контактите за оптоварувањето.

Релето е побудено кога тече струја во колото на електромагнетот (изводи 1 и 3 на **слика 8.17**), при што се создава одредено магнетно поле со кое се затвора прекинувачот меѓу изводите 2 и 4. Прекинувачот е дел од колото на оптоварувањето, па на тој начин и во колото на оптоварувањето ќе протече струјата на оптоварувањето.

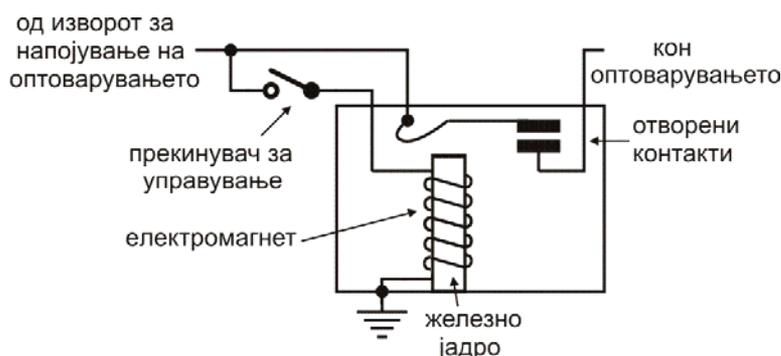


Слика 8.17: Побуден електромагнетно реле.

Слика 8.18: Непобуден електромагнетно реле.

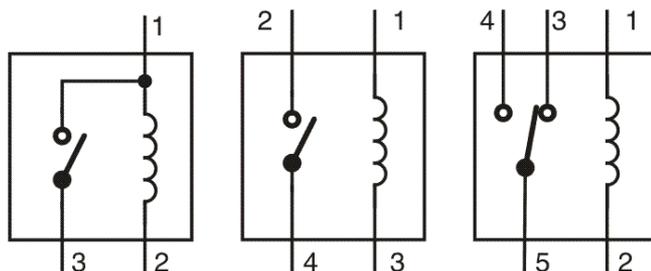
Релето е исклучено кога престанува да тече струја во управувачкото коло меѓу изводите 1 и 3, магнетното поле повеќе не постои и контактите на прекинувачот се отвораат.

Релеите се НО-нормално отворени, НЗ-нормално затворени а има и еден 3-заеднички крај за преклопникот. Кај нормално отворените релеи, прекинувачките контакти се отворени се додека релето не стане побудено. Нормално затворено реле има затворени контакти кога релето не е побудено. Во електричните шеми релето секогаш е прикажано во состојба кога не е побудено (слика .8.18).



Слика 8.19: Шематска конструкција на реле.

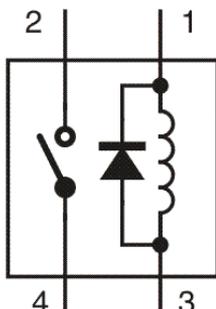
Електричен симбол на реле е дадена на слика.8.19, а на слика.8.20 се дадени електричните симболи на релеи со 3, 4 и 5 изводи.



Слика 8.20: Електрични симболи на релеи со 3, 4 и 5 изводи.

Кога управувачкото коло е затворено, преку калемот на електромагнетот тече струја и создава електромагнетно поле. Во моментот на исклучувањето на прекинувачот на управувачкото коло, престанува да дејствува магнетното поле, а поради самоиндукцијата во калемот на неговите краеве се јавува голем напонски скок со спротивен поларитет од напонот на напојувањето на калемот. За калем со напојување од 12V на спротивниот крај на калемот се јавува напонски скок кој може да пречекори вредност од 200V и протекува струја во спротивна насока. Со оглед на тоа дека управувањето со релето се прави со транзистор или преку интегрирано коло, потребно е овие напонски скокови да се придушат за да не дојде до оштетување на управувачките елементи. За придушвање на напонските скокови се користат отпорници со голема вредност на отпорот, диоди или кондензатори, приклучени

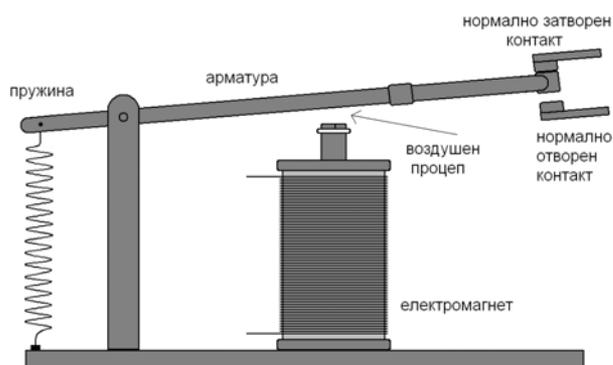
паралелно на калемот (слика 8.21). За придушување со диода, како на слика 8.19, диодата се приклучува во инверзна насока, така што да не пропушта струја кога е релето во побудена состојба, а станува спроводлива во моментот на создавањето на напонскиот скок. Најдобри резултати во придушувањето покажува диодата и таа најчесто се користи за таа цел.



Слика 8.21: Реле со придушување на напонските скокови.

Релеите се употребуваат таму каде што е потребно да се управува со сигнали со мала моќност или кога се управува со повеќе кола со еден сигнал.

На слика 8.22 е дадена конструкција на електромагнетно реле.



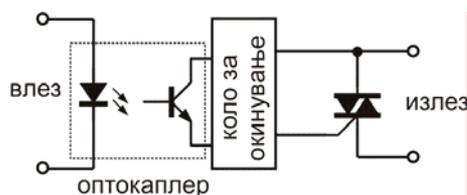
Слика 8.22: Конструкција на електромагнетно реле.

8.3.2. Начин на работа на електронските релеи

Прекинувачките карактеристики на транзисторите, тиристорите и тријациите можат да се користат во извршување на еквивалентна функција на реле. Со примена на овие елементи се добива уред наречен електронско реле. Овој уред содржи управувачки дел, составен од електронски елементи со мала моќност и прекинувачки дел, составен од полупроводничките прекинувачки елементи. Двата дела се физички и електрично меѓусебно разделени. Управувачкиот дел може да биде едноставен до многу сложен, во зависност од задачите што треба да ги извршува електронското реле. За посложени операции се применуваат посложени електронски елементи, како што се микропроцесорите. Според тоа, управувачкиот дел може да ги задоволува барањата за

заштитни функции (заштита од преголем напон или струја на потрошувачот, променлив напон или струја од минимална до максимална вредност во почетокот на вклучувањето, промена на насоката на вртење кај мотори како потрошувачи и друго). Управувачкиот дел може да има одвоен напон на напојување од прекинувачкиот дел.

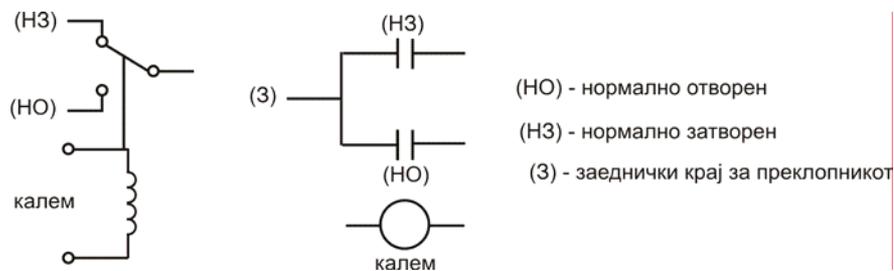
Прекинувачкиот дел ги содржи полупроводничките елементи кои функционираат како прекинувачи. За еден прекинувачки контакт се користи еден елемент. Прекинувачкиот дел на електронското реле може да се приклучи на еднонасочен, монофазен или на трофазен наизменичен мрежен напон. Кога се работи за трифазен приклучок, прекинувачкиот дел содржи три полупроводнички елементи. Принципот на работа на електронското реле е даден на **слика 8.23**. Со напонот на управување се побудува LED диодата на оптокаплерот, а со фототранзисторот се отвора тријакот кој станува спроводен. Оптокаплер е уред составен од светлечка диода и фототранзистор. Тие се ставени во едно куќиште во форма на интегрирано коло. Кога диодата е вклучена, таа емитува светлина кон фототранзисторот и го активира (вклучува). Командата за управување со транзисторот се пренесува по светлосен пат. Со примена на оптокаплерот се добива електрично одвојување на управувачкиот од прекинувачкиот дел на релето.



Слика 8.23: Електрична шема на електронско реле.

Електронското реле може да биде ставен во сопствено куќиште, или да биде дел од сложен уред за управување со моќни потрошувачи. Такви уреди, за управување со електрични мотори, се викаат инвертори или фреквенциски претворувачи. Со инверторите се регулира брзината и насоката на вртењето, вртливиот момент на моторот, начинот на стартувањето, а се опфатени и сите видови на заштита. Со примената на инверторите се одбегнуваат големите склопки – контактори, се намалува потрошувачката на енергија, предизвикана од привлекувањето на електромагнетите и нивото на бучавата на контактите. Предноста на електронските во однос на електромагнетните релеи е помалата потрошувачка на управувачкиот дел, нема абење на механичките делови и нагорување на контактите, помали димензии за релеи со поголема моќност и поголема можност за дополнителни функции. Неговите недостатоци се: одреден пад на напонот на прекинувачкиот елемент и загуба на енергија, ограничен број на контакти по прекинувачки елемент и несакано вклучување при појавата на електрични пречки.

Електричниот симбол на електронско реле е даден на **слика 8.24**.



Слика 8.24: Електричен симбол на електронско реле.

Постојат повеќе вида релеи: електромагнетни со привлечна котва, релеи со контакти во вакуум или некој инертен гас, познати како REED-релеи, релеи со контакти потопени во жива, поларизирани релеи, релеи за машини алатки со голем број контакти, денес заменети со PLC контролери, контактори за електрични мотори, денес се повеќе се заменуваат со тиристорски уреди и други.

ЗАПАМЕТИ !!!

- * Реле е електричен прекинувач кој се користи за прекинување или за воспоставување на струјно коло;
- * Кај нормално отворено реле, прекинувачките контакти се отворени се додека релето не стане побудено.
- * Нормално затворено реле има затворени контакти кога релето не е побудено.
- * Релеите се употребуваат таму каде што е потребно да се управува со сигнали со мала моќност или кога се управува со повеќе кола со еден сигнал.

ПРОВЕРИ ДАЛИ ЗНАЕШ

1. Дефинирај го поимот реле.
2. Објасни го принципот на работа на електромагнетното реле.
3. Кога релеите се нормално отворени а кога нормално затворени?
4. Нацртај шематска конструкција на реле со 3, 4 и 5 изводи.
5. Какви видови релеи постојат?
6. Објасни ја примената на релеите?
7. За каков вид релеј станува збор кога отворањето и затворањето на струјните контакти го вршат полупроводнички елементи?
8. Објасни го начинот на отворање и затворање на електромагнетниот релеј.

ТЕМАТСКО УТВРДУВАЊЕ

I Прашања со заокружување

(Заокружи ги точните одговори)

1. Елементите кај кои со промена на температурата се менува нивната отпорност се:
 - а) фотоотпорници
 - б) фотодиоди
 - в) термистори.

2. Елементи кои се користат како температурни сензори се:
 - а) фотогенератори
 - б) термистори
 - в) фотодиоди.

3. Елементи кои се користат во инструменти за мерење на осветленоста се:
 - а) фотодиоди
 - б) фотоотпорници
 - в) фототранзистори
 - г) фотогенератори.

4. Полупроводнички елементи со способност да ја претвораат енергијата на светлосното зрачење директно во електрична се нарекуваат:
 - а) фотогенератори
 - б) фотоотпорници
 - в) фототранзистори
 - г) термистори.

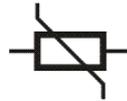
5. Како составен дел од инверторите се употребуваат:
 - а) фотодиоди
 - б) релеи
 - в) термистори
 - г) фотоотпорници.

II Прашања со поврзување

6. Поврзи ги шематските симболи со елементите:



а)



б)



в)

- 1. Фотодиода _____
- 2. Фототранзистор _____
- 3. Термистор _____.

7. Поврзи ги специфичните електронски елементи со нивната примена како:

- 1. Термистори
- 2. Фотогенератори
- 3. Фотоотпорници
- а) Светломери _____
- б) Температурни сензори _____
- в) соларни ќелии _____.

III Прашања со дополнување

8. Кај NTC-термисторите со зголемување на температурата нивниот отпор се _____ .

9. Специфичните електронски елементи кои се користат во алармните системи се _____ .

10. _____ овозможуваат електрични кола со мала струја да управуваат со течењето на големи струи.

11. Електронските елементи чии електрични својства зависат од промената на енергијата на светлосното зрачење се нарекуваат _____ .

12. Нормално затворено реле има _____ контакти кога релето не е побудено.



Истражувај и дознај повеќе:

- Истражувај на интернет и дознај повеќе за видови електронски специфични елементи.
 - Пронајди шеми во други стручни литератури примената на фотоелектричните елементи
 - Изработи проект за примена и начинот на работа на електромагнетниот релеј.

П Р И Л О Г

ЗАДАЧИ

СО РЕШЕНИ ПРИМЕРИ

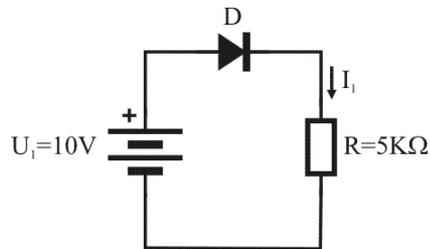
СОДРЖИНА

Задачи и решени примери од полупроводнички диоди.....	257-266 стр.
Задачи и решени примери од транзистори.....	268-274 стр.
Задачи и решени примери од засилувачи.....	274-285 стр.
Задачи и решени примери од операциски засилувачи.....	284-285 стр.
Задачи од извори на еднонасочен напон.....	285 стр.

Задачи и решени примери од полупроводнички диоди

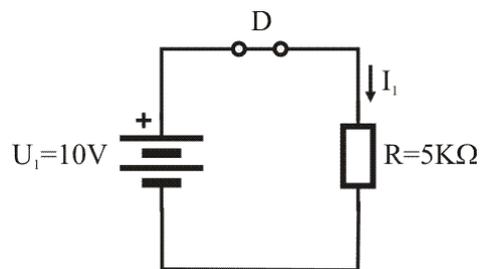
(Во задачите се употребува техничка насока на струјата)

1. Пресметај ја струјата во колото со отпорник и идеална диода, дадено на сликата .



Решение:

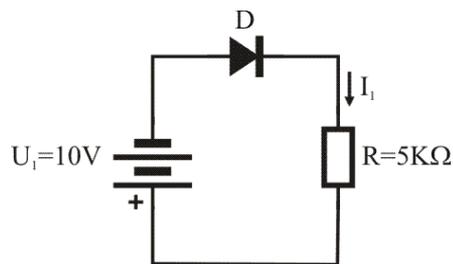
Прво се дефинира поларизацијата на диодата. Анодата на диодата е приклучена на позитивниот пол на изворот, диодата е директно поларизирана. Земајќи предвид дека диодата е идеална, во колото ќе ја замениме со затворен прекинувач. Сега колото го има следниот изглед:



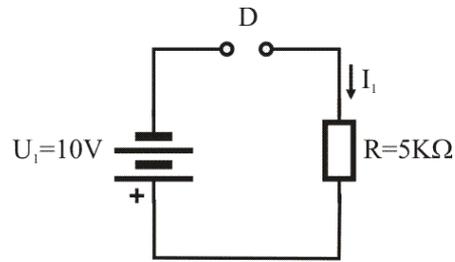
Струјата низ отпорникот може да се пресмета според:

$$I_1 = \frac{U_1}{R} = \frac{10V}{5K\Omega} = 2mA.$$

2. Пресметај ја струјата низ диодата на даденото коло, земајќи ја диодата како идеална.



Решение: Диодата е инверзно поларизирана, таа се заменува со отворен прекинувач.



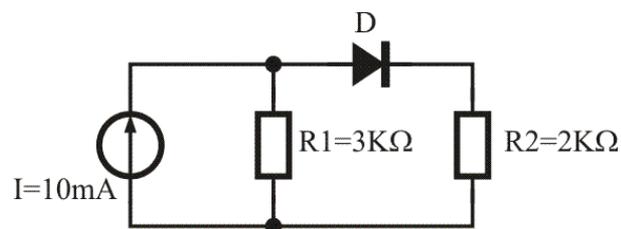
Струјата во колото е $I_1=0$.

3. Во колото со струен генератор $I = 10\text{mA}$ и идеална диода D да се пресмета:

а) напонот на отпорникот R1;

б) струјата на диодата D.

(Решение: $U_{R1}=12\text{V}$, $I_{D1}= 6\text{mA}$)

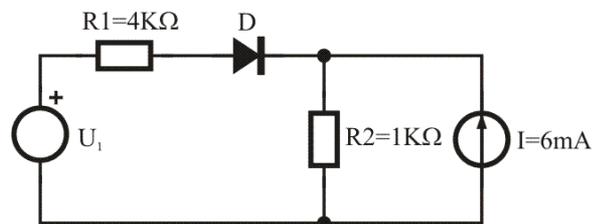


4. При $U_1 = 10\text{V}$ пресметај:

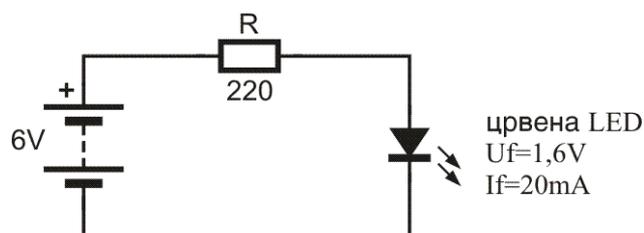
а) струја на идеалната диода D;

б) напон на R2.

(Решение: $I_D= 0,8\text{mA}$, $U_{R2}=8\text{V}$)



5. Да се приклучи црвена LED која има пад на напон од $1,6\text{V}$ и струја од 20mA , на еднонасочен извор од 6V .



Решение:

Падот на напонот на отпорникот треба да биде:

$$U_R = 6\text{V} - 1,6\text{V} = 4,4\text{V},$$

вредноста на неговиот отпор е:

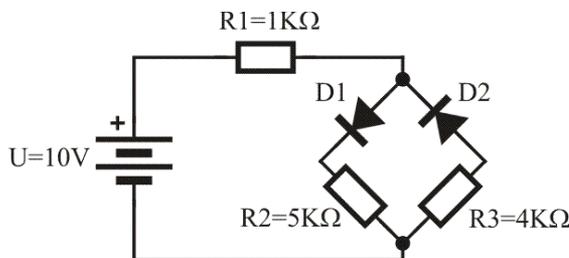
$$R = \frac{4,4V}{20mA} = 0,220K\Omega = 220\Omega .$$

Моќноста на отпорникот е:

$$P_R = U \cdot I = 4,4V \cdot 20 \cdot 10^{-3} A = 0,88W .$$

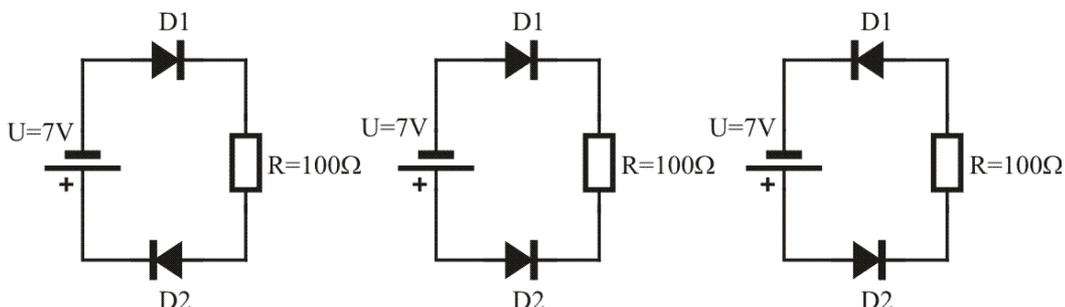
6. За колото од сликата да се пресметаат струите низ идеалните диоди D1 и D2.

(Решение: $I_{D1} = 1,7mA$, $I_{D2} = 0$)



7. Да се пресмета струјата која тече во отпорникот R за секое од овие три кола, при што треба да се претпостави дека диодите D1 и D2 се идеални диоди.

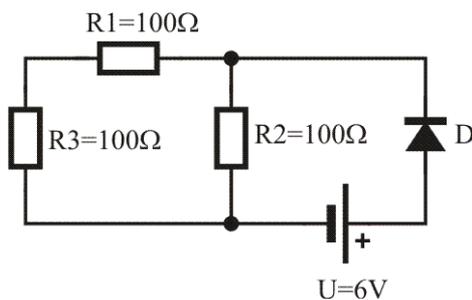
(Решение: $I_1 = 0$, $I_2 = 0$, $I_3 = 10mA$)



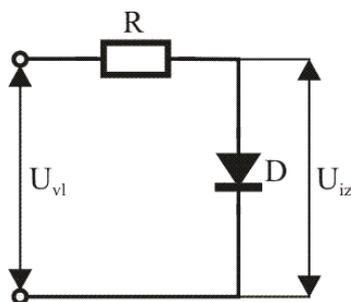
8. За колото од сликата со идеална диода:

- а) да се пресмета напонот на R2;
- б) да се одреди колкава е струјата на диодата.

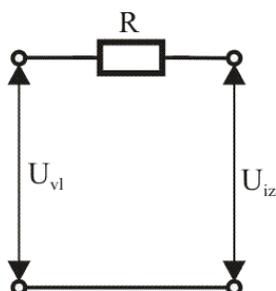
(Решение: $6V$, $90mA$)



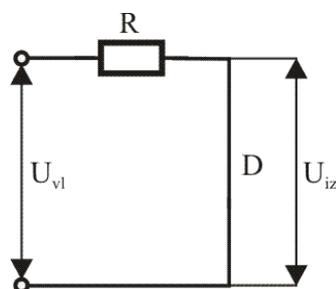
9. За колото од сликата да се нацрта преносната карактеристика.

**Решение:**

Прво се анализира колото кога на неговиот влез ќе се доведат негативни напони ($U_{vl} < 0$). Во тој случај диодата е инверзно поларизирана, се еквивалентира со отворен прекинувач, при што колото ќе го добие следниот изглед:

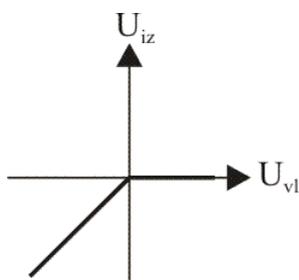


Излезниот напон ќе го следи влезниот напон $U_{iz} = U_{vl}$.



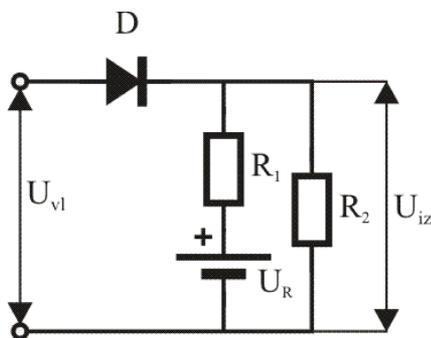
Краевите на диодата се краткоспоени, па напонот на нејзините краеве е $0V$ ($U_{iz} = 0V$).

Преносната карактеристика на колото ќе го има следниот облик:



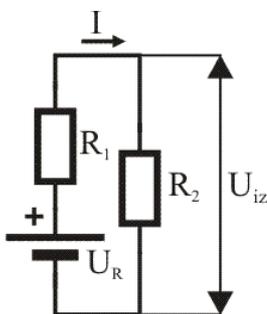
10. За колото од сликата да се нацрта преносната карактеристика.

$$R_1 = R_2 = 6K\Omega, U_R = 15V$$



Решение:

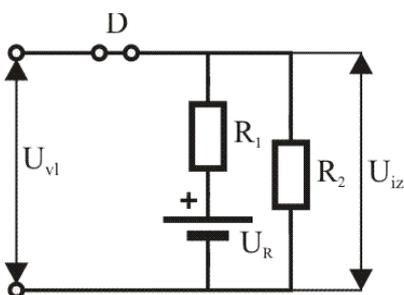
Да претпоставиме дека диодата е исклучена (инверзно поларизирана). Во тој случај колото ќе го има следниот изглед:



Струјата во колото може да се изрази како: $I = \frac{U_R}{R_1 + R_2}$ а излезниот напон:

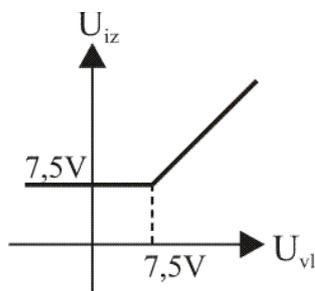
$$U_o = R_2 \cdot I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_R = \frac{6K}{6K + 6K} \cdot 15 = \frac{1}{2} \cdot 15 = 7,5V$$

Овој потенцијал се наоѓа на катодата на диодата. Промена на поларизација ќе има кога влезниот напон ќе биде поголем од 7,5V (кога потенцијалот на анодата ќе биде повисок од потенцијалот на катодата). Во тој момент диодата ќе се вклучи, односно ќе биде директно поларизирана. Колото ќе го има следниот изглед:



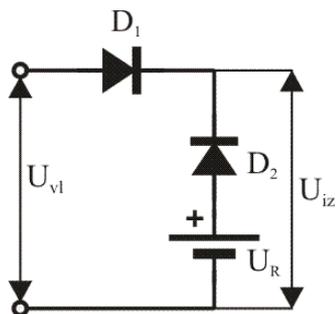
Во овој случај излезниот напон ќе го следи влезниот напон $U_{iz}=U_{vl}$.

Преносната карактеристика ќе го има следниот облик:



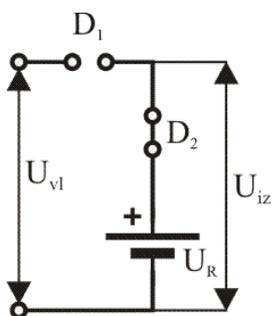
11. За колото од сликата да се нацрта преносната карактеристика.

$$U_R=10V$$

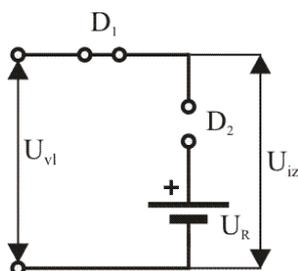


Решение:

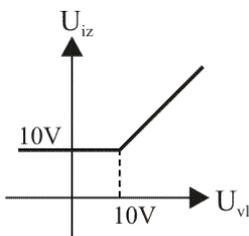
За $U_{vl} < 0$, диодата D_2 е вклучена, бидејќи на нејзината анода има потенцијал од $10V$. Во тој момент катодата на диодата D_1 ќе се наоѓа на истиот потенцијал, со што D_1 ќе биде исклучена. Излезниот напон ќе биде $U_{iz} = 10V$.



Диодата D_1 ќе се вклучи кога $U_{vl} > 10V$, при што диодата D_2 ќе се исклучи. Во тој случај $U_{iz} = U_{vl}$.

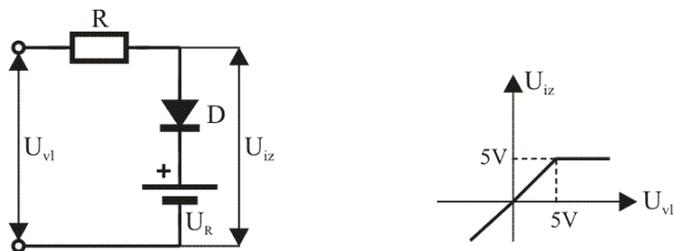


Преносната карактеристика ќе го има следниот облик:



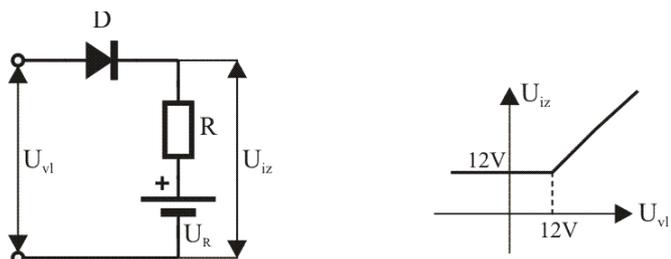
12. За колото на сликата да се нацрта преносната карактеристика. ($U_R=5V$)

(Решение)



13. За колото на сликата да се нацрта преносната карактеристика. ($U_R=12V$)

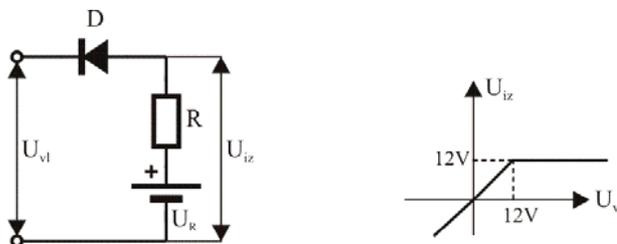
(Решение)



14. За колото на сликата да се нацрта преносната карактеристика.

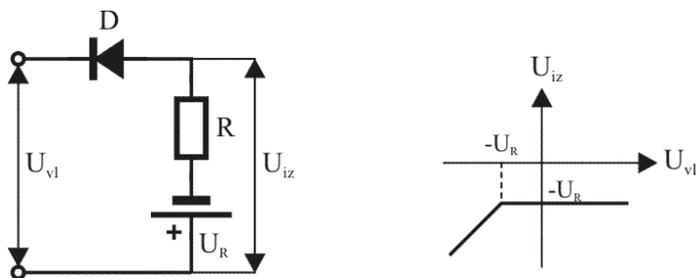
($U_R=12V$)

(Решение)



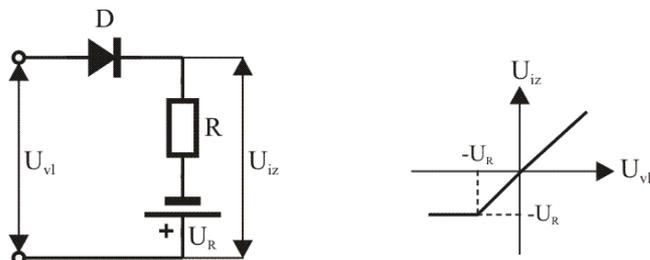
15. За колото на сликата да се нацрта преносната карактеристика.

(Решение)



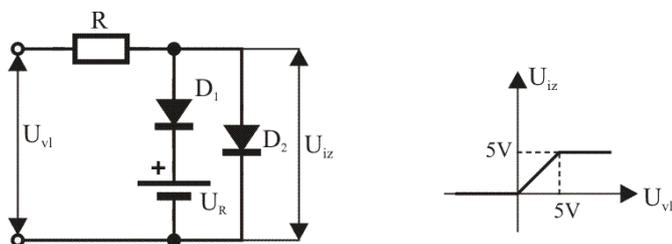
16. За колото на сликата да се нацрта преносната карактеристика.

(Решение)

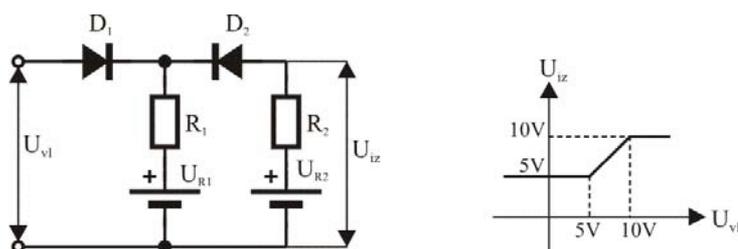


17*). За колото на сликата да се нацрта преносната карактеристика каде што $U_R=5V$.

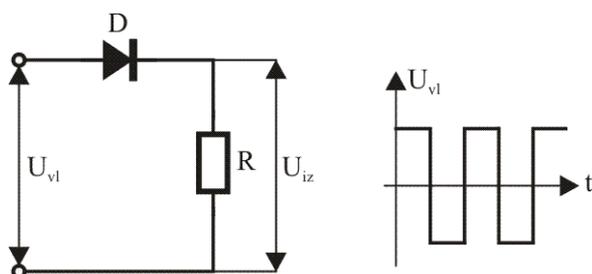
(Решение)



18*). За колото на сликата се дадени $R_1=10K\Omega$, $R_2=20K\Omega$, $U_{R1}=2,5V$, $U_{R2}=10V$. Да се нацрта преносната карактеристика на колото. (Решение)

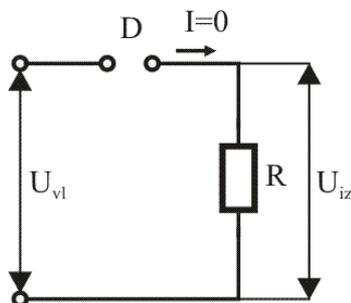


19. За колото од сликата да се нацрта зависноста на излезниот од влезниот напон (преносна карактеристика) и обликот на излезниот напон U_{iz} за даден влезен напон U_{vl} .



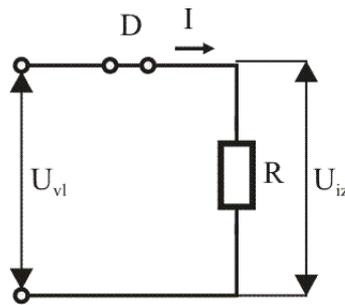
Решение:

Прво се анализира колото кога на неговиот влез ќе се доведе негативниот дел од влезниот напон ($U_{vl} < 0$). Во тој случај диодата е инверзно поларизирана, се еквивалентира со отворен прекинувач, при што колото го добива следниот изглед:



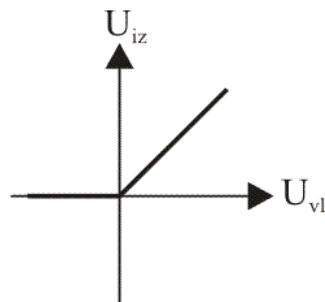
Бидејќи во колото не тече струја, нема да има пад на напон на краевите на отпорникот и излезниот напон е еднаков на 0 ($U_{iz}=0$).

До промена во колото ќе дојде кога влезниот напон ќе стане позитивен. Во тој случај анодата на диодата ќе биде на повисок потенцијал од потенцијалот на катодата кој изнесувал $0V$. Сега диодата е директно поларизирана и колото ќе го има следниот изглед:

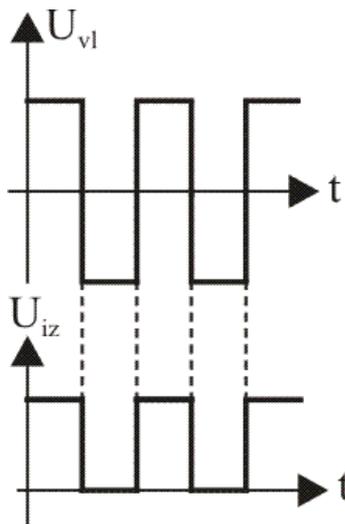


Излезниот напон ќе го следи влезниот напон $U_{iz}=U_{vl}$.

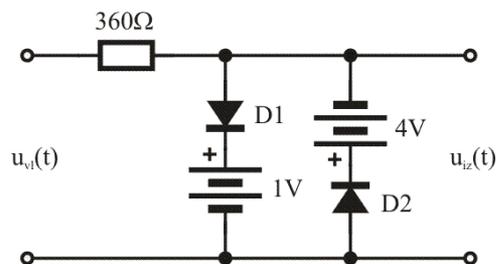
Преносната карактеристика ќе го има следниот облик:



Излезниот напон ќе го има следниот облик:



20*). Ако влезниот напон е $u_{vl} = 5\sin\omega t$ (V), донесен на влезот на колото со идеални диоди од сликата, да се нацрта графикот на излезниот напон $u_{iz}(t)$.

**Решение:**

Во услов на спроведување:

од $U_{D1} + 1V - u_{v1} = 0$ се добива границата на спроведување: $U_{D1} = u_{v1} - 1V$

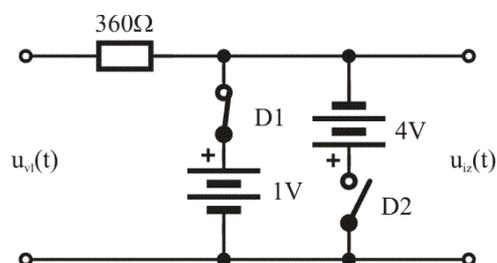
од $U_{D2} + 4V + u_{v1} = 0$ се добива границата на спроведување: $U_{D2} = -u_{v1} - 4V$.

Прво ќе го разгледаме случајот кога D1 е директно поларизирана, а D2-инверзно;

$U_{D1} > 0$, $u_{v1} > 1V$,

$U_{D2} < 0$, $-u_{v1} - 4V < 0$, $u_{v1} > -4V$,

од каде што се добива за $u_{v1} > 1V$ дека $u_{iz} = 1V$.

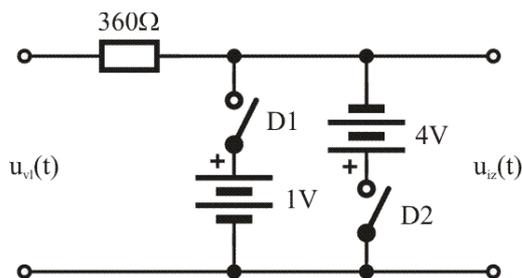


Потоа ќе го разгледаме случајот кога D1 и D2 се инверзно поларизирани;

$U_{D1} < 0$, $u_{v1} < 1V$,

$U_{D2} < 0$, $-u_{v1} - 4V < 0$, $u_{v1} > -4V$,

од каде што се добива за $-4 < u_{v1} < 1V$ дека $u_{iz} = u_{v1}$.

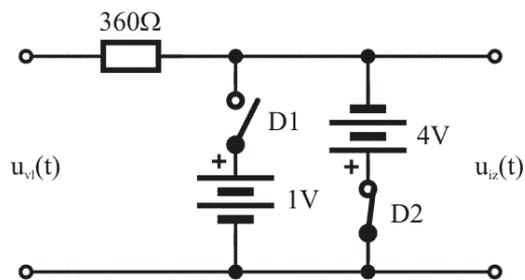


Потоа ќе го разгледаме случајот кога D1 е инверзно поларизирана а D2 директно;

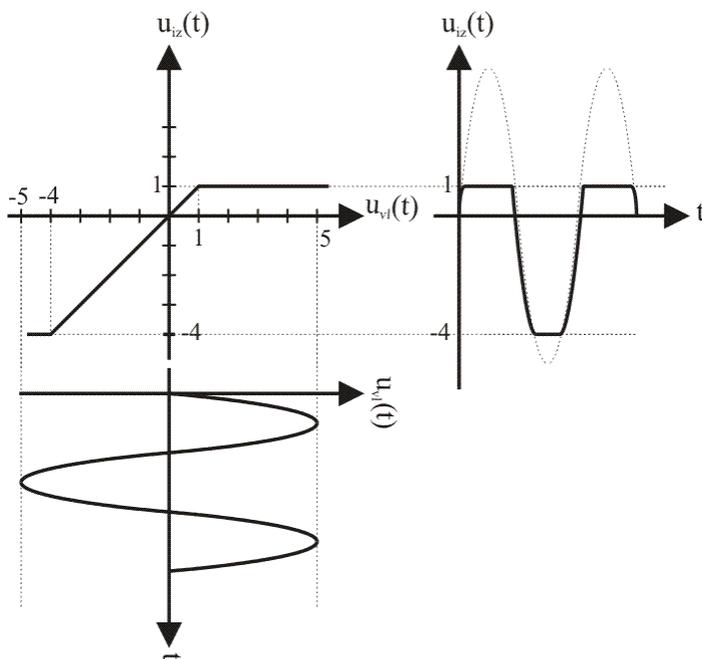
$U_{D1} < 0$, $u_{v1} < 1V$,

$U_{D2} > 0$, $-u_{v1} - 4V > 0$, $u_{v1} < -4V$,

од каде што се добива за $u_{v1} < -4V$ дека $u_{iz} = -4V$.



Обикот на излезниот напон, како и преносната карактеристика се дадени на следната слика:



Можеме да заклучиме дека ваквото коло врши ограничување на напонот и од 'горе' и од 'долу'. Ограничувањето од горе е на вредност од $1V$ а од долу на $-4V$.

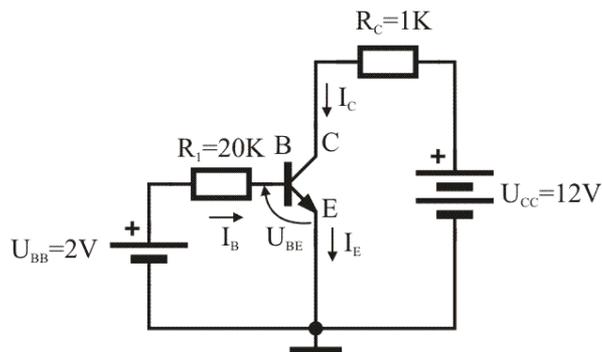
*) Проширено знаење

Задачи и решени примери од транзистори

21. Транзисторот во колото на сликата има $\beta = 100$. Емитерскиот спој е директно поларизиран со изворот $U_{BB} = 2V$ и има напон

$U_{BE} \approx 0,7V$. Да се одреди:

- струјата на базата;
- колекторската струја;
- напонот на колекторот.



Решение:

а) Струјата на базата се одредува од колото база-емитер:

$$U_{BB} - R_1 I_B - U_{BE} = 0$$

Од каде за I_B се добива:

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_1} = \frac{2 - 0,7}{20 \cdot 10^3} = 65 \mu A.$$

б) Колекторската струја е:

$$I_C = \beta I_B = 100 \cdot 65 \cdot 10^{-6} = 6,5 mA.$$

в) Напонот на колекторот се одредува од колото емитер-колектор:

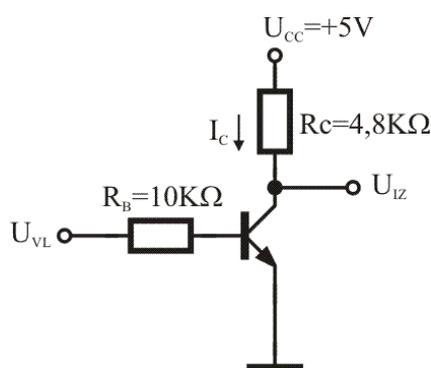
$$U_{CC} - R_C I_C - U_{CE} = 0$$

Од каде за U_{CE} се добива:

$$U_{CE} = U_{CC} - R_C I_C = 12 - 1 \cdot 10^3 \cdot 6,5 \cdot 10^{-3} = 5,5V$$

22. На сликата во колото, во кое транзисторот работи како прекинувач, се дадени следните вредности за транзисторот: $U_{CES} = 0,2V$, $U_{BE} = 0,6V$ и $\beta = 50$.

- Одреди ја минималната вредност на влезниот напон со која транзисторот се доведува во заситување;
- Одреди ја потребната вредност на влезниот напон со која транзисторот се доведува во режим на неспроведување.



Решение:

а) Колекторската струја на транзисторот кога влегува во заситување изнесува:

$$I_{CS} = \frac{U_{CC} - U_{CES}}{R_C} = \frac{5 - 0,2}{4,8 \cdot 10^3} = 1 mA.$$

Базната струја се пресметува според условот:

$$\beta \cdot I_B = I_{CS} \text{ од каде } I_B = \frac{I_{CS}}{\beta} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{50} = 0,02 \text{mA}$$

Минималната вредност на U_{VL} ќе ја одредиме преку:

$$U_{VL} = R_B \cdot I_B + U_{BE} = 10 \cdot 10^3 \cdot 0,02 \cdot 10^{-3} + 0,6 = 0,2 + 0,6 = 0,8 \text{V}$$

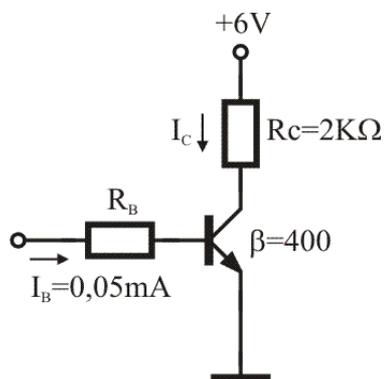
За секоја вредност на влезниот напон и базната струја поголеми од пресметаните, транзисторот ќе биде во длабоко заситување. Со исполнување на овој услов се обезбедува примена на секој транзистор од одбраниот тип со широки толеранции на факторот β . Нивото на излезниот напон од 0,2V се смета за ниско напонско ниво, а транзисторот како затворен прекинувач.

б) Транзисторот ќе биде на граница на неспроведување кога базната струја е нула, напонот база-колектор помал од 0,7V. Следи:

влезниот напон е $U_{VL} < 0,6 \text{V}$, колекторската струја е $I_C \approx 0$, а за напонот на колекторот се добива:

$$U_{CE} = U_{CC} \approx U_{IZ}$$

23. Пресметај ја струјата низ отпорникот R_C кога транзисторот е во заситување.



Решение:

Познато е дека кај транзистор кој се наоѓа во режим на заситување, напонот U_{CE} изнесува 0,2V. Според тоа, од равенката на колекторското коло:

$$U_{CE} = U_{CC} - R_C I_C$$

$$\text{се добива: } I_C = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{R_C} = \frac{6 - 0,2}{2 \cdot 10^3} = 2,4 \text{mA}$$

Во колото е дадена вредноста на базната струја I_B па со примена на релацијата меѓу струите:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \text{ , за } I_C \text{ би се добила вредност:}$$

$$I_C = I_B \cdot \beta = 0,05 \cdot 10^{-3} \cdot 400 = 20 \text{mA}$$

што претставува невозможна состојба во која за напонот U_{CE} би се добила негативна вредност. Тоа ни покажува дека, кога е транзисторот во заситување, колекторската струја не е контролирана од базната струја.

Затоа во подрачје на заситување, колекторската струјата мора да ја пресметаме од колекторското коло.

24. На сликата со транзисторот во колото се вклучува и се исклучува светилка која има отпор на vlakното за греење $1\text{K}\Omega$ и е претставена со отпорникот R_L . Транзисторот има $\beta = 50$ и напон $U_{BE} = 0,7\text{V}$. Да се определи режимот на работа на колото за базна струја од $0, 40, 100, \text{ и } 200\mu\text{A}$.

Решение:

Кога е $I_B = 0$,

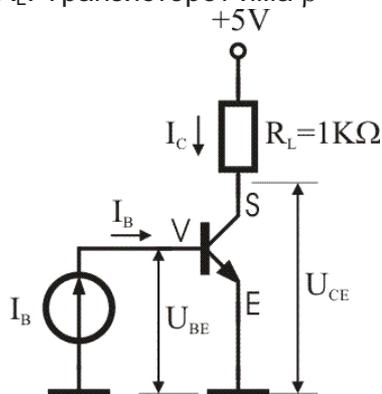
тогаш е и $I_C = 0$, нема струја низ отпорникот R_L , напонот $U_{CE} = 5\text{V}$ и $U_{RL} = 0$, транзисторот не спроведува.

За $I_B = 40\mu\text{A}$,

струјата $I_C = \beta \cdot I_B = 50 \cdot 40 \cdot 10^{-6} = 2\text{mA}$,

$$U_{CE} = 5\text{V} - R_L \cdot I_C = 5\text{V} - 2\text{mA} \cdot 1\text{K}\Omega = 5\text{V} - 2\text{V} = 3\text{V}$$

Напонот $U_R = 5 - U_{CE} = 5 - 3 = 2\text{V}$.



Колекторскиот спој се уште е инверзно поларизиран:

$U_{CB} = U_{CE} - U_{BE} = 3 - 0,7 = 2,3\text{V}$ и транзисторот е во активниот регион.

За $I_B = 100\mu\text{A}$,

$I_C = \beta \cdot I_B = 50 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 5\text{mA}$,

$$U_{CE} = 5\text{V} - R_L \cdot I_C = 5\text{V} - 5\text{mA} \cdot 1\text{K}\Omega = 5\text{V} - 5\text{V} = 0,$$

$U_{CB} = U_{CE} - U_{BE} = 0 - 0,7\text{V} = -0,7\text{V}$.

Колекторскиот спој е на границата на директна поларизација, а транзисторот на границата на заситувањето.

На светилката (отпорникот R_L) има напон од 5V .

$$I_C = I_{C_{\max}} = \frac{5\text{V}}{1\text{K}\Omega} = 5\text{mA}$$

$$I_{B(ZAS)} = \frac{I_C}{\beta} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{50} = 100\mu\text{A}.$$

Таа е вредноста на I_B која е потребна да го донесе колото на граница на заситување.

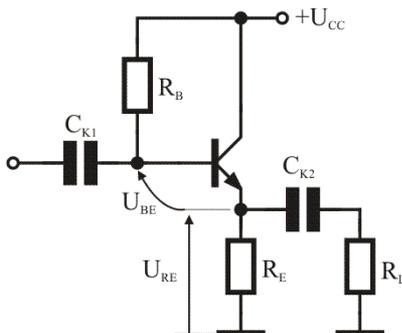
За $I_B = 200\mu\text{A}$,

базната струја го носи транзисторот во длабоко заситување, I_C не може да се зголеми над 5mA , транзисторот работи како затворен прекинувач.

$$I_C = 5\text{mA}, I_B = 200\mu\text{A}, \beta_{sat} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{200 \cdot 10^{-6}} = 25.$$

β_{sat} - форсиран фактор на струјното засилување е секогаш помало од β во нормалното активното подрачје.

25. Да се пресмета вредноста на отпорникот R_E за даденото коло. $U_{CC}=6V$; $U_{RE}=2,4V$; $U_{BE}=0,6V$; $\beta=100$; $R_B=300K\Omega$.



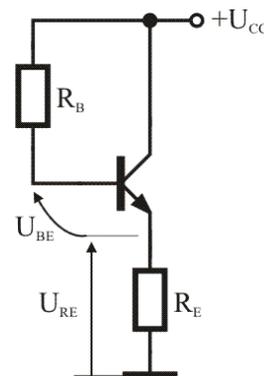
Решение:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}; \text{ од каде што за } I_C \text{ се добива: } I_C = I_B \cdot \beta$$

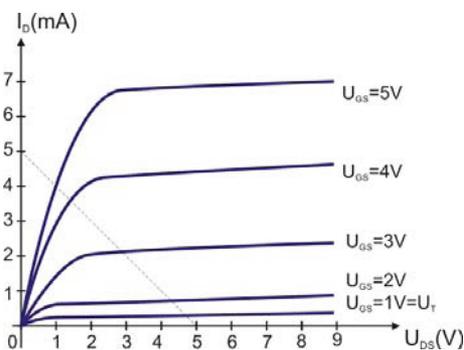
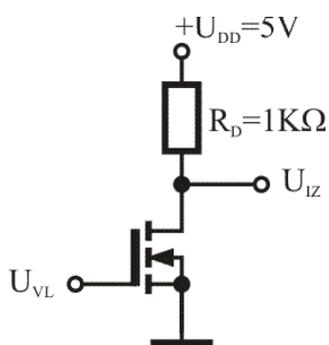
$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE} - U_{RE}}{R_B} = \frac{6 - 2,4 - 0,6}{300 \cdot 10^3} = 0,01mA = 10\mu A$$

$$I_C = I_B \cdot \beta = 100 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 1mA$$

$$R_E = \frac{U_{RE}}{I_C + I_B} = \frac{2,4}{1 \cdot 10^{-3} + 0,01 \cdot 10^{-3}} = 2,38K\Omega$$



26. Како работи даденото коло со MOSFET со индуциран канал со излезни карактеристики дадени на слика, ако на неговиот влез се донесе ниско ($U_{VL}=0V$) и високо ниво ($U_{IZ}=U_{DD}=5V$).



Решение:

Ако на влезот од N-каналниот MOSFET се донесе ниско ниво:

$$U_{VL}=U_{GS}=0V,$$

транзисторот се наоѓа во запираното подрачје, струјата низ дрејнот ќе биде $I_D \approx 0$, што значи дека и напонот на отпорникот R_D ќе биде $0V$.

Од равенката за излезниот напон се добива:

$$U_{IZ} = U_{DD} - U_{R_D} = U_{DD} = 5V.$$

Ако на влезот од N-каналниот MOSFET се донесе високо ниво:

$$U_{VL} = U_{GS} = 5V,$$

транзисторот се наоѓа во омското подрачје ($U_{DS} < U_{GS} - U_T$), струјата низ дрејнот ќе биде максимална, што значи дека и напонот на отпорникот R_D ќе биде максимален.

За излезниот напон се добива позитивна, но минимална струја приближно еднаква на нула.

Решението можеме да го прикажеме со следната табела:

U_{VL}	U_{IZ}
0V	5V
5V	0V

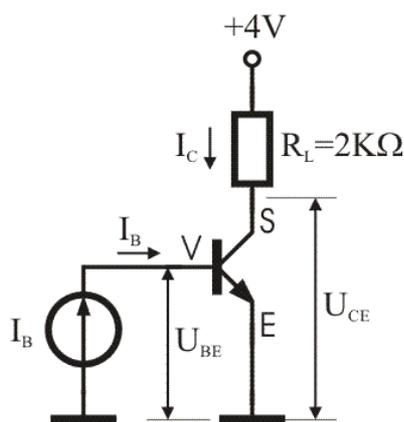
од што може да се заклучи дека ваквото коло работи како инвертор.

27. Одреди ги U_{CE} и I_C за дадените вредности на I_B и одреди го режимот на работа на транзисторот од колото на сликата.

- а) $I_B = 0$, б) $I_B = 20\mu A$,
 в) $I_B = 60\mu A$, г) $I_B = 100\mu A$

(Решение:

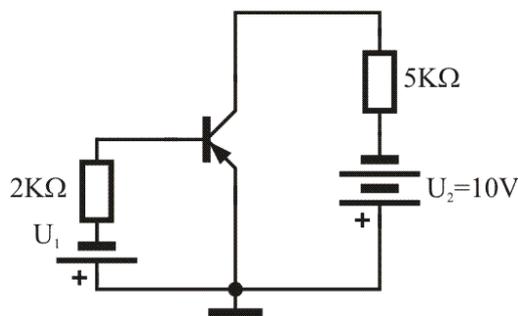
- а) $I_C = 0$, $U_{CE} = +4V$ неспроведување,
 б) $I_C = 0,8mA$, $U_{CE} = 2,4V$ област на неспроведување,
 в) $I_C = 2,4mA$, $U_{CE} = 0,2V$ на граница на заситување,
 г) $I_C = 4mA$, $U_{CE} = 0,2V$ во длабоко заситување)



28. PNP транзисторот во колото на сликата ги има следниве карактеристики $\beta = 75$ и да претпоставиме вредност за $U_{CE(ZAS)} = -0,1V$.

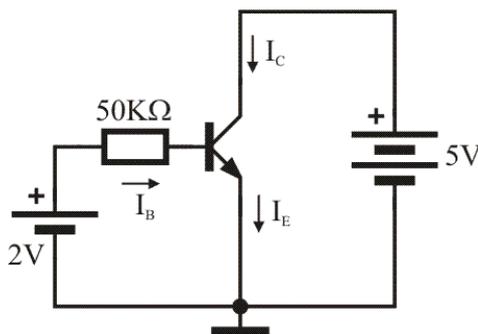
- а) Колкава колекторска струја тече кога е транзисторот во заситување?
 б) Ако е $U_{BE} = -0,6V$, колкава вредност е потребна за U_1 за транзисторот да влезе во заситување?

(Решение: а) $I_C = 0,45mA$, б) $U_1 = 0,9V$).



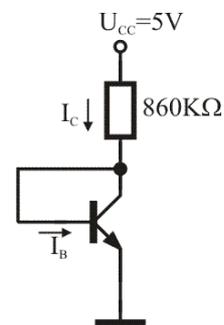
29. NPN транзисторот од сликата има $\beta = 100$, а емитерскиот спој е директно поларизиран при $U_{BE} = 0,6V$.

- а) Во кој режим работи транзисторот?
 б) Пресметај ја базната, емитерската и колекторската струја.



(Решение: а) $U_{CE} = 2,2V$, режим на спроведување б) $I_B = 28\mu A$, $I_C = 2,8mA$, $I_E = 2,828mA$).

30. Сликата покажува NPN транзистор поврзан така да изгледа како диода. Транзисторот работи во активниот режим. За дадено $U_{BE} = 0,7V$ и $\beta = 49$, пресметај ја базната и колекторската струја.



(Решение: $I_B = 0,1\mu A$, $I_C = 5\mu A$).

31. За колото дадено на сликата, при $\beta = 100$ и $U_{BE} = 0,7V$,

а) Најди го U_{IZ} за $U_{VL} = 0,8; 1,5; 2,0$ и $2,5V$.

б) За која приближна вредност на U_{VL} колекторската струја ќе биде одредена повеќе со колото за поларизација отколку со релацијата за β ? Кој е тоа режим на работа?

в) За $U_{VL} = 2,5V$ да се одреди соодносот меѓу колекторската и базната струја (β_{sat}) и да се спореди со зададената вредност во нормалното активно подрачје.

(Решение: а) за $U_{VL}=0,8V$, $U_{IZ}=0,86V$,

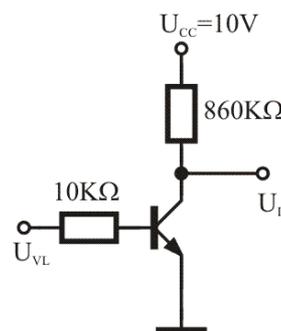
за $U_{VL}=1,5V$, $U_{IZ}=3,12V$,

за $U_{VL}=2V$, $U_{IZ}=0,2V$,

за $U_{VL}=2,5V$, $U_{IZ}=0,2V$,

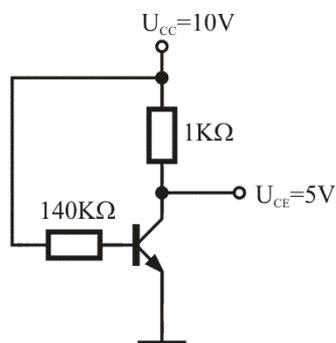
б) $U_{VL} > 0.8V$

в) $\beta_{sat} = 50 < 100$).

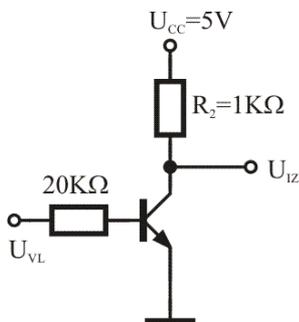


32. Ако е $U_{BE} = 0,7V$, пресметај ја вредноста на β за транзисторот во колото на сликата.

(Решение: $\beta=73$).



33. Во колото, прикажано на сликата, напонот на вклучувањето на спојот база емитер U_{BE} е $0,7V$, U_{CES} е $0,1V$, а β е 200 . Најди ја вредноста на излезниот напон за $U_{VL} = 0,8V$ и $1,0V$ и спореди го односот на промената на излезните напони со односот на промената на влезните напони.

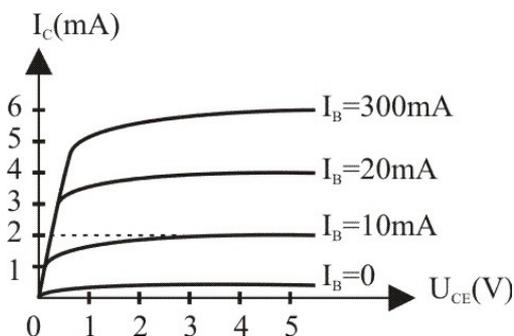
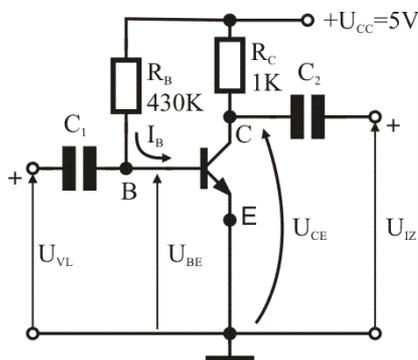


(Решение: за $U_{vl}=0,8V$, $U_{iz}=4V$, а за $U_{vl}=1V$, $U_{iz}=3,5V$,

$$\Delta U_{vl} = 0,2V \quad \Delta U_{iz} = -0,5V \quad \frac{\Delta U_{iz}}{\Delta U_{vl}} = -2,5).$$

Задачи и решени примери од засилувачи

34. Дадени се излезните карактеристики на NPN-транзистор, во спој со заеднички емитер. Да се одреди место на работната точка и на работната права. Транзисторот е во активен режим на работа и има напон $U_{BE} = 0,7V$.



Решение:

Работната права се црта во излезните карактеристики, точката на пресекот со U_{CE} оската е на 5V, а со струјната оска на $U_{CC} / R_C = 5mA$.

Од:

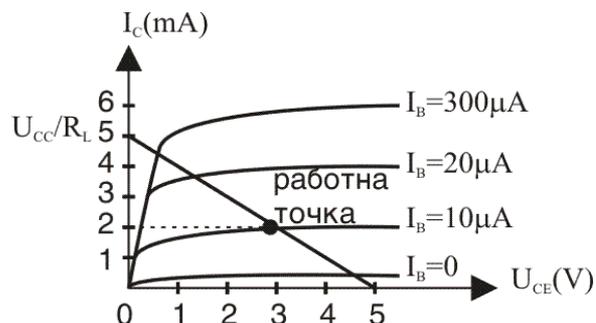
$$U_{CC} = U_{BE} + R_B I_B$$

базната струја I_B е:

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B} = \frac{5 - 0,7}{430K} = 10\mu A.$$

Работната точка лежи во пресекот на работната

линија и карактеристиката за $I_B = 10\mu A$. За работната точка се добива $U_{CE} = 3V$ и $I_C = 2mA$.



Кога капацитивноста на кондензаторот е многу голема ($C \rightarrow \infty$), го еквивалентираме со прекин во колото.

35. За транзисторот од задача 1 да се пресмета β (h_{FE}), за работната точка како во задачата.

Решение:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \text{ за } U_{CE} = \text{const.}$$

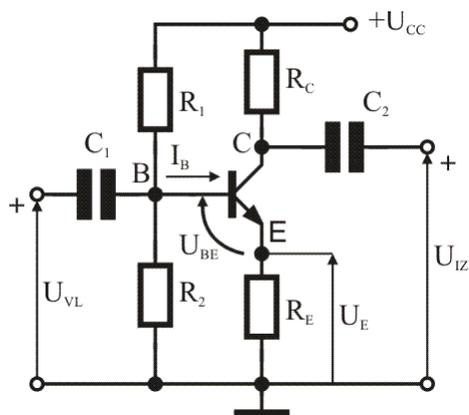
$$\beta = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-6}} = 200.$$

Коментар: Биполарни транзистори произведени во еден циклус имаат различни вредности на β , кои можат да достигнат разлики од 50 до 100%. Ако β се менува од 100 до 400, во овој пример, при базна струја од $10\mu A$, се добива:

ако $\beta = 100$, $I_C = 100 \cdot 10\mu A = 1mA$,

ако $\beta = 400$, $I_C = 400 \cdot 10\mu A = 4mA$.

36. За колото на засилувач со заеднички емитер, дадено на слика, да се одреди емитерската струја ако е дадено: $R_1 = 3K\Omega$, $R_2 = 1K\Omega$, $R_C = 4K\Omega$, $R_E = 1,5K\Omega$.



Решение:

Со напонскиот делител $R_1 - R_2$ се добива напонот на базата U_B (според изразот 3.22):

$$U_B = U_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 10 \cdot \frac{1K}{1K + 3K} = 2,5V$$

$$U_{BE} = 0,7V.$$

Од равенката: $U_B = U_{BE} + R_E \cdot I_E$

се добива:

$$I_E = \frac{2,5 - 0,7}{1,5K} = 1,2mA \text{ и}$$

$$I_{R1} = I_{R2} = \frac{U_{CC}}{R_1 + R_2} = \frac{10}{1K + 3K} = 2,5mA.$$

Се забележува дека во овие пресметки не влегува вредноста на β . Причината е претпоставката која кажува дека струјата I_B не влијае врз вредноста на U_B . Ако претпоставиме вредност 100 за β , добиваме:

$$I_B = \frac{I_E}{\beta + 1} = \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{100 + 1} = 0,012mA \ll 2,5mA,$$

со што се покажува оправданоста на наведената претпоставка.

37. Транзисторот во колото од задачата 40 има $\beta = 25$, а останатите елементи се:

$R_1 = 45\text{K}\Omega$, $R_2 = 30\text{K}\Omega$, $R_C = 3\text{K}\Omega$, $R_E = 2\text{K}\Omega$. Да се одредат вредностите на I_C и U_C .

Решение:

Со трансформацијата направена со примена на Тевененовата теорема се добива:

$$U_{BT} = U_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 10 \cdot \frac{30\text{K}}{30\text{K} + 45\text{K}} = 4\text{V}$$

$$R_{BT} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{30\text{K} \cdot 45\text{K}}{30\text{K} + 45\text{K}} = 18\text{K}$$

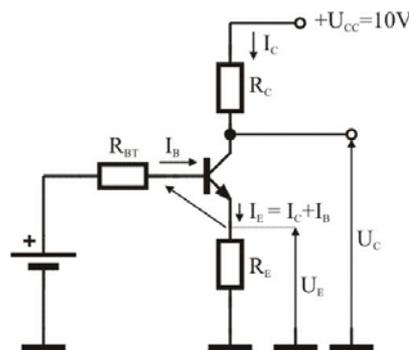
Од равенката: $U_{BT} - R_{BT} \cdot I_B - U_{BE} - R_E \cdot I_E = 0$, со замена за

$U_{BE} = 0,7\text{V}$, се добива

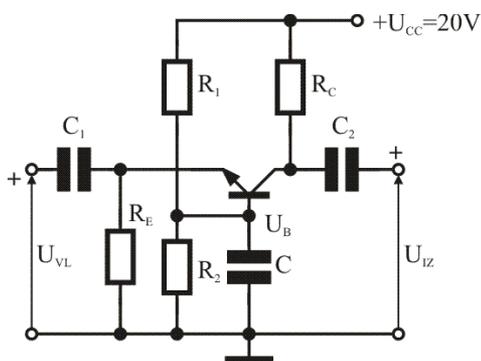
$$I_E = 1,23\text{mA}$$

$$I_C = \frac{\beta}{\beta + 1} \cdot I_E = \frac{25}{26} \cdot 1,23 \cdot 10^{-3} = 1,18\text{mA}$$

$$U_C = U_{CC} - R_C \cdot I_C = 10 - 3 \cdot 10^3 \cdot 1,18 \cdot 10^{-3} = 6,46\text{V}$$



38. За колото на засилувач со заедничка база дадено на сликата, вредностите на елементите се: $R_1 = 6\text{K}\Omega$, $R_2 = 1\text{K}\Omega$, $R_C = 4,5\text{K}\Omega$, $R_E = 1,5\text{K}\Omega$. Факторот на струјното засилување на транзисторот β има голема вредност. Да се одреди местото на работната точка.



Решение:

Колото за поларизација има иста форма како и во задача 60, па имаме;

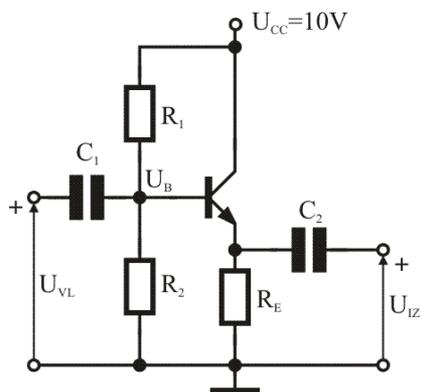
$$U_B = \frac{1\text{K}}{7\text{K}} \cdot 20 = 2,86\text{V}$$

$$I_E = \frac{2,86 - 0,7}{1,5 \cdot 10^3} = 1,44\text{mA}$$

$$U_C = 20 - 1,44 \cdot 10^{-3} \cdot 4,5 \cdot 10^3 = 13,5\text{V}$$

$I_C \approx I_E$ кога β е големо.

39. Даден е засилувач со заеднички колектор. Да се пресмета вредноста на колекторската струја. Дадени се следниве вредности на елементите на колото: $R_1 = 4\text{K}\Omega$, $R_2 = 2\text{K}\Omega$, $R_E = 1\text{K}\Omega$.



Решение:

$$U_B = U_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 10 \cdot \frac{2K}{4K + 2K} = 3,33V.$$

$$U_E = U_B - U_{BE} = 3,33 - 0,7 = 2,63V$$

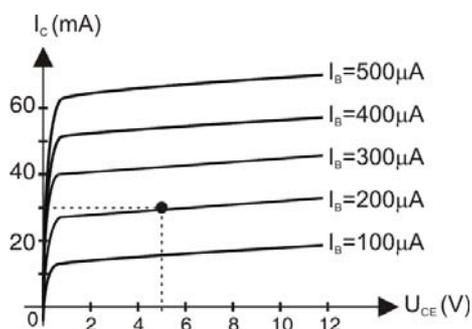
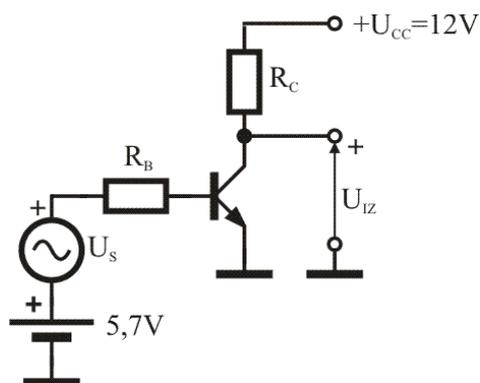
$$I_E = \frac{U_E}{R_E} = \frac{2,63}{1 \cdot 10^3} = 2,63mA$$

$$I_C = I_E = 2,63mA.$$

Коментар: Овој засилувач е познат како емитерски следител, кој има напонско засилување помало од 1. Обично се употребува за трансформација на импедансата.

40. На сликата е дадено коло со заеднички емитер и неговите карактеристики. Работната точка е одбрана да има $I_C = 30mA$ и $U_{CE} = 5V$. За напонот U_{BE} се смета дека е $0,7V$.

- а) да се нацрта статичката работна линија;
- б) да се пресмета вредноста на R_C ;
- в) да се пресмета вредноста на R_B ;
- г) да се пресмета β на транзисторот;
- д) да се пресмета вредноста на напонското засилување за голем сигнал.



- (Решение:**
- а) за $I_C=0A$, $U_{CE}=12V$, за $U_{CE}=0V$, $I_C=50mA$,
 - б) од графикот $R_C=240\Omega$,
 - в) од графикот $I_B=200\mu A$, $R_B=25K\Omega$,
 - г) $\beta=150$,
 - д) $A_u=1,44$).

41. На сликата е прикажано засилувачко коло со заеднички емитер. Со претпоставени вредности $I_B \ll I_1$, $\beta = 250$ и

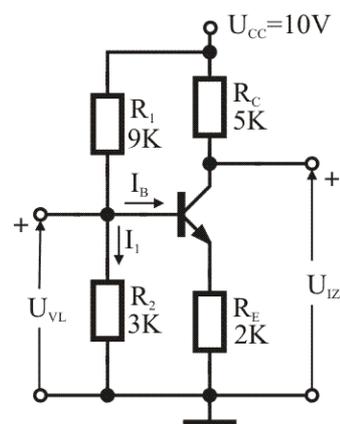
$$U_{BE} = 0,7V.$$

а) пресметај ја вредноста на струите I_E , I_C и I_B ;

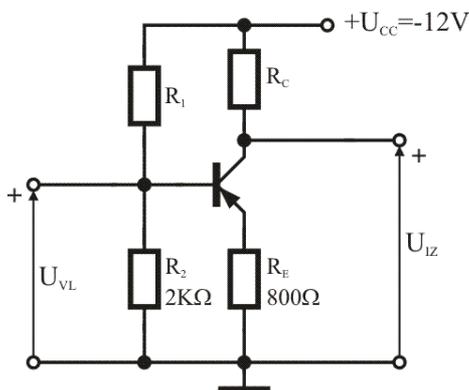
б) пресметај ја вредноста за U_{CE} .

(Решение: а) $I_C=225mA$, $I_B=3,58\mu A$, $I_E \approx I_C$,

б) $U_{CE}=-1,57V$.)



42. На сликата е даден засилувач со PNP-транзистор. За вредност на $U_{BE} = -0,7V$ и $\beta = 120$.



а) да се пресмета вредноста на отпорот R_1 за која

$$I_E = -1,2mA;$$

б) да се пресмета вредноста на отпорот R_C за која

$$U_C = -6V;$$

(Решение: а) $R_1=12,45K\Omega$,

б) $R_C=5K\Omega$)

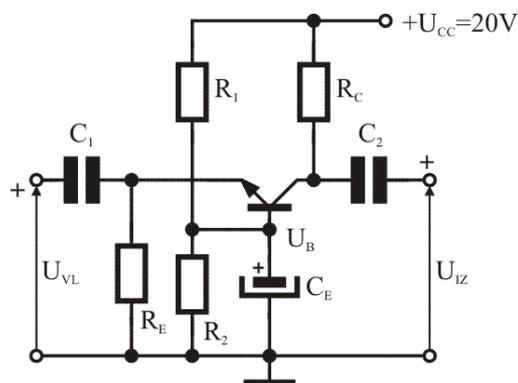
43. Засилувач со заедничка база, даден на сликата, е поларизиран со $U_{CC} = 20V$,

$R_1 = R_2 = 3K\Omega$ и $R_E = 4K\Omega$. Транзисторот има $\beta = 100$

и $U_{BE} = 0,7V$.

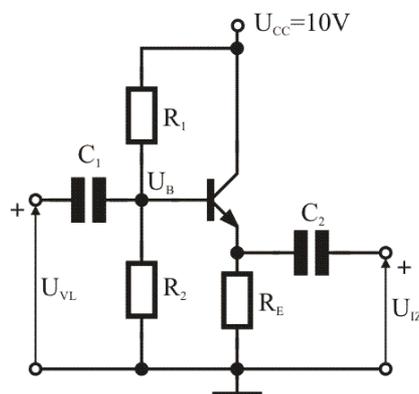
Да се одреди вредноста на I_E и I_C ;

(Решение: $I_C=2,3 mA$, $I_E \approx I_C$)



44. Колото за поларизација на засилувачот со заеднички колектор дадено на сликата е составено од $R_1 = 6 K\Omega$, $R_2 = 4 K\Omega$ и $R_E = 2,7 K\Omega$. Ако

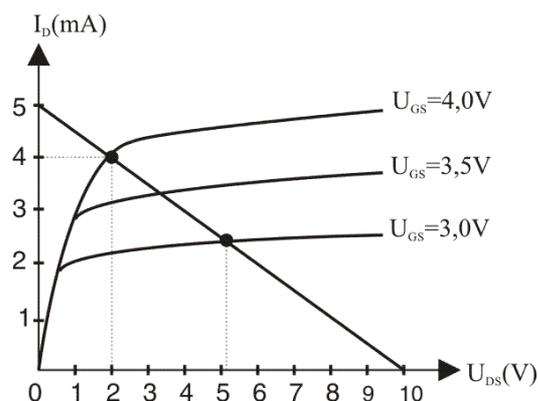
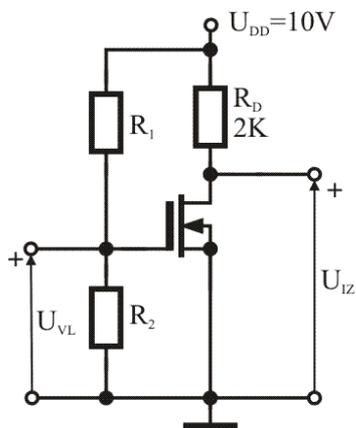
$U_{BE} = 0,7 V$ и β со голема вредност, да се пресмета емитерската струја I_E .



(Решение: $I_E=1,22 \text{ mA}$)

45. За колото од сликата се дадени карактеристиките на транзисторот. Да се одреди:

- а) вредноста на U_{DS} ако е $U_{GS} = 2V$;
- б) најдоброто место на работната точка;
- в) вредностите на R_1 и R_2 за одбраното место на работната точка.



Решение:

а) Од графикот за $U_{GS} = 2V$ следува $U_{DS} = 8,2V$

б) Од графикот за $U_{GS} = 4V$ се добива $U_{DS} = 1,9V$.

Резултатите под а) и б) се добиваат со одредување на пресекот на соодветната карактеристика и работната линија.

За еднакви амплитуди околу работната точка и со еднаква позитивна и негативна амплитуда на влезниот напон, работната точка треба да се постави на местото каде $U_{GS} = 3V$.

в) Со примена на равенката 3.61 се добива:

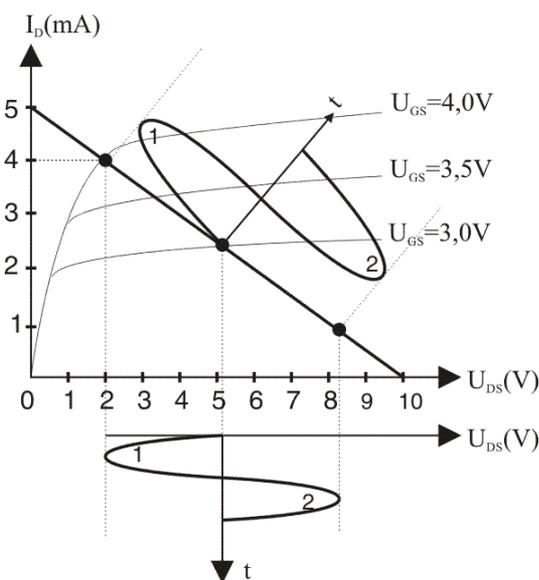
$$3 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot 10$$

Ако се одбере едната вредност, на пример,

$R_2 = 10K\Omega$, за R_1 се добива $23K\Omega$. Резултатот на засилувањето на голем сигнал е прикажан на графикот. Кога влезниот напон U_{GS} се менува синусоидално од 3V до 4V и назад до 3V, работната точка се движи по работната линија и го одредува излезниот напон во границите од 5V до 1,9V, за време на другата половина на синусоидата влезниот напон се менува од 3V на 2V, а излезниот се менува од 5V до 8,2V. Засилувањето е:

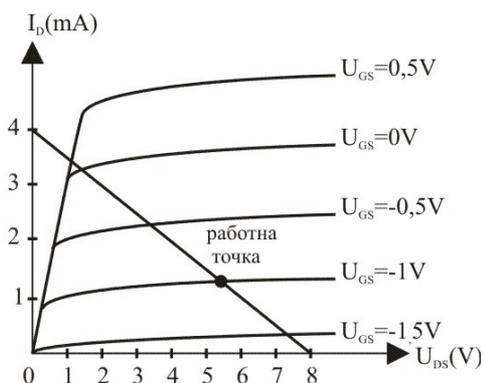
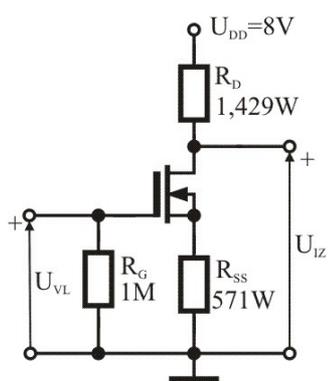
$$A_U = \frac{U_{IZ}}{U_{VL}} = \frac{-6,3}{2} = -3,15$$

Негативниот знак покажува дека засилувачот го инвертира влезниот сигнал.



46. За MOSFET со вграден канал е потребен негативен U_{GS} напон. Тој може да се добие со отпорник R_{SS} во колото на сорсот. Со тој отпорник се зголемува напонот на сорсот, така што да биде поголем од напонот на гејтот. Дадени се излезните карактеристики на MOSFET. Работната точка треба да лежи на карактеристиката $U_{GS} = -1V$, во пресекот со работната линија за отпор од $2K\Omega$ во колото дрејн - сорс.

Да се одреди вредноста на отпорот R_{SS} кој треба да се стави во колото на сорсот.



Решение:

За да се задоволи барањето е потребно отпорот во колото дрејн – сорс да се раздели на R_D и R_{SS} , при што имаме $R_D + R_{SS} = 2K\Omega$.

Напонот на гејтот е $0V$ зашто низ R_G не тече струја. Напонот на отпорникот R_{SS} е даден со:

$$U_{RSS} = I_D \cdot R_{SS},$$

а напонот U_{GS} со:

$$U_{GS} = -I_D \cdot R_{SS} = -1.$$

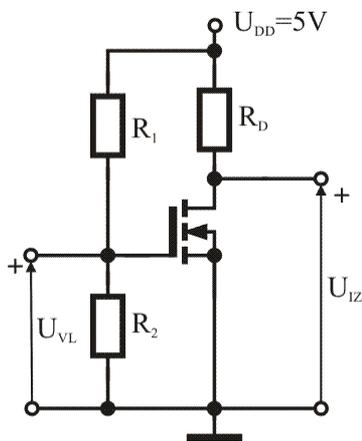
Струјата I_D за работната точка изнесува $I_D = 1,75mA$

$$U_{GS} = -1 = -R_{SS} \cdot 1,75 \cdot 10^{-3}$$

$$R_{SS} = \frac{U_{GS}}{I_D} = \frac{1}{1,75 \cdot 10^{-3}} = 571\Omega$$

$$R_D = 2 \cdot 10^3 - 571 = 1429\Omega.$$

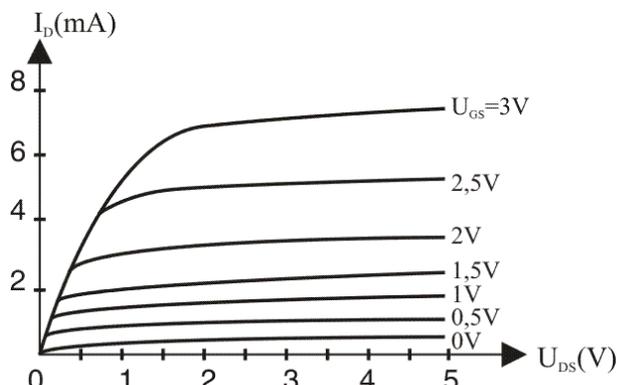
47. На сликата е дадено коло на засилувач со N-канален MOSFET со индуциран канал. Да се одреди вредноста на отпорникот R_2 за $U_{GS} = 2V$, ако R_1 има вредност $150K\Omega$.



(Решение: $\frac{R_1}{R_2} = \frac{3}{2}, R_2 = 100\text{K}\Omega$.)

48. На графикот се дадени излезните карактеристики на N-канален MOSFET со индуциран канал. Транзисторот е ставен во засилувач со заеднички сорс, даден во задача 47 со $R_1 = 100\text{K}\Omega$, $R_2 = 30\text{K}\Omega$ и $R_D = 1,25\text{K}\Omega$.

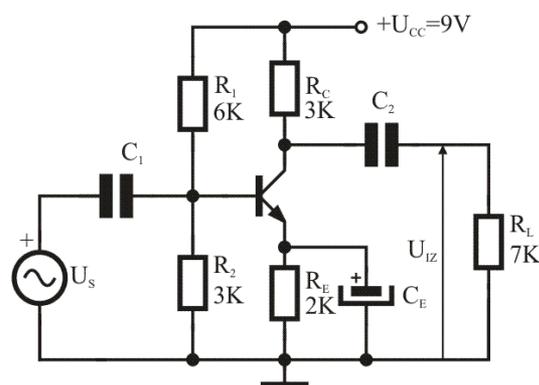
- а) Да се конструира работната права за ова коло.
- б) Да се одреди положбата на работната точка.
- в) Да се најде напонското засилување за големи сигнали.



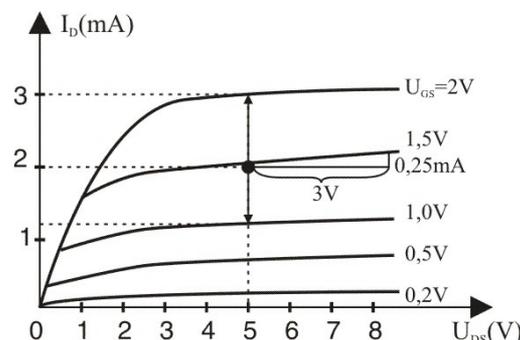
(Решение: а) за $I_D=0$, $U_{DS}=5\text{ V}$, за $U_{DS}=0$, $I_D=4\text{ mA}$,
 б) ќе лежи на $U_{GS}=1,5\text{V}$,
 в) $A_U=1,65$.)

49. Во засилувачкото коло со заеднички емитер е употребен транзистор со $h_{fe} = 50$ и $h_{ie} = 2\text{K}\Omega$. Колкаво е биде напонското засилување за мали сигнали?

(Решение: $A_U=-52,5$.)



50. На графикот се дадени излезните карактеристики на MOSFET, за кој треба да се одредат параметрите за мали сигнали g_m и g_0 и да се пресмета напонското засилување на засилувач на мали сигнали во спој со заеднички сорс, при што засилувачот е оптоварен со отпорник R_L од $8\text{K}\Omega$.



Решение:

$$g_m \approx \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} = \frac{1,75 \cdot 10^{-3}}{1} = 1,75 \text{ mS}.$$

Од графикот се гледа дека за промена на U_{GS} за $\pm 0,5V$ ($\Delta U_{GS} = 1V$), промената на струјата I_{DS} изнесува $1,75\text{mA}$. За g_m и g_0 добиваме:

$$g_0 \approx \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{DS}} = \frac{0,25 \cdot 10^{-3}}{3} = 83,3 \mu\text{S}.$$

За пресметка на напонското засилување треба да се најде еквивалентниот отпор R_{Leq} , како паралелна комбинација на g_0 и надворешното оптоварување од $8K\Omega$:

$$R_{Leq} = \frac{1}{\frac{1}{g_0} + R_L} = \frac{1}{\frac{1}{83,3 \cdot 10^{-6}} + 8 \cdot 10^3} = 4,8 K\Omega$$

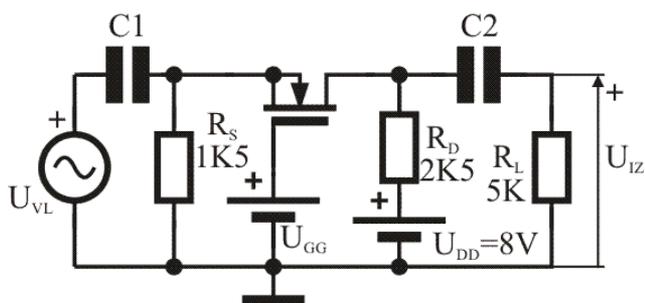
$$A_U = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = -\frac{U_{GS} \cdot g_m \cdot R_{Leq}}{U_{GS}} = -\frac{1 \cdot 1,75 \cdot 10^{-3} \cdot 4,8 \cdot 10^3}{1} = -8,4.$$

51*). На сликата е дадено коло на MOSFET во спој со заеднички гејт, за кое е измерена струја на дрејн од 1mA .

а) Да се одреди вредноста на напонот U_{GG} со која се добива $U_G = +1V$.

б) Да се нацрта еквивалентно коло на засилувачот.

в) Да се најде напонското засилување, ако се дадени $g_0 = 0$ и $g_m = 5\text{mS}$.

**Решение:**

а) Патекаата на еднонасочната компонента на струјата на дрејнот поминува преку U_{DD} , R_D , MOSFET (дрейн – сорс) и R_S , па имаме:

$$U_S = I_D \cdot R_S = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^3 = 1,5V,$$

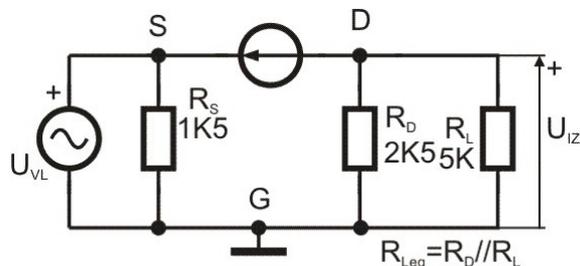
а бидејќи U_{GS} треба да биде $1V$, добиваме:

$$U_{GG} = U_G = U_{GS} + U_S = 1 + 1,5 = 2,5V.$$

б) g_0 е 0 и не се јавува во еквивалентната шема.

в) Во отпорот R_{Leq} тече само наизменична компонента на струјата и таа е $g_m U_{GS}$. Според тоа:

$$U_{vl} = -U_{GS}$$



решение

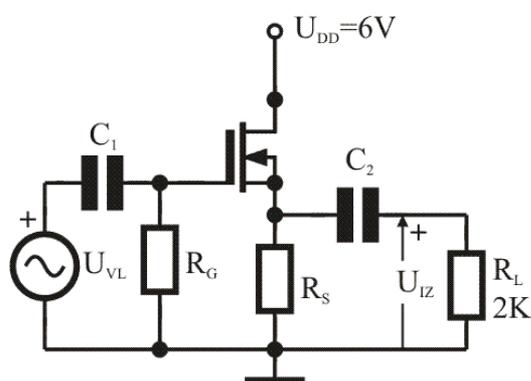
$$U_{iz} = -g_m \cdot U_{GS} \cdot R_{Leq}$$

$$A_U = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = g_m \cdot R_{Leq} = 8,33.$$

52*). Во колото на засилувач со заеднички дрејн, дадено на сликата, MOSFET има $g_m=3\text{mS}$ а $R_S = 3\text{K}\Omega$.

а) Да се пресмета напонското засилување за мали сигнали.

б) Да се пресмета напонското засилување ако се стави друг MOSFET со $g_m = 30\text{mS}$.



(Решение: а) $A_U=0,86$,
б) $A_U=0,98$.)

*) Проширено знаење

53. Во каскадната врска на два засилувачки степени, првиот степен има напонско засилување $A_{U1} = 100$, а вториот $A_{U2} = 1000$. Да се изрази засилувањето на секој степен во децибели, а потоа да се најде вкупното засилување.

Решение:

$$A_{U1} = 100; 20\log(100) = 20 \cdot 2 = 40\text{dB}$$

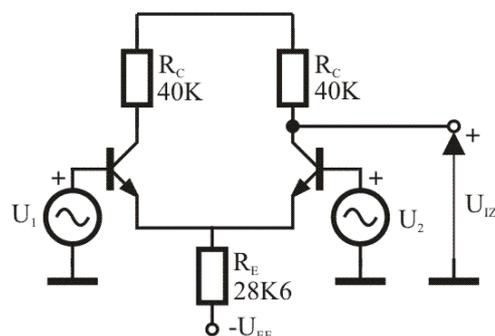
$$A_{U2} = 1000; 20\log(1000) = 20 \cdot 3 = 60\text{dB}$$

$$A_{TOT} = 40 + 60 = 100\text{dB} \text{ или}$$

$$A_{TOT} = 100 \cdot 1000 = 100000; 20\log(100000) = 20 \cdot 5 = 100\text{dB}.$$

54. За диференцијален засилувач, кој има диференцијално засилување 60dB и истофазно засилување -20dB , да се најде вредноста на факторот на потиснувањето на истофазниот сигнал ρ .

(Решение: 80dB .)



53. На сликата е дасено колото на диференцијалниот засилувач.

Транзисторите имаат $U_{BE} = 0,7V$ и $h_{ie} = 2K\Omega$.

Еднонасочната струја на R_E е $0,5mA$.

а) Да се најде диференцијалното засилување.

б) Да се најде истофазното засилување.

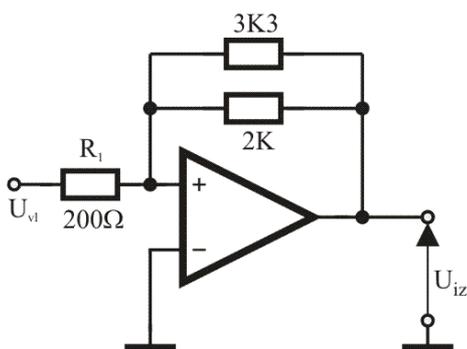
в) Да се најде факторот на потиснувањето.

(Решение: а) $A_d=10$,

б) $A_c=-0,7$

в) $\rho=14,28$.)

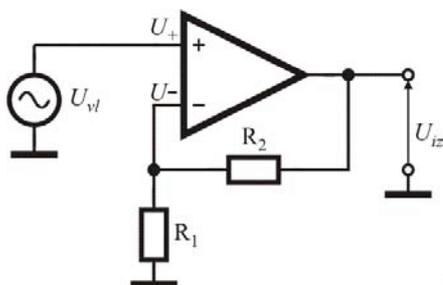
Задачи и решени примери од операциски засилувачи



22. За колото со идеален операциски засилувач на сликата да се пресмета напонското засилување.

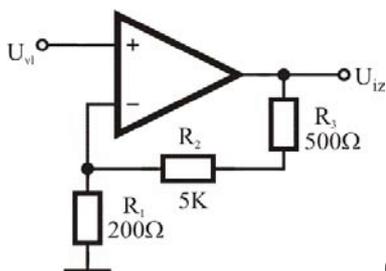
(Решение: $A_u=6,2$.)

55. Да се пресмета напонското засилување за колото од сликата, ако $R_1=200\Omega$ и $R_2=4K\Omega$.



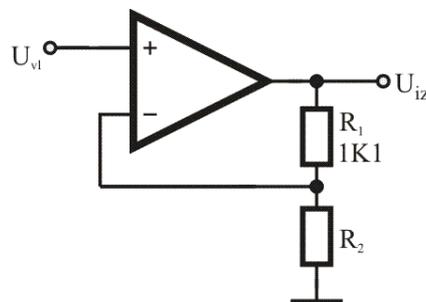
(Решение: $A_u=41$.)

56. За колото со идеален операциски засилувач од сликата да се пресмета напонското засилување.



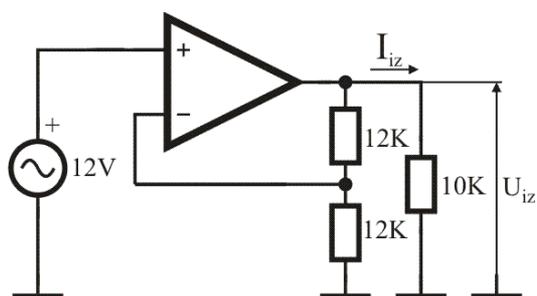
(Решение: $A_u=28,5$.)

57. За колото со идеален операциски засилувач од сликата да се прасмета вредноста на отпорот на R_2 со која колото дава напонско засилување 30.



(Решение: $R_2=38K\Omega$.)

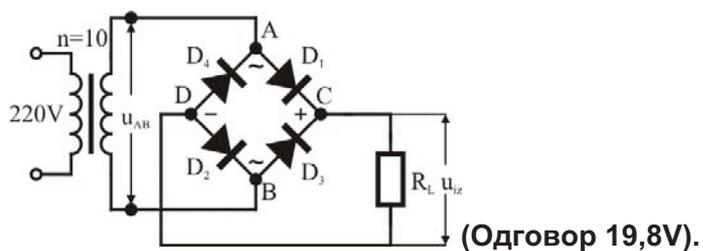
58. Колото на сликата претставува напонско – струен конвертор. Со идеален операциски засилувач и вредностите како на сликата да се најде вредноста на излезната струја.



(Решение: $I_{iz}=-1mA$ (тече во спротивна насока од прикажаната.)

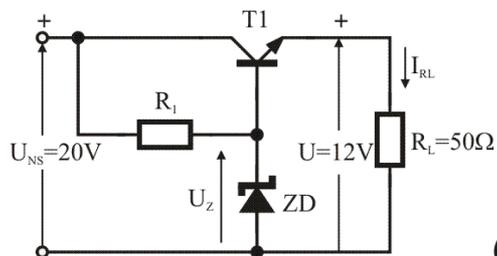
Задачи од извори на еднонасочен напон

59. Колку изнесува средната вредност на излезниот напон на колото од сликата ако преносниот однос на трансформаторот е 10?



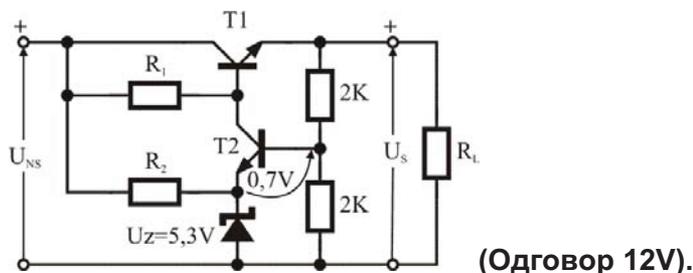
(Одговор 19,8V).

60. Колку изнесува моќноста на дисипација на потрошувачот од сликата?



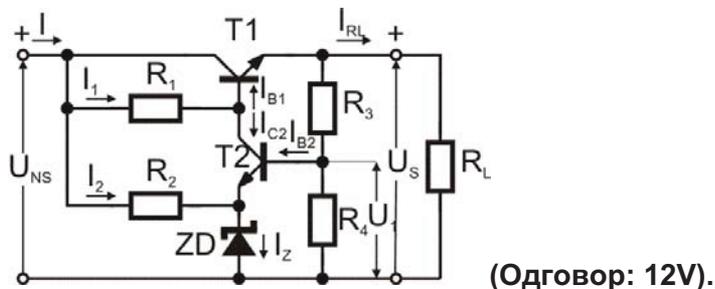
(Одговор 2,88W).

61. Колкав е стабилизираниот напон на колото од сликата?



(Одговор 12V).

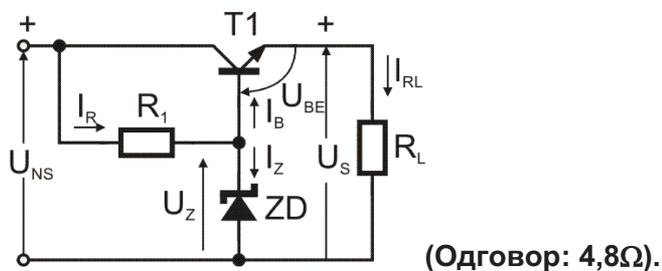
62. За колото од сликата дадено е: $U_Z = 5,3V$, $R_3 = R_4 = 2K\Omega$. Колку изнесува излезниот напон?



(Одговор: 12V).

63. За колото од претходната задача, дадени се $R_3 = R_4 = 2K\Omega$, и $U_S = 15V$. Колку изнесува напонот на Зенер диодата? (Одговор: 6,8V).

64. За колото дадено на сликата, познати се вредностите на: $U_{NS} = 16V$ и $U_S = 12V$. Колку може да изнесува минималната вредност на отпорникот R_L , ако транзисторот може да издржи максимална дисипација од 10W.



(Одговор: 4,8 Ohms).

ПОЧЕТОЦИТЕ НА ЕЛЕКТРОНИКАТА

Како започнува електронската револуција?

Може слободно да се каже дека таа започнува во втората половина на 19. век со идентификацијата на електронот од страна на англискиот физичар **Томсон (Joseph John Thomson)** и со мерењето на неговиот електричен полнеж во **1909 година**, од страна на американскиот физичар **Миликен (Robert Andrews Milikan)**.

Откритието на **Максвел (James Clerk Maxwell)** во **1864** година за постоењето на електромагнетните бранови е основа за развојот на радиокомуникациите.



James Clerk Maxwell

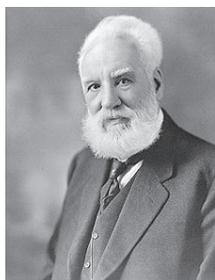
1875 година, **Томсон** емитува први бежични сигнали.



Joseph John Thomson

1876 година, **Бел (Alehander Graham Bell)** конструира прв телефон и го отвора полето на претварање и пренос на

звучните во електрични сигнали.



Alehander Graham Bell

1877 година, **Едисон (Thomas Alva Edison)** конструира фонограф, прв уред за запишување и репродукција на звукот.

1883 година, **Едисон** открива движење на електрони во вакуум од една електрода која се наоѓа на повисок потенцијал кон друга (Едисонов ефект).

1888 година, **Херц (Heinrich Herz)** експериментално го докажува постоењето на радиобрановите.



Heinrich Herz

1897 година, **Браун** ја конструира катодната цевка и ја применува во осцилоскоп.

1904 година, **Флеминг (John Fleming)**, применувајќи го Едисоновите ефект, конструира електронска цевка со два елемента и ја нарекува диода. Електронските цевки стануваат основни уреди за добивање X – зраци, радиосигнали, детектори и предаватели.



диода

Првата демонстрација на бежичните (радио) комуникации ги прави **Никола Тесла во 1894** година.



Никола Тесла

Првата примена на електронските цевки е во радиокомуникациите.

1904 година, уредот за патенти ја менува одлуката, со која на Никола Тесла му е признаен патент за радиокомуникации и на **Маркони (Guglielmo Marconi)** му го признава тој патент. Маркони се смета за прв учесник во развојот на бежичниот телеграф во 1896 и на развојот на радиокомуникациите на големи далечини во 1901 година.



Guglielmo Marconi

1906 година, Ли Де Форест (Lee De Forest) открива триода, вакуумска цевка која се користи за разни електронски примени.



Lee De Forest



триода

Првата половина на 20. век претставува ера на користење на вакуумски цевки во електрониката. Нивното користење овозможило развој на радиоуреди, телефонија на голема далечина, телевизија, па и на првите компјутери.

1912 година, Мајснер конструира електронски осцилатор.

1918 година, Армстронг (Edwin Armstrong) го измислува суперхетеро-

динскиот приемник. Врз база на тој пронајдок, од 1920 година доаѓа до неверојатен подем во радиоемитувањата.

1920 година, се појавува првата телевизиска слика, но телевизијата не се користи масовно сè до 1947 година. Првите форми на телевизиската слика се добиени со електромеханички средства. За "татко" на телевизијата сепак се смета **Владимир Зворикин, кој во 1929** година измислува електронски цевки за иконоскоп камера, а инженерите на Бел лабораторијата ја промовираат катодната цевка за црно-бел ТВ-приемник.



Владимир Зворикин

1935 година, Армстронг ја воведува фреквенциската модулација, како дополнување на дотогаш користената амплитудна модулација.

Првата и втората свет-ска војна предизвикуваат голем подем во развојот на електрониката во воената индустрија. Голем број разни видови електронски цевки и натаму претставува основен дел на електронските системи на тоа време.

За време на Втората светска војна, **1940 година** е откриен радарот, уред за мерење на далечина и насока на движење врз база на одбивање на радио микробранови.

1946 година е комплетиран најпознатиот компјутер со електронски цевки ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer).

Ограничувањата и недостатоците на електронските цевки се фактори кои довеле до појава на "полупроводничка револуција" во **1947 година**, со појавата на транзисторите, под водство на научниците **Бердин, Бретеин и Шокли (John Bardeen, Walter Houser**

Brattain, William B. Shockley), но треба да се признае дека електронските цевки не се сосема исфрлени од употреба дури и до денешните денови.



John Bardeen

1948 година, Бретејн и Бердин ја откриле полупроводничката триода - транзистор (**TRANSfer resISTOR**), нов полупроводнички засилувачки елемент со три електроди и два PN-споја.



Walter Houser Brattain

1951 година, американскиот физичар **Шокли** ги подобрил особините на транзисторот и го создал транзисторот со површински спој.



William B. Shockley



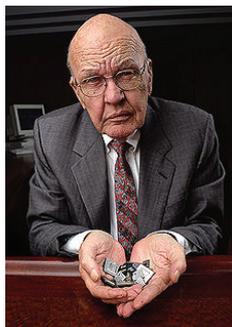
транзистор

1952 година, американскиот физичар **Шокли** дал теоретска основа и идеја за транзистори со ефект на поле кои се произведувале и применувале неколку години подоцна.

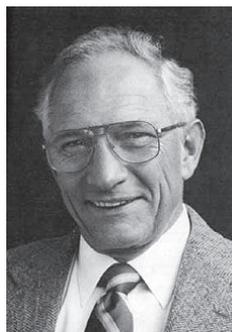
1950 година, во САД се конструирани ТВ камера и ТВ приемник во боја.

Светот станува сведок на најголемото достигнување во историјата на електрониката, појава на полупроводнички електронски елементи, направени од германиум и силициум. Мали по димензии, со прецизни карактеристики и со нис-

ки цени на производство, полупроводничките елементи од 1960 година ги потиснуваат електронските цевки во речиси сите електронски уреди. Овој факт, како и потребите за минијатуризација, особено кај ракетните системи, водат кон појавата на интегрираните кола, како резултат на независните истражувања на **Килби (Jack Kilby)** од фирмата Тексас инструментс (Texas Instruments) во **1958 година**, и на **Херни и Нојс (Jean Hoerni, Robert Noyce)** од фирмата Ферчајлд Семикондукторс (Fairchild Semiconductors) во **1959 година**.



Jack Kilby



Robert Noyce

Во **1962 година** се појавува првиот електронски ласерски систем.

Од првите интегрирани кола со десетина транзистори, во 1970 година бројот на транзисторите

расте и до 1000 во еден чип.

Во **1971 година** произведен е и првиот микропроцесор, како резултат на напорна работа на физичари, електроничари и машински инженери. Овој настан се смета како почеток на компјутеризацијата и производството на дигиталната електроника.

Од седумдесетите години на минатиот век па сè до денес, дигиталните интегрирани кола се во постојан развој.

Содржина	стр.
1. ПОЛУСПРОВОДНИЧКИ ДИОДИ	1
1.1. Предмет и поделба на ЕЛЕКТРОНИКАТА.....	3
1.2. Атомска структура на материјата.....	4
1.3. Полупроводни материјали.....	7
1.3.1. Електрични својства на полупроводните материјали.....	8
1.3.2. Полупроводник од N-тип.....	11
1.3.3. Полупроводник од P-тип.....	13
1.4. PN – спој.....	15
1.4.1. Поларизација на PN-споевите.....	16
1.4.2. PN-спој во надворешно електрично поле.....	17
1.5. Полупроводнички диоди.....	20
1.5.1. Статичка карактеристика.....	21
1.5.2. Пробивање на спојот на диодата.....	22
1.6. Видови и примена на полупроводничките диоди.....	24
1.6.1. Диоди со точкаст спој.....	25
1.6.2. Диоди со површински спој.....	26
1.6.2.1. Насочувачки диоди.....	26
1.6.2.2. Зенер диоди.....	27
1.6.2.3. Импулсни диоди.....	28
1.6.2.4. LED диоди.....	29
1.6.2.5. PIN диода.....	30
1.6.2.6. Тунел диода.....	30
1.6.2.7. Варикап дода.....	31
1.6.2.8. GUN диода.....	31
2. ТРАНЗИСТОРИ	37
2.1. NPN-транзистор.....	39
2.2. PNP-транзистор.....	42
2.3. Инверзна струја.....	44
2.4. Карактеристики на транзисторот.....	45
2.4.1. Статички режим на работа.....	45
2.4.2. Статички карактеристики.....	46
2.4.3. Параметри на транзисторот.....	49
2.4.3.1. Излезен отпор на транзисторот.....	49
2.4.3.2. Коефициент на струјно засилување на транзисторот.....	50
2.4.3.3. Работна права.....	51

2.4.4. Ограничувања при работа на транзисторот.....	53
2.5. Динамички режим на работа.....	55
2.5.1. Еквивалентна шема на транзисторот со h-параметри.....	56
2.6. Транзистор како засилувачки елемент.....	59
2.6.1. Особини на транзисторот при високи фреквенции.....	60
2.7. Транзистор како прекинувачки елемент.....	61
2.7.1. Прекинувачко коло со транзистор во спој со заеднички емитер.....	62
2.7.1.1. Режим на неспроведување.....	63
2.7.1.2. Режим на заситување.....	63
2.7.1.3. Преоден режим.....	64
2.8. Униполарни транзистори - транзистори со ефект на поле.....	66
2.8.1. Структура и принцип на работа на FET.....	67
2.8.2. Статички карактеристики на FET.....	69
2.8.3. FET во динамички режим на работа.....	70
2.8.3.1. Еквивалентна шема на FET.....	72
2.9... MOSFET.....	73
2.9.1. Структура и принцип на работа на MOSFET со индуциран канал.....	74
2.9.2. Статички карактеристики.....	76
2.9.3. MOSFET со вграден канал.....	77
2.9.4. MOSFET како прекинувачки елемент.....	78
2.10. Примена на транзисторите.....	81
3. ЗАСИЛУВАЧИ.....	85
3.1. Засилување и улога на засилувачот.....	87
3.2. Поделба на засилувачите.....	88
3.3. Засилувач како активен четворопол.....	90
3.4. Одредување на параметрите на засилувачот.....	91
3.5. Фреквенциска и фазна карактеристика на засилувачот.....	92
3.6. Графичка анализа на работата на транзисторскиот засилувач.....	94
3.7. Видови конфигурации на засилувачите.....	97
3.7.1. Засилувач со конфигурација на заеднички емитер.....	97
3.7.2. Аналитичка метода за пресметување на параметрите на засилувачите.....	101
3.7.3. Засилувач со конфигурација на заеднички колектор.....	103
3.7.4. Засилувач со конфигурација на заедничка база.....	105
3.7.5. Дарлингтонова врска.....	106
3.7.6. Засилувач со конфигурација на заеднички сорс.....	109
3.7.7. Засилувач со конфигурација на заеднички гејт.....	111
3.7.8. Засилувач со конфигурација на заеднички дрејн.....	113
3.8. Каскадно поврзани засилувачи.....	114

3.9. Видови спреги меѓу засилувачите.....	115
3.10. Засилувач при високи фреквенции.....	117
3.11. Диференцијален засилувач.....	121
3.11.1. Преносна карактеристика на диференцијален засилувач.....	123
3.11.2. Реална конфигурација на диференцијален засилувач.....	123
3.11.3. Диференцијално засилување.....	124
3.11.4. Истофазно засилување.....	125
3.11.5. Струен генератор.....	126
3.11.6. Напон на корекција.....	127
3.12. Засилувачи со повратна врска.....	128
3.12.1. Засилување со повратна врска.....	129
3.12.2. Видови на негативна повратна врска.....	131
3.12.3. Стабилност на засилувач со повратна врска.....	133
3.12.4. Постојаност на засилување на засилувач со негативна повратна врска.....	134
3.12.5. Проширување на пропусниот опсег	135
3.12.6. Видови изобличувања.....	135
3.12.7. Намалување на нелинеарните изобличувања.....	136
3.12.8. Видови на негативна повратна врска шумовите.....	137
3.12.9. Влијание на негативната повратна врска врз влезната и излезната импеданса.....	138
3.13. Засилувачи на моќност.....	140
3.13.1. Излезен степен во класа А со биполарен транзистор.....	141
3.13.2. Симетрични засилувачи на моќност.....	143
3.13.3. Симетрични засилувачи во класа В.....	144
3.13.4. Симетрични засилувачи во класа АВ.....	146
3.13.5. Комплементарни симетрични засилувачи.....	147
4. ИНТЕГРИРАНИ КОЛА	155
4.1. Карактеристики на одделни видови интегрирани кола.....	157
4.2. Хибридни интегрирани кола.....	158
4.3. Монолитни интегрирани кола.....	159
4.3.1. Изработка на основата.....	159
4.3.2. Фотолиитографија.....	161
4.3.3. Дифузија.....	163
4.3.4. Епитаксијален раст.....	163
4.4. Примена на интегрираните кола.....	164
5. ОПЕРАЦИСКИ ЗАСИЛУВАЧИ.....	169
5.1. Идеален операциски засилувач.....	172
5.2. Повратна врска на операциски засилувач.....	173
5.3. Различни конфигурации на операциски засилувачи.....	174

5.3.1. Инвертирачки засилувач.....	174
5.3.2. Неинвертирачки засилувач.....	176
5.3.3. Операциски засилувач со единично засилување.....	177
5.3.4. Коло за сумирање.....	178
5.3.5. Диференцијален операциски засилувач.....	179
5.3.6. Претворувач на струја во напон.....	180
5.3.7. Претворувач на напон во струја.....	181
5.3.8 Поместувач на фаза.....	182
5.3.9. Интегратор.....	182
5.3.10. Диференцијатор.....	184
5.3.11. Логаритамски засилувач.....	185
5.3.12. Експоненцијален засилувач.....	187
5.4. Реален операциски засилувач.....	189
5.4.1. Блок шема на реален операциски засилувач.....	192
6. ИЗВОРИ НА ЕДНОНАСОЧЕН НАПОН.....	199
6.1 Уреди за напојување од мрежен напон.....	201
6.1.1 Полубранов насочувач.....	202
6.1.2 Целобранов насочувач.....	203
6.1.3 Капацитивен филтер за насочувач.....	205
6.2 Стабилизација и регулација на напонот.....	208
6.2.1 Стабилизација на напон со зенер диода.....	209
6.2.2 Сериски стабилизатор на напон со транзистор.....	210
6.2.3 Сериски стабилизатор на напон со повратна врска.....	211
6.3 Интегрирани линеарни стабилизатори на напон.....	212
6.4 Струен стабилизатор.....	215
6.5 Стабилизатор на напон со ограничување на струјата.....	216
6.6. Прецизен стабилизатор со операциски засилувач.....	217
6.7. Прецизен целобранов насочувач со операциски засилувач.....	218
7. ТИРИСТОРИ.....	221
7.1. Динистор.....	223
7.2. Тиристор.....	224
7.3. Статички карактеристики на тиристорот.....	225
7.4. Дијак.....	226
7.5. Тријак.....	227
7.6. Примена на тиристорите.....	228
8. СПЕЦИФИЧНИ ЕЛЕКТРОНСКИ ЕЛЕМЕНТИ.....	231
8.1. Термистори.....	233
8.1.1. NTC-термистори.....	234

8.1.2. РТС-термистори.....	234
8.2. Фотоелектрични елементи.....	237
8.2.1. Фотоотпорници.....	237
8.2.2. Фотодиоди.....	239
8.2.3. Фототранзистори.....	241
8.3.4. Фотогенератори.....	242
8.2.5. Дисплеј со течен кристал.....	244
8.3. Релеи.....	247
8.3.1. Начин на работа на електромагнетните релеи.....	247
8.3.2. Начин на работа на електронските релеи.....	249

КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

1. David Irwin David Kerns: Introduction to Electrical Engineering, Prentice Hall International Editions, 1995
 2. Методија Камировски: Електроника за III година ,електротехничка струка, Просветно дело 1995
 3. Milman – Halkias: Integrated electronics: analog and digital circuits and systems, 1972
 4. Миле Ј. Станковски, Татјана Д. Колемишевска-Гугуловска: Компјутерско водење на процеси, Електротехнички факултет-Скопје, 2006
 5. Милутин Петковиќ: Електроника, учебник за III степен на занимањата од електротехничката струка со насока слаба струја и автоматика, Просветно дело 1993
 6. Зоран Тасиќ: Електроника I за II клас на електротехничките училишта, Просветно дело 1972
 7. Зоран Тасиќ: Електроника II за електротехничките училишта, Просветно дело 1982
 8. Др Ратко Опачиќ: Електроника I за II разред средњег образовања, Завод за издавање учебника Нови Сад
 9. Интернет прилози и податоци
-