

дипл.ел.инж. Наташа Божиновска

# **ЕЛЕКТРОНИКА**

за II година

образовен профил  
електротехничар за  
компјутерска техника и автоматика

**електротехничка струка**

**2010**

**Автор:**

дипл. ел. инж. Наташа Божиновска

**Рецензенти:**

Проф. д-р Јосиф Косев,  
**ФЕИТ-Скопје**

Емилија Џундева, дипл.ел.инж.  
**Професор во СЕТУГС “Михајло Пупин” – Скопје**

Софија Темкова, дипл.ел.инж.  
**Професор во СЕТУГС “Михајло Пупин” – 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:**

780

Со решение на Министерот за образование и наука на Република Македонија бр. 22-4373/1 од 29.07.2010 година се одобрува употребата на овој учебник

CIP - Каталогизација во публикација  
Национална и универзитетска библиотека “Св.Климент Охридски” , Скопје  
621.38(075.3)  
БОЖИНОВСКА, Наташа  
Електроника за II година : образовен профил електротехничар за компјутерска  
техника и автоматика : електротехничка струка / Наташа Божиновска. - Скопје :  
Министерство за образование и наука на Република Македонија, 2010. - 270, [5]  
стр. : граф. прикази ; 29 см  
ISBN 978-608-226-241-3  
COBISS.MK-ID 84292106

## ПРЕДГОВОР

Учебникот **ЕЛЕКТРОНИКА** за **II година** од електротехничка струка е резултат на промените во наставните програми за училиштата од електротехничка струка за профил на **електротехничар за компјутерска техника и автоматика**. Учебникот е пишуван во согласност со програмата за предметот ЕЛЕКТРОНИКА за II година изработена во април 2000 година и ревидирана во мај 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. **Хармониски осцилатори**. Предмет на анализа се различни видови осцилатори, како RC осцилатор, LC-осцилатор, осцилатор со Винов мост и осцилатор со кварц и принципи на стабилизација на нивната фреквенција.

6. **Извори за напојување**. 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. 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 тематските целини во кои се планирани задачи, дадени се решени примери и задачи за решавање. Исто така, на крајот од секоја тематска целина се дадени прашања за тематско утврдување на истата.

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 рецензентите, за сугестиите и за предлозите при конечното оформување на учебников.

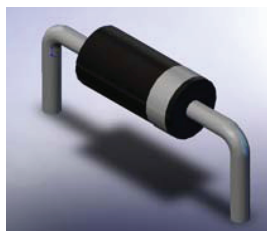
Авторот



# 1. 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 електрониката;
- да ја објаснуваш поделбата на електрониката;
- да ги разбираш носителите на електрицитет кај полупроводните материјали;
- да ги опишуваш својствата на полупроводникот од N и P-тип;
- да разликуваш примесни и непримесни полупроводници;
- да го сфаќаш заемното дејство на полупроводничките материјали со светлинската енергија;
- да го објаснуваш создавањето на PN спојот, неговите својства и управувањето со електричната струја низ него;
- да ја објаснуваш поларизацијата на диодата;
- 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 опишуваш примената на диодите со точкест и површински спој;
- да ја познаваш практичната примена на полупроводничките диоди – насочувачката, зенеровата, импулсната, фотодиодата, LED диодата.





## 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 контрола на протокот на електроните и другите носители на електричен полнеж 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 граѓбен 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.

**Активни компоненти** се оние компоненти на кои им е потребна енергија од еднонасочен извор за да ја извршуваат својата функција. Во активни компоненти спаѓаат: биполарни транзистори, фетови, мосфетови, операциски засилувачи, микропроцесори, и други.

**Пасивни компоненти** се: отпорници, калемаи, кондензатори, диоди, тиристоры, варисторы, NTC, PTC-термисторы и VDR-отпорници и други.

Електронските уреди опфаќаат сè, 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.

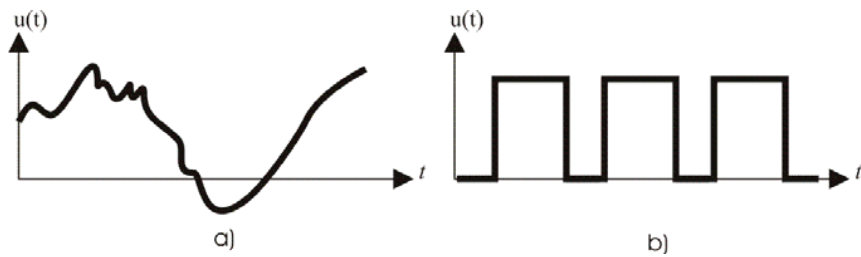
Напон или струја, која се менува на одреден начин со времето за да кодира или за да пренесе информација се вика **електричен сигнал** (во понатамошниот текст сигнал).

Сите природни појави и процеси се менуваат со текот на времето. Тие можат да се опишуваат со континуирани или дискретни функции.

Континуираните функции се непрекинати и нивните промени со текот на времето се без моментални скокови. Амплитудата на овие функции се менува постепено, бидејќи во било кој конечен временски интервал има бесконечно многу вредности. Сигналите кои се менува континуирано со времето се нарекуваат **аналогни сигнали** (слика 1.1а).

Дискретните функции имаат нагли промени во амплитудата, односно амплитудата нагло преминува од една вредност на друга. Дискретните функции можат да имаат одреден опсег на вредности од едно конечно множество. Во електрониката од посебно значење со **дигиталните сигнали** чија амплитуда се менува меѓу две дискретна нивоа (слика 1.1б).

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 импулси – сигнали со правоаголен облик со непериодичен карактер.



Слика 1.1: График на аналоген и дигитален сигнал.

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

**Аналогната електроника** оперира со континуирани сигнали, кои во било кој временски интервал добиваат бесконечно многу различни вредности.

**Дигиталната електроника** оперира со дискретни сигнали – сигнали кои примаат одреден опсег на вредности од едно конечно множество.

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. **Хибридните** кола служат за преобразба на 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.

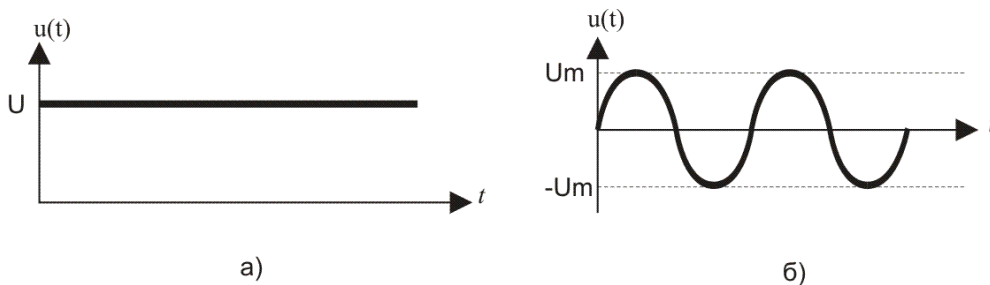
Области на електрониката се: компјутерска техника (хардверски дел), автоматика (контрола и управување со процеси, роботика), телекомуникации, микроелектроника (интегрирани кола), енергетска електроника, оптоелектроника, микробранова електроника и други.

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

$U, I$  - константна еднонасочна вредност (слика 1.2 а);

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

$U_M, U_m, I_M, I_m$  - амплитуда или максимална вредност на синусоидално променлив напон или струја (слика 1.2б).



Слика 1.2: График на еднонасочен и наизменичен напон.

**НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!**

- **Електрониката се занимава со анализа, развој и производство на електронски елементи, компоненти, уреди и системи.**
- **Електронските компоненти се делат на активни и пасивни. Активни компоненти се оние компоненти на кои им е потребна енергија од еднонасочен извор за да ја извршуваат својата функција.**
- **Според видот на сигналот електрониката може да се подели на аналогна и дигитална електроника.**

**ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ**

1. Дефинирај го поимот "ЕЛЕКТРОНИКА"?
2. Што претставува електронско коло?
3. Кои се активни електронски компоненти?
4. Кои се пасивни електронски компоненти?
5. Што е сигнал?
6. Како се дели електрониката?
7. Какви може да бидат електронските кола?

**1.2. Полупроводници**

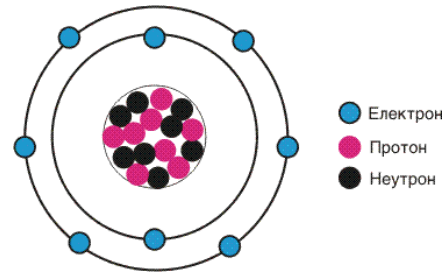
Способноста за слободно движење на слободните електрони во материјалот се вика спроводливост, а спротивставувањето на движењето се вика отпорност. Материјали со голем број слободни електрони се викаат **спроводници**, а оние со малку или без слободни електрони **изолатори**.

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 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  $10^7$   $\Omega\text{cm}$ .

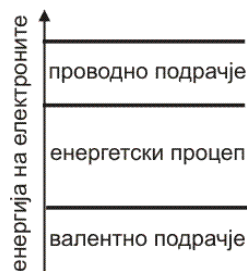
## 1.2.1. Носители на електрицитет кај полупроводните материјали

**Атомот** претставува основен елемент на градбата на сите материји. Тој е составен од јадро, во кое се распоредени позитивни честички, **протони** и **неутрони**, а околу јадрото кружат други честички наречени **електрони** (слика 1.3). Оваа структурата на атомот ја објавил данскиот физичар Нилс Бор, во 1913 година. Денес постојат поусовршени модели, но Боровиот модел е доволно добар за објаснување на полупроводниците во најголем број случаи. 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.



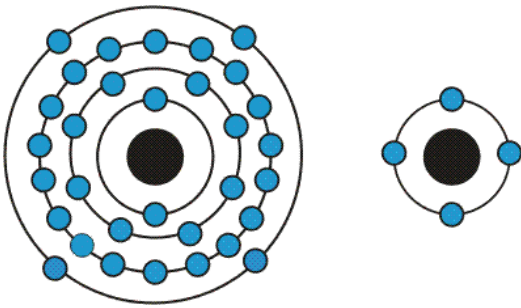
Слика 1.3: Структура на атомот.

Електроните се носачи на најмал познат електричен полнеж со негативен поларитет, кој изнесува  $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} C$ , колкушто имаат и протоните, само со позитивен поларитет. Бројот на електроните во атомот е еднаков на бројот на протоните и тие го одредуваат електричното однесување на атомот. Електроните се распоредени на различни енергетски нивоа (слика 1.4).



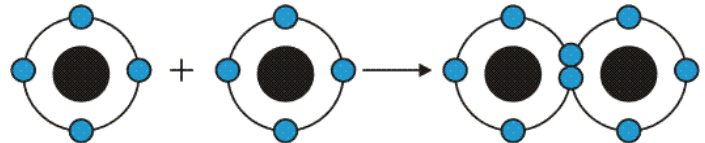
Слика 1.4: Енергетски нивоа на електроните.

Електроните кои имаат енергија во областа на валентното подрачје, се **валентните** електрони, кои се слабо врзани со јадрото, а можат и да го напуштат атомот. Тие се наоѓаат во последната орбита, најоддалечени од јадрото и на највисоко енергетско ниво. Енергетскиот процеп (или забрането подрачје), во кое нема електрони, одговара на количество енергија која е потребна да се додаде на валентните електрони за да тие станат слободни, со што би преминале во проводното подрачје. 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, велиме дека се создава **празнина** и атомот станува позитивно наелектризиран (**позитивен јон**). Ако атомот прими дополнителен електрон, тој ќе има поголем број електрони од протони и атомот станува негативно наелектризиран (**негативен јон**).



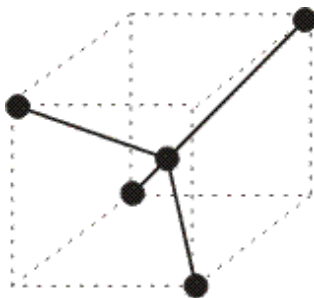
Слика 1.5: Атом на силициум и неговиот упростен модел.

Моделот на атомот на силициум и неговиот упростен модел се дадени на **слика 1.5**. Упростениот модел е составен од јадро со сите цврсто врзани електрони и од валентните електрони околу тоа јадро. Сите меѓусебни дејства на атомите се остваруваат преку валентните електрони. На **слика 1.6** е прикажана врската меѓу два атома на силициум.

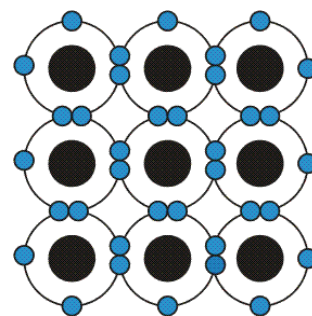


Слика 1.6: Ковалентна врска меѓу атомите на силициум.

Бидејќи атомот на силициумот има четиривалентни електрони, тој може да се поврзе со уште четири други атома на силициум и сите ќе бидат на иста оддалеченост еден од друг. Атомите од материјалот се поврзуваат во правилна структура наречена кристална структура. Во таква структура се остварени сите можни ковалентни 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 ковалентните врски на централниот атом се распоредени во четири темиња кои што не се едно до друго. Прикажувањето на ковалентните врски на поголем број атома 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: Ковалентни врски на поголем број атома.

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 ( $27^{\circ}\text{C} = 300\text{K}$ ) се создаваат слободни електрони и кристалната структура веќе не е совршена.

Несовршената кристална структура е основ за електричните особини на полупроводничките материјали. Таа несовершенство може да има: структурен, енергетски или хемиски карактер.

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

Енергетските несовершености главно се должат на топлинската енергија. Веќе при температури од 150K, атомите во кристалната решетка почнуваат да треперат, движејќи се наизменично еден кон друг. При тоа може да дојде до прекинување на ковалентните врски и создавање слободни електрони. За извлекување на еден електрон од неговото место потребна е минимална енергија од  $0,75\text{eV}^{*)}$  за германиумот и  $1,2\text{eV}$  за силициумот. Ослободените електрони по кратко време наоѓаат друго испразнето место, предавајќи ја својата енергија на други атоми. Во секој момент во кристалот постои одреден број слободни електрони.

Со ослободувањето на електронот, соодветната ковалентна 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**. Ако слободниот електрон најде на празнина може да ја пополни. Процесот на повторното воспоставување ковалентна врска се вика **рекомбинација**. 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, што се нарекува **фотоелектричен ефект**. Под фотоелектричен ефект се подразбира размена на енергијата меѓу фотоните (светлосните кванти) и електроните од атомот на полупроводникот. Ако енергијата, која 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 ковалентната врска и ќе стане слободен. Спротивен процес се одвива кога електронот преминува во патека со пониско енергетско ниво или ако се враќа во ковалентната врска. Таков премин може да биде проследен со емисија на еден квант на светлинска енергија – фотон, или може да предизвика зголемено треперење на атомот.

Полупроводници само со структурни или енергетски несовершености се викаат безпримесни, за разлика од примесните во кои несовершенство се создава по хемиски пат. До хемиски несовершености доаѓа кога во кристалот се внесуваат одредени хемиски примеси. Од интерес се со две групи елементи чишто атоми се интегрираат во кристалната структура на полупроводникот. Елементите од едната група имаат атоми со пет валентни електрони и тоа се фосфорот, арсенот и антимонот. Елементите од другата група имаат атоми со три валентни електрони. Тука спаѓаат борот, алуминиумот, галиумот и индиумот.

<sup>\*)</sup>  $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$



**НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!**

- Атомот, како основен елемент на градбата на сите материи, е составен од јадро, во кое се распоредени поситни честички, протони и неутрони, а околу јадрото кружат други честички наречени електрони.
- Електроните се носачи на најмал познат електричен полнеж со негативен поларитет, кој изнесува  $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .
- Ако некој електрон го напушти атомот, велиме дека се создава празнина и атомот станува позитивно наелектризиран (позитивен јон). Ако атомот прими дополнителен електрон, тој ќе има поголем број електрони од протони и атомот станува негативно наелектризиран (негативен јон).
- Секој електрон, напуштајќи го атомот, зад себе остава позитивен полнеж. Во техниката на полупроводниците тој се вика празнина.
- Несовршената кристална структура е основ за електричните особини на полупроводничките материјали. Таа несовершенство може да има: структурен, енергетски или хемиски карактер.
- До хемиски несовершености доаѓа кога во кристалот се внесуваат одредени хемиски примеси.

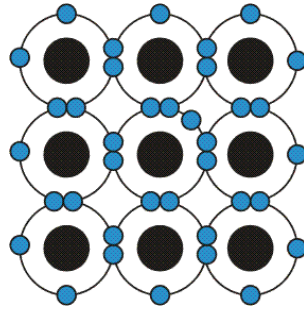
**ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ**

1. Нацртај ја структурата на атомот!
2. Колкав полнеж има електронот и со каков поларитет?
3. Кои електрони се валентни електрони?
4. Кој атом се нарекува негативен јон?
5. Како се добива позитивен јон?

**1.3. Полупроводник од N и P-тип**

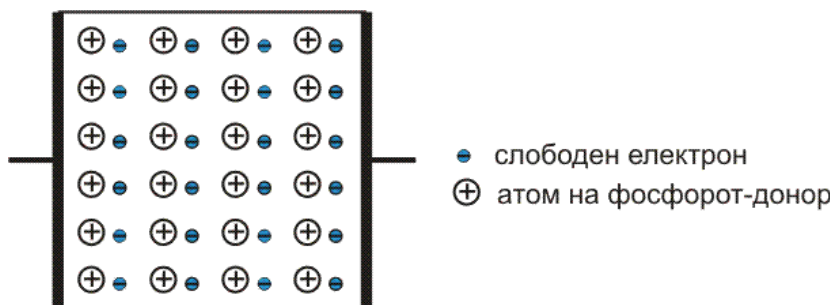
Атомот на фосфорот има пет валентни електрони и има еднакви димензии со димензиите на атомот на силициумот. Тој може лесно да се интегрира во кристалната структура на силициумот. Ако се уфрли атом на фосфор во високо загреан кристал од силициум, тој на едно место ќе го замени атомот на силициумот и ќе формира ковалентни врски со околните атоми. При тоа, еден електрон од атомот на фосфорот останува вишок. Тој не може да влезе во ковалентна врска, бидејќи сите се пополнети. Електронот е врзан лабаво со атомот на фосфорот и при многу пониска температура од собната температура станува

слободен. За негово ослободување е доволна енергија од 0,05eV. Интегрирањето на атомот на фосфорот во кристалната решетка на силициумот е претставено на **слика 1.9**.



Слика 1.9: Атом на фосфор во кристална решетка на германиум.

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 скоро исцело резултат на движењето на слободните електрони. Слободните електрони во полупроводник од N-тип се создаваат на два начина: едните, со внесување петвалентни атоми на хемиски примеси, наречени **донори**, бидејќи секој атом од нив дава по еден слободен електрон а другите со термичко раскинување на ковалентните врски меѓу атомите. Донорите се атоми со позитивен електричен полнеж (позитивни јони). Со термичкото раскинување на ковалентните 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 1.10**.

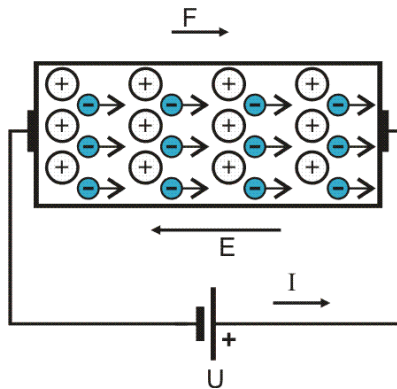


Слика 1.10: Шематски приказ на полупроводник од N-тип.

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.

Ако го приклучиме полупроводникот на еднонасочен извор на напојување, како на **слика 1.11**, 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 позитивниот кон негативниот пол на изворот преку полупроводникот.

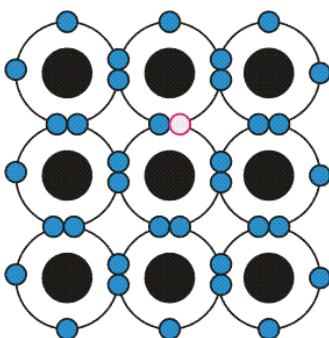


Слика 1.11: Полупроводник од N-тип во електрично поле.

Во сите понатамошни анализи на состојбите во полупроводниците ќе се користи т.н. техничка насока на струјата, која е со насоката спротивна од насоката на движењето на електроните.

Ако го свртиме 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.

Атомот на борот е тривалентен и остварува три валентни врски со околните атоми. Во обидот да ја оствари и четвртата ковалентна врска, тој "присвојува" еден електрон од соседните атоми, ослободен со термичко раскинување на ковалентните врски. На местото на "присвоениот" електрон се создава празнина (слика 1.12). Атомите на борот се наречени **акцептори** и тие се со негативен електричен полнеж поради "присвоениот" електрон. Со внесување акцепторски атоми во кристалната структура на германиум или силициум се создаваат празнини кои се однесуваат како основни носители на позитивен електричен полнеж. На овој начин се добива полупроводник од P-тип, при кажан на **слика 1.13**.

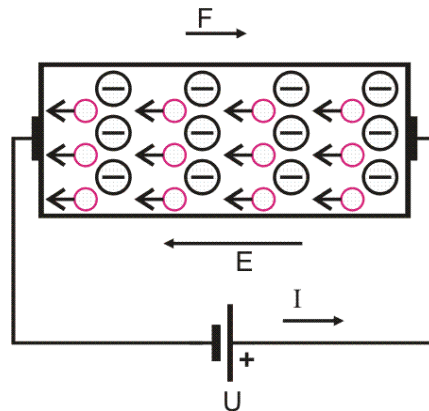


Слика 1.12: Атом на бор во кристална решетка на германиум.



Слика 1.13: Шематски приказ на полупроводник од P-тип.

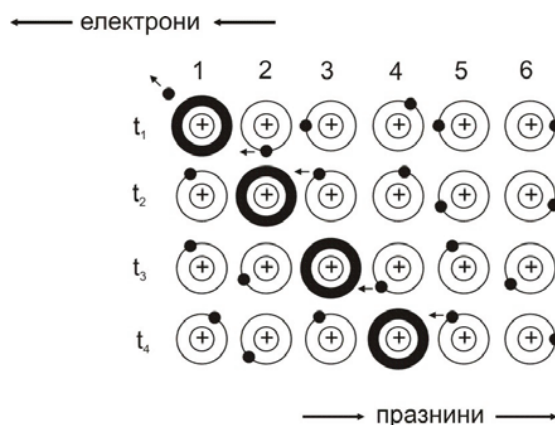
Празнините во овој тип полупроводник се создаваат на два начина: со внесување акцепторски атоми и со термичко раскинување на ковалентните врски. Како споредни носители овде се јавуваат електроните создадени со термичко раскинување на ковалентните врски.



Слика 1.14: Полупроводник од P-тип во електрично поле.

Со помош на **слика 1.14** 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  $F$ , којашто е резултат на полето  $E$ , ги насочува празнините да се движат во насоката во која делува електричното поле, а електроните во спротивната насока. Со такво насочено движење се воспоставува струја со јачина  $I$ .

Движењето на празнините е привидно (**слика 1.15**). Физички се поместуваат валентните електрони пополнувајќи ги најблиските празнини во насока спротивна од електричното поле, а ефектот на тоа движење е појава на празнина на друго место во насока на електричното поле, што е еквивалентно на движење на празнината. Малите стрлки покажуваат како прескокнуваат електроните кон лево под дејство на надворешното електрично поле, а празнината (црното кругче) визуелно се поместува кон десно. Со буквите  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  и  $t_4$  означен е истиот ред од кристалната решетка во неколку последователни моменти.



Слика 1.15: Движење на празнините.

На местото на контактот на полупроводникот со доводната жица, празнините извлекуваат електрони од металот и се рекомбинираат, а на спротивниот контакт се создаваат нови празнини со премин на оној број валентни електрони во контактниот метал колкав е бројот на рекомбинираниите 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.

### НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

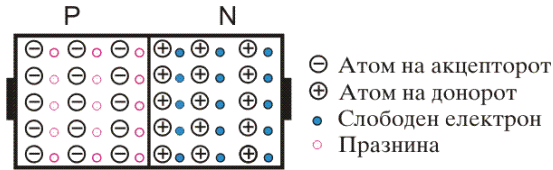
- Полупроводник од N-тип се добива со внесување на петвалентни атоми (наречени донори) во кристалната решетка на германиум или силициум.
- Со внесување тривалентни атоми (наречени акцептори) во кристалната структура на германиум или силициум се добива полупроводник од P-тип.
- Во полупроводник од N-тип спроводливоста е скоро исцело резултат на движењето на слободните електрони.
- Во полупроводник од N-тип електроните се главни, а празнините се споредни носители на електричниот полнеж.
- Во полупроводник од P-тип празнините се главни, а електроните се споредни носители на електричниот полнеж.

## 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. При тоа обичното физичко спојување на два вида кристали не е употребливо, туку во еден единствен кристал, кој што веќе содржи примеси од еден тип (т.н. подлога), од едната страна на кристалот се врши внесување на примеси од спротивен тип, но со многу повисока концентрација. На пр., се внесуваат акцептори во подлога од N-тип или обратно, донори во подлога од P-тип. Поради повисоката концентрација, новите примесите го менуваат типот на полупроводникот во делот од кристалот каде што се внесени. На тој начин се формира полупроводничката структура наречена PN-спој. Тој од едната страна има полупроводник од P-тип, а од другата страна полупроводник од N-тип.

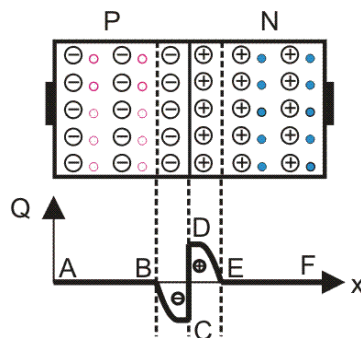
Да замислиме дека двата полупроводника штотуку настанале. Таа состојба е прикажана на **сликата 1.16** и може да постои само во замислениот момент на создавање. Имено, знаеме дека концентрацијата на електрони на N-страната е многу поголема од концентрацијата на празнини, а на P-страната концентрацијата на празнини е многу поголема од концентрацијата на електрони. Тоа создава состојба на силна нерамнотежа на

концентрациите поради која електроните се придвижуваат кон P-страната, а празнините кон N-страната. Ваквото придвижување се одвива без надворешни влијанија според т.н. принцип на дифузија. Принципот на дифузија вели дека честичките кои што можат слободно да се движат во некој простор секогаш се стремат да постигнат изедначена концентрација во целиот простор.



Слика 1.16: Кристал на PN-спој.

Сепак, движењето на електроните и празнините кон спротивните страни кај PN-спојот не трае до изедначување на концентрациите во целиот простор бидејќи тие се рекомбинираат веднаш штом ќе поминат на другата страна од спојот. На тој начин околу спојот се создава подрачје без слободни електрони и празнини (т.е. без слободни носители на електричен полнеж). Во тоа подрачје остануваат само акцепторски и донорски јони кои исто така се носители на електричен полнеж, но се неподвижни бидејќи се врзани во решетката. Вака создаденото подрачје се нарекува подрачје на просторен полнеж. Со навлегувањето на електроните и празнините во спротивните страни од PN-спојот подрачјето се шири сè до моментот кога се воспоставува рамнотежа и престанува натамошното навлегување.

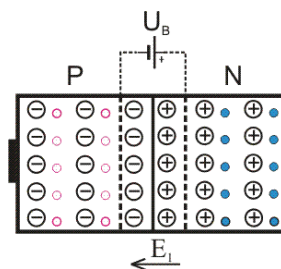


Слика 1.17: Распределба на густината на полнежи.

Оваа состојба е прикажана на **слика 1.17**. На сликата е прикажана и распределбата на полнежите долж полупроводникот со PN-спој. Делот A-B е стандардниот полупроводник од P-тип во кој постои рамнотежа (еднаквост на концентрациите) меѓу негативниот полнеж на акцепторските јони и позитивниот полнеж на празнините. Делот E-F е стандардниот полупроводник од N-тип со рамнотежа меѓу позитивниот полнеж на донорските јони и негативниот полнеж на електроните. Заради тоа деловите A-B и E-F се електрички неутрални (вкупниот полнеж во тие делови е 0). Во делот B-C се наоѓаат само акцепторски јони од P-полупроводникот, а во делот D-E само донорски јони од N-полупроводникот. Помеѓу овие врзани полнежи се појавува електрично поле кое што

всушност е причината за запирање на натамошното навлегување на електроните и празнините кон спротивните страни. Затоа подрачјето на просторен полнеж се нарекува и подрачје на попречување (бариера). Навистина, ако воочиме дека полето е насочено од N кон P-страната на спојот (од позитивните кон негативните јонски полнежи), тогаш е јасно дека тоа ќе делува врз електроните со сила насочена од P кон N-страната и ќе ги попречува да поминат – ќе ги враќа од спојот кон N-страната. На сличен начин ги попречува и празнините, но сега со сила во спротивната насока (од спојот кон P страната), бидејќи тие се носители на позитивен полнеж.

Подрачјето на попречување е мошне тесно и обично е од редот на  $1\mu\text{m}$ . Полето што се создава во него предизвикува појава на внатрешна потенцијална разлика меѓу двата краја на подрачјето, позната под името потенцијална бариера. Таа симболично е прикажана со изворот  $U_B$  на **слика 1.18**.



Слика 1.18: Потенцијална бариера во PN-спој.

Интересно е да забележиме дека непостоењето слободни носители на електрицитет во подрачјето на попречување прави тоа да се однесува како изолатор. Од друга страна внесените примеси во полупроводникот ја прават P-страната релативно добар проводник, а истото тоа го прават и примесите внесени во N-страната. Комбинацијата од два проводника разделени со изолатор всушност претставува кондензатор, а во случајов тој е во форма на плочест кондензатор. Неговата капацитивност се пресметува според познатата формула за плочест кондензатор:

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

каде  $S$  претставува површина на спојот,  $d$  ширината на зоната на попречување, а  $\varepsilon$  диелектрична константа.

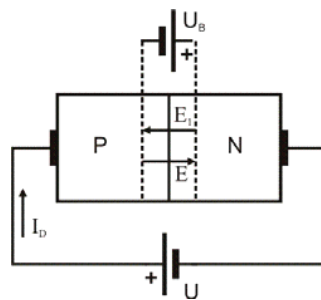
Што се однесува до споредните носители, внатрешното електрично поле го овозможува нивното преминување преку спојот и се формира струја на споредни електрони и струја на споредни празнини. Но таа е само незначителен дел од вкупната струја што под дејство на електричното поле ја поништува струјата што би настанала со дифузија поради големите разлики во концентрациите на двете страни од PN-спојот. На тој начин PN-спојот се одржува во рамнотежа.

## 1.5. Управување со електричната струја низ PN-спојот

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 е приклучен изворот.

### 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 1.19), надворешното електрично поле  $E$  ќе има спротивна насока од внатрешното поле  $E_1$ .

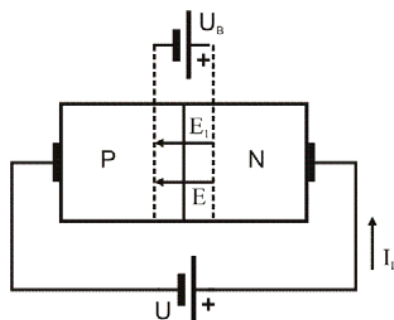


Слика 1.19: PN-спој поларизиран во спроводна насока.

Под влијание на резултантното поле, потенцијалната бариера се намалува, празнините од P-подрачјето ќе преминуваат во N-подрачјето, а електроните од N-подрачјето преминуваат во P-подрачјето па протекува струја  $I_D$ . PN-спојот станува спроводлив, односно станува поларизиран во спроводлива насока. За да PN-спојот практично стане спроводлив, потребно е струјата  $I_D$  да има јачина од редот на  $1 \mu A$ . Напонот, при кој ќе протече оваа струја се вика напон на вклучување и неговата вредност зависи од материјалот на полупроводникот. За германиумот тој изнесува  $0,3V$ , а за силициумот  $0,6V$ .

### Инверзно поларизиран PN-спој

При свртувањето на поларитетот на изворот се свртува и насоката на надворешното поле  $E$  (слика 1.20) и неговата насока се совпаѓа со насоката на внатрешното поле  $E_1$ .



Слика 1.20: PN-спој поларизиран во неспроводна насока.



Сега потенцијалната бариера станува поголема, зоната на попречување поширока, па основните електрони и празнини уште потешко ќе можат да ја поминуваат. Во оваа состојба, PN-спојот е поларизиран во неспроводна насока. Во неспроводно поларизираниот 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. Интересно е да се напомене дека таа расте со зголемување на температурата, што влијае врз поведението на електронските елементи кај кои е применет PN-спојот.

### НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

- **PN-спој е полупроводничка структура формирана со внесување на акцептори во подлога од N-тип или обратно, донори во подлога од P-тип.**
- **Бариерата е подрачје без слободни електрони и празнини.**
- **Ако се поврзе позитивниот пол на изворот со приклучокот на P-подрачјето, а негативниот пол на приклучокот на N-подрачјето, PN-спојот е директно поларизиран.**
- **Во неспроводно поларизираниот PN-спој, тече мала струја, струја 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.**

### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

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!
13. Кои носители се главни, а кои споредни кај полупроводникот од N-тип?
14. Кои носители се главни, а кои споредни кај полупроводникот од P-тип?
15. Што претставува PN-спој?
16. Како може да се поларизира PN-спојот?

## 1.6. Полупроводнички диоди

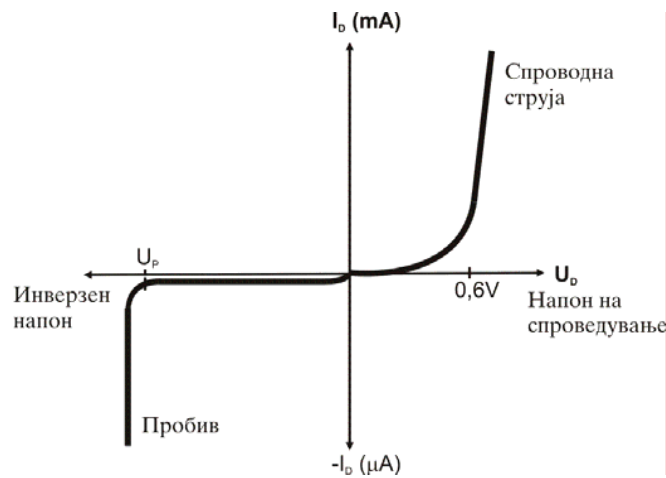
Прв и основен претставник меѓу електронските елементи базиран врз PN-спојот е полупроводничката диода. Структурата и графичкиот симбол на диодата се дадени на **слика 1.21**. Металниот приклучок на P делот се нарекува анода и се означува со A, а на N-делот е катода означена со K. Основната карактеристика 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 напон 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.



Слика 1.21: Структура, графички симбол и изглед на диодата.

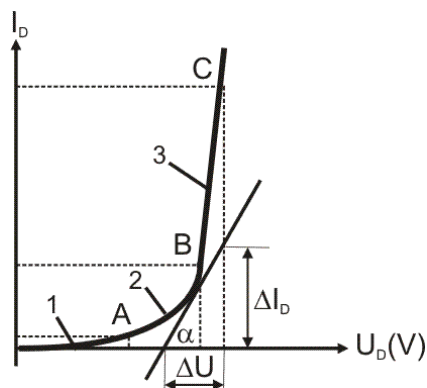
### 1.6.1. Статичка карактеристика

Статичката карактеристика на диодата (**слика 1.22**) 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 краеви, при одредена константна температура на околината.

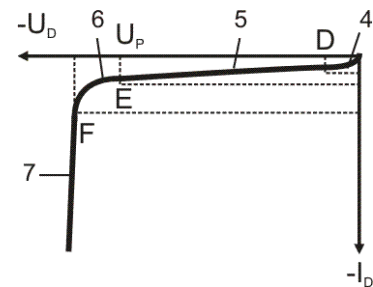


Слика 1.22: Статичка карактеристика на диодата  
т.н. струјно-напонска карактеристика.

Карактеристиката на директно поларизирана диода е прикажана во првиот квадрант. Таа може да се подели на три зони (слика 1.23).



Слика 1.23: Карактеристика на спроводно поларизирана диода.



Слика 1.24: Карактеристика на инверзно поларизирана диода.

Првата зона, од координатниот почеток до точката А, е подрачје на многу мали напони. Тука се работи за напони од неколку десетини милivolти, при што струјата достигнува вредности помали од микроампер. 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 0,6V.

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. Отпорот на диодата се менува со промена на директниот напон, донесен на диодата. Тој е одреден со наведнатоста на карактеристиката во таа точка:

$$rd = \frac{\Delta U_D}{\Delta I_D} .$$

Карактеристиката на инверзно поларизираната диода е прикажана во третиот квадрант на координатните оски. И таа може да се подели на неколку зони (**слика 1.24**).

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 почнува да се зголемува. Кај диодите од силициум оваа зона е многу тесна, а кај германиумовите диоди е поширока. Вредноста на максималниот дозволен 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. Пробивот на диодата може да биде од термички и од електрични причини.

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

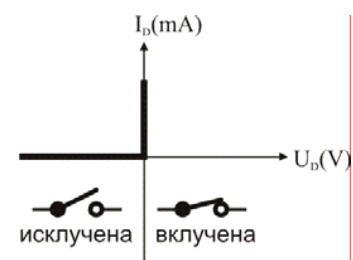
**Лавинскиот ефект** се јавува во споеви со поголема ширина на запречниот слој. При големи инверзни напони во запречниот слој се создава јако електрично поле, кое на електроните што се движат преку тој слој им дава голема кинетичка енергија и забрзување. Кога таа енергија ќе достигне одредена граница, доаѓа до раскинување на нови ковалентни врски, бројот на слободните електрони се зголемува и се создава лавина од слободни електрони (слично на снежна лавина). При тоа се создаваат нови слободни електрони и празнини при судир на забрзаните електрони со атомите од решетката. Инверзната струја може да достигне голема вредност и да дојде до уништување 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.

**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  $U_p$ , настанува истргнување на електроните од ковалентните врски поради големите сили што врз нив ги создава електричното поле во зоната на попречување, при тоа 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.

Постојат диоди кои работат во режим на електричен пробив и се нарекуваат зенер диоди.

**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.

Струјно-напонската карактеристика од слика 1.22 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 1.25**. Идеалната диода дејствува како затворен прекинувач, кога е директно поларизирана, и како отворен прекинувач, кога е инверзно поларизирана.



Слика 1.25: Карактеристика на идеална диода.

## НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

- **Основната карактеристика на диодата е 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 напон е врзан со анодата, а негативниот со катодата.**
- **Инверзна или неспроводна поларизација на диодата имаме кога позитивниот пол на изворот е врзан со катодата, а негативниот со анодата на диодата.**
- **Струјно-напонската карактеристика на диодата ја претставува зависноста на струјата на диодата од еднонасочниот напон на нејзините краеве, при одредена константна температура на околината.**

## ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

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. Објасни го поимот идеална диода и нацртај ја нејзината статичка карактеристика!

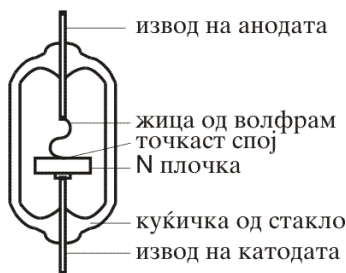
## 1.7. Видови и примена на полупроводничките диоди

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.

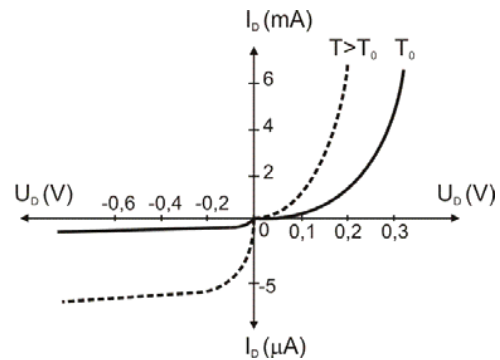
Според намената разликуваме: насочувачки, демодулациони, ограничувачки, импулсни, прекинувачки, капацитивни, фотодиоди, LED диоди и други. Според конструкцијата разликуваме два вида, и тоа диоди со точкест спој и диоди со површински спој.

### 1.7.1. Диоди со точкест спој

На **слика 1.26** е дадена конструкцијата на точкеста диода, а струјно-напонската карактеристика на германиум диодата OA90 е дадена на **слика 1.27**.



Слика 1.26: Конструкција на точкеста диода.



Слика 1.27: Струјно напонска- карактеристика на германиум диода OA90.

Треба да се обрне внимание на размерот на струјата: при директната насока таа е дадена во mA, а во инверзната во  $\mu A$ . 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 при директна поларизација, при напон од 0,1V 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. Овие диоди денес се среќаваат воглавно во постари електронски уреди.

Шотки диодите се современи диоди со спој метал-полупроводник. Се состојат од силициумски полупроводник од N-тип врз кој е нанесен метал што со силициумот гради соединение силицид. Металот може да биде алуминиум или никел. При поларизацијата на шотки-диодите во директна насока, прагот на спроведување изнесува 0,3V што претставува речиси половина од прагот на спроведување на обичните силициумски диоди. Шотки-диодите имаат многу поголема густина на струјата во однос на стандардните диоди. Предноста на овие диоди е што се брзи и работат како обични силициумски диоди. Се применуваат во брзи, импулсни склопови, како насочувачи за општа намена, во уреди од областа на радиофреквенциите како и за насочувачки уреди со голема моќност. Денес секој компјутер има напојување изведено со шотки-диоди.

## 1.7.2. Диоди со површински спој

Диодата со површински спој се состои од два слоја на полупроводник, едниот од P-тип, а другиот 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.

### 1.7.2.1. 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 поднесуваат 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  $I_D \max$ ;
- максимален дозволен инверзен напон  $U_i \max$  (околу 70% од вредноста на пробивниот напон  $U_P$ );
- максимална дозволена моќност на дисипација  $P_D \max$  (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.



Стандардна диода 25A, 1200V.

## Каталожки вредности за неколку различни диоди:

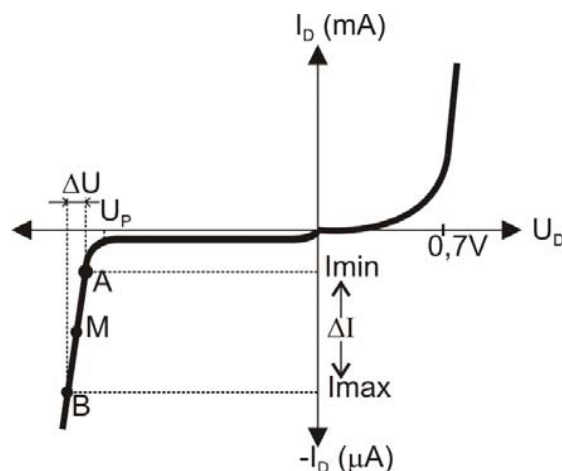
Во табелата се прикажани каталожки вредности за неколку различни насочувачки диоди.

Ознака	$I_{dmax}$ -при директна поларизација (A)	при директен напон (V)	$I_{inv}$ -при инверзна поларизација (mA)	при инверзен напон (V)	Максимален дозволен инверзен напон $U_{imax}$ (V)	Максимална дозволена температура ( $^{\circ}C$ )
AX101	0,5	<0,5	<0,02	40	40	45
AX102	0,5	<0,6	<0,03	60	60	45
AX103	0,5	<0,8	<0,04	80	80	45
BY50A	20	1,2	1	100	100	175
BY50B	20	1,2	1	200	200	175
BY50D	20	1,2	1	400	400	175
1N4001	1	1,1	0,01	50	50	175
1N4002	1	1,1	0,01	100	100	175
1N4003	1	1,1	0,01	200	200	175
1N5407	3	1,3	/	/	1000	175

## 1.7.2.2. Зенер диоди

Зенер диода е силициумска диода со површински спој, наменета за стабилизација на едностран 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 стрмина на делот на карактеристиката и поостро колена после точката на пробивниот напон. Типичната струјно-напонска карактеристика е дадена на **слика 1.28**.

За стабилизација на напон се користи делот меѓу точките A и B, познат како област на зенеров ефект. За голема промена на струјата  $\Delta I$  се добива релативно мала промена на инверзниот напон  $\Delta U$  на краевите на диодата, што е карактеристично за уредите кои 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.



Слика 1.28: Струјно-напонска карактеристика на зенер диода.



Симболот на зенер диодата е даден на **слика 1.29**.

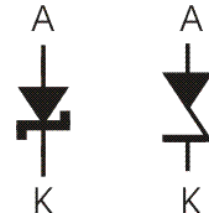
Зенер диодите се изработуваат за напони на стабилизација од 3V до 75V, но можни се и напони надвор од овој опсег (до 200V).

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.



Слика 1.29: Симбол на зенер диода.

**Каталожки вредности за неколку различни зенер диоди:**

Ознака	Зенеров напон $U_z$ (V)	$R_z = \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z}$ ( $\Omega$ )	при дадена $I_z$ (mA)	$I_d$ -при директна поларизација (mA)	при директен напон (V)	Максимална дозволена моќност на дисипација $P_{dmax}$ (mW)	Максимална дозволена струја $I_{zmax}$ (mA)	Максимална дозволена температура ( $^{\circ}C$ )
BZ1	0,6-0,75	5	5	100	<1	250	100	150
BZ2	2-3	70	5	100	<1	250	50	150
BZ3	3-4	75	5	100	<1	250	50	150
BZ4	4-5	65	5	100	<1	250	100	150
ZE4,7	4,1-5,2	65	5	100	<1	250	/	150
ZE5,6	5-6,3	35	5	100	<1	250	/	150
ZE6,8	6,1-7,5	4	5	100	<1	250	/	150
ZF1,4	1,3-1,5	20	1,4	/	/	400	130	150
ZF2,1	1,9-2,3	30	2,1	/	/	400	80	150
ZR2,7	2,5-2,9	70	5	100	<1	250	/	150
BZL27	24,1-30	<15	25	<0,25	1	1,25	40	150
ZBL28	29,6-36,5	<15	25	<0,25	1	1,25	33	150

### 1.7.2.3. Импулсни диоди

Карактеристично за логичките операции во дигиталните кола е работа со импулси кадешто 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 споредните слободни носители на полнеж уфрлени преку слојот за

попречување на кои им е потребно конечно време да се рекомбинираат со што диодата исклучува.

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 со  $t_{rr} > 0,1\mu s$  и наносекундни со  $t_{rr} < 0,1\mu s$  ( $t_{rr}$  – reverse recovery time – означува време на инверзно опоравување).

Импулсните диоди имаат поголема примена кај импулсните извори за напојување.

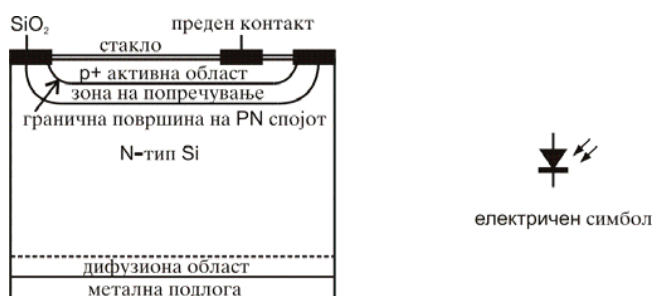
**Каталожки вредности за неколку различни импулсни диоди:**

Ознака	$I_{dmax}$ -при директна поларизација (A)	при директен напон (V)	$I_{inv}$ -при инверзна поларизација ( $\mu A$ )	при инверзен напон (V)	Максимален дозволен инверзен напон $U_{imax}$ (V)	Време на инверзно опоравување $t_{rr}$ (ns)
AAV13	30	0,4	15	20	25	500
AAV15	200	0,6	2,5	10	30	25
AAZ17	40	0,5	1,5	1,5	50	<350
AAZ18	90	0,5	0,6	1,5	30	<70

**1.7.2.4. 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 со јачината на светлината која паѓа на диодата.

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 2 $\mu m$  за галиумарсенид. Модел и електричен симбол на фотодиода се дадени на **слика 1.30**.



Слика 1.30: Модел и електричен симбол на фотодиода.

Знаеме дека еден фотон на апсорбирана светлина ослободува еден електрон и една празнина. Ако тие се разделат пред да имаат можност да се рекомбинираат и 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 P-тип и како влегува подлабоко во материјалот нејзиниот интензитет нелинеарно се намалува. Фотон на светлина, кој навлегол во зоната на попречување, создава слободен електрон и празнина. Електронот и празнината се придвижуваат под влијание на внатрешното електрично поле на спојот во спротивни насоки и поминуваат преку спојот. Електроните и празнините создадени надвор од зоната на попречување се движат хаотично, многу од нив влегуваат во зоната на попречување, а други се рекомбинираат и се губат без да стигнат до зоната. Колку е поголем бројот на електроните и празнините во зоната на попречување, а тоа значи дека е поголем интензитетот на светлината што паѓа врз диодата, толку е поголема и фотострујата.

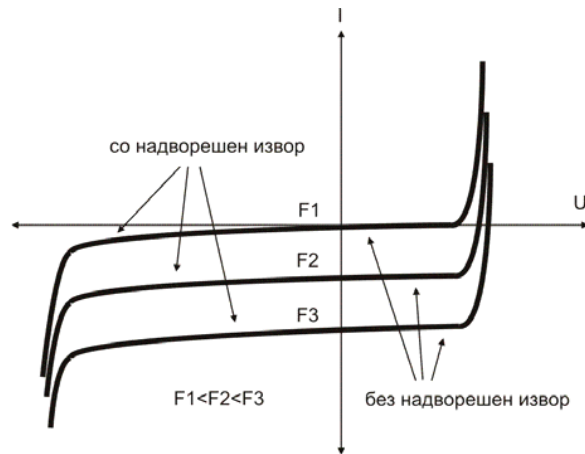
Заради подобро искористување на светлината, ширината на зоната на попречувањето може да се зголеми со соодветно ниво на внесените примеси во полупроводникот. Диода од овој вид работи во фотонапонски режим. Таа всушност претставува извор на фотонапон и фотоструја. Такви диоди се применуваат во фотоапаратите за мерење на осветлувањето на објектот што се снима и во соларните ќелии.

Една од најпознатите примени е соларната ќелија која е попозната по намената како извор на напон што преобразува светлинска во електрична енергија – со што со право може да се каже дека претставува еколошки извор на “чиста” електрична енергија.

### Фотодиода со надворешен извор за поларизација

Сепак, полесен начин за проширување на зоната е со примена на надворешна поларизација. Во овој случај диодата работи во фотоспроводлив режим со помош на надворешен извор за напојување и тоа во режим со инверзна поларизација. Кога фотодиодата не е осветлена, во колото тече само инверзната струја на диодата, наречена струја на темно. Фотострујата на диодата се менува од вредноста на струјата на темно (неосветлена диода) до вредност соодветна на максималната осветленост. Нејзината карактеристика на зависноста на струјата од напонот на поларизацијата при различни нивоа на осветлување е дадена на **слика 1.31**.

Фотодиодите најмногу се применуваат во алармните системи, на пр. за детекција на чад, далечинските управувачи и други примени.



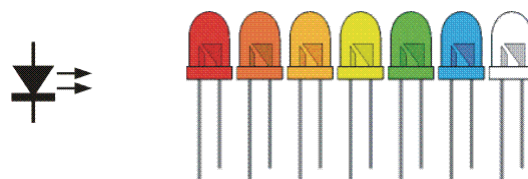
Слика 1.31: Струјно-напонска карактеристика на фотодиода.

### 1.7.2.5. LED диоди

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

Секој хемиски елемент има своја бранова должина на која зрачни 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, но и инфрацрвена (IR) и ултравиолетова (UV), од невидливиот дел на спектарот. Разни 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. Такви диоди, на пр. се користат за видео-дисплеи во спортски сали, стадиони и за реклами.

Електричниот симбол и изглед на **LED диода** е даден на **слика 1.32**.



Слика 1.32: Електричен симбол и изглед на LED диода.

За нормална работа, LED диодата користи директна поларизација, а напонот на краевите на диодата се движи меѓу 1,6 V и 3 V, зависно од бојата. Типична работна струја на LED диода

со стандардна големина изнесува околу 20 mA, а максимален инверзен напон до 5 V. Освен стандардните, постојат и високоефикасни LED диоди со работна струја од 2 до 8 mA.

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 милиони импулси во секунда). Посебно ефикасни LED диоди со комбинација на бои која што дава бела светлина наоѓаат примена за осветление.

#### Каталожки вредности за неколку различни LED диоди

Тип	Боја	$I_F$ max.	$U_F$ typ.	$U_F$ max.	$U_R$ max.	Интензитет на светлината	Агол на осветлување	Бранова должина
Стандардна	Црвена	30mA	1.7V	2.1V	5V	5mcd	60°	660nm
Стандардна	Сјајно црвена	30mA	2.0V	2.5V	5V	80mcd	60°	625nm
Стандардна	Жолта	30mA	2.1V	2.5V	5V	32mcd	60°	590nm
Стандардна	Зелена	25mA	2.2V	2.5V	5V	32mcd	60°	565nm
High intensity	Сина	30mA	4.5V	5.5V	5V	60mcd	50°	430nm
Super bright	Црвена	30mA	1.85V	2.5V	5V	500mcd	60°	660nm
Low current	Црвена	30mA	1.7V	2.0V	5V	5mcd	60°	625nm

#### НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

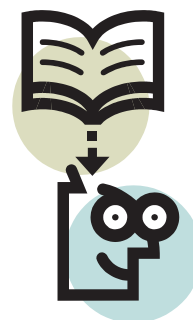
- Шотки-диодите се применуваат во брзи, импулсни склопови, како насочувачи за општа намена, во уреди од областа на радиофреквенциите како и за насочувачки уреди со голема моќност.
- Насочувачките диоди се диоди со површински спој, а се користат за добивање еднонасочна струја од извор на наизменичен напон.
- Зенер диода е силициумска диода со површински спој, наменета за стабилизација на еднонасочен напон.
- Импулсните диоди имаат поголема примена кај импулсните извори за напојување.
- Фотодиодите најмногу се применуваат во алармните системи, на пр. за детекција на чад, далечинските управувачи и други примени.
- LED диодите се користат за видео-дисплеи во спортски сали, стадиони и за реклами.

## ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

1. Какви видови полупроводнички диоди разликуваме според конструкцијата?
2. Објасни го подобрувањето на струјно-напонската карактеристика на зенер диодата.
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 како се делат импулсните диоди според времето на исклучување?
12. Нацртај ја шематска ознака на фотодиода!
13. Нацртај ја шематска ознака на LED диоди!
14. Каде се применуваат полупроводничките диоди – насочувачката, зенеровата, импулсната, фотодиодата, LED диодата?

### Вежби за активно учење:

- Обиди се да откриеш во кои уреди од твоето домаќинство имаат примена видовите диоди.
- Истражувај на интернет за видови и карактеристики на диоди и врз основа на истражувањето изработи проект.
- На часовите по практична настава согледај го насочувачкото дејство на полупроводничката насочувачка диода со помош на осцилоскоп.
- За да ја разбереш експоненцијалната функција која во трета година ќе ја изучиш по предметот математика, направи “истражување” на експоненцијалната функција ( $y=e^x-1$ ) со помош на калкулатор. Провери дали ја добиваш истата зависност како кај струјно-напонската зависност при директна поларизација на диодата. Побарај помош од професор.



## 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. Алармни системи а) фото диода \_\_\_\_\_
2. Видео дисплеи б) шотки диода \_\_\_\_\_
3. Во напојување на компјутер в) зенер диода \_\_\_\_\_
4. Стабилизатори на напони г) LED 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 \_\_\_\_\_ .

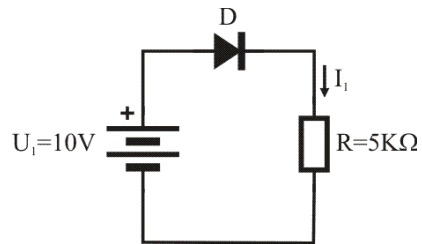


# П Р И Л О Г 1

**Задачи со решени примери**

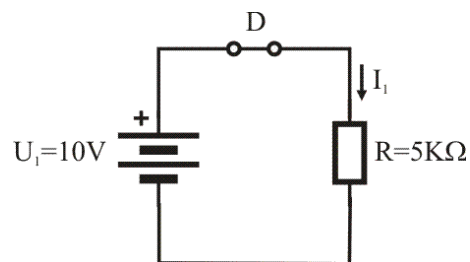


1. Пресметај ја струјата во колото со отпорник и идеална диода, дадено на сликата.



**Решение:**

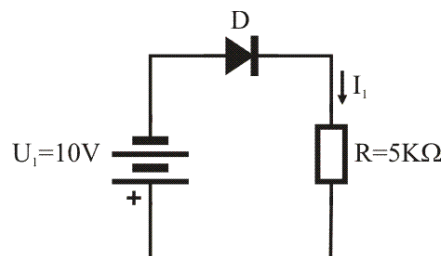
Прво се дефинира поларизацијата на диодата. Анодата на диодата е приклучена на позитивниот пол на изворот, диодата е директно поларизирана. Земајќи предвид дека диодата е идеална, во колото ќе ја замениме со затворен прекинувач. Сега колото го има следниот изглед:



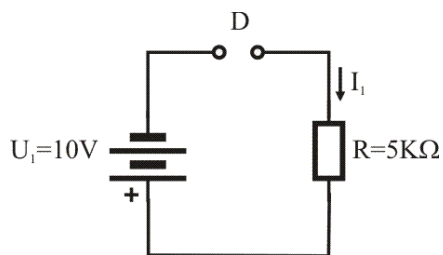
Струјата низ отпорникот може да се пресмета според:

$$I_1 = \frac{U_1}{R} = \frac{10V}{5K\Omega} = 2mA.$$

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.

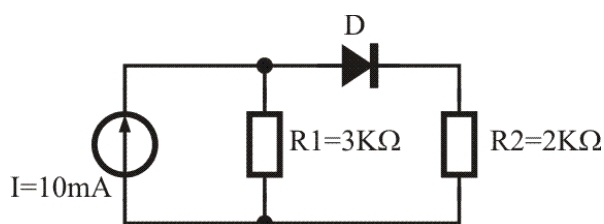


Струјата во колото е  $I_1=0$ .

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.

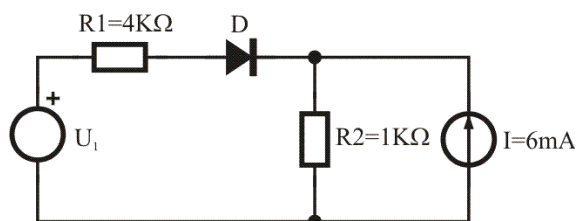
(Решение:  $U_{R1}=12\text{V}$ ,  $I_{D1}= 6\text{mA}$ )



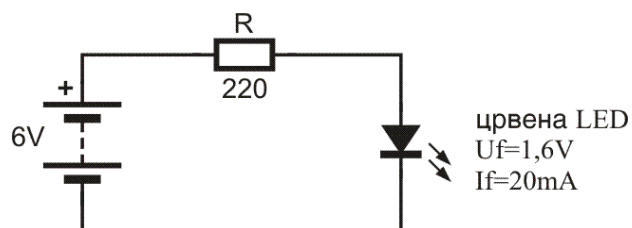
4. При  $U_1 = 10\text{V}$  пресметај:

- 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  $20\text{mA}$ , на еднонасочен извор од  $6\text{V}$ .



**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:

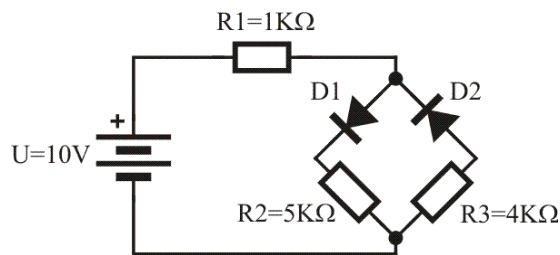
$$R = \frac{4,4V}{20mA} = 0,220K\Omega = 220\Omega .$$

Моќноста на отпорникот е:

$$P_R = U \cdot I = 4,4V \cdot 20 \cdot 10^{-3} A = 88mW .$$

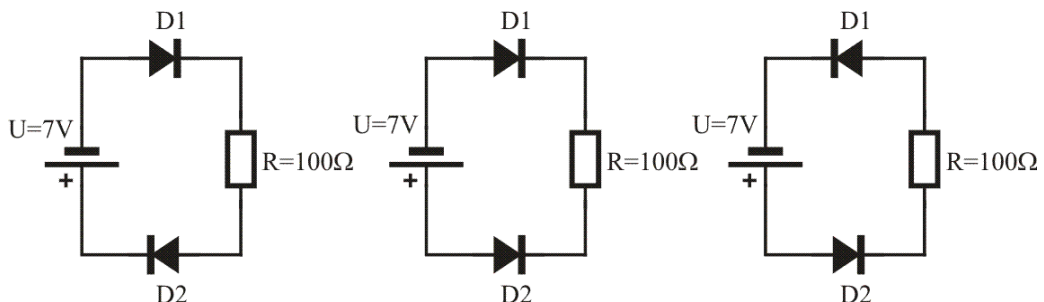
6. За колото од сликата да се пресметаат струите низ идеалните диоди D1 и D2.

(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.

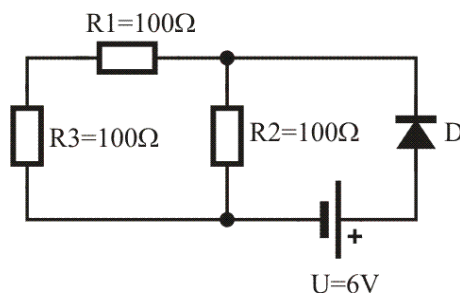
(Решение:  $I_1 = 0$ ,  $I_2 = 0$ ,  $I_3 = 10mA$ )



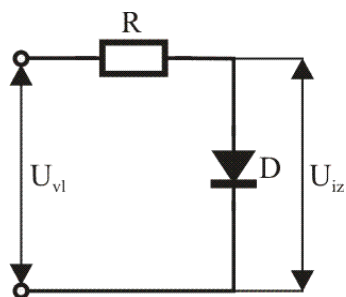
8. За колото од сликата со идеална диода:

- а) да се пресмета напонот на R2;
- б) да се одреди колкава е струјата на диодата.

(Решение:  $6V$ ,  $90mA$ )

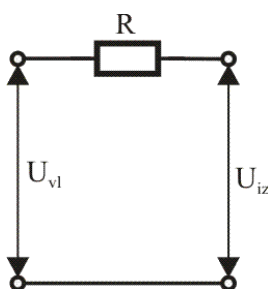


9. За колото од сликата да се нацрта преносната карактеристика.

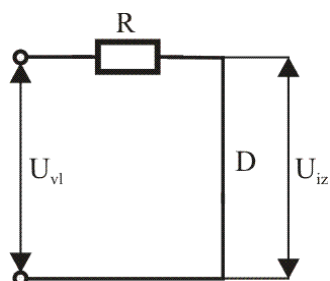


**Решение:**

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:

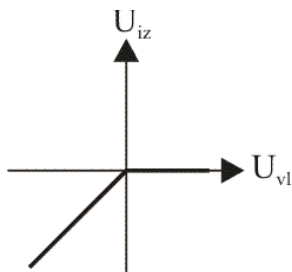


Излезниот напон ќе го следи влезниот напон  $U_{iz} = U_{vl}$ .



Краевите на диодата се краткоспоени, па напонот на нејзините краеве е  $0V$  ( $U_{iz} = 0V$ ).

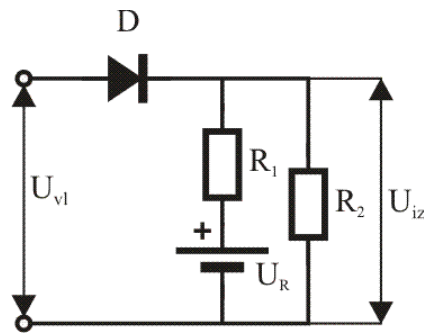
Преносната карактеристика на колото ќе го има следниот облик:



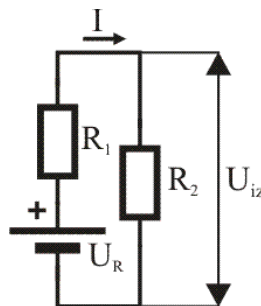
10. За колото од сликата да се нацрта преносната карактеристика.

$$R_1 = R_2 = 6K\Omega, U_R = 15V$$



**Решение:**

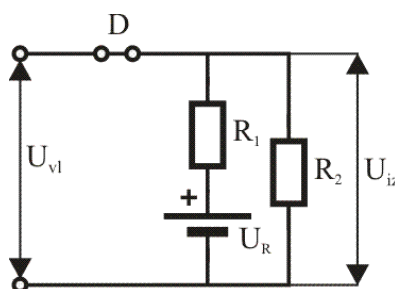
Да претпоставиме дека диодата е исклучена (инверзно поларизирана). Во тој случај колото ќе го има следниот изглед:



Струјата во колото може да се изрази како:  $I = \frac{U_R}{R_1 + R_2}$  а излезниот напон:

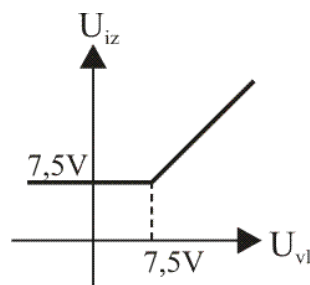
$$U_o = R_2 \cdot I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_R = \frac{6K}{6K + 6K} \cdot 15 = \frac{1}{2} \cdot 15 = 7,5V$$

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:



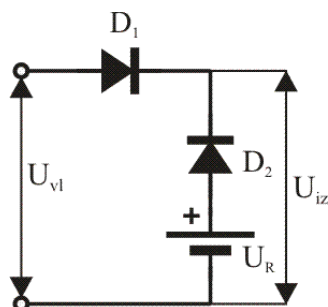
Во овој случај излезниот напон ќе го следи влезниот напон  $U_{iz}=U_{vl}$ .

Преносната карактеристика ќе го има следниот облик:



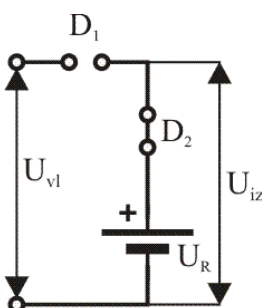
11. За колото од сликата да се нацрта преносната карактеристика.

$$U_R = 10V$$

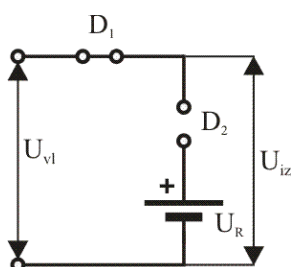


**Решение:**

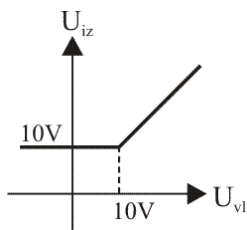
За  $U_{vl} < 0$ , диодата  $D_2$  е вклучена, бидејќи на нејзината анода има потенцијал од  $10V$ . Во тој момент катодата на диодата  $D_1$  ќе се наоѓа на истиот потенцијал, со што  $D_1$  ќе биде исклучена. Излезниот напон ќе биде  $U_{iz} = 10V$ .



Диодата  $D_1$  ќе се вклучи кога  $U_{vl} > 10V$ , при што диодата  $D_2$  ќе се исклучи. Во тој случај  $U_{iz} = U_{vl}$ .

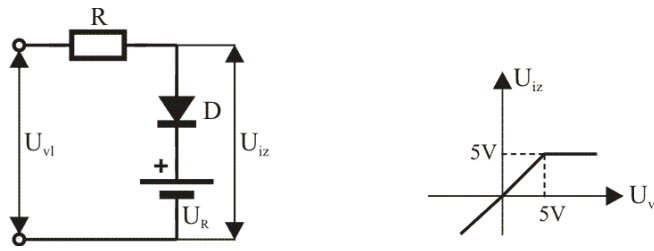


Преносната карактеристика ќе го има следниот облик:



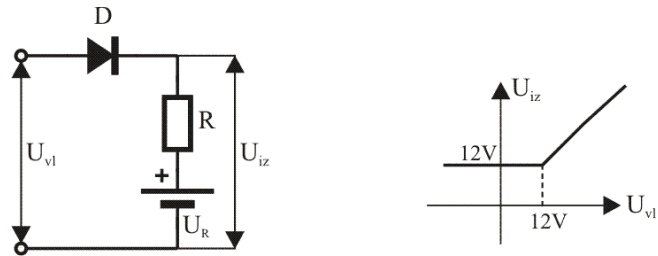
12. За колото на сликата да се нацрта преносната карактеристика. ( $U_R = 5V$ )

**(Решение)**



13. За колото на сликата да се нацрта преносната карактеристика. ( $U_R=12V$ )

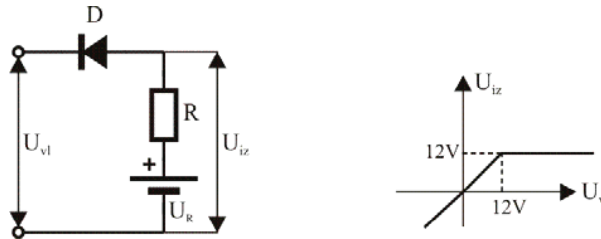
(Решение)



14. За колото на сликата да се нацрта преносната карактеристика.

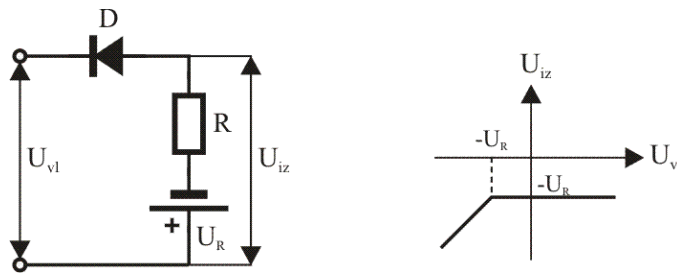
( $U_R=12V$ )

(Решение)



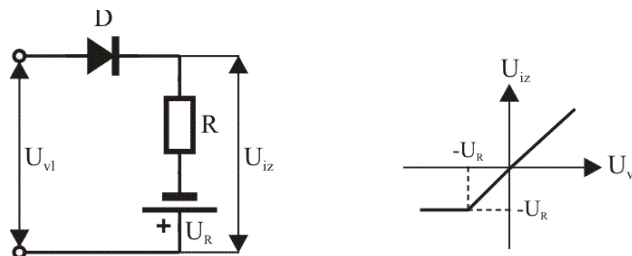
15. За колото на сликата да се нацрта преносната карактеристика.

(Решение)



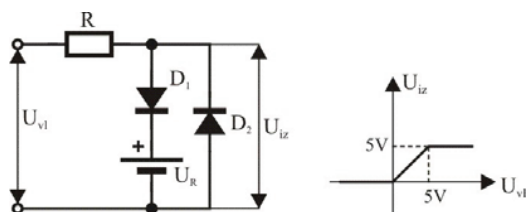
16. За колото на сликата да се нацрта преносната карактеристика.

(Решение)

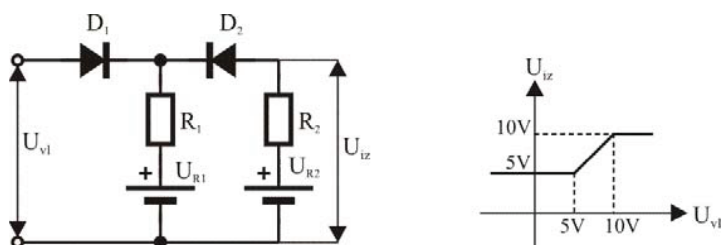


17\*). За колото на сликата да се нацрта преносната карактеристика каде што  $U_R=5V$ .

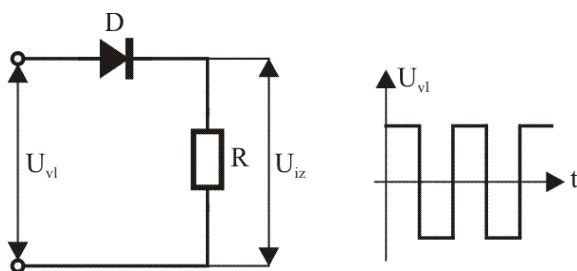
(Решение)



18\*\*). За колото на сликата се дадени  $R_1=10\text{K}\Omega$ ,  $R_2=20\text{K}\Omega$ ,  $U_{R1}=2,5\text{V}$ ,  $U_{R2}=10\text{V}$ . Да се нацрта преносната карактеристика на колото. (Решение)

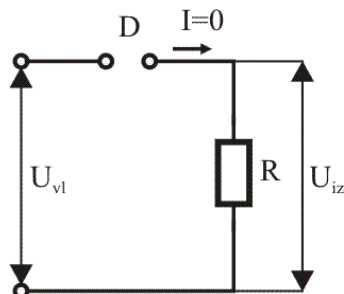


19. За колото од сликата да се нацрта зависноста на излезниот од влезниот напон (преносна карактеристика) и обликот на излезниот напон  $U_{iz}$  за даден влезен напон  $U_{vl}$ .



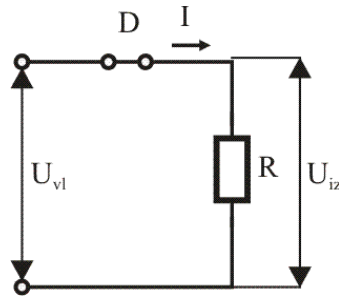
**Решение:**

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:



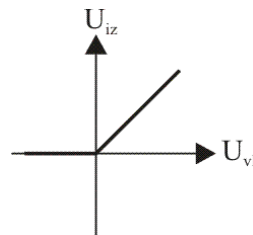
Бидејќи во колото не тече струја, нема да има пад на напон на краевите на отпорникот и излезниот напон е еднаков на 0 ( $U_{iz}=0$ ).

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:

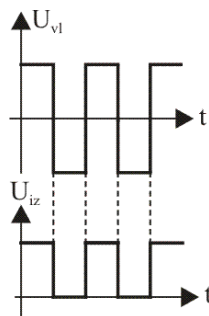


Излезниот напон ќе го следи влезниот напон  $U_{iz}=U_{vl}$ .

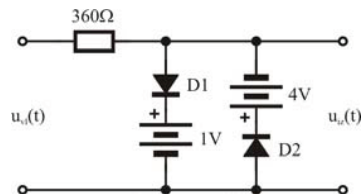
Преносната карактеристика ќе го има следниот облик:



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  $U_{D1}+1V-u_{vl}=0$  се добива границата на спроведување:  $U_{D1}=u_{vl}-1V$

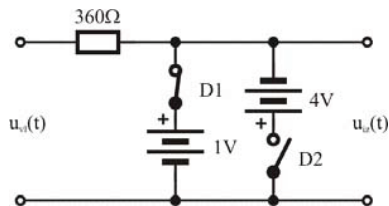
од  $U_{D2}+4V+u_{vl}=0$  се добива границата на спроведување:  $U_{D2}=-u_{vl}-4V$ .

Прво ќе го разгледаме случајот кога D1 е директно поларизирана, а D2-инверзно;

$$U_{D1} > 0, \quad u_{v1} > 1V,$$

$$U_{D2} < 0, \quad -u_{v1} - 4V < 0, \quad u_{v1} > -4V,$$

од каде што се добива за  $u_{v1} > 1V$  дека  $u_{iz} = 1V$ .

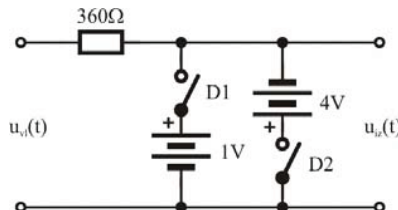


Потоа ќе го разгледаме случајот кога D1 и D2 се инверзно поларизирани;

$$U_{D1} < 0, \quad u_{v1} < 1V,$$

$$U_{D2} < 0, \quad -u_{v1} - 4V < 0, \quad u_{v1} > -4V,$$

од каде што се добива за  $-4 < u_{v1} < 1V$  дека  $u_{iz} = u_{v1}$ .

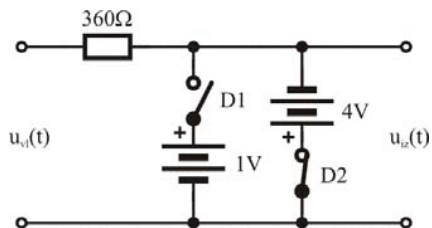


Потоа ќе го разгледаме случајот кога D1 е инверзно поларизирана а D2 директно;

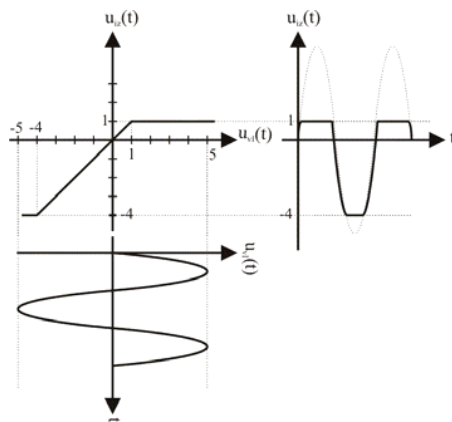
$$U_{D1} < 0, \quad u_{v1} < 1V,$$

$$U_{D2} > 0, \quad -u_{v1} - 4V > 0, \quad u_{v1} < -4V,$$

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.

\*) Потешки задачи

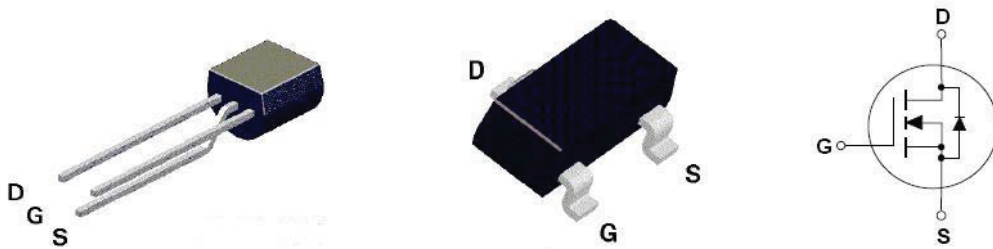
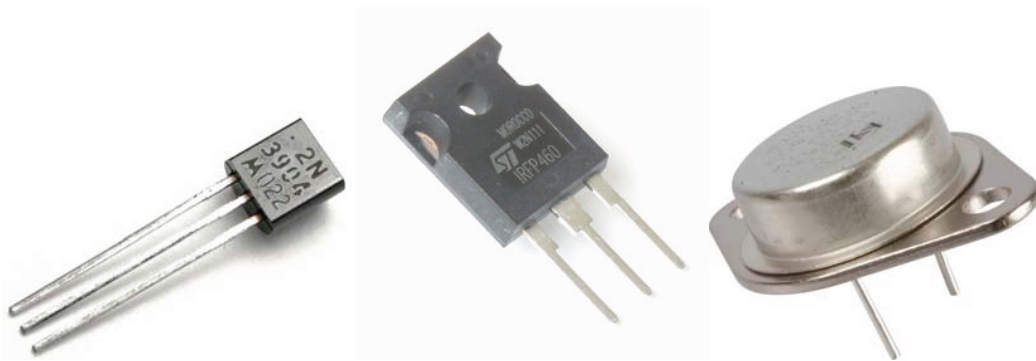
# 2.

## ТРАНЗИСТОРИ

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

- да го толкуваш физичкото создавање на транзисторот со помош на PN-споеви;
- да го објаснуваш начинот на работа на транзисторот;
- 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 ги објаснуваш различните режими на работа кај транзисторот: статички и динамички, линеарен и нелинеарен;
- да ги познаваш ограничувањата при работа на транзисторите (струјно, напонско, моќност, температура);
- 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 транзистор кој има можност да ја претвори светлинската во електрична енергија;
- да ги разбираш можностите на униполарните транзистори;
- да објаснуваш поврзување на униполарен транзистор во електрично коло;
- да го објаснуваш принципот на работа на FET;
- да го споредуваш начинот на работа на биполарен транзистор и FET;
- да го објаснуваш принципот на работа на 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  $\mu$  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.





Што се случува кога се комбинираат два PN-споја во еден полупроводник? Во таа насока, уште во 1948 година работеле двајца американски научници Бретејн и Бердин и успеале да конструираат нов електронски елемент, наречен транзистор. Називот транзистор е добиен со спојување на два англиски збора **TRANS**fer res**ISTOR**, со значење преносна отпорност, или поточно, отпорност со која може да се управува. Слично како и кај диодата, првиот транзистор бил со точкест спој, но набргу во 1951 година американскиот физичар Шокли предложил решение на транзистор со површински спој (во англискиот јазик познат како Junction transistor).

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, струјата на транзисторот поминува преку два PN-споја, за разлика од транзисторите со ефект на поле, во кои струјата тече само преку канал од еден вид полупроводник, како што ќе биде разгледано понатаму.

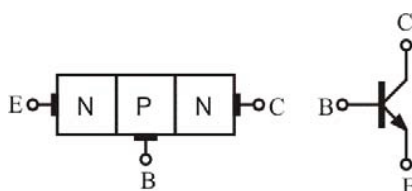
Според режимот на работа, транзисторите од двете групи можат да се поделат на засилувачки и на прекинувачки.

## 2. Транзистори

Структурата на биполарниот транзистор изгледа како две PN-диоди со површински спој, ставени во процесот на производството многу блиску една до друга, така што да споделуваат заеднички регион. Според тоа, биполарниот транзистор претставува “сендвич” 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

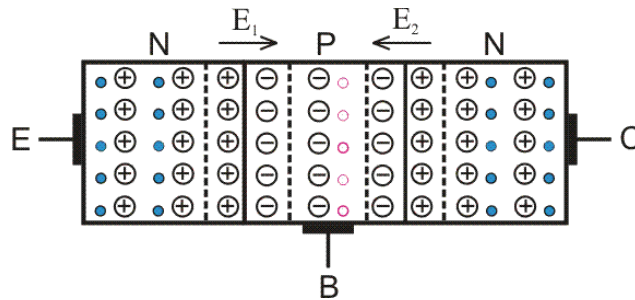
NPN-транзисторот е “сендвич” од два PN-споја со заеднички P-региони. Неговата структура и шематската ознака се дадени на **слика 2.1**.



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

Средниот регион на транзисторот се вика **база** (B) и во конструкцијата на транзисторот се бара да биде што потенок. Едниот крај на N-регионот се вика **емитер** (E) и има основна

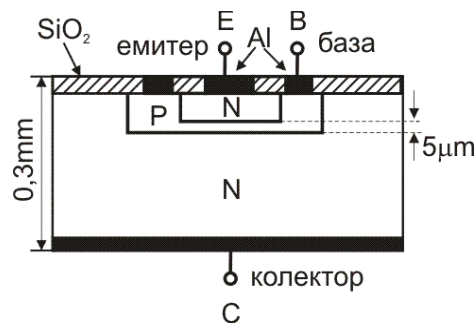
задача да емитува носители на полнеж-електрони, кои патуваат преку базата (B) и се собираат на спротивниот крај на транзисторот, наречен **колектор** (C) под услов на поларизација на транзисторот што ќе биде објаснет со слика 2.4.



Слика 2.2: Графички приказ на NPN-транзистор.

За подобро разбирање на процесите ќе се послужи́ме 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.

На сликата е даден реалниот физички распоред на полупроводниците на NPN-транзистор (**слика 2.3**).



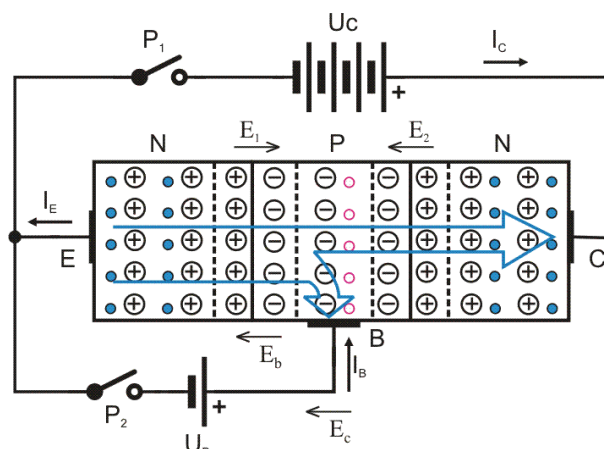
Слика 2.3: Физички распоред на полупроводните региони на NPN-транзистор.

Ширината на базата меѓу емитерот и колекторот за некои видови транзистори изнесува до неколку  $\mu\text{m}$ , а самиот спој меѓу полупроводниците P и N е околу  $1 \mu\text{m}$ . Површините на споевите база-колектор и база-емитер не се еднакви. Површината на колекторскиот спој е неколку пати поголема од површината на емитерскиот спој. Ова е потребно за да може колекторот да ги собере сите електрони кои доаѓаат од емитерот. Начинот на формирање на PN-споевите со внесување повисоки концентрации примеси од спротивен тип во подлога од даден тип полупроводник, опишан кај диодите, се применува и при производството на современите транзистори. Од слика 2.3 се гледа дека слојот за базата е формиран во колекторот, а слојот на емитерот е формиран во базата. Тоа значи дека концентрацијата на акцептори во базата е повисока од концентрацијата на донори во

колекторот и концентрацијата на донори во емитерот е повисока од концентрацијата на акцептори во базата. Ова ни кажува дека при директна поларизација на емитерскиот спој емитерот ќе уфрла (емитира) многу повеќе електрони во базата отколку што базата уфрла празнини во емитерот. Оваа особина, заедно со многу малата широчина на базата се клучни чинители на транзисторскиот ефект што ќе биде анализиран во следното поглавје.

### 2.1.1. Поларизација на NPN-транзисторот

Бидејќи транзисторот има два PN-споја, а секој од нив може да биде поларизиран директно или инверзно, постојат четири начини на поларизација, односно четири подрачја на работа на транзисторот. За поларизација на споевите се потребни два еднонасочни извори (слика 2.4). Изворот  $U_B$  е врзан меѓу базата и емитерот и директно го поларизира емитерскиот спој, а изворот  $U_C$  е меѓу колекторот и емитерот и е поголем од изворот  $U_B$  така што колекторскиот спој да биде инверзно поларизиран. При ваква поларизација на транзисторот, се вели дека транзисторот работи во **нормално активно подрачје**.



Слика 2.4: NPN-транзистор поларизиран во нормално активно подрачје.

Со затворање на прекинувачите  $P_1$  и  $P_2$ , 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 директна поларизацијата на емитерскиот спој, но практично не зависи од степенот на инверзна поларизација на колекторскиот спој бидејќи сите електрони што стигнале до него ќе поминат во колекторот. Значи, кога транзисторот се наоѓа во нормално активно подрачје **колекторската струја се управува со напонот база-емитер и скоро не зависи од напонот база-колектор што е суштина на транзисторскиот ефект**. Тоа се случува кога колекторот е на повисок потенцијал од потенцијалот на базата кон емитерот ( $U_{CE} \geq U_{BE}$  и  $U_{BE} \approx (0,6 \text{ до } 0,7)V$  кај силициумскиот транзистор). Бидејќи емитерскиот спој во нормалното активно подрачје работи во режим на релативно големи струи (mA), напонот на директно поларизираните спој база-емитер сосем малку се менува, слично како кај диодите (подрачје 3 на слика 1.23). Низ транзисторот ќе течат струите  $I_E$  и  $I_C$  со големи јачини при што ќе важи:  $I_E = I_B + I_C$ .

Ако на сликата 2.4 се промени поларитетот само на напонот база-емитер, транзисторот од нормално активно подрачје преминува во **подрачје на исклучување**. Во подрачјето на исклучување двата PN-споја се инверзно поларизирани бидејќи базата е на понизок потенцијал, и во однос на емитерот, и во однос на колекторот. Сега кон базата течат само инверзните струи на заситување на двата споја. Бидејќи тие се многу мали (кај силициумскиот транзистор се од редот на nA) може да сметаме дека транзисторот се однесува како отворено коло.

Ако на сликата 2.4 се промени поларитетот само на напонот за поларизација на колекторскиот спој, транзисторот од нормално активно подрачје преминува во **подрачје на заситување**. Во подрачјето на заситување двата PN-споја се директно поларизирани. Низ транзисторот може да протечат големи струи кои зависат само од напоните и отпорностите во колото во кое е приклучен. Ова поведење на транзисторот е спротивно на претходното и тој во колото се однесува како куса врска.

Ако на слика 2.4, при вклучени прекинувачите P1 и P2, колекторот и емитерот си ги заменат местата, транзисторот ќе се поларизира во **инверзното активно подрачје**. Сега емитерот и колекторот си ги менуваат улогите, но тоа доведува до некавалитетно поведење бидејќи колекторот е лош “емитирач” на носители, а емитерот лош “собирач (колекционер)”. Ако не внимаваме, ова може лесно да ни се случи при поврзување на транзисторот во некое коло, па може да си помислиме дека тој е неисправен.

## 2.1.2. Струи кај транзисторот

Ако прекинувачот P<sub>2</sub> се остави отворен (базата виси), напонот колектор-емитер ќе се распредели меѓу двата споја така што скоро цел ќе се појави на инверзно поларизираните спој колектор-база, а база-емитер ќе биде сосем малку директно поларизиран поради што ќе тече мала колекторска струја  $I_{CE0}$  наречена “**струја колектор-емитер при отворена база**”.

Инверзната струјата  $I_{CBO}$  е “струја колектор-база при отворен емитер”, колекторска струја со мала вредност која тече низ инверзно поларизируваниот спојот колектор-база при отворен емитер (емитерот виси).

Кога ја дискутираме работата на транзисторот во нормалното активно подрачје, видовме дека скоро целата струја што тече низ емитерот ( $I_E$ ) тече и низ колекторот ( $I_C$ ). Разликата меѓу тие две струи ја чини базната струја ( $I_B = I_E - I_C$ ). Меѓу струите на транзисторот во нормалното активно подрачје постои линеарна зависност прикажана со релацијата:

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1)I_{CBO}$$

која поради малата вредност на струјата  $I_{CBO}$ , во најголем број случаи може да се упрости на:

$$I_C \approx \beta I_B.$$

Оваа релација ја извеле научниците Еберс и Мол според кои равенките за напоните и струите кај транзисторот, т.н. модел на транзисторот, се нарекуваат “Еберс-Молов модел”.

Параметарот  $\beta$  се нарекува коефициент на струјно засилување на транзисторот. Неговата вредност се движи во широк опсег на толеранции, што произлегува од варијациите во технолошкиот процес, а претставува предизвик за проектантите на склопови со транзистори. Во следната табела се дадени каталожки податоци транзистори и вредности на  $\beta$  како клучен параметар.

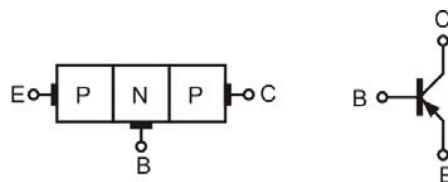
Ознака	за $I_C$ (mA)	за $U_{CE}$ (V)	$\beta$	Категорија (употреба)	Можна замена
BC107	2	5	125-260	Аудио, за мали моќности	BC182 BC547
AF240	2	10	50	Засилувач во UHF-подрачје	/
BC182	2	5	125-260	За општа намена, за мали моќности	BC107 BC182L
BC547B	2	5	110-450	Аудио, за мали моќности	BC107B
BC875	7	10	2000	Нискофреквентен аудио засилувач	BC876
BF421	25	20	>40	Излезен видеозасилувач во ТВ-приемници	/

### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

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

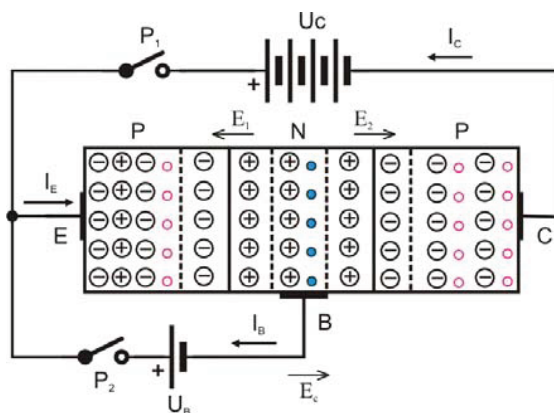
PNP транзисторот претставува “сендвич” од два PN-споја, со заедничко N-подрачје. Неговата структура и шематскиот знак се дадени на **слика 2.5**.



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 во спротивна насока од онаа кај NPN-транзисторот. Концентрацијата на акцептори во емитерот кај него е многу поголема од концентрацијата на донори во базата, а таа пак е многу поголема од концентрацијата на акцептори во колекторот, што значи дека овде главната струја е струјата на празнините.

За разјаснување на процесите што се одвиваат во PNP-транзисторот ќе се послужи́ме со шемата дадена на **слика 2.6**.



Слика 2.6: PNP- транзистор поларизиран во нормално активно подрачје.

На сликата можеме да забележиме дека двата извори на напон се поставени обратно, а исто така обратно се означени и техничките насоки на струите низ неговите приклучоци. Ваквата поставеност на напоните при вредности  $U_C > U_B$  обезбедува поларизација во нормалното активно подрачје. Целокупната дискусија што ја направивме претходно за NPN-транзисторот може да се примени и кај PNP-транзисторот. Сега наместо електрони емитерот ќе емитира празнини кои што минуваат низ тенката база и преминуваат во колекторот. Тие сега претставуваат основни носители на струјата во транзисторот. За струите исто така ќе важат Еберс-Моловите релации.

Патем, ако ги споредиме насоката на стрелката од емитерот во шематската ознака на транзисторот (слика 2.5) и техничките насоки на струите прикажани на слика 2.6, ќе видиме дека се поклопуваат. Ова може да се провери и кај NPN транзисторот (слика 2.1 и слика 2.4). Сепак, теба да укажеме дека во практиката се користат и референтните насоки за струите кај транзисторот. Според референтните насоки се зема дека сите струи влегуваат во транзисторот. Затоа кај нив постојат и позитивни и негативни вредности (за разлика од техничките кои секогаш имаат позитивни вредности). На пример, според референтните насоки, колекторската струја кај NPN-транзисторот е позитивна, а кај PNP-транзисторот е негативна. Референтните насоки ги користат производителите во своите каталози.

### НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

- Транзисторот се наоѓа во нормално активно подрачје кога емитерскиот спој е директно поларизиран а колекторскиот инверзно.
- Кога транзисторот се наоѓа во нормално активно подрачје колекторската струја се управува со напонот база-емитер и скоро не зависи од напонот база-колектор што е суштина на транзисторскиот ефект.
- Кога транзисторот се наоѓа во нормално активно подрачје низ него ќе течат струите  $I_E$  и  $I_C$  со големи јачини при што ќе важи:  $I_E = I_B + I_C$ .
- Транзисторот се наоѓа во подрачје на исклучување кога емитерскиот и колекторскиот спој се инверзно поларизирани.
- Во подрачјето на заситување двата PN-споја се директно поларизирани.
- Транзисторот се наоѓа во инверзното активно подрачје кога емитерскиот спој е инверзно поларизиран а колекторскиот директно.
- Според референтните насоки се зема дека сите струи влегуваат во транзисторот.
- Според “Еберс-Молов модел” основната релација за транзисторот е 
$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1)I_{CBO} \quad \text{т.е.} \quad I_C \approx \beta I_B.$$

### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

1. Каква насока имаат внатрешните полиња  $E_1$  и  $E_2$  во PNP транзисторот во однос на NPN-транзисторот?
2. Кио се подрачјата на работа на транзисторот?
3. Кои носители ја создаваат струјата во NPN-транзисторот?
4. Како се создава струјата  $I_{CE0}$  во транзисторот?
5. Како се создава струјата  $I_{CB0}$  во транзисторот?
6. Која е основната релација за транзисторот според “Еберс-Молов модел”.

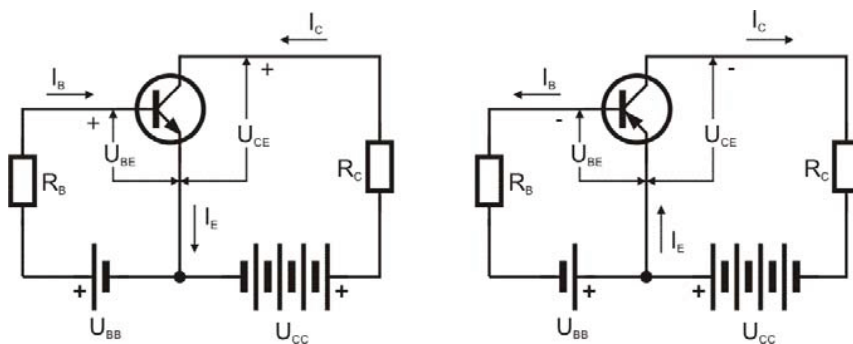
## 2.3. Карактеристики на транзисторот

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.

### 2.3.1. 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-транзисторот, 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.

Транзисторите се нарекува дека се “во спој со заеднички емитер” бидејќи емитерот е заеднички и за базната и за 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

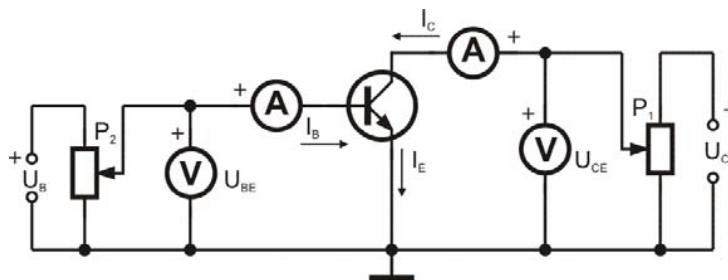
$I_E$  - емитерска струја

На колата се прикажани референтните насоки на струите, кон транзисторот. За решавање на колата препорачливо е да се користи насоката која всушност ја покажува стрелката на емитерот.



### 2.3.2. Статички карактеристики во спој со зеднички емитер

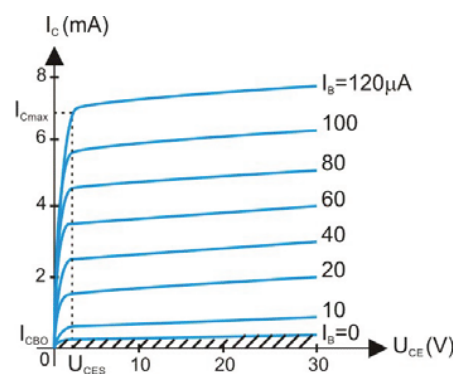
Од горе наведените, четири големини се со јасно изразена меѓусебна зависност. Тоа се: базната струја  $I_B$  и напонот база-емитер  $U_{BE}$ , како влезни, и колекторската струја  $I_C$  и напонот колектор-емитер  $U_{CE}$ , како излезни големини. Нивните зависимости можат да се претстават графички преку 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 карактеристика** 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  $P_2$  се регулира струјата  $I_B$  да биде 0, а со  $P_1$  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  $I_B = 0$ .

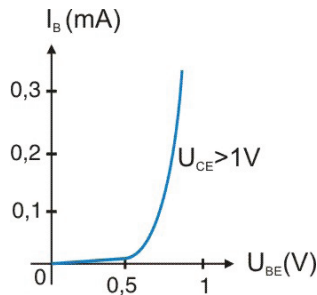
Потоа следува снимање на следната крива, така што со  $P_2$  се регулира да се добие струја  $I_B$  од 10μA, а целата постапка се повторува како и претходно. Со натамошна промена на стру-

јата  $I_B$  на вредностите 20, 40, 60, 80, 100 и 120 $\mu$ A се добиваат сите останати криви на дијаграмот.

Карактеристиката:

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

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 (слика 2.10)**.



Слика 2.10: Влезна карактеристика.

Влезните карактеристики претставуваат множество од криви линии кои скоро се поклопуваат меѓусебно. Ова посебно важи при напони колектор-емитер поголеми од 1V. Затоа на слика 2.10 за влезните карактеристики е нацртана само една линија.

Која било линија од излезните карактеристики  $I_C = f(U_{CE})$  за  $I_B = \text{const.}$ , дава можност за приближно одредување на статичкиот параметар на транзисторот – факторот на струјното засилување во спој со заеднички емитер  $\beta$ :

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

Факторот на струјното засилување се дефинира како однос на колекторската струја  $I_C$  и базната струја  $I_B$  и претставува неименуван број.

Излезните карактеристики даваат можност и за дефинирање на поимите работната точка и работната 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. Влијанието на овој отпорник врз работата на транзисторот 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 приме-на на II Кирхофов закон за излезното коло на транзисторот:

$$U_{CC} - R_C I_C - U_{CE} = 0 \dots\dots\dots(2.3)$$

или во друга форма како:

$$U_{CE} = U_{CC} - R_C I_C \quad (2.4)$$

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

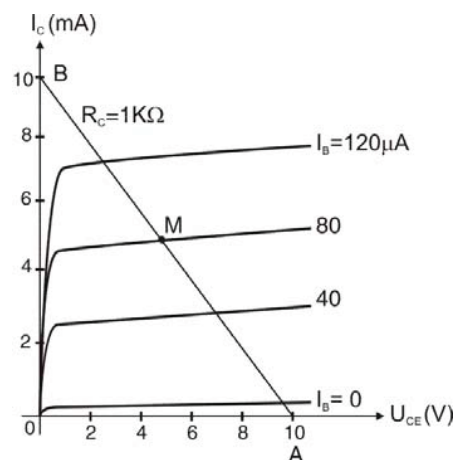
внесеме во системот на излезните карактеристики  $I_C - U_{CE}$  и да ги поврземе. Така, на пример, ако се дадени вредностите за  $U_{CC} = 10V$  и  $R_C = 1K\Omega$ , координатите на точките ќе бидат:

$I_C = 0$ ,  $U_{CE} = 10V$ , за точката А,

$U_{CE} = 0$ ,  $I_C = \frac{10}{1000} = 10mA$ , за точката В.

Добиената состојба се гледа на **слика 2.11**.

Статичката работна точка М на транзисторот претставува пресек меѓу работната права и линијата  $I_B = \text{const.}$  која што одговара на струјата поставена во базното коло. Струјата во базата може лесно да се одреди од базната контура ако се познати напонот  $U_{BB}$  и отпорот  $R_B$  бидејќи напонот на директно поларизираниот спој база-емитер обично се движи во опсегот од 0,6 до 0,7V и се зема како константен (најчесто 0,6V).

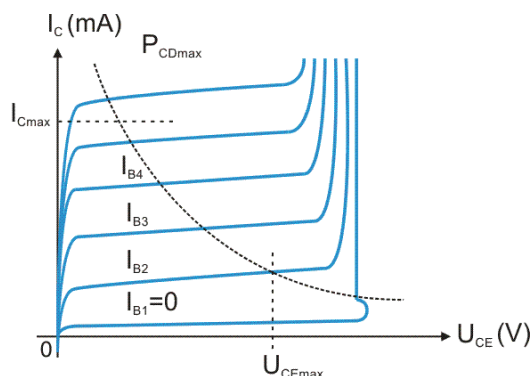


Слика 2.11: Положба на работната права.

### 2.3.3. 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 2.12** се дадени излезните карактеристики на транзистор во спој со заеднички емитер, продолжени до областа на пробивот на колекторскиот спој.



Слика 2.12: Ограничување на работното подрачје на транзисторот.

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.

Моќност на дисипација претставува електрична енергија која во единица време во транзисторот се претвора во топлина која се предава на околината. Оваа топлина се создава на колекторот. Максималната дозволена моќност на дисипација  $P_{CDmax}=U_{CE}I_C$  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 дозволена колекторска струја  $I_{Cmax}$ , максималниот дозволен колекторски напон  $U_{CEmax}$  и максималната дозволена 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.

Во табелата се дадени каталожки вредности за максималните дозволени вредности на напонот, струјата и моќноста за неколку транзистори:

Ознака	$I_{Cmax}$ (mA)	$U_{CEmax}$ (V)	$P_{CDmax}$
AC175	2000	18	1100
AF115	10	20	50
AF139	8	15	60
ASY80	1000	15	500
BC183A	200	45	300

### НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

- **Статички режим на работа имаме кога во колото на транзисторот постојат само едностранни напони и струи со кои се поларизира транзисторот.**
- **$I_C = f(U_{CE})$  за  $I_B = const$  претставува излезна карактеристика на транзисторот.**
- **$I_B = f(U_{BE})$  за  $U_{CE} = const$  претставува влезна карактеристика на транзисторот.**
- **Факторот на струјното засилување се дефинира како однос на колекторската струја  $I_C$  и базната струја  $I_B$  и претставува неименуван број.**
- **Моќност на дисипација претставува електрична енергија која во единица време во транзисторот се претвора во топлина која се предава на околината.**

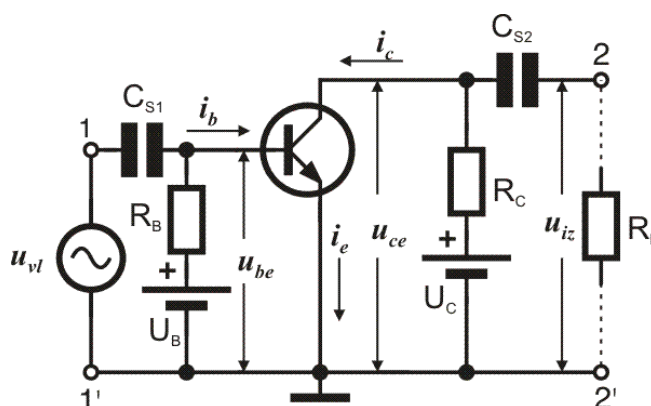
## ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

1. Дефинирај статички и динамички 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  $\beta$ ?
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?

## 2.4. Динамички режим на работа

Сите напори што ги правиме, за да го ставиме транзисторот во статички режим на работа во нормалното активно подрачје се само припрема за тој да може да ја извршува функцијата на засилувач. Со донесување на променливиот напон (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. Тој сигнал се носи на влезот на транзисторскиот засилувачки степен (слика 2.13) и се добива засилен на излезот од тој степен за натамошна обработка (натамошно засилување или за активирање на одреден уред).



Слика 2.13: Транзистор во динамички режим.

Во динамичкиот режим на работа на транзисторот се применува следниот начин на означување на напоните и струите:

$U_{BE}, U_{CE}, U_B, U_C, I_B, I_C, I_E$  - константна еднонасочна вредност;

$u_{vl}, u_{be}, u_{ce}, u_{iz}, i_b, i_c, i_e$  – променлива компонента (мал сигнал);

$U_{vl}, U_{be}, U_{ce}, U_{iz}, I_b, I_c, I_e$  – амплитуда на малиот сигнал;

$u_{BE}, u_{CE}, i_B, i_C, i_E$  – тотална (вкупна) вредност (еднонасочна + мал сигнал).

**Струјното засилување на транзисторот** се дефинира како однос на колекторската струја  $I_C$  и базната струја  $I_B$  во работната точка од излезните карактеристики.

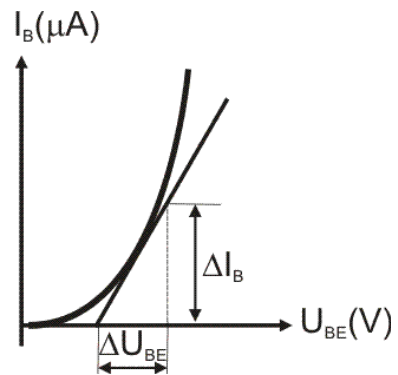
**Излезниот отпор** се одредува со наведнатоста на тангентата на излезната карактеристика во работната точка.

**Влезниот отпор** е соодветно наведнатост на тангентата на влезната карактеристика во работната точка. Тој може да се спореди со динамичкиот отпор кај диодите.

Од влезната карактеристика се одредува како наклон на тангентата на карактеристиката во работната точка (слика 2.14):

2.14):

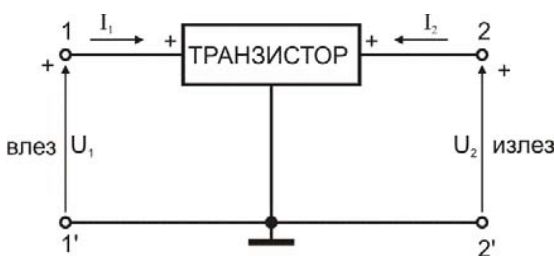
$$R_{vl} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}$$



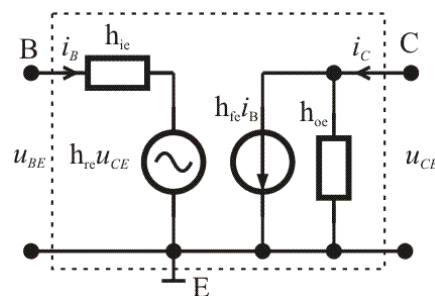
Слика 2.14: Одредување на влезната отпорност на транзисторот.

### 2.4.1. 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 2.15).



Слика 2.15: Транзистор како активен четворопол.



Слика 2.16: Еквивалентно коло на транзисторот со h-параметри.

За анализа на транзисторот во спој со заеднички емитер, кога работи со нискофреквенциски сигнали со мали амплитуди најповолни се h-параметрите (слика 2.16). Шемата со h-параметри важи само за променливите сигнали и служи за поедноставување на анализата на неговата работа така што можат посебно да се разгледува колото за

еднонасочниот од колото за наизменичниот режим. 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. 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:

$$\begin{cases} \Delta U_{BE} = hie\Delta I_B + hre\Delta U_{CE} \\ \Delta I_C = hfe\Delta I_B + hoe\Delta U_{CE} \end{cases} \dots\dots\dots(2.5)$$

Со кратко спојување на излезното коло на транзисторот во однос на наизменичната струја, промената на излезниот напон  $\Delta U_{CE}$  станува нула. Од првата равенка на системот се добива:

$$hie = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \text{ за } \Delta U_{CE} = 0 \dots\dots\dots(2.6)$$

Овој параметар претставува влезен отпор на транзисторот при краткоспоен излез.

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

$$hre = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{CE}}; \text{ за } \Delta I_B = 0 \dots\dots\dots(2.7)$$

Овој параметар претставува коефициент на напонска повратна спрега при отворено влезно коло и тој е неименуван број. Вредноста на овој параметар е многу мала кај современите транзистори па во понатамошните анализи ќе биде изоставен.

За краткоспоено излезно коло, од втората равенка добиваме:

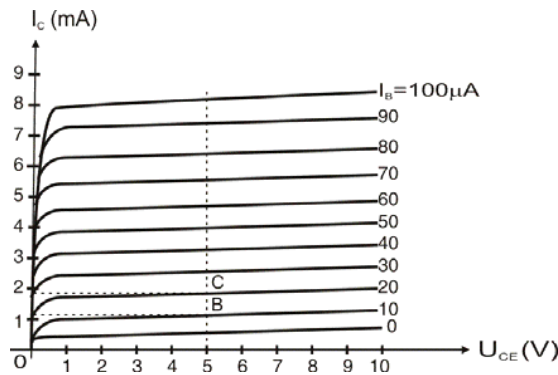
$$hfe = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}; \text{ за } \Delta U_{CE} = 0 \dots\dots\dots(2.8)$$

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

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

$$hfe = \frac{I_C}{I_B} \dots\dots\dots(2.9)$$

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 2.17**).



Слика 2.17: Одредување на струјното засилување.

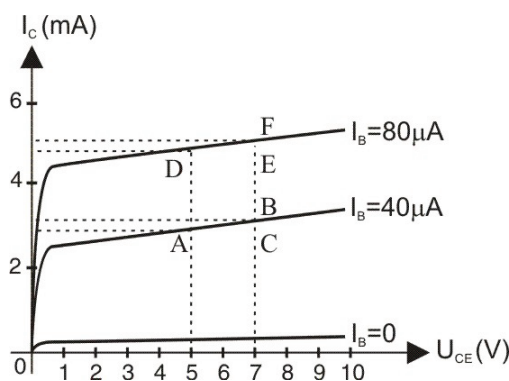
Со пренесување на тие точки по хоризонтала на ординатната оска ќе добиеме промени на колекторската струја, предизвикани од промените на базната струја. Ако се помести статичката работна точка од точката В, во која има базна струја од  $10\mu\text{A}$ , во точката С со базна струја од  $20\mu\text{A}$ , колекторската струја ќе се зголеми од  $1200\mu\text{A}$  на  $1800\mu\text{A}$ , па за струјното засилување добиваме:

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

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.

За отворено влезно коло, од втората равенка се добива:

$$hoe = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}}; \text{ за } \Delta I_B = 0. \dots\dots\dots(2.10)$$



Слика 2.18: Одредување на излезниот отпор на транзисторот.

На **слика 2.18** е даден пример, за одредување на излезниот отпор на транзисторот од излените карактеристики. За напон  $U_{CE} = 5\text{V}$  и за базна струја  $I_B = 40\mu\text{A}$  се добива работната точка А, така што од точката 5V на апсцисната оска се крева вертикала до пресекот со карактеристиката за базна струја од  $40\mu\text{A}$ . 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 80μA, при еднаков напон  $U_{CE}$  од 5V, се добива точката D. Сега промената на колекторската струја  $\Delta I_C$  изнесува 0,3mA, а излезниот отпор ќе биде:

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

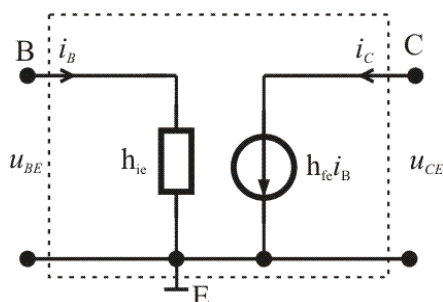
Овој отпор опаѓа со растење на колекторската струја.

Реципрочната вредност на излезната отпорност е всушност излезната спроводливост, односно параметарот  $h_{oe}$ . Поради малата вредност, параметарот  $h_{oe}$  може, во повеќето случаи, исто така да се изостави.

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.

Транзисторот може да се претстави и со други параметри кои што во општ случај 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  $h_{re}$  и  $h_{oe}$  во голем број случаи имаат толку мали вредности што можат да се занемарат. Во тие случаи транзисторот се претставува само со два параметри  $h_{ie}$  и  $h_{fe}$ . Еквивалентната шема на транзисторот со h-параметрите сега добива изглед како на **слика 2.19**.



Слика 2.19: Еквивалентна шема на транзистор со h-параметри.

## НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

- Струјното засилување на транзисторот се дефинира како однос на колекторската струја  $I_C$  и базната струја  $I_B$  во работната точка од излезните карактеристики.
- Излезниот отпор се одредува со наведнатоста на тангентата на излезната карактеристика во работната точка.
- Влезниот отпор е соодветно наведнатост на тангентата на влезната карактеристика во работната точка.
- Параметарот  $h_{ie}$  претставува влезен отпор на транзисторот при краткоспоен излез.
- Параметарот  $h_{fe}$  претставува струјното засилување на транзисторот при краткоспоено излезно коло и претставува неименуван број.
- За режим на работа со мали сигнали транзисторот се претставува само со два параметри  $h_{ie}$  и  $h_{fe}$ .

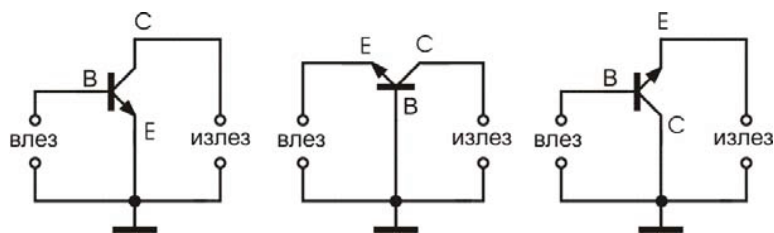
### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

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 за мали сигнали.

## 2.5. Транзистор како засилувачки елемент

Транзисторот е активен електронски елемент со влез и излез. Во електрично коло тој може да се претстави 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 2.20**):

- 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 2.20: Видови споєви на транзисторот.

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

Врз основа на системот на равенките за  $h$ -параметрите, може да се нацрта еквивалентна шема како на слика 2.16 која одговара на генералната шема на засилувач (со струјно засилување  $h_{fe}$ , влезна и излезна отпорност). 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  $h_{ib}$ ,  $h_{rb}$ ,  $h_{fb}$ ,  $h_{ob}$  се однесуваат на спој со заедничка база, параметрите  $h_{ie}$ ,  $h_{re}$ ,  $h_{fe}$ ,  $h_{oe}$  на спој со заеднички емитер и параметрите  $h_{ic}$ ,  $h_{rc}$ ,  $h_{fc}$ ,  $h_{oc}$  на спој со заеднички колектор. Другите конфигурации (зависно од заедничката електрода) можат да се прикажат со  $h$ -параметри за соодветната конфигурација, но параметрите за заеднички емитер се доволни и можат да се употребат за решавање на сите конфигурации.

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

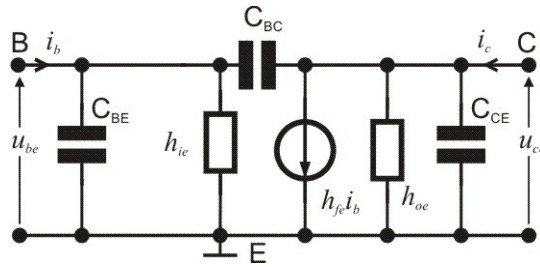
	Заедничка база	Заеднички емитер	Заеднички колектор
$h_i (\Omega)$	21,6	1100	1100
$h_r$	$2,9 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^{-4}$	1
$h_f$	- 0,980	50	-51
$h_o (S)$	$0,49 \times 10^{-6}$	$24 \times 10^{-6}$	$25 \times 10^{-6}$

Ако се познати еден вид  $h$ -параметри, можат да се пресметаат и параметрите од друг вид спрега.

### 2.5.1. 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 2.21**. Дополнителни елементи во однос на колото на слика 2.15 се капацитивностите меѓу базата

и емитерот  $C_{BE}$ , меѓу колекторот и базата  $C_{BC}$  и меѓу колекторот и емитерот  $C_{CE}$ . Капацитивноста меѓу колекторот и емитерот е мала и обично не се зема во предвид (се занемарува).



Слика 2.21: 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.

Фреквенциските карактеристики (амплитудната и фазната) на транзисторот се одредени од еквивалентните капацитивности на PN-споевите и паразитните капацитивности меѓу електродите.

### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

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

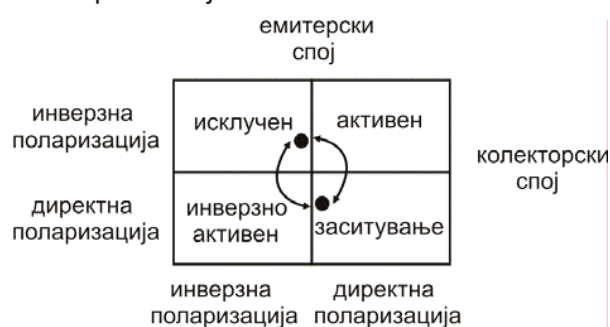
## 2.6. Транзистор како прекинувачки елемент

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 дигиталните логички кола, а тоа е инверзија на сигналот, односно промена од 0 на 1 или од 1 на 0.

Транзисторот, 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.

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 активно подрачје, инверзното активно подрачје или во режим на неспроведување.

На **слика 2.22** шематски е прикажано дефинирањето на режимите на работа. Режимот исклучен се дефинира со инверзна поларизација на емитерскиот и на колекторскиот спој. Во овие услови транзисторот се однесува како **отворен прекинувач**. Нормалното активно 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.



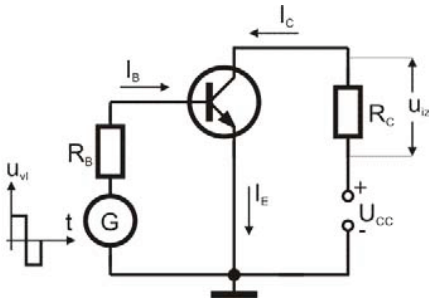
Слика 2.22: Шематски приказ на режимите на работа.

Состојбата исклучен и заситување се од примарна важност за транзистор како прекинувач. Кога е во состојба исклучен, 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.

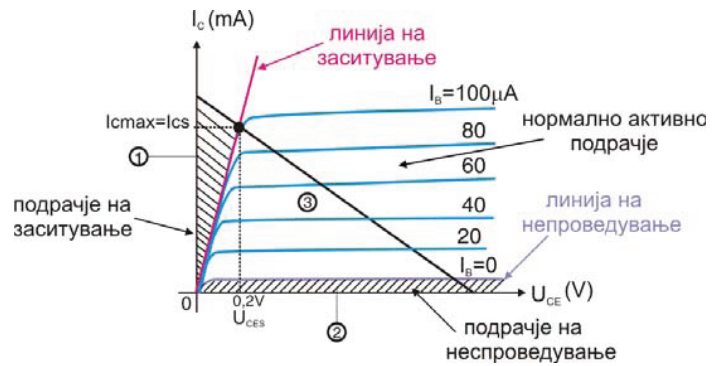
### 2.6.1 Прекинувачко коло со транзистор во спој со заеднички емитер

Во прекинувачките кола обично се користи транзистор во спој со **заеднички емитер** (**слика 2.23**). Во колото на базата е ставен извор на напон со правоаголна форма 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 2.24**. На дијаграмот се маркирани делови на работната линија, кои припаѓаат на три области: 1 – област на заситување, 2 – област на неспроведување и 3 – област на нормално активно подрачје.



Слика 2.23: Транзистор како прекинувач.



Слика 2.24: Дијаграм на работни подрачја.

Кога транзисторот работи како засилувач работната точка се движи по работната права следејќи ги промените на сигналот. Малите промени на сигналот прават мали поместувања околу почетната точка (т.е. статичката работна точка). Тогаш за транзисторот велиме дека работи во режим на мали сигнали. Ако се зголеми амплитудата на сигналот, работната точка ќе почне да се приближува до границите со подрачјата на непроведување и на заситување. При импулсни сигнали со големи вредности работната точка ќе почне да прескокнува од едната до другата граница минувајќи брзо низ нормалното активно подрачје. Во овој случај велиме дека транзисторот работи во режим на големи сигнали.

Така престојот во нормалното активно подрачје се трансформира во “преодна состојба”, а двете работни состојби се претставени со крајните точки од работната отсечка (пресеците на работната права со карактеристиката  $I_B=0$  и со вертикалната линија од карактеристиките).

### Подрачје на непроведување

При негативен влезен напон и спојот база-емитер е инверзно поларизиран па низ базата течат инверзните струи на двата PN-споја. Бидејќи кај современите транзистори тие се многу помали од струите на транзисторот кога тој проведува, ќе земеме дека струјата во базата е 0. Со тоа, подрачјето на непроведување на транзисторот во излезните карактеристики е претставено со хоризонталната линија  $I_B=0$ .

Во практиката (пред сè кај дигиталните кола) се зема дека транзисторот не проведува сè додека колекторската струја не достигне 1% од максималната струја во колото. Тоа дозволува напонот на базата кај исклучен силициумски транзистор да достигне и до 0,5V, но за да бидеме сигурни дека е исклучен пожелно е да не отстапува многу од 0V.

При претходно кажаните услови германиумските транзистори бараат мала негативна вредност за напонот база-емитер.

### Подрачје 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  $I_{BS}$ , а во колото колектор емитер протекува струја  $I_{CS}$ . Работната точка се поместува во областа на заситувањето.

Состојбата на заситувањето се карактеризира со мали напони  $U_{CES}$  на колекторот (околу 0,2V кај силициумските транзистори). Во графикот на излезните карактеристики таа претставува скоро вертикална линија во која се влеваат хоризонталните линии (означена со линија на заситување на сликата). Линијата е позиционирана околу вредноста  $U_{CES}$ , а нејзиниот пресек со работната права одговара на најголемата струја што може да протече во колекторот во соодветното електрично коло:

$$I_{CS} = \frac{(U_{CC} - U_{CES})}{R_C}.$$

Од карактеристиките може да се види и базната струја при која транзисторот бил доведен во подрачјето на заситување. За неа сеуште важи релацијата за нормалното активно подрачје:

$$I_{BS} = \frac{I_{CS}}{\beta}.$$

На таа вредност одговара соодветна позитивна вредност на импулсот во влезното коло. Ако импулсот има поголема вредност, тогаш и базната струја ќе биде поголема, додека колекторската струја не може понатаму да се зголемува. Во тој случај велиме дека транзисторот влегува подлабоко во заситување, а равенството станува неравенство:

$$I_{BS} \geq \frac{I_{CS}}{\beta}.$$

Отпорноста на транзисторот во заситување се пресметува според:

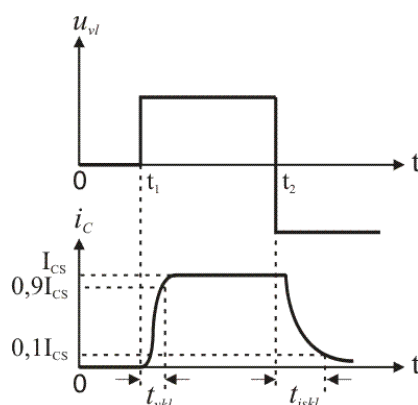
$$R_{sat} = \frac{U_{CES}}{I_{CS}} \dots \dots \dots (2.11)$$

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.

### 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 2.25**. Како што се гледа од сликата, колекторската струја ја достигнува максималната вредност  $I_{CS}$ , со задоцнување  $t_{vk}$ . Ова задоцнување се должи на времето што им е потребно на носителите емитирани од емитерот со дифузното движење низ базата да пристигнат до

колекторот. Нешто помало влијание имаат и сопствените капацитивности на споевите на транзисторот.



Слика 2.25: 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 од завршувањето на импулсот до 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.

## НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

- Кога транзисторот се наоѓа во подрачје на исклучување, тој се однесува како отворен прекинувач.
- Во подрачјето на заситување транзисторот се однесува како затворен прекинувач.

## ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

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?



## 2.7. 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.

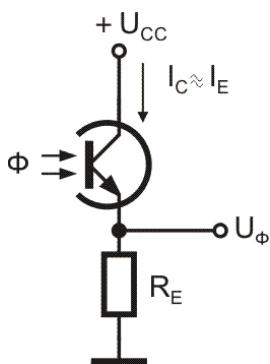
Карактеристиката на релативната осетливост на фототранзисторот, дефинирана како однос на фотострујата  $I_{\phi}$  за која и да е бранова должина на светлината наспроти максималната вредност  $I_{\phi\text{max}}$  е дадена на **слика 2.26**. Таа покажува како фототранзисторот реагира на светлина со разни бранови должини.



Слика 2.26: 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 треба да 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 2.27**. 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  $I_{\phi}$  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.



Слика 2.27: Фототранзистор во електрично коло.

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.

Каталошки податоци на неколку видови фототранзистори:

Ознака	$I_C$ (mA) при осветлување од 1KLux, и $U_{CE}=5V$	$I_{CEO}$ ( $\mu A$ )	$U_{inv}$ (V)
BPV22	5,7	0,1	20
BPX70	0,1 - 0,7	0,1	20
BPX72	0,5 - 3	0,1	20
BPX381	0,4 - 3,2		50
BPX431	1,6 - 12,5		50

### НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

- Фототранзисторот е биполарен транзистор со колекторска струја пропорционална на светлосниот флуks, кој паѓа на површината на колекторскиот спој.
- Кога транзисторот не е осветлен, ќе тече само инверзната струја и таа ја претставува струјата на "темно".
- Фототранзисторите најчесто се употребуваат во прекинувачки кола, каде што нивната нелинеарност не создава проблеми.

### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

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?

## 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 слоен **FET** (**JFET** - **J**unction **F**ield **E**ffect), во кој алуминиумската плоча е заменета со PN-спој. Основна карактеристика на овој транзистор е тоа што струјата низ него е формирана само од еден вид полнежи. 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.

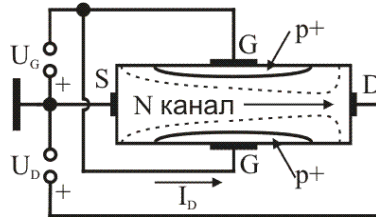
Постојат два вида униполарни транзистори: **спојни FET-ови** (JFET) и **MOSFET-и** (**M**etal – **O**xide – **S**emiconductor **FET**).

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

MOS транзисторите со ефект на поле се применуваат во прекинувачките кола кога не се бараат специјално големи брзини (што важело порано), но денес со мосфети (од легура на Si-Ge) се градат процесорите за фреквенции од ред на гигахерци, како и сложени дигитални кола со голем број компоненти.

## 2.8.1. Структура и принцип на работа на FET

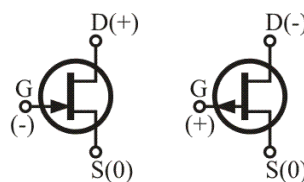
Структурата на FET е прикажана шематски на **слика 2.28**. Тој е составен од тенка плочка со правоаголен пресек од силициумски полупроводник од N или од P-тип. На двете спротивни површини (на сликата спротивни по вертикала) на плочката е нанесен полупроводник, спротивен од оној од кој е направена плочката и се формирани два PN-споја. Тие две области меѓусебно се сврзани преку металните приклучоци и претставуваат влезна електрода, наречена **гејт (G)**.



Слика 2.28: Структура на FET.

На другите краеве на плочката 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 плочката, разликуваме N-канален FET со N-тип полупроводник на плочката и P-канален FET, со P-тип полупроводник на плочката. Графичките симболи на двата вида FET се дадени на **слика 2.29**.



Слика 2.29: Шематски симбол на N-канален и P-канален FET.

Ако се прави паралела со биполарниот транзистор, гејт електродата одговара на базата, сорсот на емитерот, а дрејнот на колекторот. Изворот на еднонасочен 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 ограничиме само на N-FET.

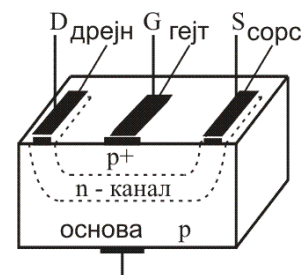
Кога нема напон меѓу гејтот и сорсот, или кога гејтот кратко е споен со сорсот, каналот е широко отворена патека за електроните да течат од сорсот кон дрејнот под

влијание на изворот  $U_D$ . При помали напони на дрејнот јачината на струјата на дрејнот  $I_D$  зависи само од напонот на изворот  $U_D$  и отпорноста на полупроводникот на каналот.

Со приклучување на изворот  $U_G$ , како на слика 2.28, двата PN-споја инверзно се поларизираат и по должината на споевите се создава бариера. Полупроводникот на каналот е формиран со мал процент на донори, а областа на гејтот е со поголем процент на акцептори, бариерата повеќе се шири во областа на каналот отколку во гејтот. Електроните во каналот се оддалечуваат од границата на бариерата кон средината на каналот. Каналот станува стеснет со проширувањето на бариерата, 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.

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 инверзниот напонот на PN-спојот меѓу гејтот и дрејнот.

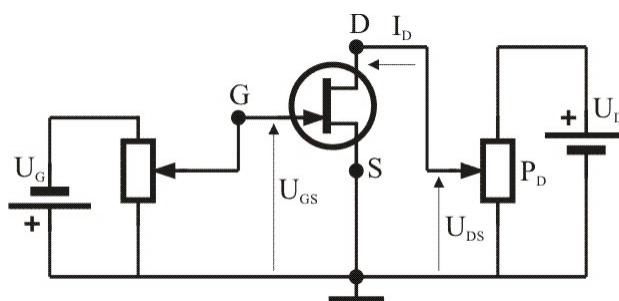
Една можна реализација на N-FET е дадена на **слика 2.30**. На основата или супстратот се додава примеса со која се создава n-регионот на каналот со мала дебелина (околу  $1\mu\text{m}$ ), потоа со следното додавање на акцепторски примеси се формира p-регионот на гејтот. На површината се ставаат метални контакти за изводите на гејтот, сорсот и дрејнот.



Слика 2.30: Структура на N-FET.

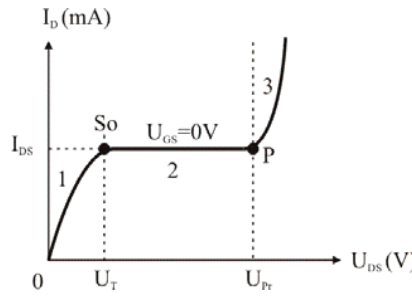
## 2.8.2. Статички карактеристики на FET

Од статичките карактеристики на FET, битни се карактеристиките  $I_D - U_{DS}$  и  $I_D - U_{GS}$ , при што со  $I_D$  е означена излезна 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 2.31**.



Слика 2.31: 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  $U_{GS} = \text{const}$ . Излезната карактеристика  $I_D = f(U_{DS})$  за  $U_{GS} = 0$  ќе има изглед како на **слика 2.32**.

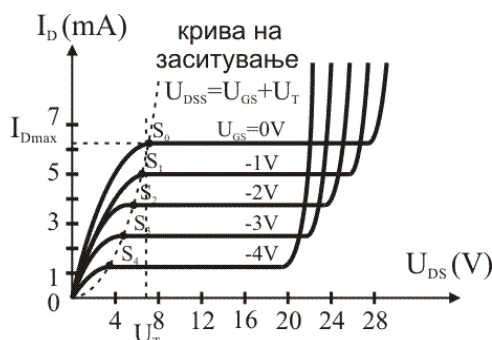


Слика 2.32: Излезна карактеристика на FET.

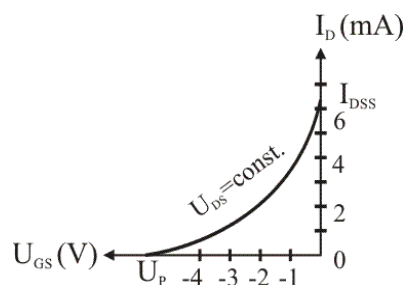
За мали напони  $U_{DS}$ , каналот се однесува како отпорност, што придонесува карактеристиката да има линеарен тек. Тој дел од карактеристиката ја дефинира областа на активна отпорност (означена со 1 на сликата). Со зголемувањето на напонот  $U_{DS}$  се зголемува инверзната поларизација на PN-спојот гејт–дрејн и се проширува бариерата. 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 бариери речиси се допираат. Струјата  $I_D$  во каналот има вредност  $I_{DS}$  и не се менува со зголемувањето на напонот  $U_{DS}$ . На карактеристиката тоа е делот означен со 2 и е наречен област на заситување или подрачје на константни струи.

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 дрејнот 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 дрејнот.

На **слика 2.33** се дадени комплетните карактеристики  $I_D = f(U_{DS})$  за  $U_{GS} = \text{const}$ . Областа на активна отпорност на карактеристиките е одделена од областа на заситување со кривата на заситување, нацртана со испрекината линија.



Слика 2.33: Фамилија струјно-напонски карактеристики.



Слика 2.34: Преносна карактеристика на FET.

Во поголемиот дел на карактеристиките од слика 2.33, 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.

Преносната карактеристика  $I_D = f(U_{GS})$  за  $U_{DS} = \text{const.}$  е дадена на **слика 2.34**.

Статички параметри на транзисторот се:

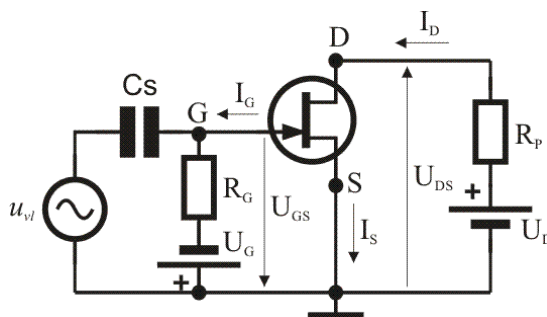
- Струјата при целосно отворен канал ( $I_{DSS}$ ) која се добива на слика 2.34 во пресек со ординатата, а на слика 2.33 е означена со  $I_{Dmax}$ .
- Напонот на допир т.е. целосно затворен канал ( $U_P = \text{pinch-off voltage}$  – напон на гејтот при кој фетот е комплетно исклучен) кој се добива на слика 2.34 во пресек со апсцисата.

Овие параметри се даваат во каталозите, на пр., за BF245 изнесуваат:

Ознака	Тип	Куќиште	$I_{DSS}$ (mA)	при $U_{GS}$ (V)	при $U_{DS}$ (V)	$U_P$ (V)	при $U_{DS}$ (V)	при $I_D$ (nA)
BF245A	N	TO-92	2 до 6,5	0	15	-0,4 до -2,2	15	10
BF245B	N	TO-92	6 до 15	0	15	-1,6 до -3,8	15	10
BF245C	N	TO-92	12 до 25	0	15	-3,2 до -7,5	15	10

### 2.8.3. FET во динамички режим на работа

Електричната шема на **слика 2.35** 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 предизвикуваат мали промени на еднонасочните вредности.



Слика 2.35: Електричната шема на колото на FET во динамички режим на работа.

Динамичката влезна отпорност на FET може да се дефинира како:

$$r_{vl} = \frac{\Delta U_{GS}}{\Delta I_G} \quad \text{за } \Delta U_{DS} = 0 \dots\dots\dots (2.12)$$

но поради екстремно малата вредност на инверзната струја низ гејтот таа има вредност од редот на повеќе гигаоми, поради што редовно колото гејт-сорс се смета отворено.

Преносната спроводливост или транскондуктанса е:

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \quad \text{за } \Delta U_{DS} = 0. \dots\dots\dots(2.13)$$

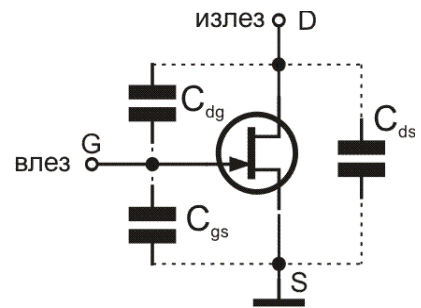
Таа се дефинира со стрмнината на преносната карактеристика, односно наведнатост на тангентата на преносната карактеристика во работната точка и нејзините вредности се движат меѓу 0,1 и 10mA/V.

Динамичката излезна отпорност се дефинира за областа на заситување со:

$$r_{iz} = \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta I_D} \quad \text{за } \Delta U_{GS} = 0. \dots\dots\dots(2.14)$$

и има вредност од неколку десетини до неколку стотини килооми.

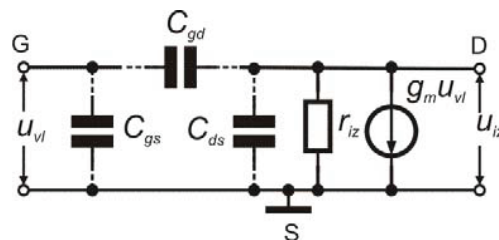
Меѓуелектродните капацитивности имаат значително влијание врз карактеристиките на FET при високи фреквенции. Тие се прикажани на **слика 2.36**. Капацитивноста меѓу гејтот и сорсот  $C_{gs}$  паралелно е врзана на влезот и ја намалува импедансата на FET на високи фреквенции. Нејзината вредност е околу 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 дрејнот 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 2.36: Распоред на меѓуелектродните капацитивности на FET.

### 2.8.3.1. Еквивалентна шема на FET

Целосната еквивалентна шема на FET е дадена на **слика 2.37**.



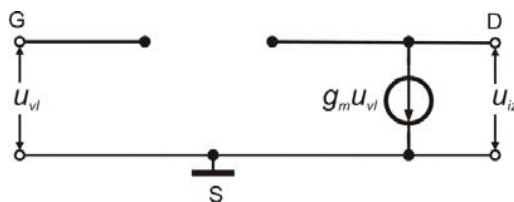
Слика 2.37: Целосна еквивалентна шема на FET.

Во колото се внесени сите претходно дефинирани параметри. Динамичката влезна отпорност на FET-от е изоставена поради нејзината многу голема вредност. 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, а често и големата паралелна отпорност  $r_{izl}$ . Така, добиената шема е прикажана на **слика 2.38**.



Слика 2.38: Еквивалентна шема на FET за ниски фреквенции.

### НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

- Излезната струја на униполарниот се контролира со електрично поле, создадено со влезниот напон.
- 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.
- $I_D = f(U_{DS})$  за  $U_{GS} = \text{const.}$  претставува излезна карактеристика на униполарен транзистор.
- $I_D = f(U_{GS})$  за  $U_{DS} = \text{const.}$  претставува преносната карактеристика на униполарен транзистор.

### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

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-от.
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.

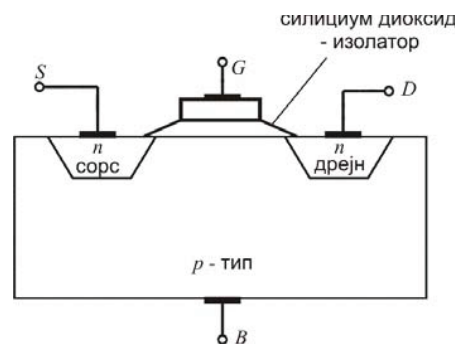
## 2.9. MOSFET

Најмногу користениот транзистор со ефект на поле во областа на модерните дигитални електронски кола има структура составена од полупроводник врз кој се создава силициум диоксидот, а врз него се поставува метален слој, по што и го добил називот MOSFET (Metal – Oxide – Semiconductor FET). Така било во почетокот, а во модерната структура со нови технологии наместо метал, се применува пласт од полисилициум. Меѓутоа, старата ознака MOS останала и понатаму да се употребува.

MOSFET-ите 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 2.39**. Основата или телото е од силициумски полупроводник од P–тип, со мал процент на акцепторски примеси со дебелина од неколку стотини  $\mu\text{m}$ . Со технолошка постапка, наречена оксидација, на горната површина на основата се формира тенок слој на изолација од силициумдиоксид (стакло) со дебелина од околу  $0,1 \mu\text{m}$ . Без оглед на малата дебелина, изолациските способности на силициумдиоксидот се многу добри и отпорноста на овој слој е голема.



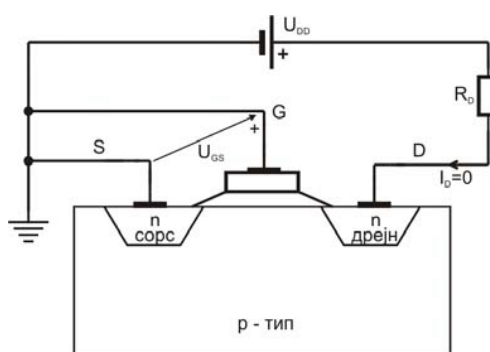
Слика 2.39: Структурата на n–канален MOSFET.

Во натамошната постапка, на горната површина на основата, прекриена со изолацискиот слој, се отвораат два "прозорци" на растојание околу  $10 \mu\text{m}$  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 В. 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 силициумски чип. Освен овој вид со три изводи, се среќаваат и транзистори со четири изводи, каде што изводот В 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 2.39, приклучокот на гејтот и основата како плочи, и оксидниот слој како диелектрик формираат структура на кондензатор.



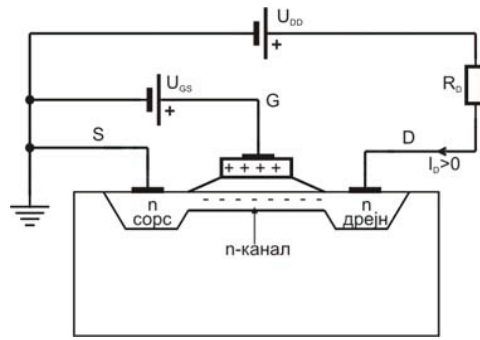
Слика 2.40: Однесување на n-канален MOSFET при  $U_{GS}=0$ .

Сега ќе ја ставиме структурата од слика 2.39 во колото на **слика 2.40** 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.

Меѓутоа, ако се донесе доволно голем позитивен напон на гејтот ( $U_{GS} > U_T$ ) (**слика 2.41**), струја ќе протече во колото меѓу дрејнот и сорсот. Напонот  $U_T$  се вика напон на праг и за современите MOSFET од овој вид се движи во опсегот 0,3 до 0,8V. Струја нема да тече преку изводот на гејтот зашто тој е целосно електрички изолиран од останатиот дел.

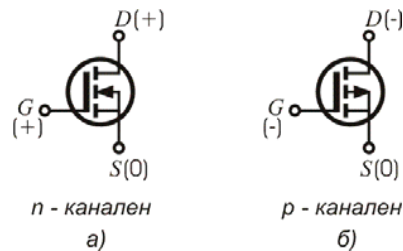
За да се разбере што се случува, ќе се повикаме на претходно опишаната структура на кондензатор. Позитивниот напон донесен на гејтот ќе предизвика полнење на тој кондензатор, што е еднакво на натрупување позитивен полнеж на гејтот и привлекување на исто толкав, но спротивен по знак електричен полнеж на спротивната плоча, односно во појасот на основата меѓу дрејнот и сорсот. Тој појас 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 "во режим на збогатување".



Слика 2.41: Формирање на индуциран канал.

Електричниот симбол на овој вид MOSFET е даден на **слика 2.42(а)**.



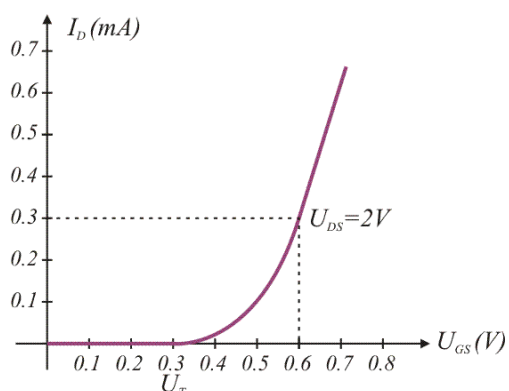
Слика 2.42: Електричниот симбол на MOSFET со индуциран канал во режим на збогатување.

P-канален MOSFET е прецизен комплемент на N-каналниот, којшто е веќе анализиран. Тој се формира со внесување два региона од P–тип на основа од N–тип и со оксиден изолирачки слој наспроти гејтот. Само за споредба, неговиот електричен симбол е прикажан на **слика 2.42(б)**. Струјата низ мосфетот и сите напони се со спротивен поларитет во однос на N-каналниот MOSFET, а направената анализа останува непроменета, со тоа што носителите на полнежот се празнините.

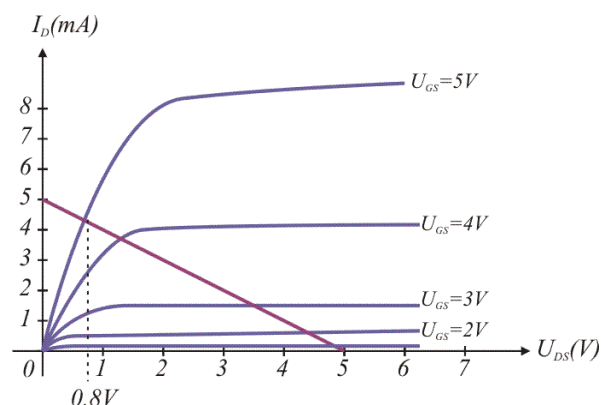
### 2.9.2. Статички карактеристики

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 дрејнот  $I_D$  од напонот меѓу гејтот и сорсот е дадена со преносната карактеристика на **слика 2.43**. За напон  $U_{GS} = 0$ , нема струја во колото дрејн - сорс. Со зголемувањето на напонот  $U_{GS}$  е потребно тој да достигне одредена вредност  $U_T$ , па струјата  $I_D$  да почне да тече. Таа се зголемува нелинеарно со зголемувањето на позитивниот напон на гејтот, бидејќи каналот се повеќе се збогатува со мнозински носители на полнежот и неговата отпорност се смалува.



Слика 2.43: Преносна статичка карактеристика на MOSFET.

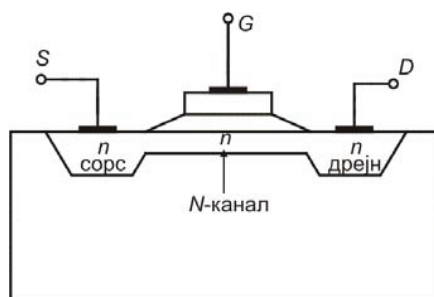


Слика 2.44: Излезна статичка карактеристика на MOSFET со индуциран канал.

Излезната карактеристика  $I_D = f(U_{DS})$  за  $U_{GS} = \text{const.}$  со внесена работна права е претставена на **слика 2.44**. 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

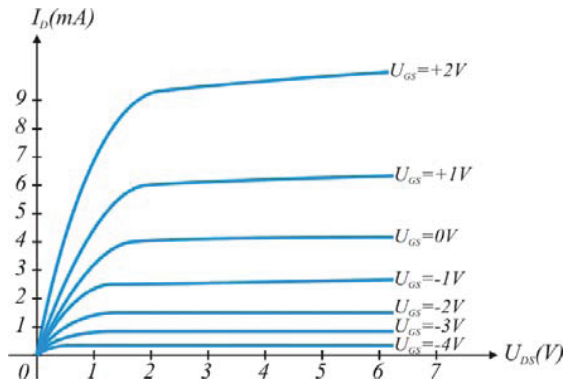
Структурата на овој вид MOSFET се разликува по тоа што регионот на спроводниот канал се вградува со додавање примеси во подрачјето под гејтот за време на неговата изработка. Каналот ги поврзува областите на сорсот и на дрејнот и постои без оглед на тоа каква е поларизацијата на транзисторот (**слика 2.45**).



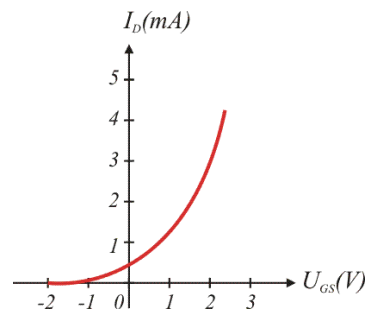
Слика 2.45: MOSFET со вграден канал.

Кога ќе се стави овој транзистор во коло, како на слика 2.41, 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.



Слика 2.46: Излезна карактеристика на MOSFET со вграден канал.



Слика 2.47: Преносна карактеристика на MOSFET со вграден канал.

Излезната карактеристика на MOSFET со вграден канал е дадена на **слика 2.46**, а преносната на **слика 2.47**. 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".

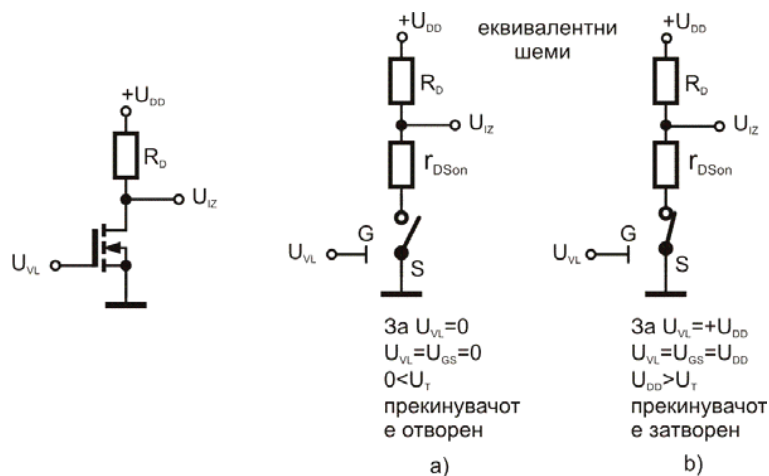
Овој вид MOSFET е посложен за изработка, поради дополнителните чекори за формирање на регионот на каналот. Тоа го прави поскап и неговата примена се ограничува на некои специјални кола.

### 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-от се однесува како отворен прекинувач меѓу дрејнот и сорсот.

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-от како прекинувач може да се прикаже на два начина, преку две еквивалентни шеми (**слика 2.48**):

- а) работа во подрачје на исклучување;
- б) работа во "омски" регион.



Слика 2.48: Еквивалентна шема на MOSFET во подрачје на исклучување и "омски" регион.

Се покажува дека мосфетот работи во "омски" регион 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  $r_{DSon}$ . Вредноста на струјата  $I_D$  зависи од напонот на изворот  $U_{DD}$ . Овој режим се користи како "затворен прекинувач" во дигиталните кола.

За да утврдиме дали MOSFET-от се наоѓа во омското подрачје, го одредуваме напонот  $U_{DS}$  од:

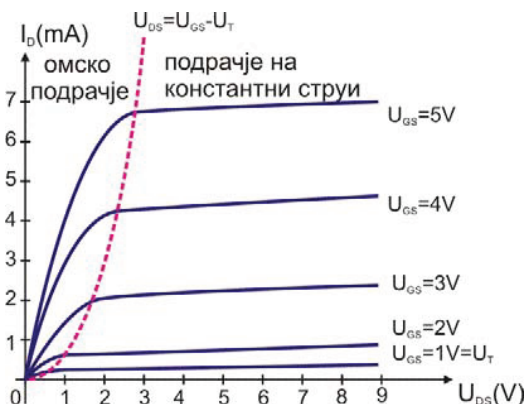
$$U_{DS} = U_{DD} - R_D I_D \quad (2.15)$$

Условот за транзисторот да се најде во "омскиот" регион 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  $U_{GS} \gg U_T$ .

За работа во подрачјето на константни струи 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. Кога MOSFET-от се наоѓа во подрачјето на константни струи, се користи за засилување во аналогните кола.

Во карактеристиките на **слика 2.49** јасно се разграничени омското подрачје и подрачјето на константни струи на MOSFET-от.

Слика 2.49: Омското подрачје и подрачјето на константни струи во излезните карактеристики на MOSFET-от.



## НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

- MOSFET е технолошки унапреден FET со примена на метал – силициум диоксид.
- Кај MOSFET со индуциран канал, каналот во кој тече струјата се формира со поларизација на MOSFET-от.
- Кај MOSFET со вграден канал, каналот се формира во текот на производството на MOSFET-от.
- 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.
- Мосфетот работи во "омски" регион кога е исполнет условот  $U_{DS} < (U_{GS} - U_T)$ .
- Мосфетот работи во подрачјето на константни струи кога е исполнет условот  $U_{DS} > U_{GS} - U_T$ .

### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

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. Големiot 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.

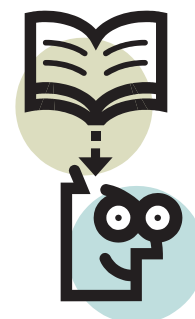


Како прекинувачки елементи, освен за стандардните прекинувачки функции, транзисторите се применуваат во дигиталната технологија за изработка на логички порти како составни делови на комплексни дигитални системи. Така, на пример, еден полупроводнички чип може да содржи и по неколку милиони транзисторски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

Употребата на транзисторите има два основни аспекти: како основни градбени елементи во интегрираните кола (аналогни или дигитални) и како дискретни компоненти во колата за поголеми моќности. Функционално служат како засилувачки елементи или како прекинувачки елементи. Денес целокупниот свет на комуникациите, компјутерството, автоматиката, сообраќајот, радио и телевизиската техника, интернетот, воената технологија, вселенската технологија, но и нашиот секојдневен живот (во домаќинствата) се зависни од „Неговото Величество Транзисторот“.

### Вежби за активно учење:

- 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.



## ТЕМАТСКО УТВРДУВАЊЕ

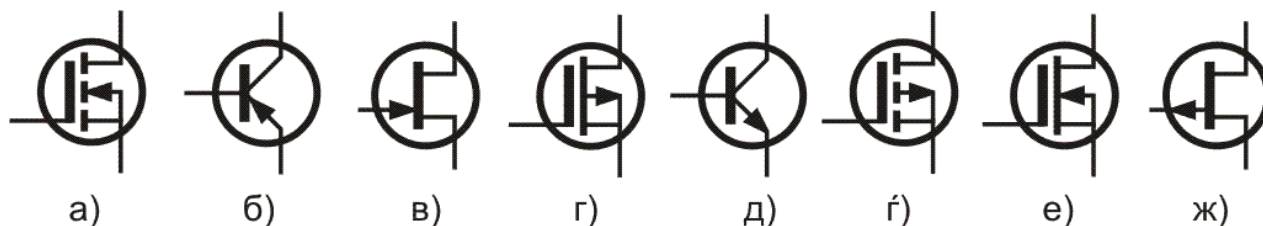
### I Прашања со заокружување

(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)  $h_i = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1}$  за  $\Delta U_2 = 0$ .
2. Коэффициент на напонска повратна спрега.      б)  $h_r = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2}$ ; за  $\Delta I_1 = 0$ .
3. Коэффициент на струјно засилување.      в)  $h_f = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1}$ ; за  $\Delta U_2 = 0$ .
4. Влезна отпорност.      г)  $h_f = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1}$ ; 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  $\Delta I_C$ , и промената на базната струја  $\Delta I_B$  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 во нормално активно подрачје 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.

# П Р И Л О Г 2

**Задачи со решени примери**



1. 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:

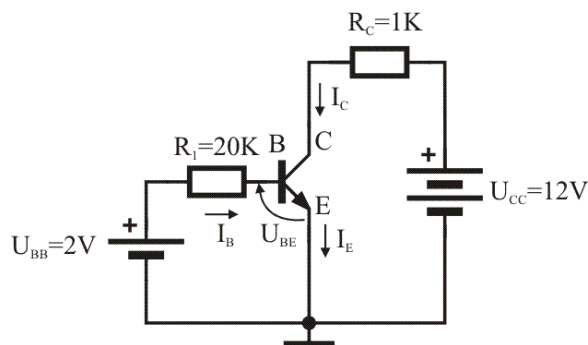
$$I_C = \beta I_B = 100 \cdot 65 \cdot 10^{-6} = 6,5 mA.$$

в) Напонот на колекторот се одредува од колото емитер-колектор:

$$U_{CC} - R_C I_C - U_{CE} = 0$$

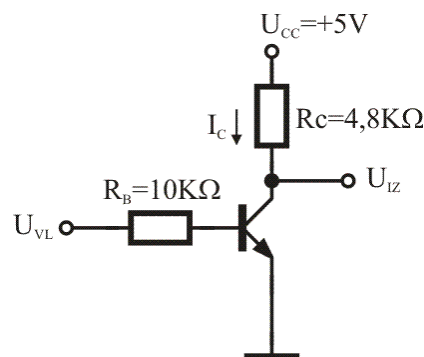
Од каде за  $U_{CE}$  се добива:

$$U_{CE} = U_{CC} - R_C I_C = 12 - 1 \cdot 10^3 \cdot 6,5 \cdot 10^{-3} = 5,5V$$



2. 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:

$$\beta \cdot I_B = I_{CS} \text{ од каде } I_B = \frac{I_{CS}}{\beta} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{50} = 0,02 mA.$$

Минималната вредност на  $U_{VL}$  ќе ја одредиме преку:

$$U_{VL} = R_B \cdot I_B + U_{BE} = 10 \cdot 10^3 \cdot 0,02 \cdot 10^{-3} + 0,6 = 0,2 + 0,6 = 0,8V$$

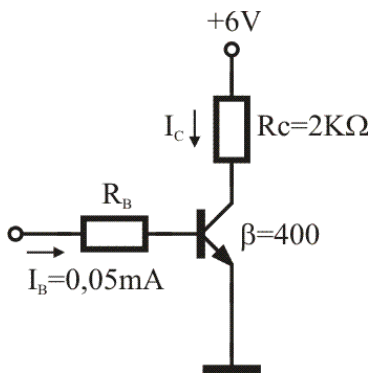
За секоја вредност на влезниот напон и базната струја поголеми од пресметаните, транзисторот ќе биде во длабоко заситување. Со исполнување на овој услов се обезбедува примена на секој транзистор од одбраниот тип со широки толеранции на факторот  $\beta$ . Нивото на излезниот напон од 0,2V се смета за 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  $|U_{VI}| < 0,6V$ , колекторската струја е  $I_C \approx 0$ , а за напонот на колекторот се добива:

$$U_{CE} = U_{CC} \approx U_{IZ}.$$

3. 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:

$$U_{CE} = U_{CC} - R_C I_C$$

$$\text{се добива: } I_C = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{R_C} = \frac{6 - 0,2}{2 \cdot 10^3} = 2,4mA$$

Во колото е дадена вредноста на базната струја  $I_B$  па со примена на релацијата меѓу струите:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}, \text{ за } I_C \text{ би се добила вредност:}$$

$$I_C = I_B \cdot \beta = 0,05 \cdot 10^{-3} \cdot 400 = 20mA$$

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.

4. На сликата со транзисторот во колото се вклучува и се исклучува светилка која има отпор на влакното за греење  $1K\Omega$  и е претставена со отпорникот  $R_L$ . Транзисторот има  $\beta = 50$  и



напон  $U_{BE} = 0,7V$ . Да се определи режимот на работа на колото за базна струја од 0, 40, 100, и 200 $\mu A$ .

**Решение:**

Кога е  $I_B = 0$ ,

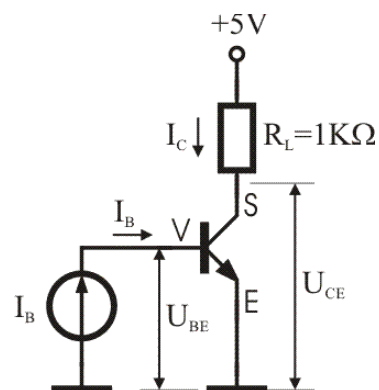
тогаш е и  $I_C = 0$ , нема струја низ отпорникот  $R_L$ , напонот  $U_{CE} = 5V$  и  $U_{RL} = 0$ , транзисторот не спроведува.

За  $I_B = 40\mu A$ ,

струјата  $I_C = \beta \cdot I_B = 50 \cdot 40 \cdot 10^{-6} = 2mA$ ,

$$U_{CE} = 5V - R_L \cdot I_C = 5V - 2mA \cdot 1K\Omega = 5V - 2V = 3V$$

Напонот  $U_R = 5 - U_{CE} = 5 - 3 = 2V$ .



Колекторскиот спој се уште е инверзно поларизиран:

$U_{CB} = U_{CE} - U_{BE} = 3 - 0,7 = 2,3V$  и транзисторот е во активниот регион.

За  $I_B = 100\mu A$ ,

$$I_C = \beta \cdot I_B = 50 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 5mA,$$

$$U_{CE} = 5V - R_L \cdot I_C = 5V - 5mA \cdot 1K\Omega = 5V - 5V = 0,$$

$$U_{CB} = U_{CE} - U_{BE} = 0 - 0,7V = -0,7V.$$

Колекторскиот спој е на границата на директна поларизација, а транзисторот на границата на заситувањето.

На светилката (отпорникот  $R_L$ ) има напон од 5V.

$$I_C = I_{C \max} = \frac{5V}{1K\Omega} = 5mA$$

$$I_{B(ZAS)} = \frac{I_C}{\beta} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{50} = 100\mu A.$$

Таа е вредноста на  $I_B$  која е потребна да го донесе колото на граница на заситување.

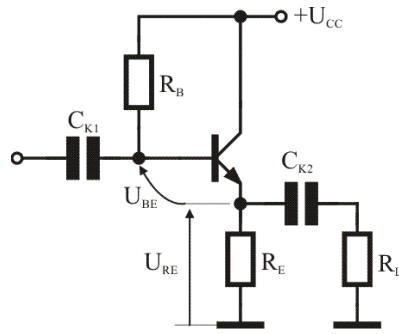
За  $I_B = 200\mu A$ ,

базната струја го носи транзисторот во длабоко заситување,  $I_C$  не може да се зголеми над 5mA, транзисторот работи како затворен прекинувач.

$$I_C = 5mA, I_B = 200\mu A, \beta_{sat} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{200 \cdot 10^{-6}} = 25.$$

$\beta_{sat}$  - форсиран фактор на струјното засилување е секогаш помало од  $\beta$  во нормалното активното подрачје.

5. Да се пресмета вредноста на отпорникот  $R_E$  за даденото коло.  $U_{CC}=6V$ ;  $U_{RE}=2,4V$ ;  $U_{BE}=0,6V$ ;  $\beta=100$ ;  $R_B=300K\Omega$ .



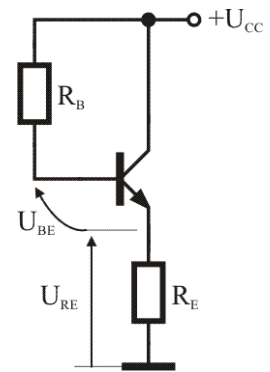
**Решение:**

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}; \text{ од каде што за } I_C \text{ се добива: } I_C = I_B \cdot \beta$$

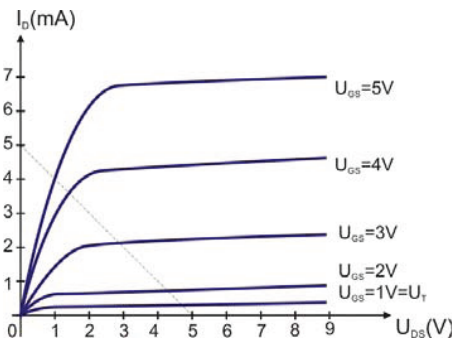
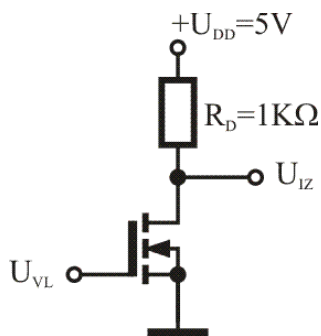
$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE} - U_{RE}}{R_B} = \frac{6 - 2,4 - 0,6}{300 \cdot 10^3} = 0,01mA = 10\mu A$$

$$I_C = I_B \cdot \beta = 100 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 1mA$$

$$R_E = \frac{U_{RE}}{I_C + I_B} = \frac{2,4}{1 \cdot 10^{-3} + 0,01 \cdot 10^{-3}} = 2,38K\Omega$$



6. 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:

$$U_{VL}=U_{GS}=5V,$$

од графикот во пресекот со работната права се утврдува дека ќе биде  $U_{DS}=1V$ , а бидејќи е (исто од графикот)  $U_T=1V$ , транзисторот се наоѓа во омското подрачје ( $U_{DS}<U_{GS}-U_T$ ), струјата низ дрејнтот 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	1V

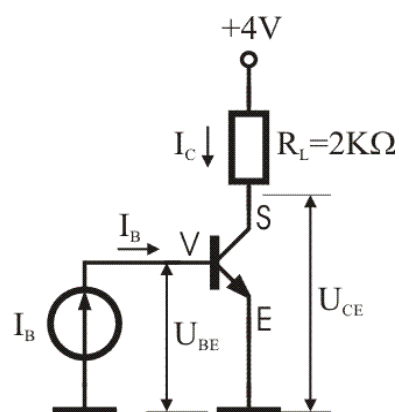
од што може да се заклучи дека ваквото коло работи како инвертор.

7. 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:

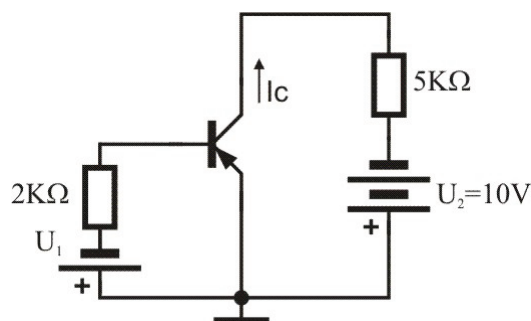
- а)  $I_C=0$ ,  $U_{CE}=+4V$  неспроведување,  
 б)  $I_C=0,8mA$ ,  $U_{CE}=2,4V$  нормално активно подрачје,  
 в)  $I_C=2,4mA$ ,  $U_{CE}=0,2V$  на граница на заситување,  
 г)  $I_C=4mA$ ,  $U_{CE}=0,2V$  во длабоко заситување)



8. PNP транзисторот во колото на сликата ги има следниве карактеристики  $\beta = 75$  и да претпоставиме вредност за  $U_{CE(ZAS)} = -0,1V$ .

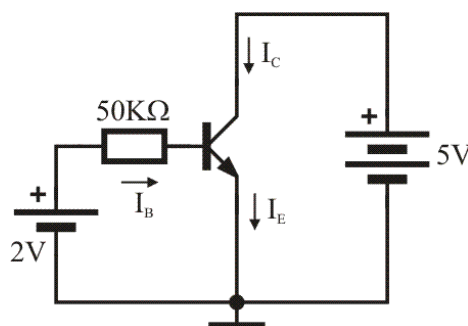
- а) Колкава колекторска струја тече кога е транзисторот во заситување?  
 б) Ако е  $U_{BE} = -0,6V$ , колкава вредност е потребна за  $U_1$  за транзисторот да влезе во заситување?

(Решение: а)  $I_C=1,98mA$ , б)  $U_1=0,9V$ ).



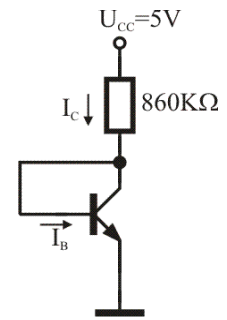
9. NPN транзисторот од сликата има  $\beta = 100$ , а емитерскиот спој е директно поларизиран при  $U_{BE} = 0,6V$ .

- а) Во кој режим работи транзисторот?  
 б) Пресметај ја базната, емитерската и колекторската струја.



(Решение: а)  $U_{CE} = 5V$ , режим на спроведување б)  $I_B = 28\mu A$ ,  $I_C = 2,8mA$ ,  $I_E = 2,828mA$ ).

10. 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.



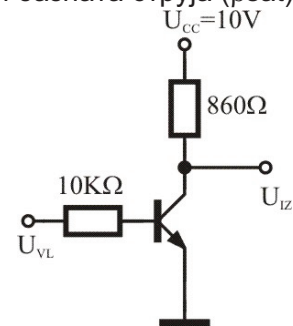
(Решение:  $I_B = 0,1\mu A$ ,  $I_C = 5\mu A$ ).

11. 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  $\beta$ ? Кој е тоа режим на работа?

в) За  $U_{VL} = 2,5V$  да се одреди соодносот меѓу колекторската и базната струја ( $\beta_{sat}$ ) и да се спореди со зададената вредност во нормалното активно подрачје.



(Решение: а) за  $U_{VL}=0,8V$ ,  $U_{IZ}=10-0,86=9,14V$ ,

за  $U_{VL}=1,5V$ ,  $U_{IZ}=3,12V$ ,

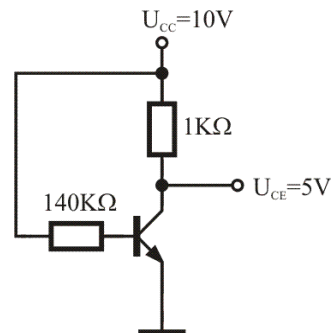
за  $U_{VL}=2V$ ,  $U_{IZ}=0,2V$ ,

за  $U_{VL}=2,5V$ ,  $U_{IZ}=0,2V$ ,

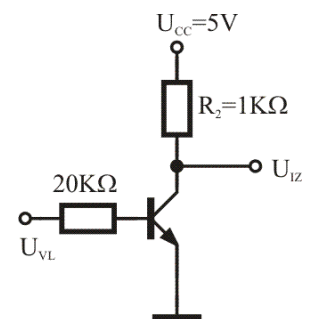
б)  $U_{VL} > 0.8V$

в)  $\beta_{sat} = 50 < 100$ ).

12. Ако е  $U_{BE} = 0,7V$ , пресметај ја вредноста на  $\beta$  за транзисторот во колото на сликата. (Решение:  $\beta=73$ ).



13. Во колото, прикажано на сликата, напонот на вклучувањето на спојот база емитер  $U_{BE}$  е  $0,7V$ ,  $U_{CES}$  е  $0,1V$ , а  $\beta$  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  $U_{VL}=1V$ ,  $U_{IZ}=2V$ ,

$$\Delta U_{vl} = 0,2V \quad \Delta U_{iz} = -0,5V \quad \frac{\Delta U_{iz}}{\Delta U_{vl}} = -10).$$

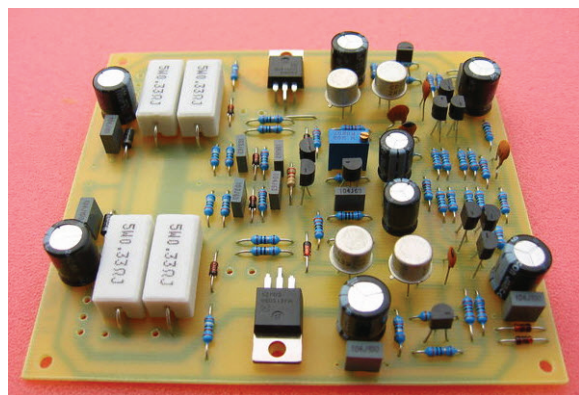
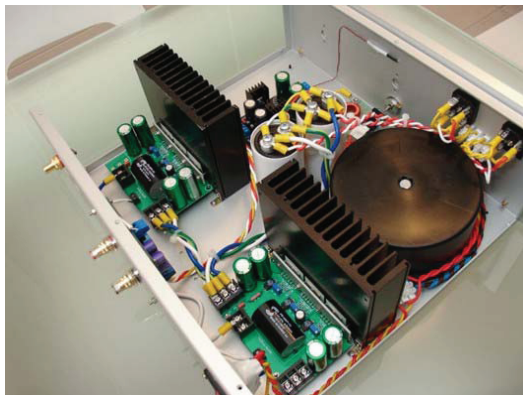
# 3.

## 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;

- да објаснуваш 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 читаш шеми на: инвертирачки и неинвертирачки операциски засилувач, суматор, диференцијален засилувач реализиран со операциски засилувач, струен засилувач, претворувач на струја во напон и претворувач на напон во струја;
- да ја познаваш практичната примена на операцискиот засилувач.

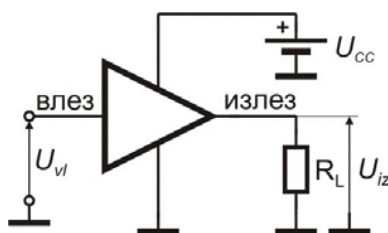


### 3.1. Засилување и улогата на засилувачот

Сè што се случува во природата, а може да се дефинира со непрекинато променливи параметри, како што се температура, притисок, интензитет на светлината и друго, може да се претвори во електричен напон или струја. Таков напон или струја, која на одреден начин се менува со времето, се вика **електричен сигнал**. За добивање на електричниот сигнал се користат соодветни видови сензори или претворувачи, како што е, на пример, фотодиодата или фототранзисторот. За да може сигналот од сензорот да се користи за мерење или за некоја друга управувачка задача, тој треба да се засили на ниво потребно за извршување на бараната функција. Конкретно за фотодиодата, струјата од редот неколку стотици наноампери треба да се зголеми на ниво од неколку ампери, а тоа е речиси сто милиони пати. Такво засилување се прави со електронски уреди – засилувачи.

Суштината на засилувањето е во тоа што не се зголемува 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.

Со засилувачите се засилува напон, струја или моќност, а во некои случаи сигналот се претвора од напонски во струен или обратно. Во општ случај, тие 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.

Во случај кога нè интересира засилување на напон, на влезот од засилувачот се носи влезниот сигнал  $U_{vl}$ , а на неговиот излез се добива сигнал  $U_{iz}$  со иста форма, но со зголемена вредност. За да функционира засилувачот потребна му е енергија што ја добива од еднонасочниот извор на напон. Влезниот и излезниот напон најчесто се мерат во однос на едниот крај од изворот кој што се означува со симболот  $\perp$ . Тој претставува референтна точка во колото со потенцијал  $0V$  и се нарекува **маса**. Функцијата на колото е да ја зголеми амплитудата на влезниот напон земајќи енергија од изворот и да ја предаде на потрошувачот – претставен со отпорникот  $R_L$ . Математички гледано, засилувачот го пресликува влезниот сигнал врз потрошувачот множејќи го со некоја (константна) вредност. Таа вредност всушност е засилувањето на засилувачот.

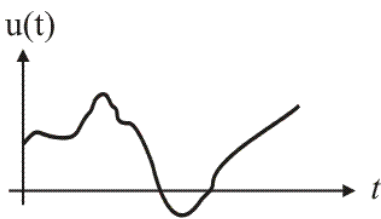


Претходниот пример со фотодиодата бара засилувач со засилување кое што е многу тешко или невозможно да се оствари. Во тој случај може да се употребат повеќе засилувачи со помало засилување поврзани во каскада. Каскадно поврзување се прави така што излезот на претходниот засилувач се поврзува со влезот на наредниот, како на **слика 3.2**. При тоа треба да имаме предвид дека засилувачите може да бидат различни меѓу себе, а посебно првиот (влезниот степен) и последниот (излезниот степен). Да забележиме исто така дека на сликата е употребен правоаголник за означување на засилувачот и не е прикажано напојувањето. Тоа го практикуваме кога не' интересира само да го прикажеме текот на сигналот.

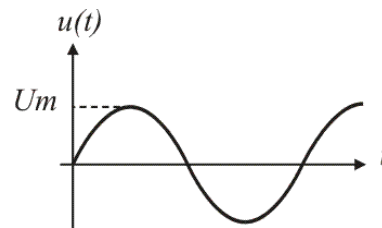


Слика 3.2: Каскадна врска на засилувачи.

Континуирано променлив со времето сигнал се вика **аналоген сигнал (слика 3.3)**, а колата за нивна обработка се викаат **аналогни кола**. Аналогниот сигнал може да има комплексна бранова форма како на **слика 3.3** или да биде повторлив или периодичен, како што е синусоидалниот сигнал од **слика 3.4**. Врз основа на синусоидалниот сигнал се дефинираат карактеристиките на многу електронски кола и системи. Синусниот сигнал се користи за испитување на фреквенциските карактеристики на засилувачите и во практиката се нарекува тест-тон.



Слика 3.3: Континуирана форма на аналоген сигнал.



Слика 3.4: Синусоидална форма на сигналот.

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

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

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

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

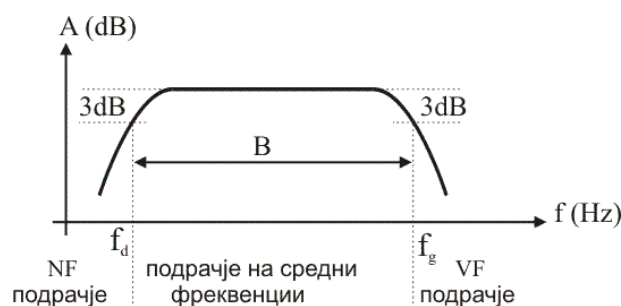


## ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

1. Дефинирај електричен сигнал.
2. Нацртај каскадна врска на засилувачи и објасни го принципот на претворање на светлината во електричен сигнал.

### 3.2. Поделба на засилувачите

Многу важна карактеристика на засилувачот е неговата амплитудна и фазна карактеристика. Иако засилувањето беше претходно дефинирано како константна вредност, во практиката не е така. Имено, ако на влезот се донесат наизменични напони со исти амплитуди и различни фреквенции, на излезот ќе се добијат наизменични напони со истите фреквенции, но со различни амплитуди и различни фази што значи дека засилувањето зависи од фреквенцијата. Зависноста на засилувањето од фреквенцијата се нарекува **амплитудно-фреквенциска карактеристика** (или само амплитудна карактеристика) (слика 3.5).



Слика 3.5: Амплитудна карактеристика на засилувач.

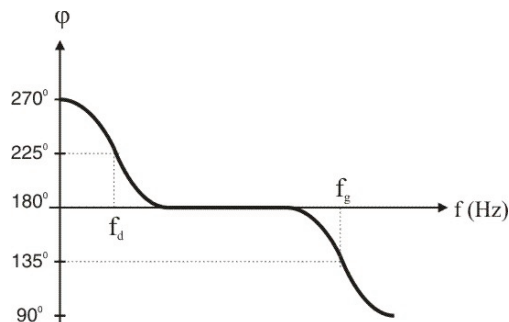
Ниеден реален засилувач не може да го засили влезниот сигнал во неограничен фреквенциски опсег. Во колото на засилувачот, освен транзисторот, кој има ограничувања во однос на фреквенциите кои може да ги засилува, постојат и капацитивности и индуктивности, кои го прават засилувањето зависно од фреквенцијата. 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**  $f_g$  на засилувачот се смета фреквенцијата за која засилувањето опаѓа за фактор 0,707 (или се вели опаѓа за 3dB), 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**  $f_d$ . Разликата меѓу горната и долната гранична фреквенција:

$$B = f_g - f_d \dots \dots \dots (3.3)$$

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 што содржат фреквенции надвор од пропусниот опсег на засилувачот. Така, на пример, ако се засили музика преку телефонски засилувач, таа ќе биде избличена. Тоа ние го чувствуваме како „сиромашен звук“ бидејќи низ засилувачот нема да бидат засилени ниту ниските фреквенции (басовите) ниту високите фреквенции (чинелите).



Слика 3.6: Фазна карактеристика на засилувачот.

**Фазно-фреквенциска карактеристика** (или само фазна карактеристика) (слика 3.6) 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  $45^\circ$ , а за долната се зголемува за  $45^\circ$ . Со зголемувањето и со намалувањето на фазната разлика во однос на  $180^\circ$  се јавуваат фазни избличувања на сигналот.

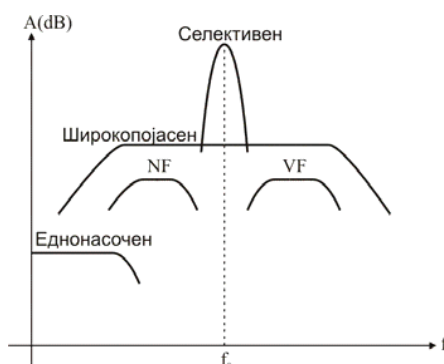
Човечкото уво не е чувствително на фазните избличувања и во аудио-системите таа нема поголемо значење, но кај видео засилувачите и кај импулсните засилувачи има големо значење.

Засилувачите можат да се поделат во неколку групи: според видот на засилувањето, според фреквенцискиот опсег или според режимот на работа.

Првата поделба е на засилувачи на мали и засилувачи на големи сигнали. Засилувачите на мали 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 едена каскада 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 кој најчесто работи како засилувач на големи сигнали.

На **слика 3.7** се прикажани неколку можни амплитудно-фреквенциски карактеристики и соодветните називи за засилувачите со такви карактеристики. Забележливо е дека засилувањето опаѓа и кон повисоките, но и кон пониските фреквенции (освен кај еднонасочните).



Слика 3.7: Идеални амплитудно-фреквенциски карактеристики на различни засилувачи.

Според ширината на фреквенцискиот опсег, засилувачите се делат на: широкопојасни, теснопојасни или селективни, нискофреквенциски, високофреквенциски и на засилувачи на еднонасочен сигнал.

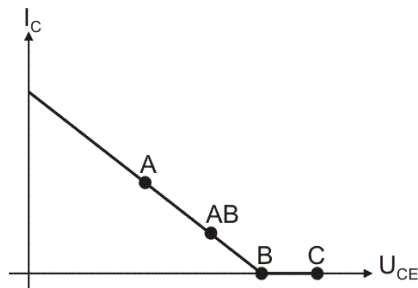
**Широкопојасните** засилувачи можат да засилат сигнали во широк фреквенциски опсег. Такви се засилувачите на видеосигнали (т.н. видеозасилувачи) или засилувачите на импулсни сигнали (т.н. импулсни засилувачи).

**Селективните** засилувачи засилуваат сигнали со тесен фреквенциски опсег околу централната 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 кои го заземаат долниот дел од фреквенцискиот спектар. Нискофреквенциските засилувачи ги засилуваат сигналите со ниски фреквенции какви што се, на пример, аудиосигналите. Постојат различни извори на аудиосигнали (т.н. микрофони). Максималната моќност на тие сигнали 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 телефонијата, фреквенцискиот опсег 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.

Режимот на работа на засилувачот е одреден со положбата на работната точка на транзисторот (транзисторите) од кои е конструиран. Според тоа, засилувачите се делат на засилувачи во класа А, класа АВ, класа В и класа С, а се среќаваат и специјални класи како Е, F, G или D. Местото на работната точка на работната права во излезната, струјно-напонската карактеристика на транзисторот е прикажано на **слика 3.8**. Од сликата се гледа дека работната права, од точката В па натаму лежи на апсцисната оска.



Слика 3.8: 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 транзисторот кај **засилувачот во класа В** се наоѓа на почетокот на работната права. Засилувачот редовно се изведува со два транзистора така што при наизменичен сигнал едниот транзистор ја засилува позитивната, а другиот негативната полупериода на сигналот.

**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 класата В.

Работната точка на транзисторот кај **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.

Класата D е всушност т.н. дигитална класа на засилувач на моќност во која транзисторите работат како прекинувачи и постигнуваат високо искористување на енергијата и мала тежина. Се применува кај аудиозасилувачите во мобилните телефони и кај малите системи за домашно кино (home theatre).

## НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

- Суштината на засилувањето е во тоа што мала промена на влезниот напон и струја предизвикува голема промена на излезниот напон, што се толкува како засилен влезен напон или струја.
- Зависноста на засилувањето од фреквенцијата се нарекува амплитудно-фреквенциска карактеристика.
- Фазно-фреквенциска карактеристика е зависност на фазното поместување на излезниот во однос на влезниот сигнал со промена на фреквенцијата.
- Засилувачите се делат на неколку групи според:
  - а) видот на засилувањето (напонски, струјни и засилувачи на моќност);

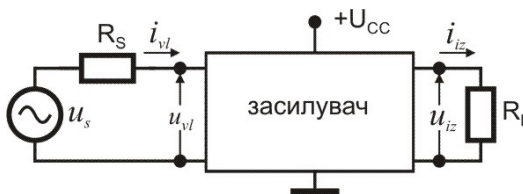
- б) фреквенцискиот опсег (широкопојасни, селективни, засилувачи на ниски фреквенции, засилувачи на високи фреквенции и еднонасочни);
- в) режимот на работа, а тоа значи според положбата на работната точка (класа А, класа АВ, класа В и класа С, а се среќаваат и специјални класи како Е, F, G или D).

### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

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?
4. Какви видови засилувачи постојат според видот на засилувањето?
5. Како се делат засилувачи според ширината на фреквенцискиот опсег?
6. Каде се користат широкопојасните засилувачи?
7. Каде се користат селективните засилувачи?
8. Каде се применуваат нискофреквентните, а каде високофреквентните засилувачи?
9. Каде се наоѓа работната точка на засилувачите во класа А, В, АВ и С на излезната карактеристика на засилувачот?

### 3.3. Параметри на засилувачот

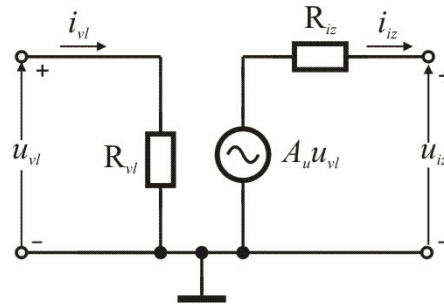
Засилувачите можат да бидат едноставни сколпови со еден транзистор, но и сложени структури од голем број транзистори, кондензатори, калемии и други компоненти. Сепак, нивното поведење во однос на сигналот може да се прикаже поедноставено со помош на едноставно електрично коло наречено четворопол. Компонентите од кои е составен четворополот всушност се параметрите на засилувачот. Напонскиот засилувач претставен преку четворопол, заедно со изворот на сигнал и потрошувачот се прикажани на **слика 3.9**.



Слика 3.9: 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  $R_L$ .

Засилувачот од слика 3.9 се еквивалентира со шемата прикажана на **слика 3.10**.



Слика 3.10: Еквивалентна шема на засилувач.

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

$$R_{vl} = \frac{U_{vl}}{I_{vl}} (\Omega) \dots\dots\dots (3.4)$$

**Напонското засилување** се дефинира како однос на излезниот напон и влезниот напон при отворен излез:

$$A_U = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} \dots\dots\dots (3.5)$$

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

$$A_I = \frac{I_{iz}}{I_{vl}} \dots\dots\dots (3.6)$$

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

$$A_P = \frac{P_{iz}}{P_{vl}} = \left| \frac{U_{iz} \cdot I_{iz}}{U_{vl} \cdot I_{vl}} \right| = |A_U \cdot A_I| \dots\dots\dots (3.7)$$

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

$$A_U (dB) = 20 \log \left| \frac{U_{iz}}{U_{vl}} \right|, \quad A_I (dB) = 20 \log \left| \frac{I_{iz}}{I_{vl}} \right|, \quad A_P (dB) = 10 \log \left| \frac{P_{iz}}{P_{vl}} \right| \dots\dots\dots (3.8)$$

Логаритамската функција претставува инверзна (обратна) функција на експоненцијалната функција.

Коефициентот на корисното дејство  $\eta$  се дефинира како однос на средната моќност (средна вредност на моќноста во една периода) на наизменичниот сигнал, предаден на потрошувачот и на моќноста што се зема од изворот за напојување, изразена процентуално како:

$$\eta = \left| \frac{P_k}{P_o} \right| \cdot 100(\%) \dots\dots\dots (3.9)$$

Излезната отпорност се дефинира со:

$$R_{iz} = \frac{U_2}{I_{iz}}(\Omega) \text{ при } U_S=0 \text{ и } R_L \rightarrow \infty \dots\dots\dots(3.10)$$

Излезната отпорност се одредува така што влезниот наизменичен извор се премостува, се отстранува потрошувачот  $R_L$  на излезот од засилувачот, и на негово место се приклучува напонскиот извор  $U_2$ .

Излезното коло во шемата на слика 3.10 всушност претставува приказ на засилувачот во однос на потрошувачот според Тевененовата теорема.

Од влезната отпорност се бара да има поголема вредност, со што помалку ќе го оптоварува генераторот на сигналот или претходниот засилувачки степен.

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  $180^\circ$ . Бидејќи  $-\sin(a)=\sin(\alpha+180^\circ)$ , јасно е дека засилувачот што има негативно засилување всушност ја врти фазата на влезниот сигнал за  $180^\circ$ .

### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

1. Нацртај ја блок-шемата на засилувачот како четворопол.
2. Кои параметри на синусоидалниот сигнал може да се менуваат?
3. Како се дефинира струјното засилување на засилувачот?
4. Напиши равенка со која ќе го претставиш напонското засилување на засилувачот.
5. Дефинирај го коефициентот на корисно дејство.
6. Напиши релации со кои се дефинира влезната и излезната отпорност.

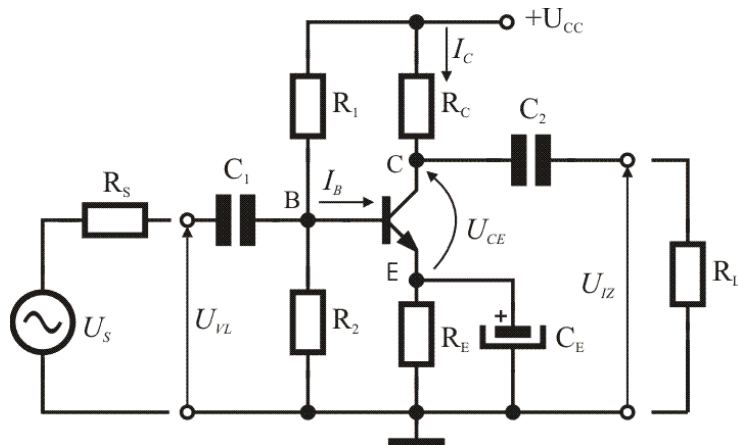
## 3.4. Видови конфигурации на засилувачи

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 врска имаат ниска импеданса и се сметаат за краток спој за наизменичната компонента на сигналот. Од друга страна, 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.

### 3.4.1. Поларизација на транзисторот кај едностепените засилувачи



Оваа конфигурација претставува најчесто употребуван засилувач. Шемата на засилувачот е дадена на слика 3.11.

Слика 3.11: Засилувач со биполарен транзистор во конфигурација со 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 потенцијалот на базата. Со отпорниците  $R_C$  и  $R_E$  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 врска  $C_1$  и  $C_2$ , исто така претставуваат краток спој 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.

Бидејќи практично секогаш е задоволено  $I_C \gg I_B$ , важи релацијата:

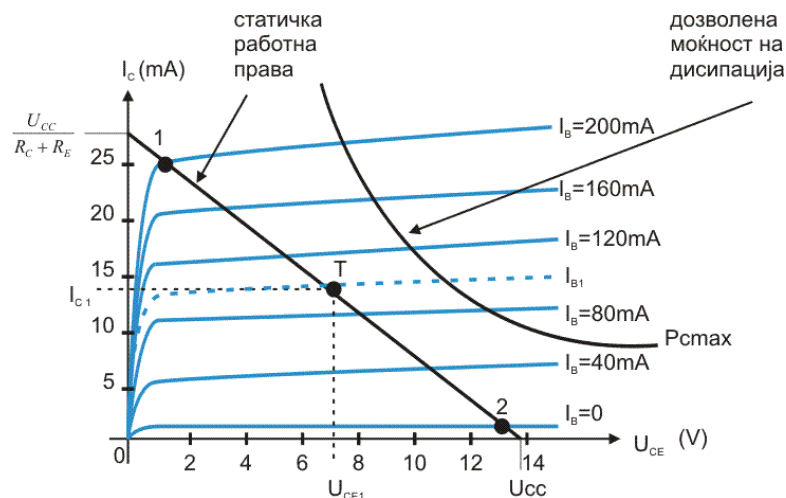
$$U_{CC} = U_{CE} + (R_C + R_E)I_C \dots\dots\dots(3.11)$$

Ова е равенката на статичката работна права што се добива со примена на вториот кирхофов закон во контурата напојување-колектор-емитер. Во излезните карактеристики на транзисторот, за работната права се бира најповолната положба, а тоа е да биде под хиперболата на дозволената моќност на дисипацијата и да обезбеди најголем опсег на движење на работната точка во линеарниот дел на карактеристиките (слика 3.12). 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 3.12: Графичко одредување на статичката работна точка на транзисторот.

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

$$\frac{U_{CC}}{R_1 + R_2} \gg I_B \dots\dots\dots(3.12)$$

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

$$I_{R_1} \approx I_{R_2} \approx \frac{U_{CC}}{R_1 + R_2}, \dots\dots\dots(3.13)$$

а напонот на базата:

$$U_B = U_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \dots\dots\dots(3.14)$$

Напонот на емитерот  $U_E$  е:

$$U_E = U_B - U_{BE} = R_E I_E = R_E (I_C + I_B) \dots\dots\dots(3.15)$$

и така доаѓаме до вредноста на  $R_E$ :

$$R_E = \frac{U_E}{I_C + I_B} \approx \frac{U_E}{I_C} \dots\dots\dots(3.16)$$

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

$$U_C = U_{CE} + U_E \dots\dots\dots(3.17)$$

$$R_C = \frac{U_{CC} - U_C}{I_C}$$

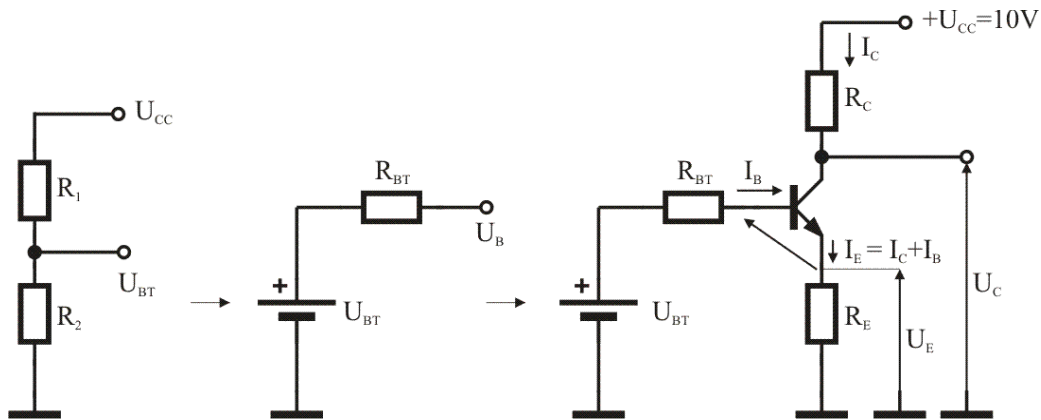
Со вака одбраните вредности за  $R_E$  и  $R_C$  се поставува работната точка, така што да ги задоволи специфицираните услови за поларизација.

Дизајнирањето на засилувачот е комплексна задача во која треба да се разрешат многу компромиси. Опишаната постапка е само пример за еден пристап во кој се прават некои претпоставки: може да се избере напојувањето, може да се изберат базни отпорници така што базната струја да биде занемарлива во однос на струјата низ нив.

Статичката работна права 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  $C_E$ .

**\* Проширени знаења \***

Ако не се применува претпоставката 3.12, колото за поларизација може да се трансформира според Тевененовата теорема (слика 3.13), за да се направи пресметката на струјата  $I_B$ .



Слика 3.13: Електрично коло на засилувачот за одредување на статичката работна точка.

$$U_{BT} = U_{cc} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_{BT} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

За контурата на колото база–емитер важи равенката:

$$U_{BT} - R_{BT} \cdot I_B - U_{BE} - I_E \cdot R_E = 0$$

а за струјата  $I_B$  се добива:

$$I_B = \frac{I_E}{\beta + 1}$$

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

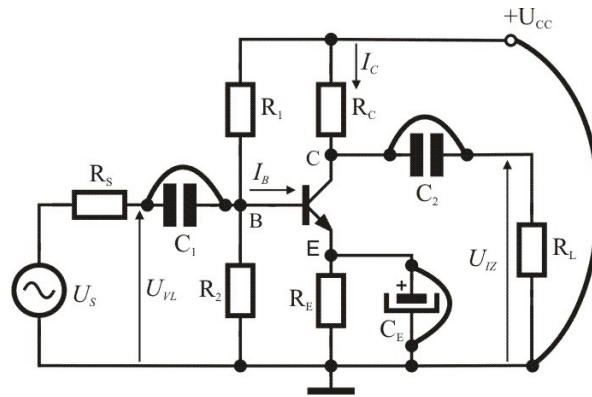
промената на температурата може да дојде до промена на некој од параметрите на транзисторот и да предизвика поместување на работната точка. Ако, на пример, дошло до поместување на работната точка нагоре, во насока на поголема колекторска струја, се зголемува и падот на напонот на отпорникот  $R_E$  и 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.

### НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

- Основните параметри на засилувачот се напонското, струјното и засилувањето на моќност, коефициентот на корисното дејство, влезната и излезната отпорност.
- Транзисторот работи како засилувач кога емитерскиот спој е директно, а колекторскиот инверзно поларизиран.
- Работната права се поставува така што да биде под хиперболата на дозволената моќност 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.

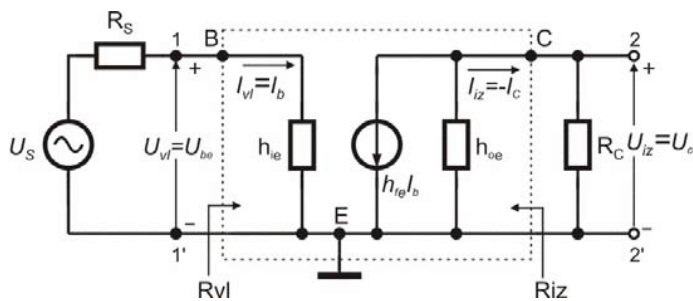
### 3.4.2. Одредување на параметрите кај засилувачот во спој со заеднички емитер

За пресметките на засилувањето ќе користиме еквивалентна шема на транзисторскиот засилувач на наизменични напони и струи на транзистор во спој со заеднички емитер, од слика 3.11 во режим на мали сигнали и средни фреквенции. Во подрачје на средни фреквенции сите капацитивности во колото имаат многу мала импеданса и во еквивалентната шема за наизменичен режим на работа, кондензаторите се претставуваат како куса врска како и изворот за напојување (слика 3.14).



Слика 3.14: Шема на засилувач со транзистор со кратко споени кондензатори и кратко споен извор за напојување.

Со замена на транзисторот со упростената шема со  $h$ -параметри се добива шемата на засилувачот како на **слика 3.15**. Во шемата не е внесен изворот за еднонасочен напон  $U_{CC}$ , кој претставува краток спој за наизменичната струја. Изоставен е параметрот  $h_{re}$  поради неговата мала вредност. Исто така, изоставени се отпорниците  $R_1$  и  $R_2$  поради тоа што нивните вредности се многу поголеми од вредноста на параметрот  $h_{ie}$ , 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. Кондензаторите  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_E$  поради малата импеданса се претставуваат како куса врска. 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.

Да воочиме дека излезниот напон во колото на слика 3.15 се добива на паралелната врска од отпорностите  $R_C$  и  $\frac{1}{h_{oe}}$ . Ако нивната еквивалентна отпорност ја означиме со:

$$R_{ek} = \frac{R_C \cdot \frac{1}{h_{oe}}}{R_C + \frac{1}{h_{oe}}} = \frac{R_C}{1 + h_{oe} R_C} \dots \dots \dots (3.18)$$

тогаш за излезниот напон ќе се добие:

$$U_{iz} = -h_{fe} I_b \cdot R_{ek}, \dots\dots\dots(3.19)$$

а за влезниот напон важи:

$$U_{vl} = h_{ie} I_b \cdot \dots\dots\dots(3.20)$$

Оттука **напонското засилување** ќе изнесува:

$$A_u = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = \frac{-h_{fe} I_b R_{ek}}{h_{ie} I_b} = -h_{fe} \frac{R_{ek}}{h_{ie}} \dots\dots\dots(3.21)$$

Од сликата е исто така видливо дека излезната струја изнесува:

$$I_{iz} = \frac{U_{iz}}{R_C} = -\frac{h_{fe} I_b R_{ek}}{R_C}, \dots\dots\dots(3.22)$$

додека влезната струја е  $I_{vl} = I_b$ , од каде за **струјното засилување** се добива:

$$A_i = \frac{I_{iz}}{I_{vl}} = \frac{-h_{fe} I_b R_{ek} / R_C}{I_b} = -h_{fe} \frac{R_{ek}}{R_C} \dots\dots\dots(3.23)$$

**Засилувањето на моќноста** соодветно ќе биде:

$$A_p = \frac{P_{iz}}{P_{vl}} = \frac{U_{iz} I_{iz}}{U_{vl} I_{vl}} = A_u A_i = h_{fe}^2 \frac{R_{ek}^2}{h_{ie} R_C} \dots\dots\dots(3.24)$$

За повеќето транзисторски засилувачки кола отпорноста  $\frac{1}{h_{oe}}$  е многу поголема од отпорноста

$R_C$  (барем неколку десетици пати). Во тој случај од неравенството  $\frac{1}{h_{oe}} \gg R_C$  следува

$h_{oe} R_C \ll 1$  што значи дека именителот во (3.18) може да се замени со 1, а  $R_{ek} \approx R_C$ . Оттука е јасно како ќе гласат изразите за засилувањата.

**Напонското засилување** соодветно ќе биде:

$$A_u \approx -\frac{h_{fe}}{h_{ie}} R_C \dots\dots\dots(3.25)$$

**Струјното засилување** соодветно ќе биде:

$$A_i \approx -h_{fe} \dots\dots\dots(3.26)$$

а за **засилувањето на моќноста** се добива:

$$A_p \approx \frac{h_{fe}^2 R_C}{h_{ie}} \dots\dots\dots(3.27)$$

**Влезната отпорност** на засилувачот се одредува под услов излезниот напон  $U_{iz}$  да е еднаков на нула, па се добива:

$$R_{vl} = \frac{U_{vl}}{I_{vl}} = h_{ie} \dots\dots\dots(3.28)$$

**Излезната отпорност** се одредува под услов влезното коло да е отворено, нема да тече струјата  $I_b$  што повлекува струјниот генератор  $h_{fe}I_b=0$ :

$$R_{iz} = \frac{U_{iz}}{I_{iz}} = \frac{1}{h_{oe}} \dots \dots \dots (3.29)$$

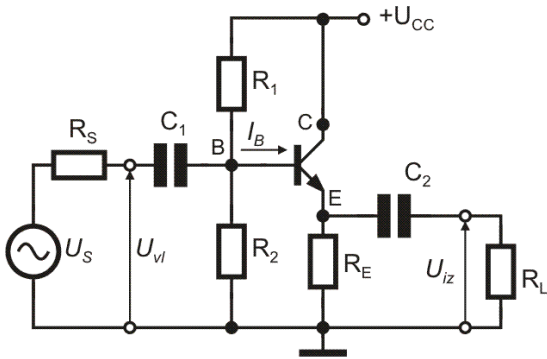
Поради малата вредност на параметарот  $h_{oe}$ , излезната отпорност на засилувачот може да се смета дека е бесконечно голема ( $R_{iz} \rightarrow \infty$ ). Тоа значи дека на шемата од слика 3.15 параметарот  $h_{oe}$  може да се изостави.

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.

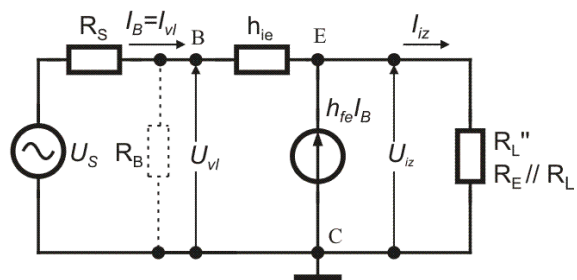
**\* Проширени знаења \***

**3.4.3. Засилувач во конфигурација со 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.



Слика 3.16а: Засилувач во спој со заеднички колектор.



Слика 3.16б: Еквивалентна шема за наизменичен сигнал.

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  $R_L''$ .

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

$$I_{iz} = h_{fe} I_B + I_B = (h_{fe} + 1) I_B \dots \dots \dots (3.30)$$

**Струјното засилување** се пресметува како:

$$A_I = \frac{I_{iz}}{I_{vl}} = \frac{(h_{fe} + 1) I_B}{I_B} = h_{fe} + 1 \dots \dots \dots (3.31)$$

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:

$$R_{vl} = \frac{U_{vl}}{I_B} = \frac{h_{ie} I_B + U_{CE}}{I_B} \dots \dots \dots (3.32)$$

Со замена на изразот 3.30 во равенката за  $U_{CE}$  се добива:

$$U_{CE} = R_L'' I_{iz} = R_L'' (1 + h_{fe}) I_B \dots \dots \dots (3.33)$$

па со внесување на (3.33) во изразот (3.32) се добива:

$$R_{vl} = \frac{h_{ie} I_B + R_L'' (1 + h_{fe}) I_B}{I_B} = h_{ie} + R_L'' (1 + h_{fe}) \dots \dots \dots (3.34)$$

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

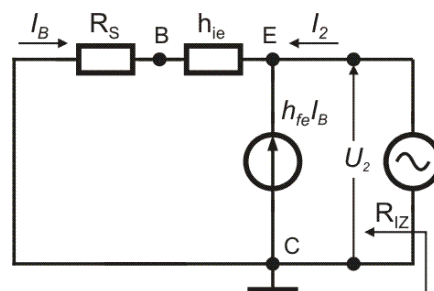
**Напонското засилување** може да се одреди според:

$$A_U = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = \frac{U_{CE}}{R_{vl} I_B} = \frac{R_L'' (1 + h_{fe}) I_B}{h_{ie} I_B + R_L'' (1 + h_{fe}) I_B} = \frac{R_L'' (1 + h_{fe})}{h_{ie} + R_L'' (1 + h_{fe})} \dots \dots \dots (3.35)$$

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.

Поеторно, преку Кирхофовите закони, доаѓаме до равенките:

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

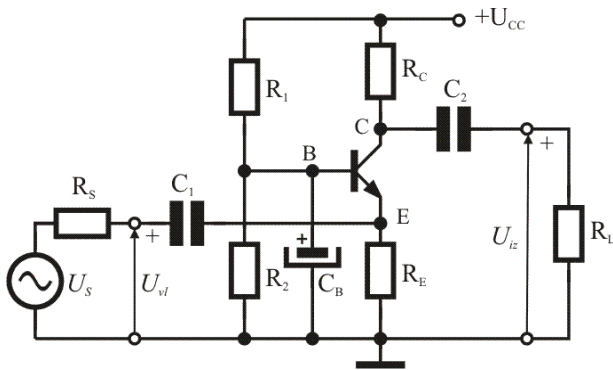
$$U_2 = -I_B (R_S + h_{ie})$$

$$R_{iz} = \frac{U_2}{I_2} = \frac{R_S + h_{ie}}{1 + h_{fe}} \dots \dots \dots (3.36)$$

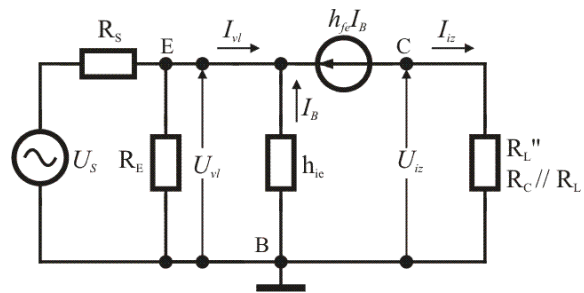
**Излезната отпорност** е многу мала, таа е со вредност од неколку десетина оми.

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.

### 3.4.4. Засилувач во конфигурација со заедничка база



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



Слика 3.19: Еквивалентна шема на засилувач во спој со 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. 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  $C_B$ .

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:



$$A_I = \frac{I_{iz}}{I_{vl}} = -\frac{h_{fe}I_B}{-(1+h_{fe})I_B} = \frac{h_{fe}}{1+h_{fe}} \approx 1 \quad (3.37)$$

и е еднакво на 1.

**Влезниот отпор е:**

$$R_{vl} = \frac{U_{vl}}{I_{vl}} = -\frac{h_{ie}I_B}{-(1+h_{fe})I_B} = \frac{h_{ie}}{1+h_{fe}} \quad (3.38)$$

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

**Напонското засилување се пресметува како:**

$$A_U = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = \frac{-h_{fe}I_B R_L''}{-h_{ie}I_B} = \frac{h_{fe}R_L''}{h_{ie}} \quad (3.39)$$

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

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

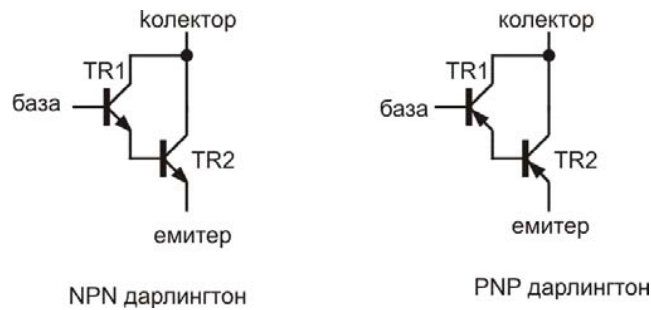
Во табела 1 е дадено споредување на вредностите на одделни параметри за сите три конфигурации на засилувачи.

**Табела 1**

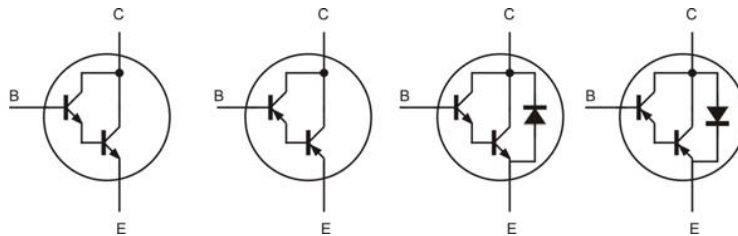
	заеднички емитер	заеднички колектор	заедничка база
Струјно засилување <b><math>A_I</math></b>	$-h_{fe}$ големо	$1+h_{fe}$ големо	$\frac{h_{fe}}{1+h_{fe}} \cong 1$ мало
Влезна отпорност <b><math>R_{vl}</math></b>	$h_{ie}$ средно голема	$h_{ie} + R_L''(1+h_{fe})$ голема	$\frac{h_{ie}}{1+h_{fe}}$ мала
Напонско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

### 3.4.5. Дарлингтонов спој

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 дарлингтонов спој. 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. Кога е произведена во форма на транзистор со стандардно куќиште, се нарекува дарлингтонов транзистор. Електричниот симбол на дарлингтонов транзисторот е даден на слика 3.21.



Слика 3.20: Структура на дарлингтонов транзисторот.



Слика 3.21: Електрични симбол на дарлингтонов транзисторот.

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

За примената на дарлингтонов спојот важни се вкупните параметри  $h_{ie}$  и  $h_{fe}$ . Тие ќе бидат пресметани со помош на слика 3.22. За оваа пресметка се зема дека струите на колекторот и на емитерот кај секој од транзисторите се приближно еднакви.

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

$$I_{C1} = h'_{fe} I_{B1}$$

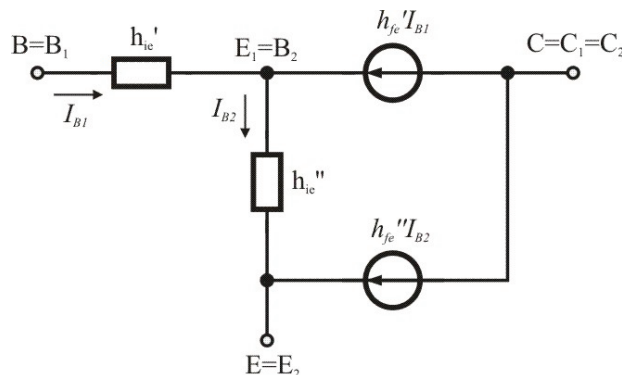
Според I Кирхофов закон за точката  $E_1=B_2$ , за базната струја  $I_{B2}$  на транзисторот TR2 се добива:

$$I_{B2} = I_{B1} + h'_{fe} I_{B1} \approx h'_{fe} I_{B1}$$

а неговата колекторска струја се пресметува според;

$$I_{C2} = h_{fe}'' I_{B2} = h_{fe}'' h_{21}' I_{B1} = h_{fe}' I_{B1}$$

$$h_{fe}' = h_{fe}' h_{fe}'' \dots \dots \dots (3.40)$$



Слика 3.22: Еквивалентна шема на дарлингтонов транзисторот.

**Еквивалентниот коефициент**  $h_{fe}$  на дарлингтонов спојот е еднаков на производот на коефициентите  $h_{fe}$  на одделните транзистори на спојот. Тој има голема вредност.

Влезната отпорност на дарлингтонов спојот е голема, поголема од влезната отпорност на првиот транзистор во врската.

Дарлингтоновиот спој се употребува за засилувачи од кои се бара големо засилување (струјно и напонско) и голема влезна отпорност.

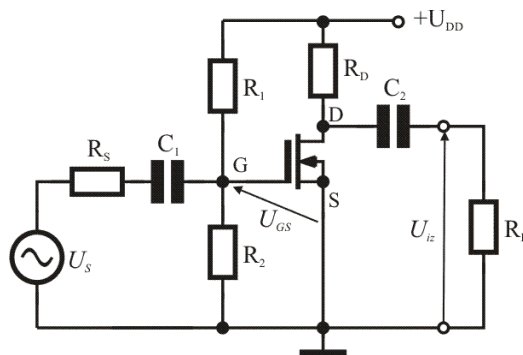
### НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

- За пресметките на засилувањето се користи еквивалентна шема на транзисторскиот засилувач во режим на мали сигнали и средни фреквенции каде кондензаторите се претставуваат како куса врска како и изворот за напојување.
- 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  $h_{ie}$ ;
  - 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 и мал излезен отпор.

- 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, а излезниот многу голем.
- Со дарлингтонов спој се постигнува голем коефициент на струјното засилување  $h_{fe}$ .

### 3.4.6. Засилувач во конфигурација со заеднички сорс

Електрична шема на еден засилувач во конфигурација со заеднички сорс со N-канален MOSFET е дадена на **слика 3.23**.



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

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.

Напонот на поларизацијата на гејтот се одредува според:

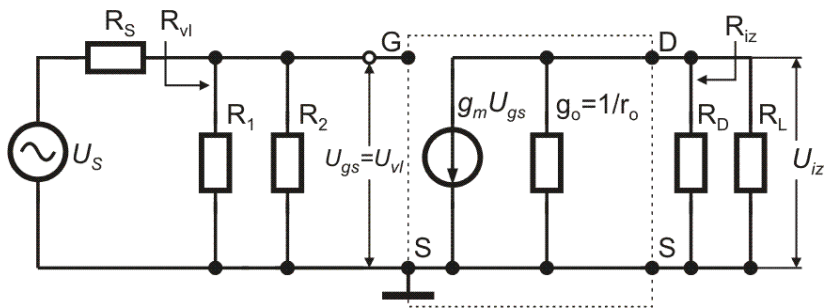
$$U_{GS} = U_{DD} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \dots\dots\dots(3.41)$$

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  $U_D$ :

$$U_D = U_{DD} - R_D I_D \dots\dots\dots(3.42)$$

со што прецизно е одредена положбата на работната точка.

Еквивалентната шема засилувач со MOSFET во конфигурација со заеднички сорс е дадена на **слика 3.24**.



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

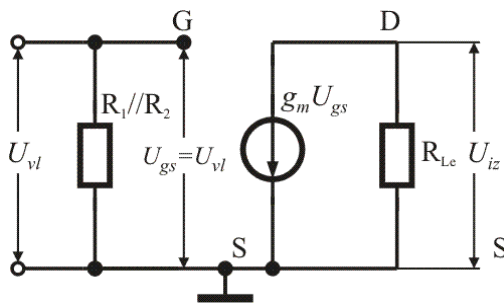
Таа е нацртана врз база на веќе познатите однесувања на спрежните кондензатори  $C_1$  и  $C_2$  и на изворот на еднонасочен напон  $U_{DD}$  за наизменичната струја. MOSFET-от е претставен со неговиот модел за мали сигнали, во кој фигурира зависниот струен генератор  $g_m U_{gs}$  каде параметарот 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

$$g_m \approx \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{DS}} = 0,$$

и излезната адмитанса  $g_o$  која се дефинира како:

$$g_o = \frac{1}{r_o} \approx \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{DS}} = 0$$

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



Слика 3.25: Упростена еквивалентна шема.

Од еквивалентната шема следува:

$$U_{iz} = -g_m U_{gs} R_{Le} \text{ и } \dots \dots \dots (3.43)$$

$$A_U = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = \frac{-g_m U_{gs} R_{Le}}{U_{gs}} = -g_m R_{Le}. \dots \dots \dots (3.44)$$

Со овој засилувач се внесува фазно поместување од  $180^\circ$ .

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

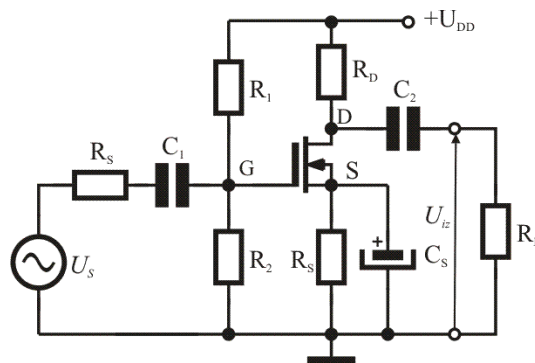
$$R_{vl} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \dots \dots \dots (3.45)$$

и зависи само од отпорниците за поларизација  $R_1$  и  $R_2$  а не и од влезната отпорност на MOSFET-от која има многу голема вредност. Поради многу големата вредност на влезната отпорност, влезното коло се прикажува како отворено коло и нема да тече влезна струја.

**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:

$$R_{iz} = \frac{r_0 R_D}{r_0 + R_D} \dots\dots\dots(3.46)$$

Во колото на сорсот може да се стави отпорник паралелно со електролитски кондензатор, со задача да врши 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.

**НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!**

- **Засилувач со MOSFET во конфигурација со заеднички сорс има:**
  - **влезен отпор кој зависи само од отпорниците за поларизација  $R_1$  и  $R_2$  а не и од влезната отпорност на MOSFET-от која има многу голема вредност;**
  - **напонско засилување кое зависи од вредноста на отпорот на оптоварувањето;**
  - **излезен отпор кој зависи од вредноста на излезниот отпор на MOSFET-от.**

**ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ**

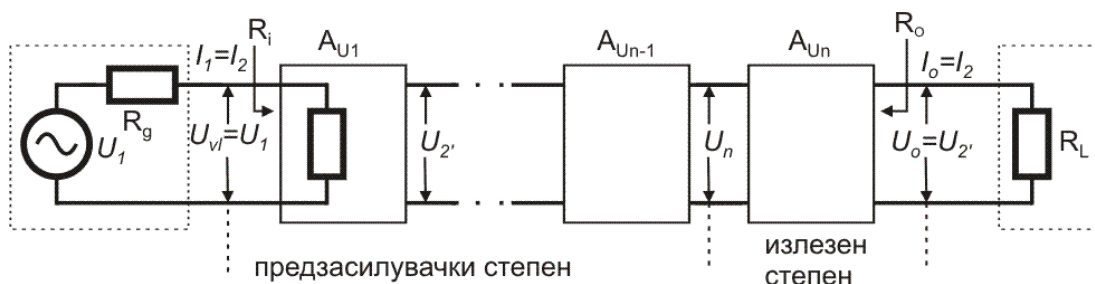
1. Како треба да бидат поларизирани PN-споевите на транзисторот за тој да работи како засилувач?
2. Со кој отпорник се одредува положбата на работната права?
3. Со кој отпорник се обезбедува температурна стабилизација на работната точка?
4. Која е улогата на кондензаторите  $C_1$  и  $C_2$ ?

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.
8. Изведи го аналитичкиот израз за напонското засилување на транзисторот во спој со заеднички сорс.

### 3.5. 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 3.27**. Изворот на сигналот  $U_1$ , дава сигнал со моќност  $10^{-6} W$  до  $10^{-10} W$ .



Слика 3.27: 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 синцир, кои работат со сигнали со помала моќност се викаат предзасилувачи 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  $A_{U1}$ ,  $A_{U2}$ ,  $A_{U3}$ , ...  $A_{Un}$ , вкупното напонско засилување на каскадата ќе биде:

$$A_{U_{TOT}} = A_{U_1} A_{U_2} A_{U_3} \dots A_{U_n}, \dots \dots \dots (3.47)$$

каде што n претставува вкупен број на засилувачки степени.

За струјното засилување се добива:

$$A_{I_{TOT}} = A_{I_1} A_{I_2} A_{I_3} \dots A_{I_n} \dots \dots \dots (3.48)$$

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:

$$A_{TOT} = A_{U_1}(dB) + A_{U_2}(dB) + A_{U_3}(dB) + \dots A_{U_n}(dB). \dots \dots \dots (3.49)$$

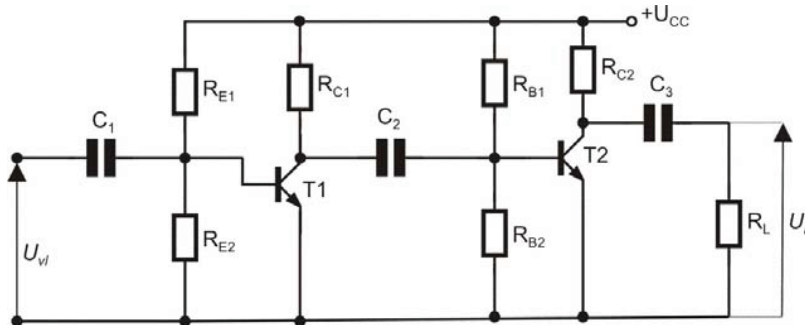
**ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ**

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?

**3.6. Видови спреги меѓу засилувачи**

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

- со капацитивна врска;
- со директна врска;
- со трансформаторска врска.



Слика 3.28: RC-врска на два засилувача.



**Капацитивната врска** се остварува со кондензатор приклучен меѓу излезот на претходниот и влезот на следниот степен. На **слика 3.28** е прикажана капацитивна врска 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 врска 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 ќе опадне  $\sqrt{2}$  пати.

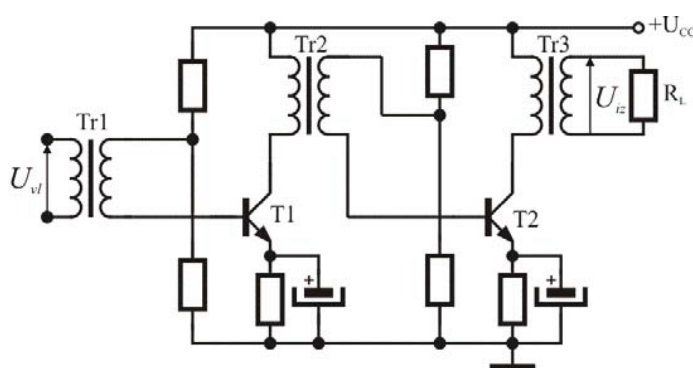
На формата на фреквенциската карактеристика најголемо влијание имаат RC-членовите присутни на влезот, на излезот и на другите места во засилувачот. Секој од овие членови дејствува како високопропусен филтер и ја ограничува карактеристиката при ниските фреквенции. Долната гранична фреквенција на таков филтер е одредена со вредноста на капацитивноста и еквивалентниот отпор поврзан паралелно на нејзините краеве, според:

$$fd = \frac{1}{2\pi R_{ekv} C_{ekv}} \dots\dots\dots(3.50)$$

За засилувач со повеќе RC-членови, како на слика 3.28, долната гранична фреквенција е одредена од степенот што има највисока долна гранична фреквенција.

Истата анализа се применува и за засилувачите со MOSFET.

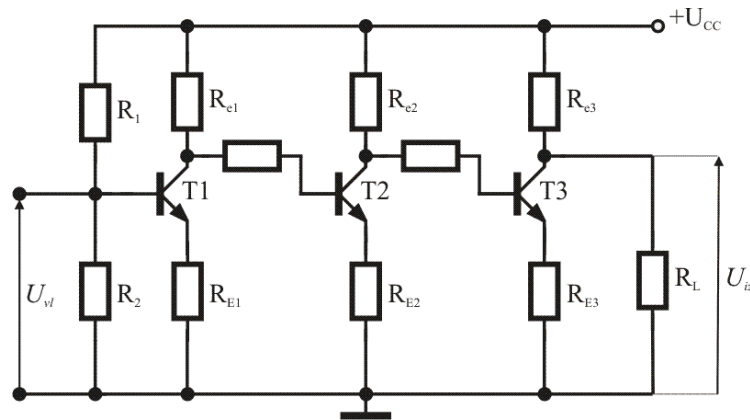
За **трансформаторската врска** самото име кажува дека сигналот меѓу два соседни засилувачки степени се пренесува со трансформатор (**слика 3.29**).



Слика 3.29: Трансформаторска врска.

Трансформаторската врска, исто како и капацитивната, обезбедува независно поставување на работните точки на засилувачите, бидејќи дозволува пренос само на наизменичниот сигнал. Со изборот на бројот на навивките се постигнува приспособување на влезниот или излезниот отпор на засилувачот.

**Директна врска** меѓу засилувачите се обезбедува со отпорник или со зенер диода на местото на кондензаторот за врска (слика 3.30). Со оваа врска е овозможено пренесување на еднонасочната компонента, како и на сигналите со многу ниска фреквенција.



Слика 3.30: Директна врска.

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 (стареење).

На крајот да напоменеме дека прикажаните шеми претставуваат само принципелен приказ за начините на поврзување, додека конкретните шеми во практиката можат да имаат најразлични структури.

### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

1. Кои се начините на меѓусебното поврзување на засилувачите во каскадата?
2. Која е улогата на кондензаторот за врска при различни фреквенции?
3. Од што зависи долната гранична фреквенција на засилувач со капацитивна врска?
4. Како се обезбедува директната врска?

### НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

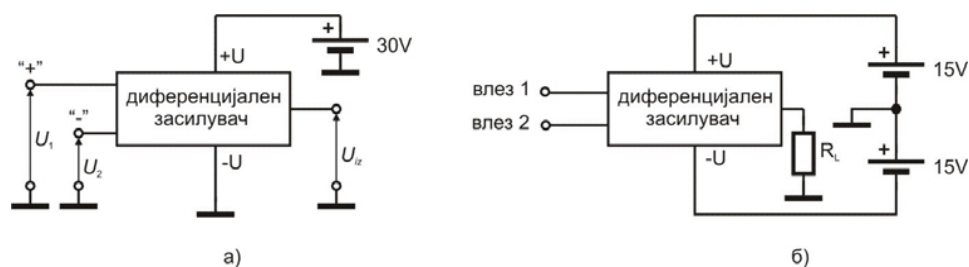
- **Каскадната врска содржи повеќе засилувачки степени со приспособување на изворот на сигналот на влезот, на излезот кон оптоварувањето и со меѓусебното приспособување на засилувачките степени.**

- Вкупното засилување на каскадата е производ на засилувањата на одделните засилувачки степени. Ако се мерат во децибели, вкупното засилување е збир на поединечните засилувања искажани во децибели.
- Засилувачките степени во каскадата меѓусебно се поврзуваат: капацитивно, директно или со трансформаторска врска.

### 3.7. 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 на кој што се добива напон пропорционален со разликата од двата влезни напони.

Блок-шема на диференцијален засилувач е дадена на **слика 3.31а**. Напонот за напојување може да биде едноделен, како на слика 3.31а, или дводелен, како на **слика 3.31б**. Точката со нулти потенцијал во колото (маса) е точката на поврзување помеѓу изворите  $+U$  и  $-U$ .



Слика 3.31: Блок-шема на диференцијален засилувач.

Влезниот сигнал на диференцијалниот засилувач може да биде диференцијален или истофазен (заеднички). Под диференцијален сигнал ја подразбираме разликата помеѓу напонот донесен на приклучокот „+“ (т.н. неинвертирачки влез) и напонот донесен на приклучокот „-“ (т.н. инвертирачки влез). Под истофазен сигнал ја подразбираме средната вредност на тие два напона.

Влезниот диференцијален сигнал е:

$$U_d = U_1 - U_2, \dots\dots\dots(3.51)$$

а диференцијалното засилување  $A_d$ :

$$A_d = \frac{U_{iz}}{U_d}. \dots\dots\dots(3.52)$$

Истофазен сигнал  $U_c$  се дефинира како средна вредност на двата влезни сигнали:

$$U_c = \frac{U_1 + U_2}{2}, \dots\dots\dots(3.53)$$

а истофазното засилување  $A_c$  како:

$$A_c = \frac{U_{iz}}{U_c} \dots\dots\dots(3.54)$$

Излезниот напон на диференцијалниот засилувач  $U_{iz}$  зависи од двата вида влезни сигнала според релацијата:

$$U_{iz} = U_d A_d + U_c A_c \dots\dots\dots(3.55)$$

Секој од влезовите има спротивно влијание врз излезот.

Влезот (-) се нарекува **инвертирачки**, а влезот (+) **неинвертирачки** влез. 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 излезниот сигнал се одредува според:

$$U_{iz} = A_U (U_1 - U_2),$$

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:

$$\rho = \frac{|A_d|}{|A_c|} \dots\dots\dots(3.56)$$

треба да биде што е можно поголем.

Овој фактор може да се изрази и во децибели како:

$$\rho(dB) = 20 \log \frac{|A_d|}{|A_c|} \dots\dots\dots(3.57)$$

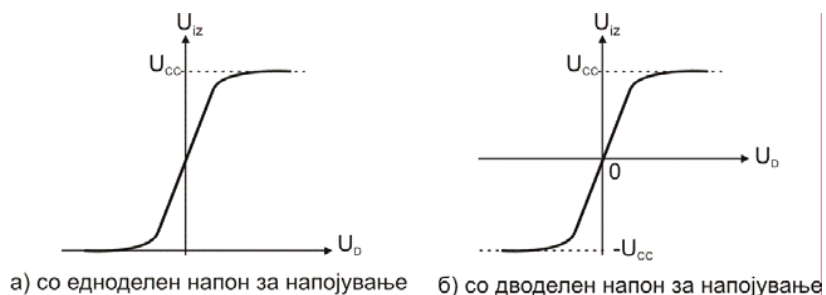
или

$$\rho(dB) = A_d(dB) - A_c(dB) \dots\dots\dots(3.58)$$

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  $A_d$ .

### 3.7.1. Преносна карактеристика на реален диференцијален засилувач

Преносната карактеристика на диференцијалниот засилувач е дадена на **слика 3.39**.

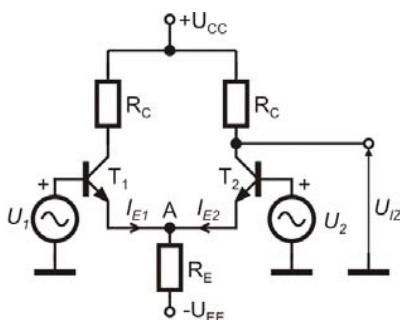


Слика 3.32: Преносна карактеристика на диференцијален засилувач.

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.

### 3.7.2. Изведба на диференцијален засилувач со биполарни транзистори

Колото на основниот диференцијален засилувач со биполарен транзистор е дадено на **слика 3.33**. Колото е симетрично околу вертикалната линија преку средината. Слично е и колото изведено со MOSFET.



Слика 3.33: Електрична шема на диференцијален засилувач.

За поставување 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. Емитерските споеви се директно поларизирани, а емитерите се на напон  $-0,6\text{ V}$ . Струјата преку отпорникот  $R_E$  се одредува според:

$$I_{RE} = \frac{-0,6V - (-U_{EE})}{R_E} \dots\dots\dots(3.59)$$

Ако транзисторите се симетрични (со еднакви карактеристики), може да се напише:

$$I_{E1} = I_{E2} = \frac{1}{2} I_{RE} \dots\dots\dots(3.60)$$

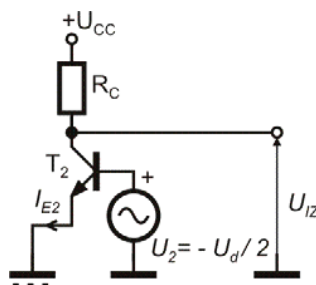
Ова претставува важен момент за разбирањето на диференцијалниот засилувач. Со напонот  $-U_{EE}$  и отпорникот  $R_E$  се одредува струјата во работната точка на секој транзистор, а со влезните напони  $U_1$  и  $U_2$  се одредува како базната струја ќе се распореди меѓу двете страни на засилувачот.

### 3.7.3. 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.

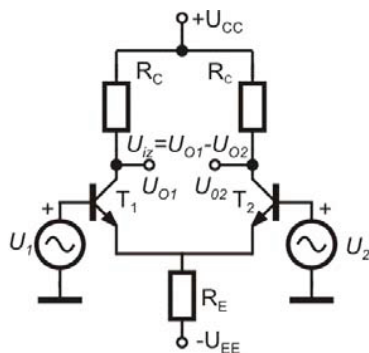


Слика 3.34: Половина од диференцијален засилувач во спој со заеднички емитер.

Сега анализата се упростува, така што половината од диференцијалниот засилувач станува обичен емитерски засилувач, прикажан на **слика 3.34**. Неговото засилување е големо, тоа е диференцијалното засилување на целиот засилувач:

$$A_d \approx \frac{R_C}{2h_{ie}} \dots\dots\dots(3.61)$$

За одредени намени, излезот може да биде приклучен на двата колектора, како што е прикажано на **слика 3.35**.



Слика 3.35: Диференцијален засилувач со излез помеѓу два колектора.

Со ова коло се добива диференцијален излезен напон, дефиниран со:

$$U_{iz} = U_{iz1} - U_{iz2} \dots\dots\dots(3.62)$$

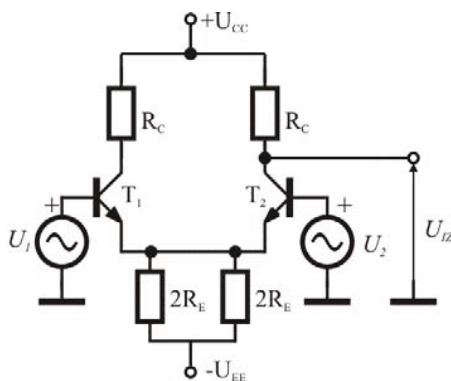
и тој е два пати поголем од претходниот пример.

Засилувањето на ова коло е:

$$A_d \approx -\frac{R_C}{h_{ie}} \dots\dots\dots(3.63)$$

### 3.7.4. Истофазно засилување

За анализа на истофазното засилување отпорноста  $R_E$  од шемата од слика 3.33 може да се подели на два еднакви дела, секој со вредност  $2R_E$ , како што е дадено на **слика 3.36**.



Слика 3.36: Диференцијален засилувач за пресметка на истофазното засилување.

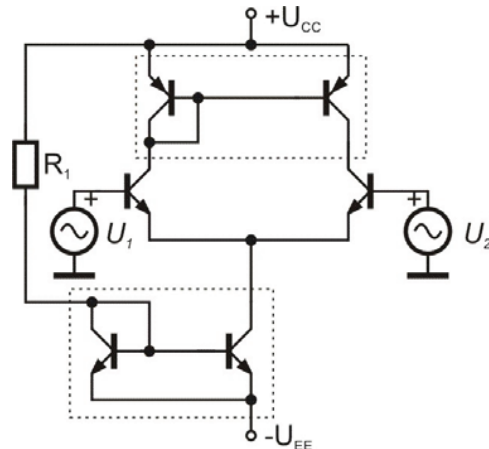
Повторно, секоја половина од колото е засилувач со заеднички емитер, а под услов вредноста на  $R_E$  да е многу поголема од  $h_{ie}$ , истофазното засилување ќе биде:

$$A_C \approx -\frac{R_C}{2R_E} \dots\dots\dots(3.64)$$

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. Подобрo решение се добива ако на

местото на  $R_E$  се вгради струен генератор, како на **слика 3.37**. Оваа конфигурација често се користи во модерни интегрирани диференцијални засилувачи или во операциски засилувачи.



Слика 3.37: Диференцијален засилувач со струјни генератори.

### НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

- Диференцијален засилувач е засилувач со два влеза, едниот се вика инвертирачки и се означува со "-", а другиот неинвертирачки и се означува со "+".
- Под диференцијален сигнал ја подразбираме разликата помеѓу напоните донесени на двата приклучока.
- Истофазен сигнал се дефинира како средна вредност на двата влезни сигнали.
- Идеален диференцијален засилувач има само диференцијално засилување, а истофазното засилување е нула.

### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

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?

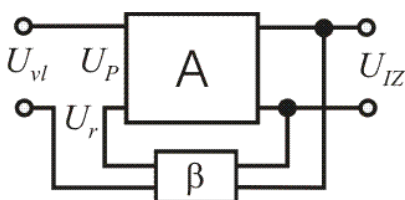


## 3.8. Засилувачи со повратна врска

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 напонски засилувач со повратна врска е прикажана на **слика 3.38**.



Слика 3.38: Блок-шема на напонски засилувач со повратна врска.

Колото на повратната врска е означено со  $\beta$ . 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  $180^\circ$ . Ако фазите на влезниот и на вратениот сигнал се совпаѓаат имаме **позитивна повратна врска** или позитивна врска. Кога фазите на влезниот и на вратениот сигнал се разликуваат за  $180^\circ$ , повратната врска се вика негативна врска или **негативна повратна врска**.

Позитивната и негативната повратна врска имаат различно влијание врз карактеристиките на засилувачот.

### 3.8.1. Засилување со повратна врска

За засилувач со **негативна повратна врска**, побудниот сигнал претставува разлика меѓу влезниот и сигналот на повратната врска:

$$U_p = U_{vl} - U_r, \dots\dots\dots(3.65)$$

а засилувањето со повратна врска е:

$$A_r = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} \dots\dots\dots(3.66)$$

Засилувањето на засилувачот без колото за повратна врска изнесува:

$$A = \frac{U_{iz}}{U_p}, \dots\dots\dots(3.67)$$

а од овој израз се добива вредноста на побудниот сигнал како:

$$U_p = \frac{U_{iz}}{A} \dots\dots\dots(3.68)$$

Колото на врската се дефинира со коефициентот на повратна врска  $\beta$ , како однос на вратениот и излезниот сигнал:

$$\beta = \frac{U_r}{U_{iz}}, \dots\dots\dots(3.69)$$

а за вратениот напон  $U_r$  имаме:

$$U_r = \beta U_{iz} \dots\dots\dots(3.70)$$

Коефициентот на повратна врската  $\beta$  е помал од 1, затоа што напонот  $U_r$  е дел од излезниот напон. Во практиката, вредноста на коефициентот на негативната повратна врска  $\beta$  се движи во граници 0,05 до 0,2.

Изразот за засилување на засилувачот со негативна повратна врска е:

$$A_r = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = \frac{A}{(1 + A\beta)} \dots\dots\dots(3.71)$$

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:

$$U_p = U_{vl} + U_r, \dots\dots\dots(3.72)$$

при што на крајот се добива:

$$A_r = \frac{A}{(1 - A\beta)}, \dots\dots\dots(3.73)$$

ако се одбере факторот  $\beta$  така што  $\beta A$  да е помал од 1 и именителот ќе биде помал од 1, од каде што следува:

$$A_r > A.$$

Засилувањето на засилувач со позитивна повратна врска е поголемо од засилувањето на истиот засилувач без позитивна повратна врска. Зголемувањето на засилувањето не се практикува, што ќе биде објаснето во наредното поглавје.

Именителот во изразите за засилување со повратна врска се вика функција на повратната врска. Нејзината вредност ја одредува производот  $A\beta$ :

$$A\beta = \frac{U_{iz}}{U_p} \cdot \frac{U_r}{U_{iz}} = \frac{U_r}{U_p} \dots\dots\dots(3.74)$$

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 повратната врска  $\beta$ . На тој начин е направена една кружна патека, а производот  $A\beta$  е наречен кружно засилување.

Често, јачината на врска се изразува во децибели како:

$$N = 20 \log \frac{A_r}{A} (dB) \dots\dots\dots(3.75)$$

За негативната повратна врска имаме:

$$N = 20 \log \frac{1}{1 + A\beta} < 0,$$

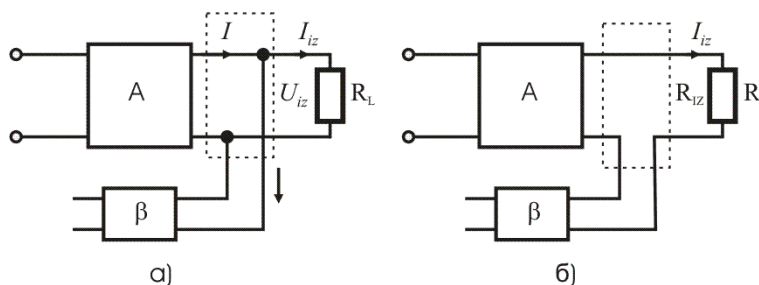
а за позитивната:

$$N = 20 \log \frac{1}{1 - A\beta} > 0.$$

Така, на пример, ако јачината на повратната 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.

### 3.8.2. Видови на негативна повратна врска

Според начинот на приклучување на колото за повратна врска на излезот, разликуваме напонска и струјна негативна врска.



Слика 3.39: Напонска и струјна негативна повратна врска.

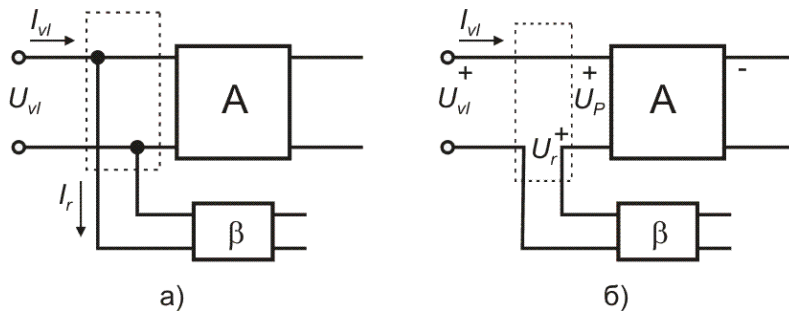
Напонска повратна врска имаме кога сигналот на повратната врска е пропорционален на излезниот напон (слика 3.39а). Влезната импеданса на колото за

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 сигналот на повратна врската е пропорционален на излезната струја (слика 3.39б). Влезната импеданса на колото за врска треба да биде помала од импедансата на потрошувачот, за да не ја намалува излезната струја.

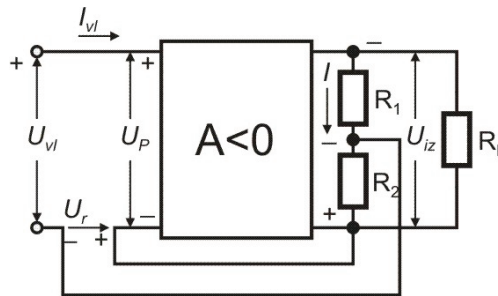
Паралелна негативна врска имаме кога излезот од колото на повратната врска ( $I_r$ ) се приклучува паралелно на влезниот побуден сигнал (слика 3.40а).

Сериска негативна повратна врска имаме кога излезот од колото на повратната врска  $U_r$  се приклучува сериски со влезниот сигнал  $U_{v1}$  (слика 3.40б).



Слика 3.40: 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 3.41: Напонско-сериска повратна врска.

На слика 3.41 е прикажана сериска 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:

$$U_{iz} = (R_1 + R_2)I . \dots\dots\dots(3.76)$$

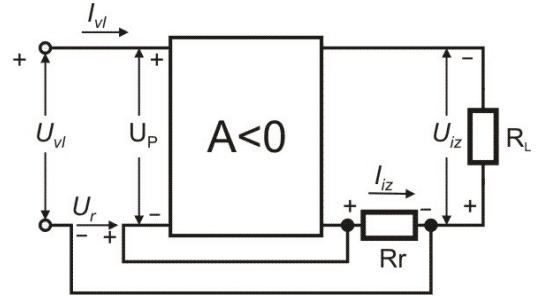
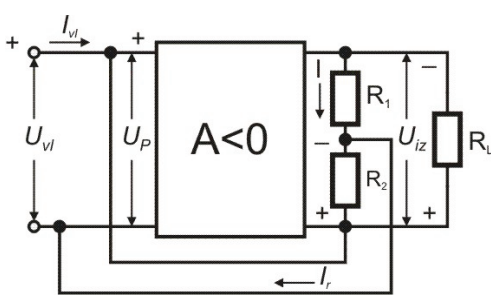
Напонот на повратна врската е:

$$U_r = R_2I . \dots\dots\dots (3.77)$$

Овде се претпоставува дека струјата на делителот  $I$  не тече преку влезното коло, поради неговиот голем влезен отпор. Коefициентот на врската е:

$$\beta = \frac{U_r}{U_{iz}} = \frac{R_2 \cdot I}{(R_1 + R_2) \cdot I} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \dots\dots\dots(3.78)$$

На **слика 3.42**, колото за повратна врска е приклучено паралелно во однос на влезот, што значи дека имаме напонска–паралелна повратна врска. Анализата се разликува од таа што беше направена кај напонско-сериската повратна врска и бара поинакво претставување на засилувачот.



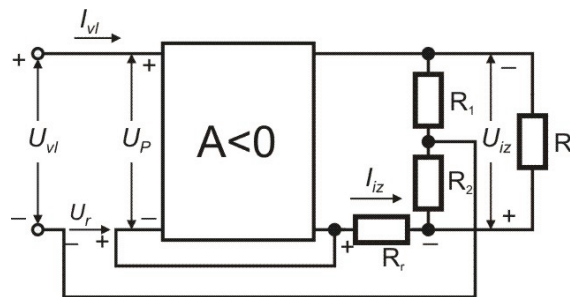
Слика 3.42: Напонско-паралелна повратна врска.

Слика 3.43: Струјно-сериска повратна врска.

На **слика 3.43**, колото на 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 струјно одмерување, а реакцијата е на влезот напонска. Анализата се разликува од таа што беше направена кај напонско-сериската повратна врска и бара поинакво претставување на засилувачот.

Коефициентот на повратна врската е:

$$\beta = \frac{U_r}{I_{iz}} \dots\dots\dots(3.79)$$



Слика 3.44: Комбинирана напонска–струјна–сериска повратна врска.

**Слика 3.44** претставува комбинирана врска 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  $R_r$ :

$$U_r = U_{R_2} + U_{R_r} \dots\dots\dots(3.80)$$

За напонот  $U_{R_2}$  имаме:

$$U_{R_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{iz} \dots\dots\dots(3.81)$$

а за  $U_{Rr}$  :

$$U_{Rr} = R_r I_{iz} = R_r \frac{U_{iz}}{R_L} = \frac{R_r}{R_L} U_{iz}. \dots\dots\dots(3.82)$$

Со замена на (3.81) и (3.82) во (3.80) добиваме:

$$U_r = U_{iz} \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_r}{R_L} \right).$$

### 3.8.3. 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 3.66:  $A_r = \frac{U_{iz}}{U_{vl}}$  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  $\pi$  ( $180^\circ$ ) во однос на влезниот сигнал. Фазната зависност меѓу излезниот и влезниот напон, дадена на слика 3.6, 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  $2\pi$  или  $4\pi$  итн. За засилувач со применета негативна врска тоа значи премин во режим со позитивна врска и појава на самоосцилирање, но со внимателно проектирање може секогаш да се осигури стабилност на засилувачот со повратна врска.

### 3.8.4. 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:

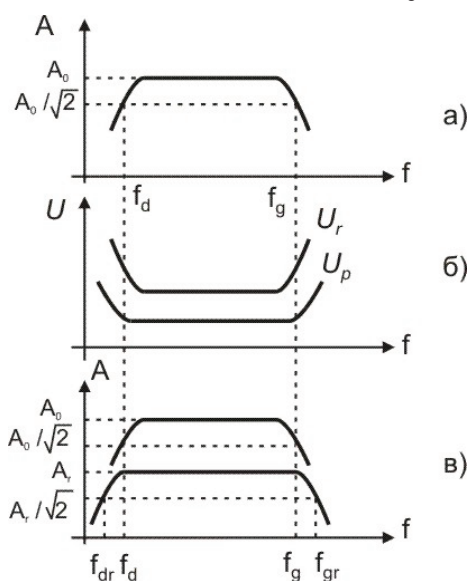
$$A_r = \frac{A}{A\beta} = \frac{1}{\beta}. \dots\dots\dots(3.83)$$

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 особените 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 врска, а тоа најчесто се изведува со пасивни елементи кои можат да бидат со стабилни карактеристики.

### 3.8.5. 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 3.45а).



Слика 3.45: Проширување на пропусниот опсег .

Според тоа, ако на влезот дејствува сигнал со константна амплитуда 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 фреквенции ќе биде намален. Ако во овој засилувач се вклучи коло за негативна повратна врска, преку тоа коло ќе се врати дел од излезниот сигнал  $U_r$ , кој има спротивна фаза од влезниот сигнал. Амплитудата на вратениот овој сигнал се намалува за ниските и високите фреквенции. По одземањето од влезниот сигнал, се добива побуден сигнал како на **слика 3.45б**. Конечниот резултат, прикажан на **слика 3.45в** покажува дека дошло до поместување на долната и горната гранична фреквенција, така што се добива проширен пропусен опсег на засилувачот.

### 3.8.6. Видови изобличувања и влијание на негативната повратна врска врз шумовите

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  $A$ -пати поголема. До линеарно изобличување на амплитудата доаѓа кај сигналите чишто фреквенции се надвор од пропусниот опсег. Отстапувањето на фазата на излезниот сигнал во однос на влезниот, прикажано со фазната карактеристика на слика 3.6, 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. Нелинеарните изобличувања ќе се намалат ако засилувачот се изведе со негативна повратна врска.

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. 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, односот сигнал-шум на излезот 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. Со внесување на негативна повратна врска, излезниот сигнал се намалува  $(1+A\beta)$ -пати, па односот сигнал-шум 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 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.



### 3.8.7. Влијание на негативната повратна врска врз влезната и врз излезната импеданса на засилувачот

Колото на повратната 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 врска од слика 3.50,  $Z_{vlr}$ , се дефинира како:

$$Z_{vlr} = \frac{U_{vl}}{I_{vl}} = \frac{(U_p + U_r)}{I_{vl}} = \frac{(U_p + \beta U_{iz})}{I_{vl}} = \frac{(U_p + A\beta U_p)}{I_{vl}} = \left(\frac{U_p}{I_{vl}}\right)(1 + A\beta). \quad (3.84)$$

Влезната импеданса на засилувачот без повратна врска  $Z_{vl}$  е:

$$Z_{vl} = \frac{U_p}{I_{vl}}.$$

Па со замена се добива:

$$Z_{vlr} = Z_{vl}(1 + A\beta). \quad (3.85)$$

Со примена на сериска повратна врска влезната импеданса се зголемува за износот на функцијата на повратната 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, поради вратената струја преку колото за повратна врска. Како резултат, се намалува влезната импеданса на засилувачот со врска во однос на влезната импеданса на тој засилувач кога нема повратна врска:

$$Z_{vlr} = \frac{U_{vl}}{I_{vl}} = \frac{Z_{vl}}{(1 + A\beta)}. \quad (3.86)$$

Излезната импеданса на засилувач со напонска негативна повратна врска се намалува во однос на излезната импеданса без повратна врска:

$$Z_{izr} = \frac{Z_{iz}}{(1 + A\beta)}. \quad (3.87)$$

Излезната импеданса на засилувачот со струјна негативна повратна врска се зголемува во однос на излезната импеданса без повратна врска:

$$Z_{izr} = Z_{iz}(1 + A\beta). \quad (3.88)$$

## НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

- Под поимот повратна врска се подразбира пренесување на еден дел од излезната енергија на засилувачот на неговиот влез.
- 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  $180^{\circ}$ , повратната врска се вика негативна повратна врска.
- Напонска повратна врска имаме кога напонот на повратната врска е пропорционален на излезниот напон.
- Струјна повратна врска имаме кога напонот на повратна врска е пропорционален на излезната струја.
- 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.

## ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

1. Што подразбираш под поимот повратна врска?
2. Кога повратната врска е негативна а кога позитивна?
3. Дефинирај го коефициентот на врска  $\beta$ ?
4. Какво е засилувањето на засилувач со негативна врска во однос на засилувањето на истиот засилувач без применета негативна 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 врска?
7. Објасни го проширувањето на пропусниот опсег на засилувач со повратна врска.
8. Што е изобличување и какви изобличувања има?
9. Какви видови на негативна врска постојат според начинот на приклучување на колото за врска на излезот?
10. Какво може да биде приклучувањето на колото за повратна врска во однос на влезот?
11. Какво е влијанието на повратната врска врз влезната и врз излезната импеданса?

## 3.9. 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, електромагнетен релеј 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 миливати до стотина вати.

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 високкоквалитетните (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 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 корисната моќност на наизменичниот сигнал што му се предава на потрошувачот, 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.

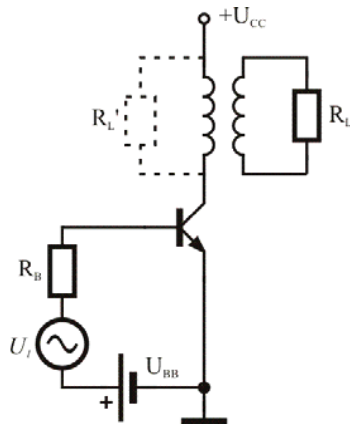
Излезниот степен може да работи во класа А, класа В и класа АВ и во сите три вида споеви, со заеднички емитер, заедничка база, заеднички колектор, односно со заеднички сорс, заеднички гејт и заеднички дрејн. Најмногу е во употреба спојот со заеднички емитер, односно заеднички сорс, затоа што има поголемо засилување на моќност во однос на другите два вида споеви.

### 3.9.1. 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. Работните услови диктираат низ транзисторот постојано да тече струја, без оглед на тоа дали на влезот има побуден сигнал.

Кај некои излезни засилувачи, врската со оптоварувањето или со следниот краен излезен степен се изведува преку трансформатор, како што е прикажано на **слика 3.46**. 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.).



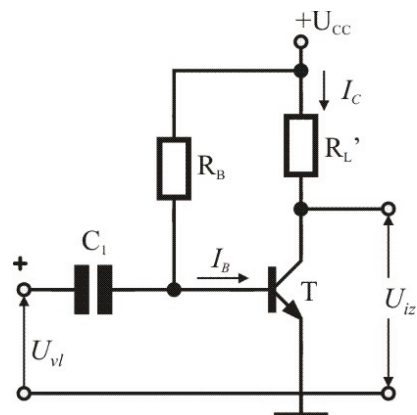
Слика 3.46: Засилувач на моќност во класа А со трансформатор.

Отпорот на оптоварувањето  $R_L$  се пресликува на примарната страна на трансформаторот според формулата:

$$R'_L = R_L \cdot n_p^2 = R_L \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2, \dots\dots\dots(3.89)$$

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.

Со внесување на пресликаниот отпор  $R'_L$ , се добива шема на засилувач во класа А со транзистор во спој со заеднички емитер е дадена на **слика 3.47**.



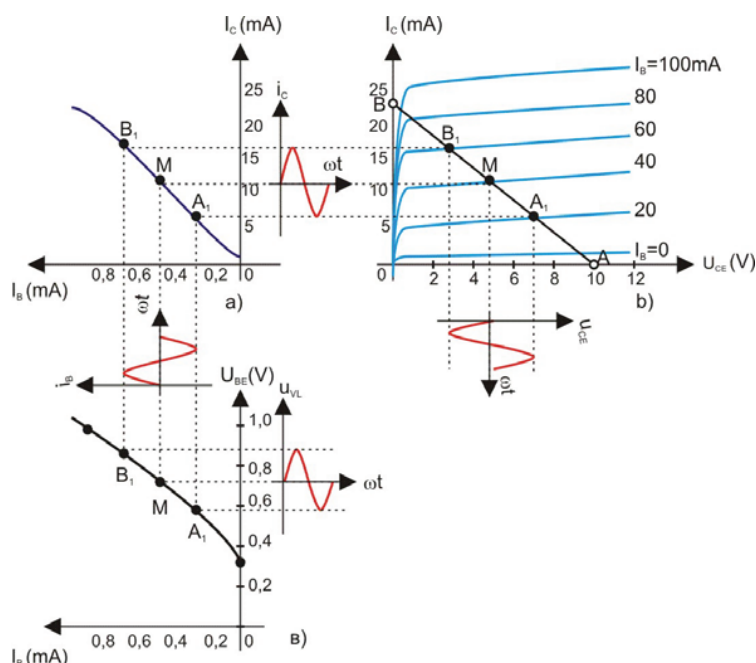
Слика 3.47: Засилувач на моќност во класа А.

## Графичка анализа на транзисторски засилувач на моќност во класа А

На **слика 3.48** се дадени дијаграмите на динамичките карактеристики на засилувачот. На влезот на засилувачот е приклучен наизменичен напон:

$$u_{vl} = U_{vlm} \sin \omega t, \dots\dots\dots(3.90)$$

каде што:  $u_{vl}$  – моментална вредност на напонот,  $U_{vlm}$  – амплитуда, а  $\omega$  – кружна фреквенција.



Слика 3.48: Графичко одредување на засилувањето.

Овој наизменичен напон му се додава на еднонасочниот напон на поларизација на базата  $U_{BE}$ . Струјата на базата, исто така, содржи еднонасочна и наизменична компонента и има форма дадена со:

$$i_B = I_{B(M)} + I_{bm} \sin \omega t \dots\dots\dots(3.91)$$

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:

$$i_C = I_{C(M)} + I_{cm} \sin \omega t \dots\dots\dots(3.92)$$

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

При пренесувањето на точките од преносната на излезната карактеристика се забележува дека движењето на работната точка од М кон  $B_1$  предизвикува зголемување на колекторската струја, но и намалување на колекторскиот напон. Со други зборови,

позитивната полупериода 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  $180^\circ$ .

Излезниот напон на транзисторот во спој со заеднички емитер е:

$$u_{IZ} = u_{CE} = I_{C(M)}R'_L - I_{cm}R'_L \sin \omega t \dots\dots\dots(3.93)$$

или

$$u_{IZ} = U_{CE(M)} - U_{cem} \sin \omega t \dots\dots\dots(3.94)$$

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:

$$A_u = \frac{U_{izm}}{U_{vlm}} = \frac{U_{cem}}{U_{bem}} \dots\dots\dots(3.95)$$

а засилувањето на струјата како:

$$A_i = \frac{I_{izm}}{I_{vlm}} = \frac{I_{cm}}{I_{bm}} \dots\dots\dots(3.96)$$

И на крајот, засилувањето на моќноста како:

$$A_p = \frac{P_{iz}}{P_{vl}} = A_u \cdot A_i \dots\dots\dots(3.97)$$

Корисната моќност се пресметува според:

$$P_k = \frac{1}{2} \cdot I_{cm} \cdot U_{cem} \dots\dots\dots(3.98)$$

а потрошената моќност од изворот е:

$$P_0 = U_{CC} I_{CM} \dots\dots\dots(3.99)$$

За избраниот режим на работа имаме:

$$I_{cm} = I_{CM} \text{ и } U_{cem} = U_{CC}.$$

Сега за факторот на корисното дејство имаме:

$$\eta = \frac{P_k}{P_0} \cdot 100 = \frac{\frac{1}{2} \cdot I_{cm} \cdot U_{cem}}{I_{CM} \cdot U_{CC}} \cdot 100 = 0,5 \cdot 100 = 50\% \dots\dots\dots(3.100)$$

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:

$$P_D = P_O - P_K. \dots\dots\dots(3.101)$$

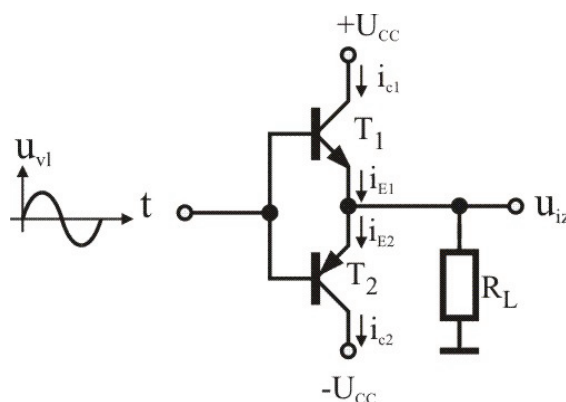
Максимална дисипација имаме кога корисната моќност е еднаква на нула. Тоа е еден од суштествените недостатоци на излезниот степен во класа А. За овој степен се потребни транзистори со голема моќност, но нивната искористеност е лоша.

### 3.9.2. Комплементарни симетрични засилувачи

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. 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 без излезен трансформатор ако се употребат комплементарни транзистори.

Комплементарен транзисторски пар се два транзистора со идентични карактеристики. Едниот е од NPN, а другиот од PNP-тип.

Принципиелна шема на таков засилувач е дадена на **слика 3.49**.



Слика 3.49: Принципиелна шема на комплементарен симетричен засилувач.

За влезни напони  $u_{vL} > 0,7V$ , транзисторот  $T_1$  е вклучен а транзисторот  $T_2$  е исклучен. Струјата низ потрошувачот е:

$$i_{RL} = i_{E1} \approx i_{C1}.$$

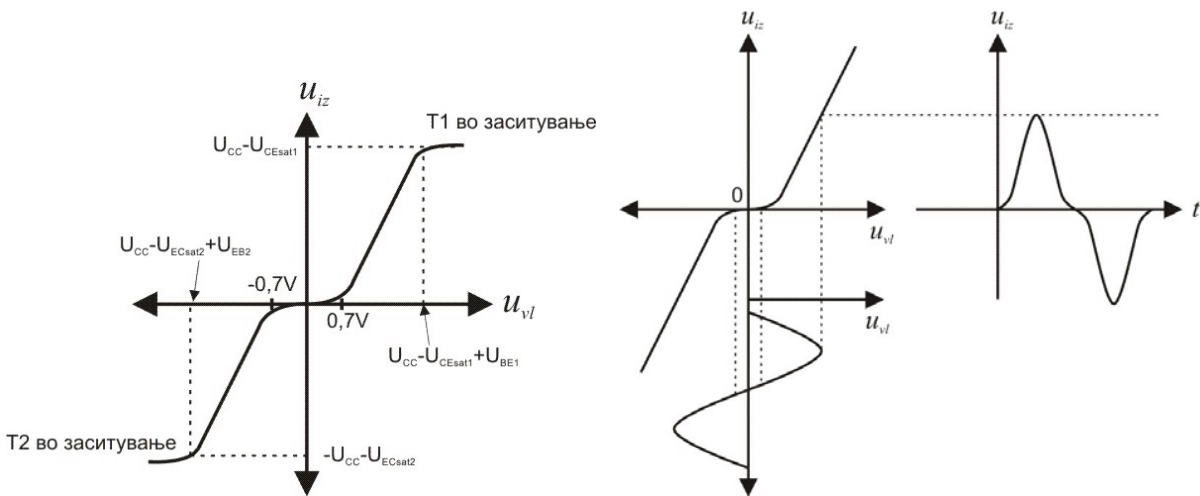
Кога излезниот напон ќе ја достигне вредноста  $u_{IZ} > U_{CC} - U_{CEsat}$ , транзисторот  $T_1$  влегува во заситување.

За влезни напони  $u_{vL} < -0,7V$ , транзисторот  $T_2$  е вклучен а транзисторот  $T_1$  е исклучен. Струјата низ потрошувачот е:

$$i_{RL} = -i_{E2} \approx -i_{C2}.$$

Кога излезниот напон ќе ја достигне вредноста  $u_{IZ} < -U_{CC} + U_{CEsat}$ , транзисторот  $T_2$  влегува во заситување.

На **слика 3.50** е дадена преносната карактеристика на комплементарен симетричен засилувач.



Слика 3.50: Преносната карактеристика на комплементарен симетричен засилувач.

Слика 3.51: Изобличувања на излезниот сигнал.

На **слика 3.51** се прикажани изобличувањата кои ги внесува комплементарен симетричен засилувач.

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 побуден трансформатор, што дава подобрување на фреквенциската карактеристика.

Овој засилувач се среќава и под назив противтактен или пуш-пул засилувач. Значаен е како излезен степен кај операциските засилувачи. Неговиот фактор на корисно дејство изнесува и до 78%.



**НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!**

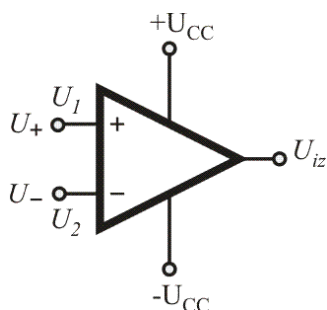
- Засилувачите на моќност се најчесто излезните степени во засилувачката каскада.
- Засилувач во класа А со еден транзистор најчесто работи како претстепен, има помали изобличувања, но и помал степен на корисно дејство (до 50%).
- Со комплементарен транзисторски пар (два транзистора со идентични карактеристики, едниот е од NPN, а другиот од PNP-тип) се избегнува користење на излезен трансформатор, а степенот на корисно дејство изнесува 78%.

**ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ**

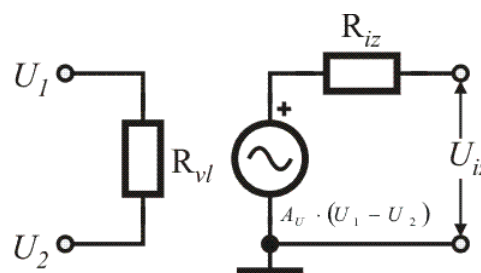
1. Кои се основните барања пред засилувачот на моќност?
2. Кои се недостатоците на излезниот степен во класа А?
3. Која конфигурација најмногу одговара за симетричните засилувачи на моќност?
4. Од која причина засилувачите во класа В се прават само во симетрична врска?
5. Објасни го принципот на работата на симетричниот степен во класа В?
6. Како може да се направат симетрични засилувачи во класа В без влезни и излезни трансформатори?

**3.10. Операциски засилувачи**

Операцискиот засилувач е еден од најупотребуваните блокови во аналогните 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.



Слика 3.52: Блок-шема на операциски засилувач.



Слика 3.53: Еквивалентна шема на реален операциски засилувач.

Операцискиот засилувач е повеќестепен напонски засилувач со директна врска, со диференцијален влез и со многу големо засилување. Неговиот шематски симбол е даден на **слика 3.52**, а еквивалентната шема на **слика 3.53**. Еквивалентната шема е составена од еден идеален напонски засилувач и конечни вредности на влезен и излезен отпор на засилувачот.

Влезовите на операцискиот засилувач се 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):

$$U_{iz} = A_U (U_1 - U_2) = A_U (U_+ - U_-), \dots\dots\dots(3.102)$$

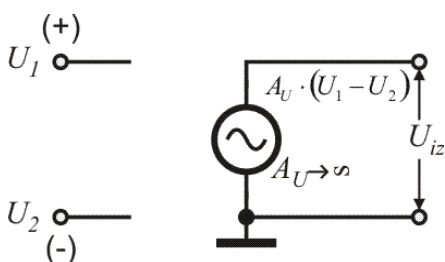
каде што со  $A_U$  се означува засилувањето на операцискиот засилувач со отворена јамка (без негативна врска). Излезниот напон е фазно поместен за  $180^\circ$  во однос на напонот  $U_2$  кој доаѓа на "-" влезот и затоа тој се вика **инвертирачки влез**. Влезниот напон  $U_{1+}$  на влезот со ознака "+" е во фаза со излезниот напон и поради тоа е наречен **неинвертирачки влез**.

### 3.10.1. Идеален операциски засилувач

Идеалениот 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 врска.
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 во однос на диференцијалниот влез. Фазното поместување да биде  $180^\circ$ . Фреквенциската карактеристика да биде рамна, а пропусниот опсег да биде бесконечен ( $B \rightarrow \infty$ ).
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.

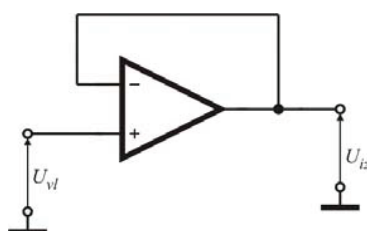
Еквивалентната шема на идеалниот операциски засилувач е дадена на **слика 3.54**.



Слика 3.54: 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 илјади и до милион. Во анализите, скоро секогаш се претпоставува бесконечно големо засилување на операцискиот засилувач, а со надворешните компоненти за негативна врска се постигнуваат бараните карактеристики. 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.

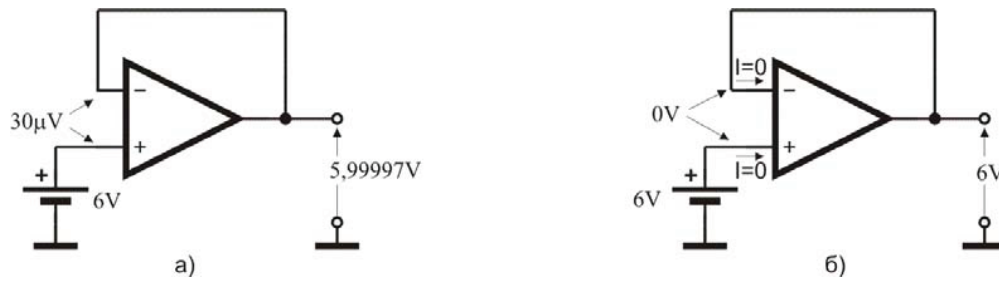
### 3.10.2. Повратна врска на операцискиот засилувач



Слика 3.55: 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 3.55), излезниот напон верно ќе го следи влезниот напон. Имено, со зголемувањето на влезниот напон се зголемува и влезниот диференцијален напон, а со тоа и излезниот напон, 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  $U_{VI}$ , напонот на излезот ќе стане многу близок по вредност со  $U_{VI}$  (т.н. принцип на напонски следител), но доволно малку помал, така што ќе постои мала напонска разлика меѓу  $U_{VI}$  и инвертирачкиот влез, која всушност се засилува и се добива излезниот 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  $U_{VI} = 6 \text{ V}$ , излезниот напон ќе биде 5,99997 V (слика 3.56а), а диференцијалниот напон на влезот ќе биде:  $6 - 5,99997\text{V} = 30\mu\text{V}$ . За практичните пресметки вредноста од  $30\mu\text{V}$  не е голема и може да се смета дека диференцијалниот напон меѓу двата влеза се држи со примена на негативна врска точно на нула (слика 3.56б).



Слика 3.56: Ефект на негативната врска и упростување.

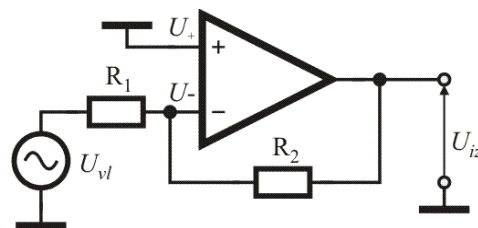
За пресметка на напонското засилување на колото, потребни се две претпоставки:

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, а нултиот диференцијален напон при нулта струја во влезовите се нарекува **ВИРТУЕЛНА НУЛА**.

### 3.10.3 Инвертирачки засилувач

Една од најмногу користените примени на операцискиот засилувач е примената како инвертирачки засилувач. Со приклучување на два отпорника, како на **слика 3.57**, направено е засилувачко коло со засилување кое зависи само од односот на вредностите на двата отпорника. Со отпорникот  $R_2$  се остварува негативна повратна врска со која се враќа дел од излезниот напон на инвертирачкиот влез. Неинвертирачкиот влез е врзан на маса.



Слика 3.57: Инвертирачки засилувач.

Напонското засилување на ова коло се одредува со релацијата:

$$A_{inv} = \frac{U_{iz}}{U_{vl}}$$

Колото се анализира под претпоставка на бесконечна вредност на засилувањето  $A_U$  на операцискиот засилувач ( $A_U \rightarrow \infty$ ).

Поради постоење на виртуелна нула на влезот од операцискиот засилувач ( $U_+ = U_-$  и  $I_{vl} = 0$ ), инвертирачкиот влез е на потенцијал на маса.

Струјата низ отпорникот  $R_1$  е:

$$I = \frac{U_{vl}}{R_1}$$

Која продолжува да тече низ повратната врска т.е. низ отпорникот  $R_2$ .

Оваа струја создава пад на напон на отпорникот  $R_2$  кој е еднаков на излезниот но со спротивен знак:

$$U_{iz} = -IR_2 = -\frac{U_{vl}}{R_1} R_2, \dots\dots\dots(3.103)$$

Сега за напонското засилување на колото се добива:

$$A_{inv} = -\frac{R_2}{R_1}. \dots\dots\dots(3.104)$$

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  $180^\circ$  во однос на влезниот и затоа овој засилувач се вика инвертирачки.

Одредувањето на засилувањето на колото се прави со односот на вредностите на отпорностите 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 едновременно и пропорционално се еднакви, при што односот останува непроменет.

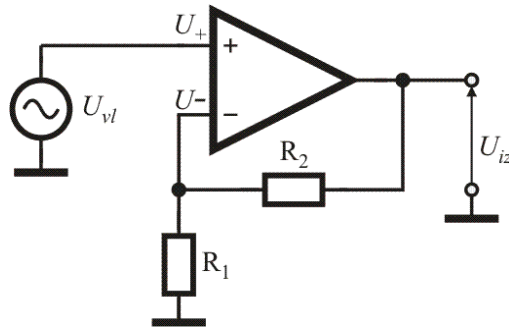
Сега лесно може да се одреди влезниот отпор на колото  $R_{vl}$ , како отпор гледан кон колото на местото на влезниот напон  $U_{vl}$ :

$$R_{vl} = R_1.$$

Треба посебно да се истакне дека **виртуелната нула** на влезот од операцискиот засилувач постои само кога е изведена **негативна повратна врска** во колото во кое е употребен засилувачот. Тоа значи дека постои отпорник поврзан помеѓу излезот на операцискиот засилувач и неговиот **инвертирачки** влез. Ако врката се изведе кон неговиот **неинвертирачки** влез, тогаш таа ќе биде **позитивна** и нема услови за постоење на виртуелната нула.

### 3.10.4. Неинвертирачки засилувач

Ако се комбинира идеален операциски засилувач со два отпорника, како на **слика 3.58** 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 3.58: Неинвертирачки засилувач.

Под услов да не тече струја во инвертирачкиот влез и при појава на виртуелна нула поради постоење на негативна повратна врска, изразот за напонот на инвертирачкиот и на неинвертирачкиот влез ќе биде:

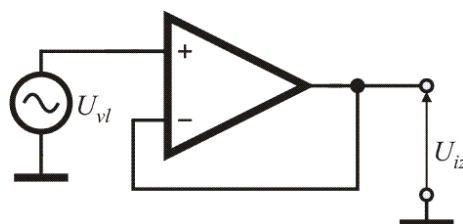
$$U_+ = U_- = U_{vl} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{iz}, \dots\dots\dots(3.105)$$

а засилувањето на колото:

$$A_{noninv} = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \dots\dots\dots(3.106)$$

И овде напонското засилување  $A_{noninv}$  се одредува со односот на вредностите на отпорите во колото. Промените на отпорите со промена на температурата на околината се минимални, а со тоа и промените 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.

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 3.59**.



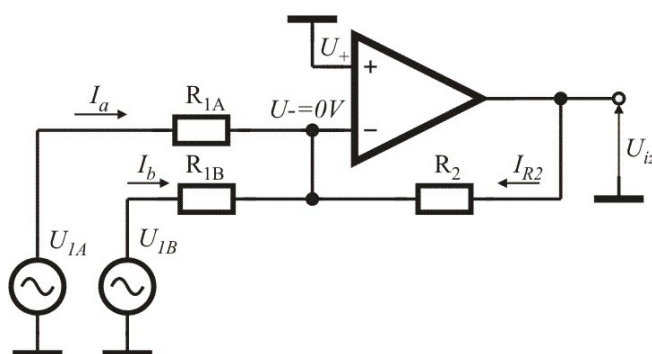
Слика 3.59: Операциски засилувач како напонски следител.

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.

Операцискиот засилувач во конфигурација на напонски следител најчесто се користи како „линиски“ засилувач што дава сигнал за долги линии или кабли обезбедувајќи ја потребната струја за нивно погонување.

### 3.10.5. Коло за сумирање

Колото прикажано на **слика 3.60**, 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 3.60: Шема на коло за собирање.

Во анализата на колото претпоставуваме идеален операциски засилувач со негативна врска, што значи постоење на виртуелна нула меѓу неговите влезови ( $U_- = U_+ = 0$ ). Изразите за струите во колото се:

$$I_A = \frac{U_{1A}}{R_{1A}}, \quad I_B = \frac{U_{1B}}{R_{1B}}, \quad I_{R_2} = \frac{U_{iz}}{R_2} \quad \dots \dots \dots (3.107)$$

За јазолот на инвертирачкиот влез, според II Кирхофов закон, може да се напише:

$$I_A + I_B = -I_{R_2}, \quad \dots \dots \dots (3.108)$$

а со замена на (3.107) во (3.108) се добива:

$$\frac{U_{1A}}{R_{1A}} + \frac{U_{1B}}{R_{1B}} = -\frac{U_{iz}}{R_2},$$

а понатаму:

$$U_{iz} = -\left( \frac{R_2}{R_{1A}} U_{1A} + \frac{R_2}{R_{1B}} U_{1B} \right) \quad \dots \dots \dots (3.109)$$

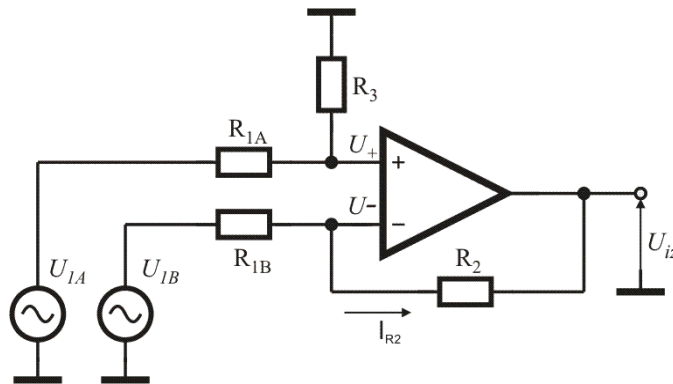
Ако  $R_{1A} = R_{1B} = R_2$  се добива:

$$U_{iz} = -(U_{1A} + U_{1B}).$$

Оваа равенка го дефинира излезот на колото за сумирање како сума од двата влеза. 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.

### 3.10.6. Засилувач на разлика

Шемата на засилувачот на разлика, со кој се засилува разлика на сигнали, е дадена на **слика 3.61**. 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 нула меѓу влезовите ( $U_- = U_+$ ).



Слика 3.61: Засилувач на разлика.

Напонот на неинвертирачкиот влез  $U_+$  претставува дел од напонот  $U_{1A}$ , добиен со напонскиот делител  $R_{1A}$  и  $R_3$ :

$$U_+ = \frac{R_3}{R_{1A} + R_3} U_{1A} \dots\dots\dots(3.110)$$

Струјата на повратната врска тече преку отпорниците  $R_2$  и  $R_{1B}$  и таа изнесува:

$$I_{R2} = \frac{U_{1B} - U_-}{R_{1B}} = \frac{U_- - U_{iz}}{R_2} \dots\dots\dots(3.111)$$

Од овие две равенки и од изразот за виртуелната нула се пресметува:

$$U_{iz} = -\frac{R_2}{R_{1B}} \left( U_{1B} - \frac{R_3}{R_2} \frac{R_{1B} + R_2}{R_{1A} + R_3} U_{1A} \right) \dots\dots\dots(3.112)$$

Вредностите на отпорот на отпорниците можат да се одберат така што да биде:

$$\frac{R_{1B}}{R_2} = \frac{R_{1A}}{R_3} \dots\dots\dots(3.113)$$



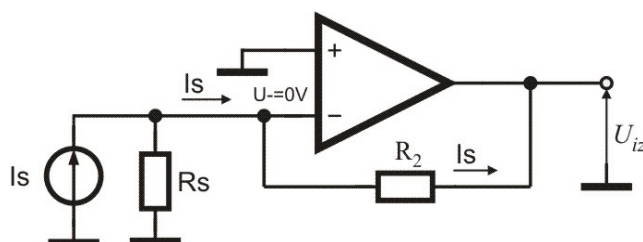
и за излезниот напон ќе добиеме:

$$U_{iz} = -\frac{R_2}{R_{1B}}(U_{1B} - U_{1A}). \dots\dots\dots(3.114)$$

Излезниот напон е пропорционален на разликата на влезните напони, а факторот на пропорционалноста е одреден со односот на отпорот за врска  $R_2$  кон отпорот на изворот на сигналот за инвертирачкиот влез  $R_{1B}$  (под услов 3.113).

### 3.10.7. Претворувач на струја во напон и напон во струја

Колото на претворувачот на струја во напон е дадена на **слика 3.62**. 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 врска.

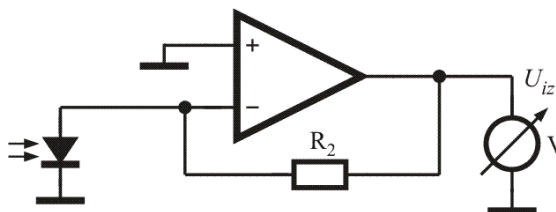


Слика 3.62: Претворувачот на струја во напон.

Влезната струја не тече преку операцискиот засилувач поради неговата бесконечна влезна отпорност, поради виртуелната нула не тече ни низ отпорникот  $R_s$  таа тече само преку отпорникот за повратна врска  $R_2$ . Излезниот напон е всушност пад на напон на отпорникот  $R_2$ :

$$U_{iz} = -I_S R_2. \dots\dots\dots(3.115)$$

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 се мерат на излез и влез соодветно. 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 3.63**) дава струја пропорционална на јачината на светлината која паѓа на нејзиниот објектив. Оваа струја се претвора во напон, пропорционален на упадната светлина, кој се мери со соодветен инструмент.

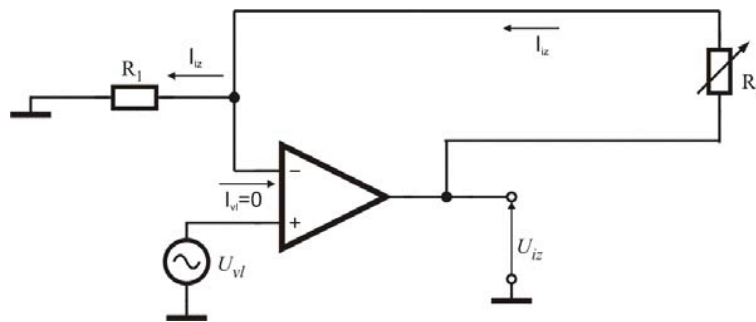


Слика 3.63: Мерач на светлина со претворувачот на струја во напон.

И овој, како и претходниот претворувач, најчесто се користи во мерна техника при пренос на мерниот сигнал на далечина меѓу точки кои може да имаат различни потенцијали. За таков вид на пренос, сигналот кој се пренесува има помали изобличувања ако се пренесува како струен сигнал. Колото на овој претворувач е дадено на **слика 3.64**.

Влезниот напон се приклучува на неинвертирачкиот влез на операцискиот засилувач а излезната струја тече во отпорниците  $R_1$  и  $R_2$ . Виртуелната нула и тука е присутна, што ја одредува излезната струја како:

$$I_{iz} = \frac{U_{vl}}{R_1} \dots\dots\dots(3.116)$$

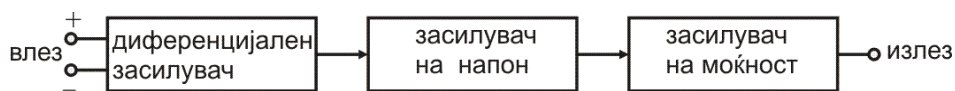


Слика 3.64: Претворувач на напон во струја.

Излезната струја е пропорционална на влезниот напон и не зависи од вредноста на отпорникот  $R_2$ , кој овде ја има улогата на оптоварувањето.

### 3.10.8. 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 3.65**). Ова е основа на која е изграден денес најпознатиот операциски засилувач 741 (UA741 или  $\mu A741$ ).



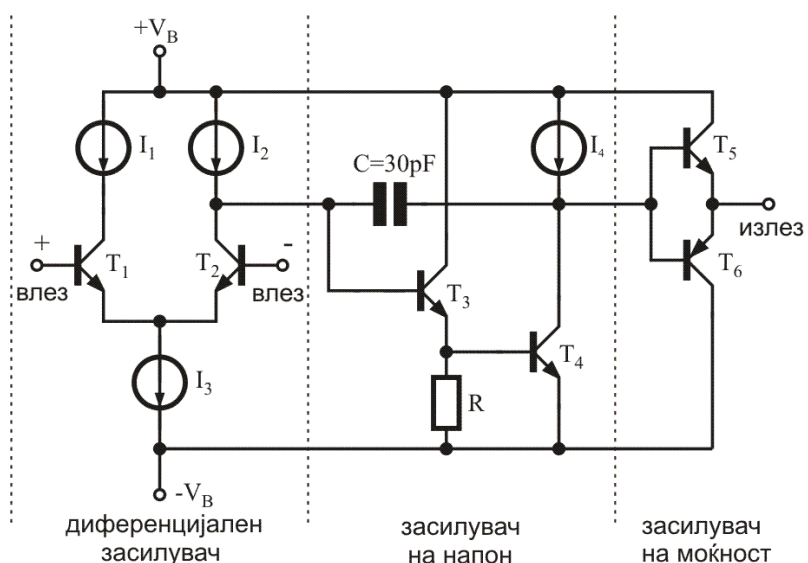
Слика 3.65: Блок-шема на операциски засилувач.

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 нагодување (т.н. 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 поднесува релативно мала дисипација.

Упростената шема на операцискиот засилувач 741 е дадена на **слика 3.66**.



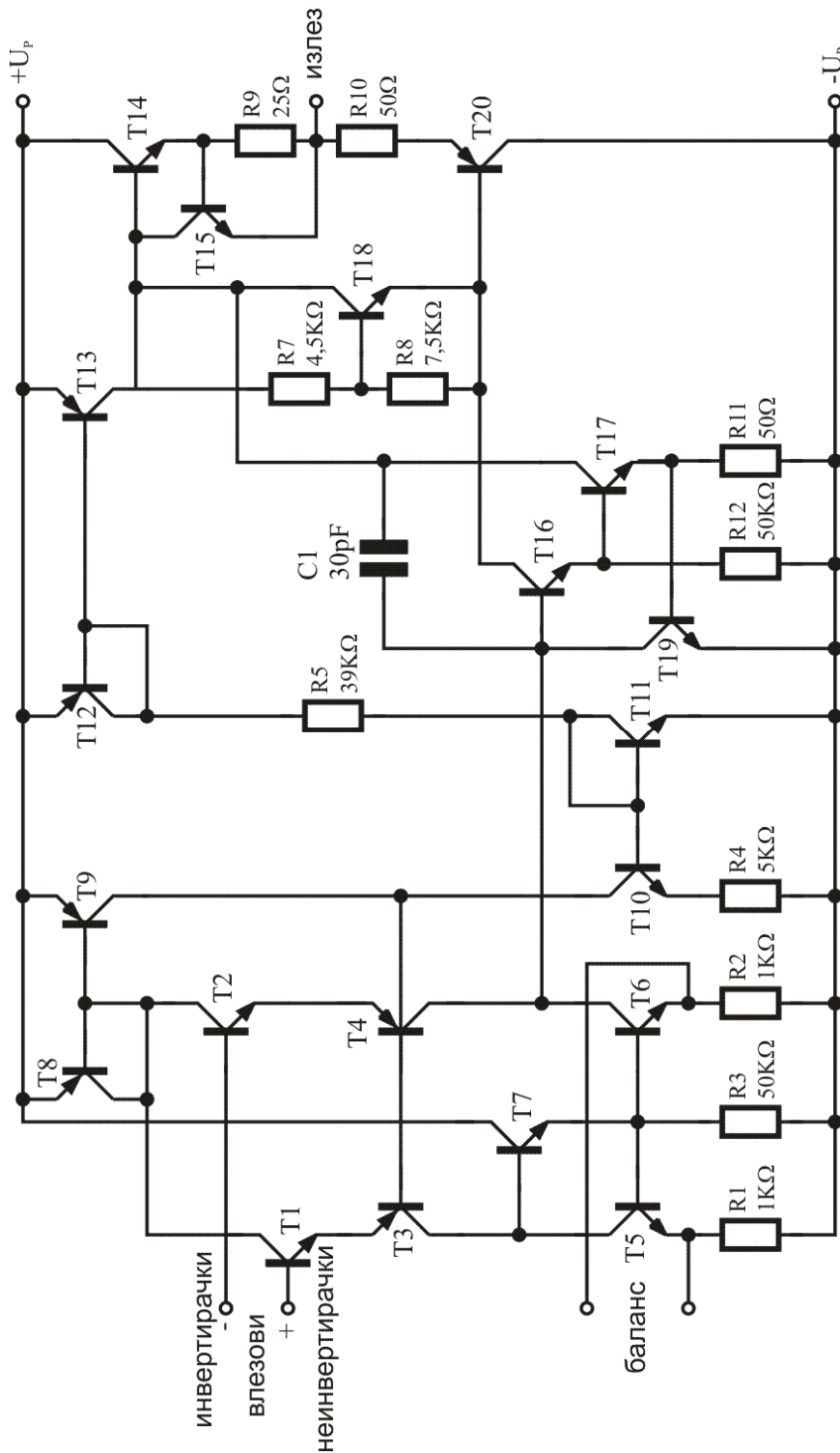
Слика 3.66: Упростена шема на операциски засилувач 741.

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  $I_3$ . Со струјниот генератор се обезбедува струјата на базите да биде многу мала од редот на  $\text{nA}$  до  $\mu\text{A}$  (кај 741 има вредност  $0,5 \mu\text{A}$ ), што обезбедува голема влезна отпорност на операцискиот засилувач. Струјните генератори обезбедуваат и голема температурна стабилност.

Засилувачот на напон е формиран со транзисторите  $T_3$ , којшто 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 се ограничува фреквенциската карактеристика за да не се јават осцилации при повратната врска. Бидејќи се работи за еднонасочен засилувач, неговата горна гранична фреквенција изнесува  $10\text{Hz}$ . Постојат операциски засилувачи кај кои може да се приклучи и надворешна повратна врска за компензација.

Засилувачот на моќност е изведен со комплементарен пар транзистори  $T_5$  и  $T_6$ , во класа АВ. 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  $1\text{mm}^2$ , ставена во метално цилиндрично кукиште или во стандарден интегриран чип, е дадена на **слика 3.67**.



Слика 3.67: Комплетната шема на операцискиот засилувач 741.

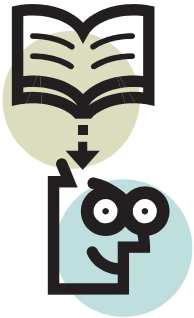
**НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!**

- Операциски засилувач е повеќестепен напонски засилувач со директна врска, со диференцијален влез и со големо засилување.
- Излезниот напон е фазно поместен за  $180^\circ$  во однос на напонот кој доаѓа на "-" влезот и затоа тој се вика инвертирачки влез.
- Напонот на влезот со ознака "+" е во фаза со излезниот напон и поради тоа е наречен неинвертирачки влез.
- Нултиот диференцијален напон при нулта струја во влезовите се нарекува виртуелна нула.
- Излезот на колото за сумирање е сума од двата влеза.
- Идеален операциски засилувач има: бесконечно големо напонско засилување, бесконечно голем влезен отпор и излезен отпор еднаков на нула.
- Со инвертирачки операциски засилувач, на неговиот излез се добива засилен влезен сигнал со фазно поместување од  $180^\circ$ .
- Со неинвертирачки операциски засилувач, на неговиот излез се добива засилен влезен сигнал без фазно поместување.
- Засилувач на разлика ја засилува разликата на влезните сигнали.
- Претворувач на напон во струја и струја во напон се операциски засилувачи со примена во мерната техника.

**ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ**

1. Дефинирај операциски засилувач.
2. Кој влез се нарекува инвертирачки а кој неинвертирачки?
3. Кои карактеристики ги има идеалниот операциски засилувач?
4. Нацртај инвертирачки засилувач и изведи го изразот за напонското засилување со претпоставката за  $A_v \rightarrow \infty$ .
5. Дефинирај го поимот "виртуелна нула".
6. Каде се применува операцискиот засилувач како напонски следител?
7. Изведи ја равенката за излезниот напон кај колото за сумирање.
8. Кој операциски засилувач засилува разлика на сигнали?
9. Која е практичната примена на струјно-напонскиот конвертор?
10. Кој операциски засилувач се користи во мерната техника при пренос на мерниот сигнал на далечина?
11. Кои се основните блокови од кои е составен еден реален операциски засилувач?

### 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 операциски засилувачи.
- Изработи проект на тема засилувачи.
- Изработи проект за практичната примена на засилувачите.
- Да се изведат релациите за напонско, струјно, влезна и излезна отпорност на засилувач во спој со заеднички колектор и база.
- Да се изведат релациите за напонско, струјно, влезна и излезна отпорност на засилувач во спој со заеднички дрејн и гејт.
- За да ја разбереш логаритамската функција која во трета година ќе ја изучиш по предметот математика, направи “истражување” на логаритамската функција ( $y=\log x$ ) со помош на калкулатор. Побарај помош од професор.

## ТЕМАТСКО УТВРДУВАЊЕ

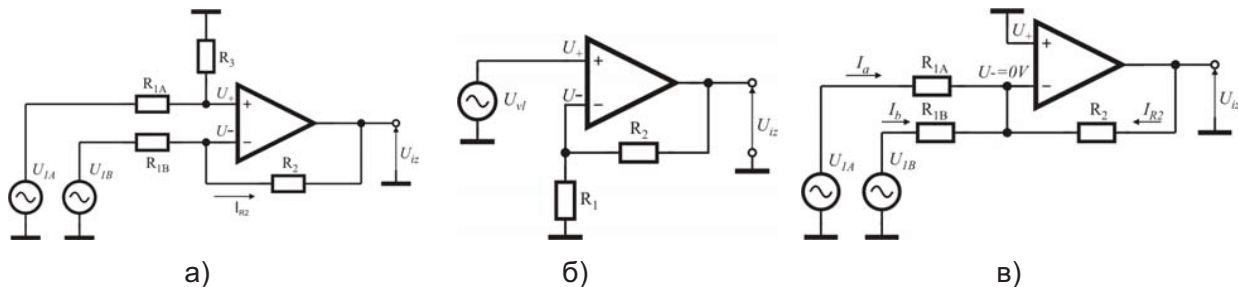
### I Прашања со заокружување

(Заокружи ги точните одговори)

1. Параметри на операциски засилувачи со бесконечна голема вредност се:
  - а) напонско засилување
  - б) излезна отпорност
  - в) влезна отпорност.
  
2. За приспособување на големата излезна отпорност на претходниот степен на мала влезна отпорност на следниот степен се користи:
  - а) инвертирачки операциски засилувач
  - б) неинвертирачки операциски засилувач
  - в) операциски засилувач како напонски следител.
  
3. Излезниот напон е пропорционален на разликата на влезните напони кај:
  - а) инвертирачки операциски засилувач
  - б) засилувач на разлика
  - в) неинвертирачки операциски засилувач.
  
4. Во електронски мерач на осветленост се применува:
  - а) претворувач на напон во струја
  - б) претворувач на струја во напон
  - в) диференцијален операциски засилувач.
  
5. Неинвертирачкиот операциски засилувач :
  - а) има позитивна повратна врска
  - б) има негативна повратна врска
  - в) нема повратна врска.

## II Прашања со поврзување

6. Поврзи ги шемите на операциските засилувачи со видот на операцискиот засилувач:



1. Коло за сумирање \_\_\_\_\_
2. Засилувач на разлика \_\_\_\_\_
3. Неинвертирачки операциски засилувач \_\_\_\_\_.

7. Поврзи го редоследот на степените во реалниот операциски засилувач:

- |               |                             |        |
|---------------|-----------------------------|--------|
| 1. I степен   | а) Засилувач на напон       | _____  |
| 2. II степен  | б) Диференцијален засилувач | _____  |
| 3. III степен | в) Засилувач на моќност     | _____. |

## 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. \_\_\_\_\_ е број кој покажува колку пати засилувањето на влезниот диференцијален напон е поголемо од засилувањето на влезниот истофазен напон.

11. \_\_\_\_\_ засилувач се користи во колата за обработка на сигналите.

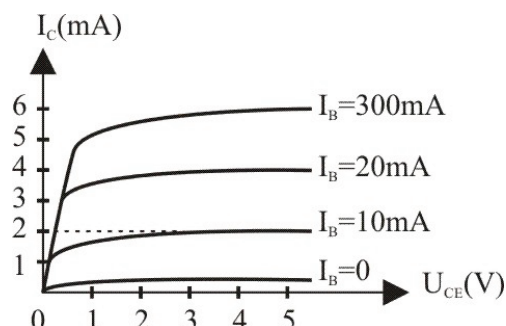
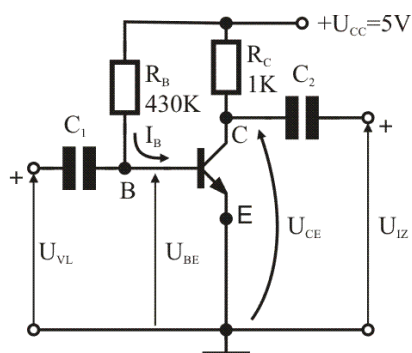


# П Р И Л О Г 3

**Задачи со решени примери**



1. 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:

$$U_{CC} = U_{BE} + R_B I_B$$

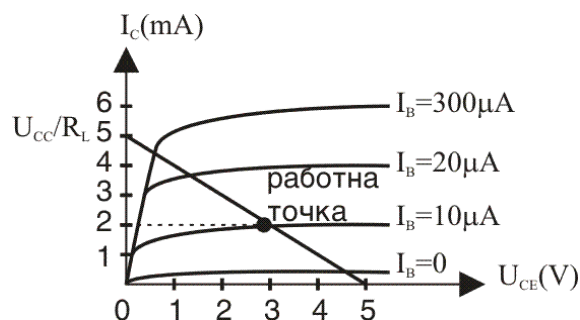
базната струја  $I_B$  е:

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B} = \frac{5 - 0,7}{430K} = 10\mu A.$$

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  $I_C = 2mA$ .

Бидејќи кондензаторот не спроведува еднонасочни струи, го еквивалентираме со прекин во колото.



2. За транзисторот од задача 1 да се пресмета  $\beta$  ( $h_{FE}$ ), за работната точка како во задачата.

### Решение:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \text{ за } U_{CE} = \text{const.}$$

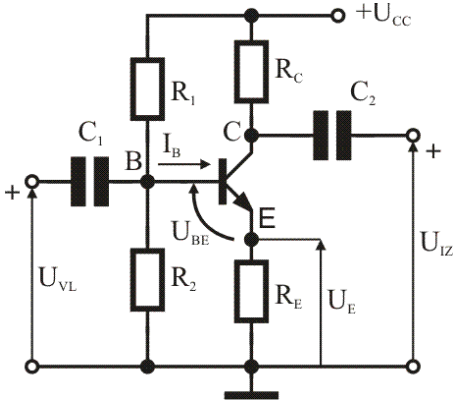
$$\beta = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-6}} = 200.$$

Коментар: Биполарни транзистори произведени во еден циклус имаат различни вредности на  $\beta$ , кои можат да достигнат разлики од 50 до 100%. Ако  $\beta$  се менува од 100 до 400, во овој пример, при базна струја од  $10\mu A$ , се добива:

$$\text{ако } \beta = 100, I_C = 100 \cdot 10\mu A = 1mA,$$

$$\text{ако } \beta = 400, I_C = 400 \cdot 10\mu A = 4mA.$$

3. 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):

$$U_B = U_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 10 \cdot \frac{1K}{1K + 3K} = 2,5V$$

$$U_{BE} = 0,7V.$$

$$\text{Од равенката: } U_B = U_{BE} + R_E \cdot I_E$$

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  $\beta$ . Причината е претпоставката која кажува дека струјата  $I_B$  не влијае врз вредноста на  $U_B$ . Ако претпоставиме вредност 100 за  $\beta$ , 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.

4. Транзисторот во колото од задачата 40 има  $\beta = 25$ , а останатите елементи се:  $R_1 = 45K\Omega$ ,  $R_2 = 30K\Omega$ ,  $R_C = 3K\Omega$ ,  $R_E = 2K\Omega$ . Да се одредат вредностите на  $I_C$  и  $U_C$ .

**Решение:**

Со трансформацијата направена со примена на Тевененовата теорема се добива:

$$U_{BT} = U_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 10 \cdot \frac{30K}{30K + 45K} = 4V$$

$$R_{BT} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{30K \cdot 45K}{30K + 45K} = 18K.$$

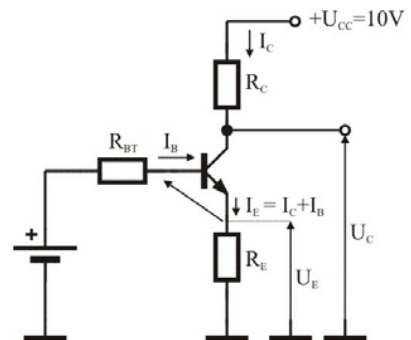
Од равенката:  $U_{BT} - R_{BT} \cdot I_B - U_{BE} - R_E \cdot I_E = 0$ , со замена за

$U_{BE} = 0,7V$ , се добива

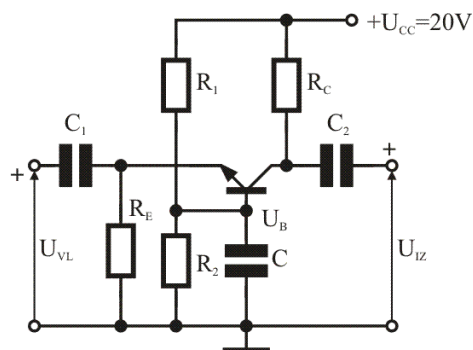
$$I_E = 1,23mA$$

$$I_C = \frac{\beta}{\beta + 1} \cdot I_E = \frac{25}{26} \cdot 1,23 \cdot 10^{-3} = 1,18mA$$

$$U_C = U_{CC} - R_C \cdot I_C = 10 - 3 \cdot 10^3 \cdot 1,18 \cdot 10^{-3} = 6,46V.$$



5. 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  $\beta$  има голема вредност. Да се одреди местото на работната точка.



**Решение:**

Колото за поларизација има иста форма како и во задача 60, па имаме;

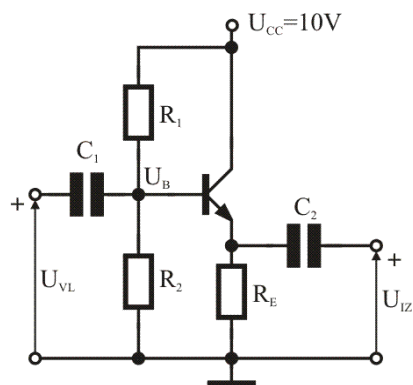
$$U_B = \frac{1\text{K}}{7\text{K}} \cdot 20 = 2,86\text{V}$$

$$I_E = \frac{2,86 - 0,7}{1,5 \cdot 10^3} = 1,44\text{mA}$$

$$U_C = 20 - 1,44 \cdot 10^{-3} \cdot 4,5 \cdot 10^3 = 13,5\text{V}$$

$I_C \approx I_E$  кога  $\beta$  е големо.

6. 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:**

$$U_B = U_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 10 \cdot \frac{2\text{K}}{4\text{K} + 2\text{K}} = 3,33\text{V}$$

$$U_E = U_B - U_{BE} = 3,33 - 0,7 = 2,63\text{V}$$

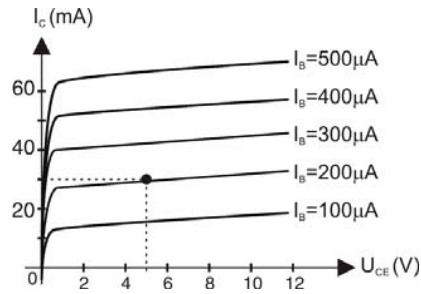
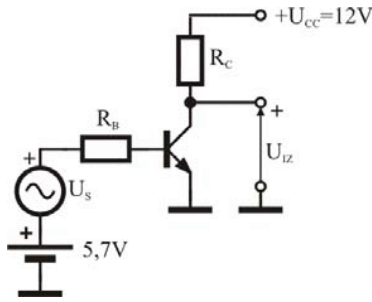
$$I_E = \frac{U_E}{R_E} = \frac{2,63}{1 \cdot 10^3} = 2,63\text{mA}$$

$$I_C = I_E = 2,63\text{mA}$$

Коментар: Овој засилувач е познат како емитерски следител, кој има напонско засилување помало од 1. Обично се употребува за трансформација на импедансата.

7. На сликата е дадено коло со заеднички емитер и неговите карактеристики. Работната точка е одбрана да има  $I_C = 30\text{mA}$  и  $U_{CE} = 5\text{V}$ . За напонот  $U_{BE}$  се смета дека е  $0,7\text{V}$ .

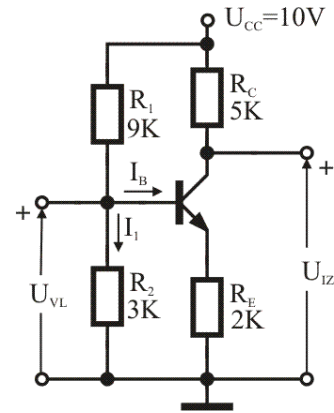
- да се нацрта статичката работна линија;
- да се пресмета вредноста на  $R_C$ ;
- да се пресмета вредноста на  $R_B$ ;
- да се пресмета  $\beta$  на транзисторот;
- да се пресмета вредноста на напонското засилување за голем сигнал.



- (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)  $A_u=1,44$ ).

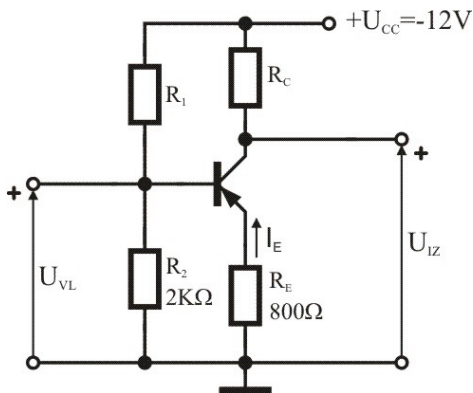
8. На сликата е прикажано засилувачко коло со заеднички емитер. Со претпоставени вредности  $I_B \ll I_1$ ,  $\beta = 250$  и  $U_{BE} = 0,7V$ .

- а) пресметај ја вредноста на струите  $I_E$ ,  $I_C$  и  $I_B$ ;  
 б) пресметај ја вредноста за  $U_{CE}$ .



- (Решение: а)  $I_C=0,9mA$ ,  $I_B=3,58\mu A$ ,  $I_E \approx I_C$ ,  
 б)  $U_{CE}=5,5V$ .)

9. 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  $U_C = -6V$ ;

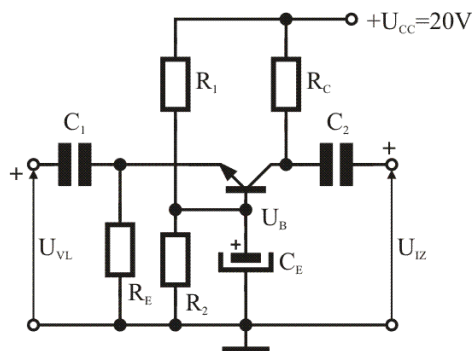
- (Решение: а)  $R_1=12,45K\Omega$ ,  
 б)  $R_C=5K\Omega$ )

10. 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  $I_C$ ;

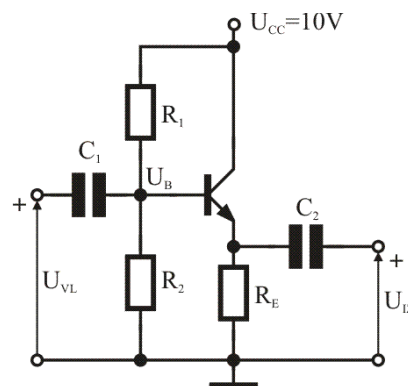
(Решение:  $I_C = 2,3 \text{ mA}$ ,  $I_E \approx I_C$ )



11. Колото за поларизација на засилувачот со заеднички колектор дадено на сликата е составено од  $R_1 = 6 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 4 \text{ k}\Omega$  и  $R_E = 2,7 \text{ k}\Omega$ .

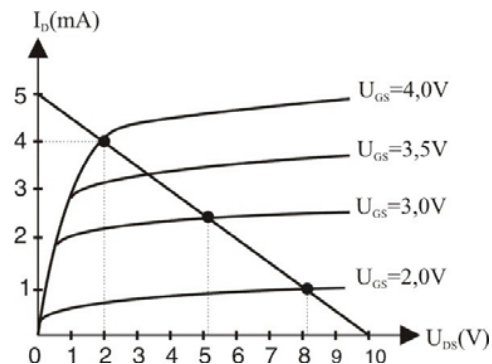
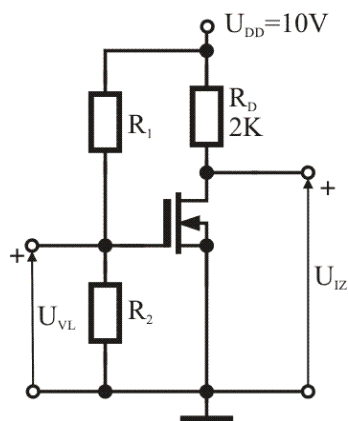
Ако  $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$  и  $\beta$  со голема вредност, да се пресмета емитерската струја  $I_E$ .

(Решение:  $I_E = 1,22 \text{ mA}$ )



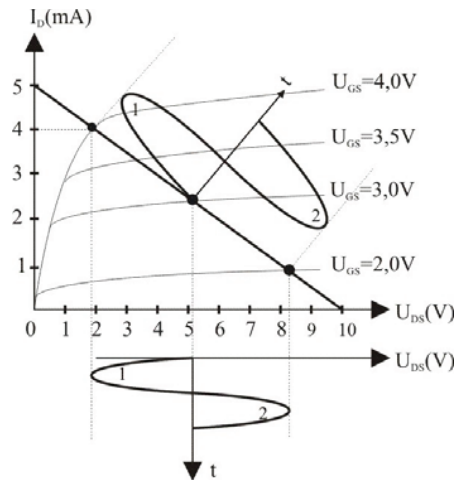
12\*. За колото од сликата се дадени карактеристиките на транзисторот. Да се одреди:

- вредноста на  $U_{DS}$  ако е  $U_{GS} = 2V$ ;
- најдоброто место на работната точка;
- 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) Од колото гејт-сорс и напонскиот делител R1 – R2 се добива:

$$3 = \frac{R2}{R1 + R2} \cdot 10$$

Ако се одбере едната вредност, на пример,

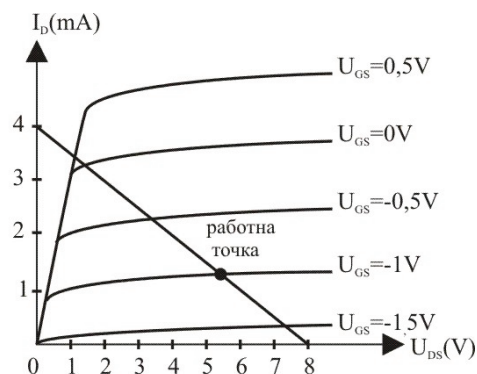
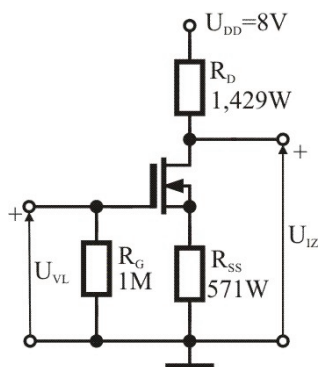
$R2 = 10K\Omega$ , за  $R1$  се добива  $23K\Omega$ . Резултатот на засилувањето на голем сигнал е прикажан на графикот. Кога влезниот напон  $U_{GS}$  се менува синусоидално од 3V до 4V и назад до 3V, работната точка се движи по работната линија и го одредува излезниот напон во границите од 5V до 1,9V, 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.

**13.** 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:

$$U_{GS} = -I_D \cdot R_{SS} = -1.$$

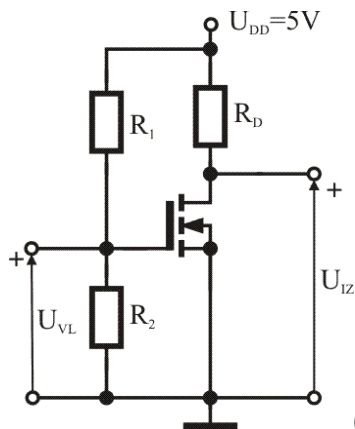
Струјата  $I_D$  за работната точка изнесува  $I_D = 1,75mA$

$$U_{GS} = -1 = -R_{SS} \cdot 1,75 \cdot 10^{-3}$$

$$R_{SS} = \frac{U_{GS}}{I_D} = \frac{-1}{1,75 \cdot 10^{-3}} = 571\Omega$$

$$R_D = 2 \cdot 10^3 - 571 = 1429\Omega.$$

14. 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  $150K\Omega$ .



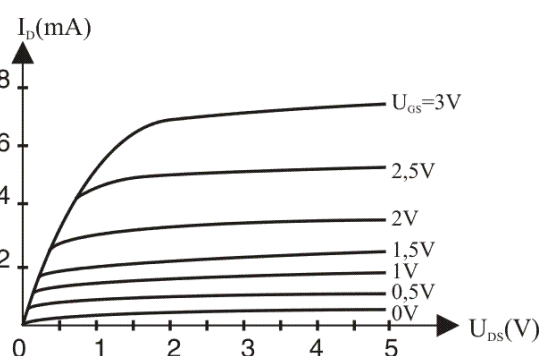
(Решение:  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{3}{2}, R_2 = 100K\Omega$ .)

15. На графикот се дадени излезните карактеристики на N-канален MOSFET со индуциран канал. Транзисторот е ставен во засилувач со заеднички сорс, даден во задача 14 со  $R_1 = 100K\Omega$ ,  $R_2 = 30K\Omega$  и  $R_D = 1,25K\Omega$ .

а) Да се конструира работната права за ова коло.

б) Да се одреди положбата на работната точка.

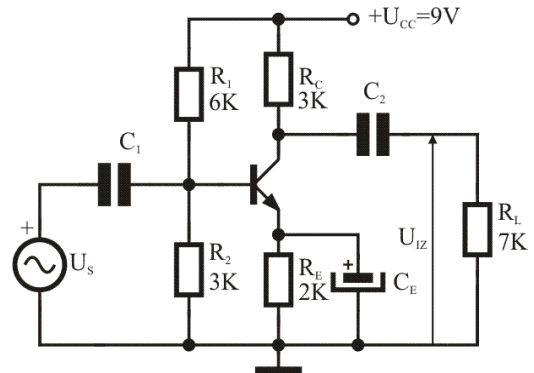
в) Да се најде напонското засилување за големи сигнали.



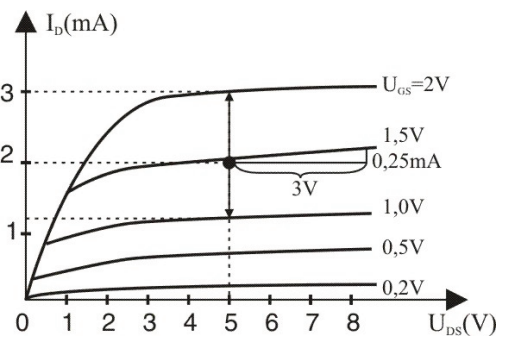
- (Решение: а) за  $I_D=0$ ,  $U_{DS}=5\text{ V}$ , за  $U_{DS}=0$ ,  $I_D=4\text{ mA}$ ,  
 б) ќе лежи на  $U_{GS}=1,5\text{V}$ ,  
 в)  $A_U=1,65$ .)

15. 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:  $A_U=-52,5$ .)



16\*. 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  $\pm 0,5\text{V}$  ( $\Delta U_{GS} = 1\text{V}$ ), 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  $8\text{K}\Omega$ :

$$R_{Leq} = \frac{1}{\frac{1}{g_0} + R_L} = \frac{1}{\frac{1}{83,3 \cdot 10^{-6}} + 8 \cdot 10^3} = 4,8\text{K}\Omega$$

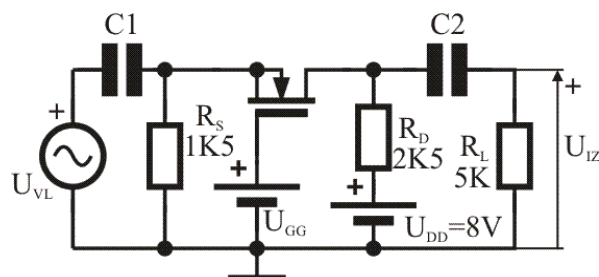
$$A_U = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = -\frac{U_{GS} \cdot g_m \cdot R_{Leq}}{U_{GS}} = -\frac{1 \cdot 1,75 \cdot 10^{-3} \cdot 4,8 \cdot 10^3}{1} = -8,4.$$

17\*). На сликата е дадено коло на MOSFET во спој со заеднички гејт, за кое е измерена струја на дрејн од 1mA.

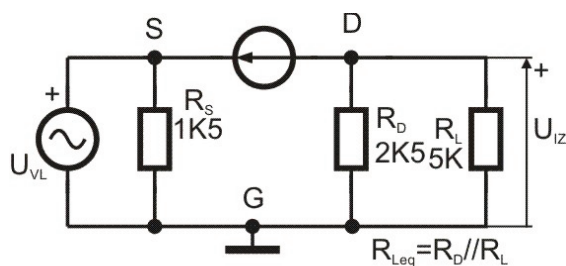
а) Да се одреди вредноста на напонот  $U_{GG}$  со која се добива  $U_{GS} = +1V$ .

б) Да се нацрта еквивалентно коло на засилувачот.

в) Да се најде напонското засилување, ако се дадени  $g_0 = 0$  и  $g_m = 5mS$ .



**Решение:**



решение

а) Патеката 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:

$$U_{vl} = -U_{GS}$$

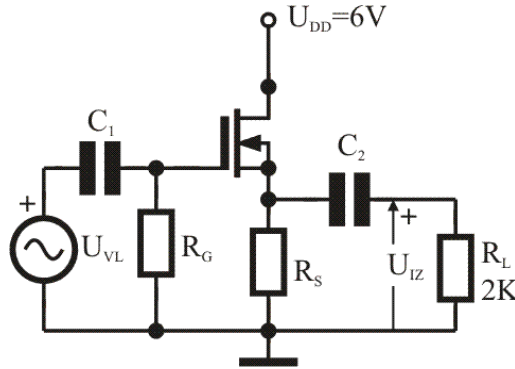
$$U_{iz} = -g_m \cdot U_{GS} \cdot R_{Leq}$$

$$A_U = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = g_m \cdot R_{Leq} = 8,33.$$

18\*). 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)  $A_U=0,98$ .)

19. 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:**

$$A_{U1} = 100; 20\log(100) = 20 \cdot 2 = 40\text{dB}$$

$$A_{U2} = 1000; 20\log(1000) = 20 \cdot 3 = 60\text{dB}$$

$$A_{TOT} = 40 + 60 = 100\text{dB} \text{ или}$$

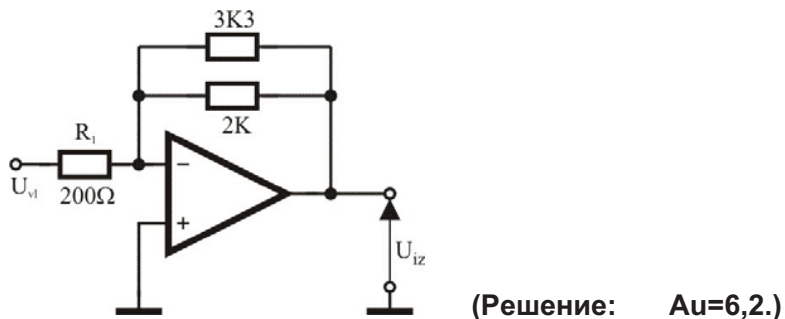
$$A_{TOT} = 100 \cdot 1000 = 100000; 20\log(100000) = 20 \cdot 5 = 100\text{dB}.$$

20. За диференцијален засилувач, кој има диферецијално засилување  $60\text{dB}$  и истофазно засилување  $-20\text{dB}$ , да се најде вредноста на факторот на потиснувањето на истофазниот сигнал  $\rho$ .

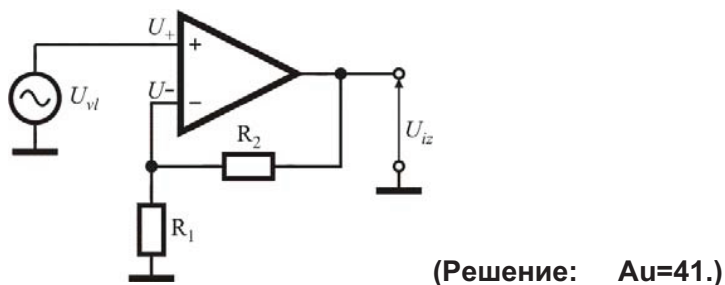
(Решение:  $80\text{dB}$ .)

### Задачи и решени примери од операциски засилувачи

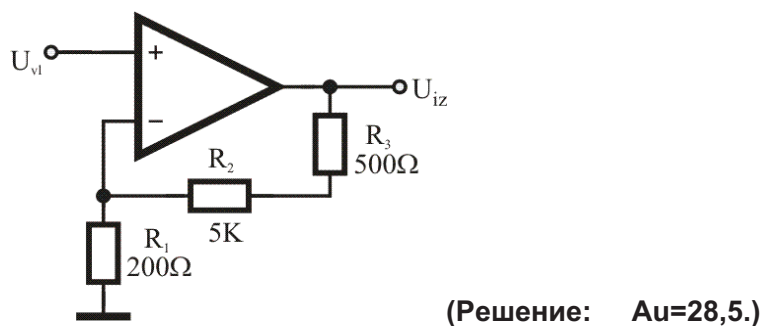
21. За колото со идеален операциски засилувач на сликата да се пресмета напонското засилување.



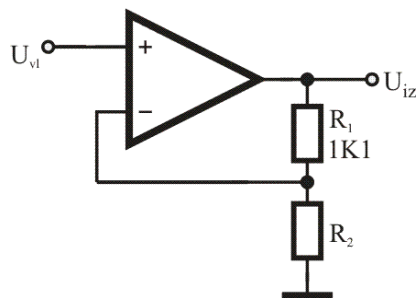
22. Да се пресмета напонското засилување за колото од сликата, ако  $R_1=200\Omega$  и  $R_2=4K\Omega$ .



23. За колото со идеален операциски засилувач од сликата да се пресмета напонското засилување.

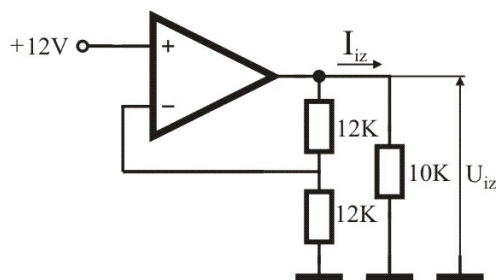


24. За колото со идеален операциски засилувач од сликата да се прасмета вредноста на отпорот на  $R_2$  со која колото дава напонско засилување 30.



(Решение:  $R_2=38K\Omega$ .)

25. За колото на сликата да се одреди вредноста на излезната струја.



(Решение:  $I_{iz}=2,4mA$ )

# 4.

## 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 интегрирани 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.

Постојат 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 шоткиевски 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 ногички 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 илјади 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 кои 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.

Постојат голем број дигитални интегрирани кола, кои не спаѓаат во овие две серии, како што се микроконтролери, микропроцесори и разни интерфејс кола.

Во категоријата **линеарни интегрирани кола** спаѓаат разни аудио, видеокола, радио и комуникациски кола, тајмери, осцилатори и голем број уреди со специјална намена.

### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

1. Како се делат интегрираните кола според нивните функции?
2. Какви транзистори се користат за производство на дигитални интегрирани кола?
3. Наброј ги видовите фамилии на логички кола.

## 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. Сите пасивни елементи и врските помеѓу елементите се изработуваат во две можни техники: “тенок филм” и “дебел филм”. Во техниката дебел филм се нанесува материјал во вид на паста (спроводен, отпорнички или диелектрички) на керамичка подлога преку маска со отвори на местата каде што треба да се нанесе материјалот. Постапката се нарекува ситопечат. Материјалот потоа се суши и се пече на висока температура. Слоевите што се нанесуваат имаат дебелина неколку микрометри. Во техниката тенок филм слоевите се нанесуваат преку таложење на материјалот од состојба на пареа. Нанесувањето може да се направи исто така преку маска, но може материјал да се нанесе по целата површина, а потоа да се отстрани со нагризување од деловите каде што не е потребен. При тоа слоевите што треба да останат се заштитуваат со фотоосетлива емулзија (слично на фотопостапката за нагризување на бакарот при изработка печатени плочки). Оваа постапка се нарекува фотолитографија. Во техниката на тенок филм дебелината на слоевите е до еден микрометар.

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  $1\text{cm}^2$  и најчесто се користат како излезни степени со поголема излезна моќност.

### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

1. Како се изработуваат хибридните интегрирани кола?
2. Во која техника се изработуваат активните елементи на хибридните кола?
3. Која е најчестата примена на хибридните интегрирани кола?

## 4.3. Монолитни интегрирани кола

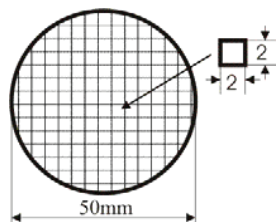
Монолитните интегрирани кола се изработуваат на единствен кристален или монолитен материјал, со што е постигната голема густина на пакување на составните делови. Во производството на овие кола се применуваат неколку десетина операции. Повеќето операции се изведуваат автоматски на поголем број интегрирани 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  $1\ \mu\text{m}$ , 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.

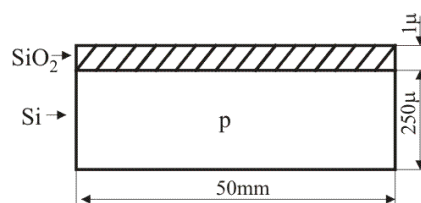
Монокристалите се формираат со постапката на извлекување. Во уредот за извлекување, пречистениот полупроводник повторно се топи во околина исполнета со некој инертен гас, со парче кристал се допира површината на истопената маса и постепено се врти и се извлекува нагоре и така расте монокристалот на полупроводникот со форма на цилиндар.

Во процесот на изработката на интегрираните кола, монокристалните цилиндри се сечат на тенки дискови со пречник од околу 50-300 mm и дебелина од 500 до 1000  $\mu\text{m}$ . Ако димензиите на колото што ќе се произведе се со дијаметар 50 mm, тогаш плочката ќе има изглед на мрежа од квадратчиња со димензии 2 x 2mm (слика 4.1).



4.1: Диск на монокристален цилиндар како подлога за интегрирани кола.

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. При тоа 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.



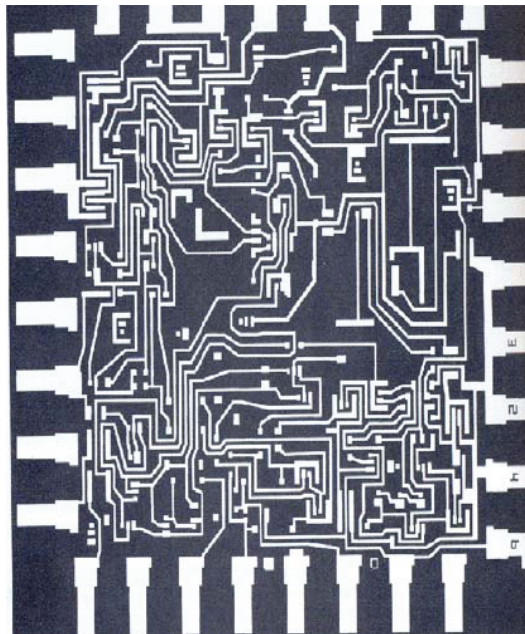
4.2: Пресек на дискот по оксидацијата.

### 4.3.2. Фотолитографија

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 фотолитографија.

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 квадратни површини и се повторува за да се добие истиот распоред како на слика 4.1.

Фотолитографскиот 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.

Фотолитографскиот 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  $\mu\text{m}$ . 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.

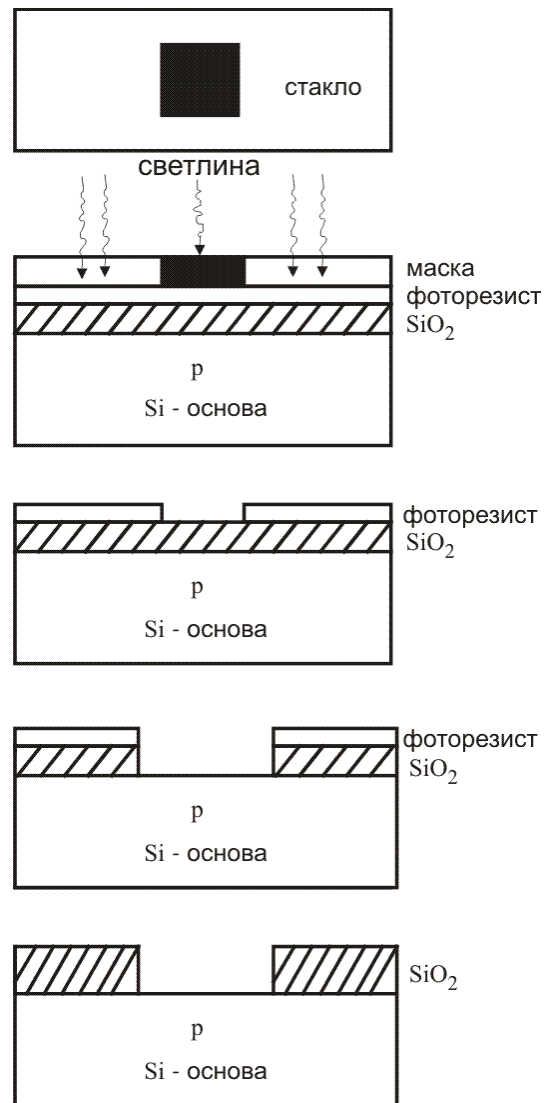
Фоторезистот е органски полимер, кој може да биде позитивен или негативен. Со негативниот фоторезист, областите изложени на светлина стануваат полимеризирани и цврсти. По развивањето, овие области остануваат на површината на дискот, а неекспонираните делови се отстрануваат. Со оваа постапка, на дискот 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**.

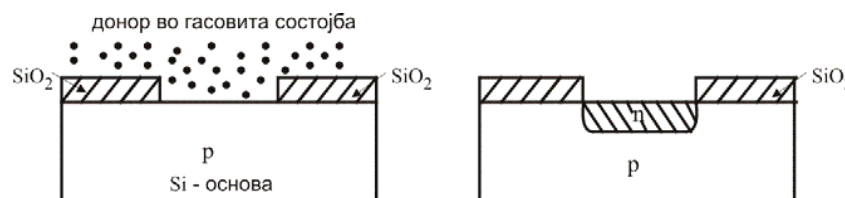


Слика 4.4: Литографска постапка на формирање на "прозорец".

### 4.3.3. Дифузија

Процесот на дифузија претставува процес на внесување примеси на површината на дискот. Дискот се загрева на висока температура,  $800^{\circ}\text{C}$  за германиумот и  $1200^{\circ}\text{C}$  за силициумот, а примесите во течна состојба или во форма на пареа, 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, тој служи како маска за дифузијата.

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.

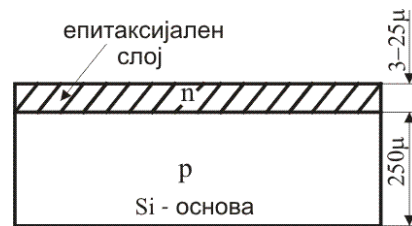
Со процесот на дифузија, најголемата концентрација на примесите е секогаш на површината на дискот. Контролирано продирање на атомите на примесите во силициумскиот диск се постигнува со јонска имплантација. Тоа е процес на формирање млаз од забрзани јони на примеса и негово насочување кон површината на 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. Епитаксијална надградба

Операција на додавање на силициумската основа на дискот на дополнителен слој полупроводник од спротивен тип се вика епитаксијална надградба. 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: Монокристал на епитаксијален слој.

Врските меѓу елементите на интегрираното коло се прават со нанесување тенок пласт – филм од спроводен материјал. Постапката на нанесување се вика таложeње и се изведува во комора со висок вакуум. Во комората се воведува алуминиум, загреан до испарување. Атомите на алуминиумот од пареата се распространуваат преку дискот и се таложат на целата површина, а низ подготвени отвори на површината на дискот создаваат спроводни врски меѓу елементите. Вишокот алуминиум се отстранува со фотолитографска постапка. Патем, на сличен начин во тенкослојните хибридни кола се прават тенкослојни отпорници со големи вредности на отпорноста. Наместо алуминиум, како материјал за нанесување се користи никел - хром, хром - силициум или молибден - силициум.

#### 4.3.5. Завршни операции

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 неколку илјади, 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 (слика 4.7).



4.7: Разни форми на интегрирани кола.



## 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  $350\text{mm}^2$ , со густина од 1 милион транзистори по квадратен милиметар.

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, мобилни телефони, телевизори, DVD, работи во автоматиката, “електрика на стакла” во автомобилската техника и други. 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

редници 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 вакуумски електронски цевки, познат под називот ENIAC, имал тежина од преку 30 t и потрошувачка од 200KW.

### **НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!**

- **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, прицврстени на заедничка подлога.**
- **Основните операции при изработка на монолитните интегрирани кола се: подготовка и оксидација на основата, фотолитографија, дифузија, епитаксијална надградба и завршни операции.**

### **ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ**

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 епитаксијална надградба?
7. Каде се применуваат интегрираните кола?

## **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 _____.            |

4. Поврзи ги операциите за изработка на монолитните интегрирани кола со редоследот на нивното извршување:

- 1. Фотолитографија \_\_\_\_\_
- 2. Подготовка и оксидација на основата \_\_\_\_\_
- 3. Дифузија \_\_\_\_\_
- 4. Завршни операции \_\_\_\_\_
- 5. епитаксијална надградба \_\_\_\_\_ .

## III Прашања со дополнување

5. Првата серија на TTL-фамилијата има ознака \_\_\_\_\_.
6. Првата серија на CMOS-фамилијата има ознака \_\_\_\_\_.
7. Процесот на внесување примеси на површината на дискот се нарекува \_\_\_\_\_.
8. Операција на додавање на силициумската основа на дискот на дополнителен слој полупроводник од спротивен тип се нарекува \_\_\_\_\_.

### Вежби за активно учење:

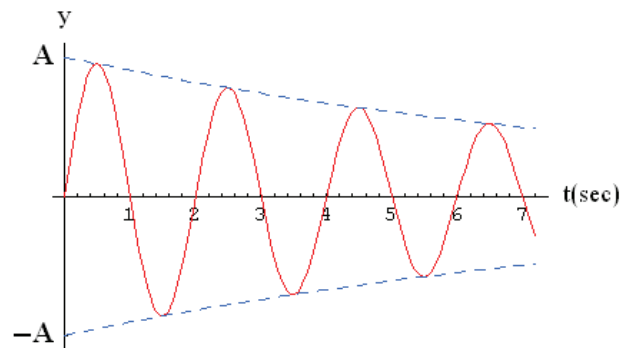
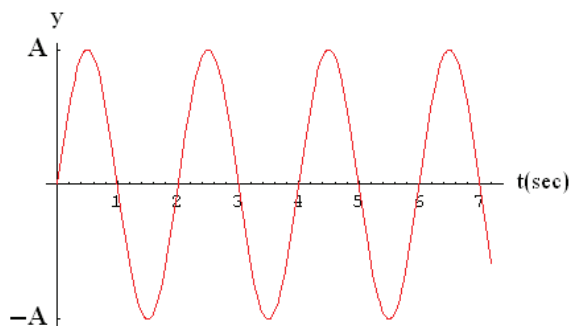


- Истражувај на интернет за видови и карактеристики на интегрирани кола и врз основа на истражувањето изработи проект.
- Во каталог за интегрирани кола пронајди ја фамилијата на логички интегрирани TTL кола и анализирај ги нивните ознаки.
- Во каталог за интегрирани кола пронајди ја фамилијата на логички интегрирани CMOS кола и анализирај ги нивните ознаки.

# 5. ХАРМОНИСКИ ОСЦИЛАТОРИ

Со хармониските осцилатори ќе можеш да се запознаеш во следнава тема и ќе можеш:

- да ја разбираш позитивната повратна врска;
- да го објаснуваш принципот на добивање на осцилации;
- да го познаваш принципот на работа на RC, LC и осцилатор со Винов мост;
- да ја објаснуваш предноста на осцилаторите со кварц;
- да го познаваш степенот на отстранување на причините за нестабилноста на фреквенцијата кај осцилаторите;
- да читаш шеми на осцилатори;
- да решаваш нумерички примери од осцилатори.





Осцилаторите се електронски уреди кои имаат способност еднонасочната енергија од изворот за напојување да ја претворат во периодичен сигнал. Процесот на претворањето се одвива без учество на каков и да е надворешен генератор на променлива струја.

Осцилаторите можат да се поделат на две групи:

- хармониски;
- релаксациони.

Хармониските осцилатори произведуваат осцилации со синусоидна бранова форма. Релаксационите осцилатори на излезот даваат напони со разни форми, коишто се разликуваат од синусоидната (правоаголни, триаголни, пилести и други).

Хармониските осцилатори можат да се поделат на :

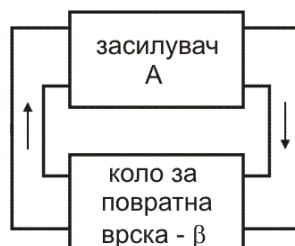
- осцилатори со негативен отпор;
- осцилатори со позитивна повратна врска.

Хармониските осцилатори се составени од активен елемент и од осцилаторно коло. Активниот елемент треба да ги воспостави и да ги одржува осцилациите.

Осцилаторите имаат широка примена во мерната техника, автоматиката, радиотехниката, ТВ-техниката, телефонската и телеграфската техника, во техниката на загревање на материјали со високофреквентни сигнали и сл.

## 5.1. Осцилатори со позитивна повратна врска

Принципот на позитивната повратна врска, даден со блок-шема на **слика 5.1**, е објаснет во поглавјето за повратната врска кај засилувачите. Таму е наведен и условот за добивање **позитивна повратна врска**, а тоа е кога **фазите на влезниот и на вратениот сигнал се совпаѓаат**, што не интересира во специјалниот случај кога и **кружното засилување е еднакво на 1** ( $A\beta = 1$ ). Како засилувач може да се користи транзистор, FET или операциски засилувач. Мрежата на повратната врска се нарекува селективно коло, бидејќи ја селектира фреквенцијата на излезниот синусоиден напон.



5.1: Блок-шема на позитивна повратна врска.

Со оглед на тоа што нема никаква надворешно влијание, интересно е да се види како започнуваат осцилациите. Во моментот на вклучување на напојувањето, на излезот од секој засилувач постои сопствен шум со широк спектар на фреквенции и со релативно мала амплитуда. Од целиот тој спектар, со мрежата за повратна врска, се одделува компонента со фреквенција еднаква со резонантната фреквенција на осцилаторното коло. И додека избраната компонента поминувајќи преку јамката на повратната врска станува се поголема, останатите компоненти остануваат исти, зашто не се обновуваат при секое поминување преку јамката. Избраната компонента расте до вредност за која осцилациите се самоодржуваат, а растењето се ограничува со нелинеарниот дел на karakteristikата на активниот елемент. Фреквенцијата на сигналот која се одржува во колото, се нарекува **фреквенција на осцилирање** и се означува со **fo**.

Основен услов за осцилирање е кружното засилување да е еднакво на 1:

$$A\beta = 1 \dots\dots\dots(5.1)$$

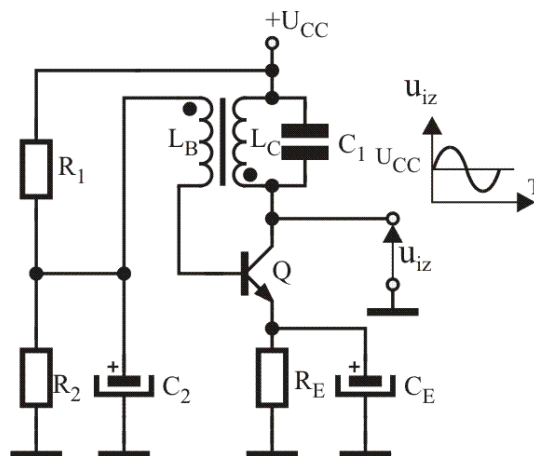
Оваа релација се нарекува **услов на Баркхаузен**.

**ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ**

1. Кој е условот за добивање позитивна повратна врска?
2. Објасни го процесот на самоодржување на осцилациите.
3. Кој е основниот услов за осцилирање?

**5.2. Осцилатори со индуктивна врска**

Шемата на осцилатор со резонантно коло и индуктивна врска е дадена на **слика 5.2**. Во колекторското коло на транзисторот Т е приклучено резонантно коло како оптоварување. Резонантното коло е индуктивно спрегнато со колото на базата преку навивките  $L_C$  и  $L_B$ .



5.2: Осцилатор со индуктивна врска.



Транзисторот внесува фазно поместување од  $180^\circ$  и повратната врска внесува фазно поместување од  $180^\circ$ . Вкупното фазно поместување изнесува  $360^\circ$  што значи дека вратениот сигнал на базата е со иста фаза како и пред тоа. На тој начин се обезбедува позитивна повратна врска.

Транзисторот служи како активен засилувачки елемент и работи во спој со заеднички емитер. Со отпорниците  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_E$  засилувачот се поларизира така што ќе работи во класа С. Кондензаторот  $C_2$  служи да го донесе на маса другиот крај на калемот  $L_B$  за наизменичната струја. Транзисторот спроведува само во еден мал дел од позитивната периода на осцилациите, кога треба да ги надомести загубите во отпорот на калемот во резонантното коло. Во останатиот дел од периодата транзисторот е неспроводен. Во тој период резонантното коло е оставено само на себе и во него се одвива осцилаторниот процес.

Фреквенцијата на излезниот напон се одредува според **Томсоновата формула**:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots\dots\dots(5.2)$$

Овој осцилатор, познат како **Мајснеров осцилатор**, дава синусоиден напон со висока фреквенција од редот на MHz. Мајснеровиот осцилатор не е наменет за работа на ниски фреквенции, затоа што кондензаторите и калемите треба да имаат големи вредности, односно да бидат со големи димензии, што е неповолно.

### НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

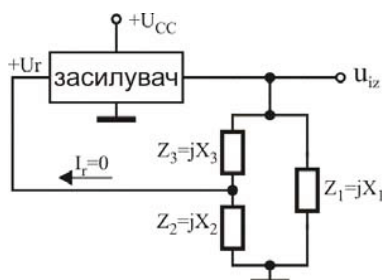
- **Осцилатори се уреди кои, со примена на позитивна повратна врска, еднонасочната струја од изворот за напојување ја претвораат во наизменична.**
- **Условот за добивање осцилации во засилувач со позитивна повратна врска, е кружното засилување да биде еднакво на 1 ( $A\beta = 1$ ).**
- **Формулата за резонантна фреквенција  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  се нарекува Томсонова формула.**
- **Мајснеровиот осцилатор е осцилатор со индуктивна повратна врска.**

### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

1. Како се обезбедува позитивна повратна врска кај осцилаторот со резонантно коло и индуктивна врска?
2. Напиши ја Томсоновата формула.
3. Зошто Мајснеровиот осцилатор не е наменет за работа на ниски фреквенции?

## 5.3. Осцилатори во три точки

Блок-шема на осцилатор во три точки е дадена на **слика 5.3**.



5.3: Блок-шема на осцилатор во три точки.

Селективното осцилаторно коло е составено од три импеданси со чисто реактивен карактер, означени како на сликата. За факторот на повратната врска  $\beta$  може да се напише:

$$\beta = \frac{u_r}{u_{iz}} = \frac{X_2}{X_2 + X_3} \dots \dots \dots (5.3)$$

Ако се исполнети условите за осцилирање, напоните  $u_r$  и  $u_{iz}$  се фазно поместени за  $180^\circ$ . Поради тоа, именителот во горната равенка треба да има негативна вредност, а тоа значи дека реактансите  $X_2$  и  $X_3$  треба да бидат со спротивен знак. Освен тоа, апсолутната вредност на реактансата  $X_3$  треба да е поголема од онаа на реактансата  $X_2$ :

$$|X_3| > |X_2| \dots \dots \dots (5.4)$$

За резонантната фреквенција на осцилаторното коло имаме услов, збирот на реактансите во колото да биде нула, па следува:

$$X_1 + X_2 + X_3 = 0 \dots \dots \dots (5.5)$$

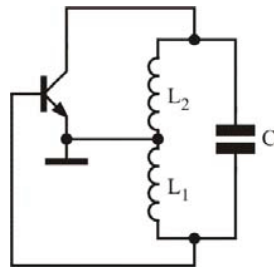
Овој услов ќе биде задоволен ако реактансите се  $X_1$  и  $X_2$  со ист знак. На основа на овој заклучок, следува дека имаме два основни вида на осцилатори во три точки:

**Хартлеев** – кој има  $X_2$  и  $X_3$  како индуктивности, а  $X_1$  како капацитивност и

**Колпицов** – кој има  $X_2$  и  $X_3$  како капацитивности, а  $X_1$  како индуктивност.

### 5.3.1. Хартлеев осцилатор

Принципиелната шема на Хартлеевиот осцилатор е дадена на **слика 5.4**. Хартлеевиот осцилатор содржи осцилаторно коло со поделена индуктивност на два дела. Практично, калемот на осцилаторното коло е направен со извод, врзан на емитерот на транзисторот. Делот на калемот  $L_1$  е во колото база емитер, а делот  $L_2$  во колото колектор емитер.



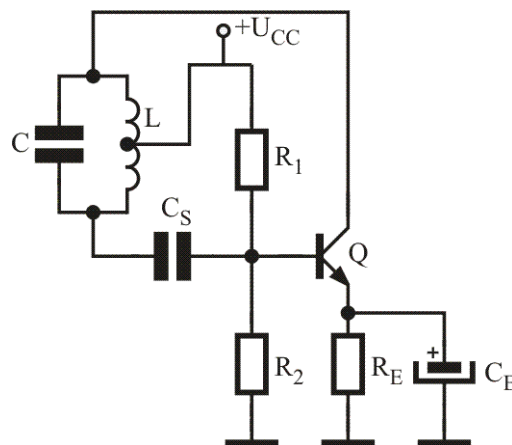
5.4: Принципиелна шема на Хартлеев осцилатор.

Струјата во делот на калемот  $L_2$  создава индукција во делот  $L_1$  за побудување на базата. Напонот на колекторот и напонот на базата меѓусебно се фазно поместени за  $180^\circ$  затоа што се земаат од спротивните краеве на калемот во однос на заедничката точка, врзана на емитерот. Ако се направат повеќе изводи од калемот, се овозможува едноставна промена на јачината на повратната врска.

Фреквенцијата на осцилаторот се пресметува според:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{C(L_1 + L_2)}} \dots\dots\dots(5.6)$$

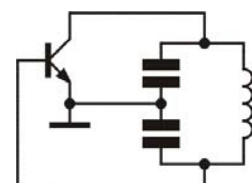
На **слика 5.5** е дадена комплетна шема на Хартлеев осцилатор.



5.5: Комплетна шема на Хартлеев осцилатор.

### 5.3.2. Колпицов осцилатор

Принципиелна шема на Колпицов осцилатор е дадена на **слика 5.6**. Селективното осцилаторно коло е составено од две капацитивности и една индуктивност. Реална шема на Колпицов осцилатор е дадена на **слика 5.7**.

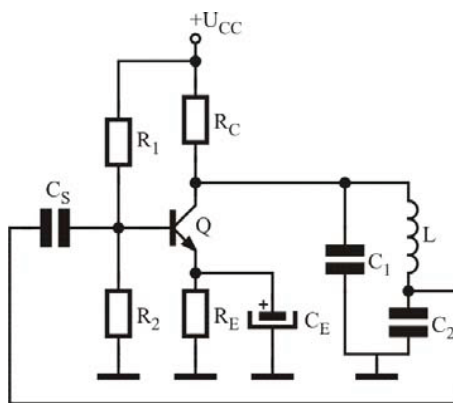


5.6: Принципиелна шема на Колпицов осцилатор.

Анализата и пресметката се прават на сличен начин како и за Хартлеевиот осцилатор, а фреквенцијата на осцилирањето е:

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{LC_1C_2}} \dots\dots\dots(5.7)$$

Нагудувањето на јачината на позитивната повратна врска е многу посложено во однос на Хартлеевиот осцилатор. Ако се менува капацитетот на  $C_2$  поради промена на јачината на повратната врска, ќе се менува и работната фреквенција на осцилаторот. Од друга страна, предноста на овој осцилатор е во тоа што наизменичниот напон на осцилациите има помали изобличувања. Кондензаторот  $C_1$  има мала реактанса за сите повисоки хармонични компоненти, тие се елиминираат и се добиваат помали изобличувања.



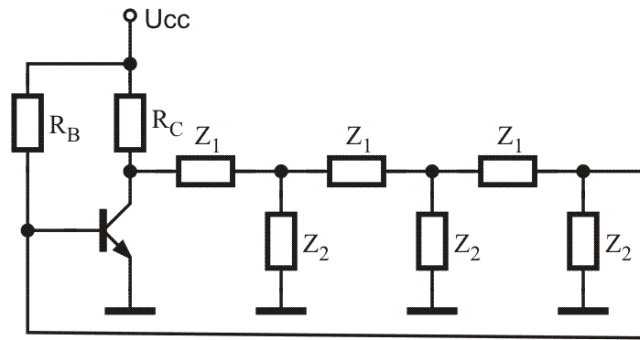
5.7: Комплетна шема на Колпицов осцилатор.

**ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ**

1. Објасни го составот на селективното осцилаторно коло на осцилаторот во три точки и кој услов треба да го исполни.
2. Какви треба да бидат реактансите на селективното осцилаторно коло на Хартлеевиот осцилатор?
3. Какви треба да бидат реактансите на селективното осцилаторно коло на Колпицовиот осцилатор?

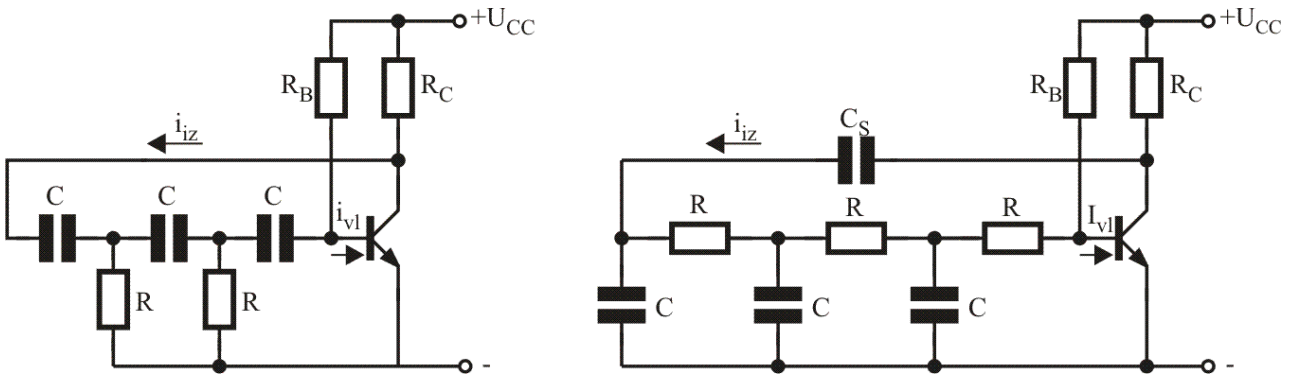
**5.4. RC-осцилатори**

Кај овие осцилатори, фазното поместување за добивање позитивна повратна врска се прави со RC атенуаторски секции. Основна шема на RC-осцилатор е дадена на **слика 5.8**.



5.8: Основна шема на RC-осцилатор.

Колото на повратната втска е составено од по три меѓусебно еднакви елементи и тоа, три врзани во серија ( $Z_1$ ) и три врзани паралелно ( $Z_2$ ). Во зависност од тоа дали елементите се во сериската гранка кондензатори или отпорници, се дефинираат осцилатори од прв или од втор вид (слика 5.9).



5.9: RC-осцилатор од I и II вид.

Еден RC член може максимално да ја помести фазата за помалку од  $90^\circ$ . За поместување од  $180^\circ$  се потребни најмалку три RC члена, при што секој член треба да ја помести фазата за  $60^\circ$ . Ако постои фазно поместување од  $180^\circ$  меѓу влезната и излезната струја, може да се напише:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot RC} \cdot \sqrt{6} \quad \text{и} \quad \frac{1}{A} = \frac{i_{vl}}{i_{iz}} = \frac{1}{29} = \beta ; \quad \text{за осцилатор од прв вид} \dots\dots\dots(5.8)$$

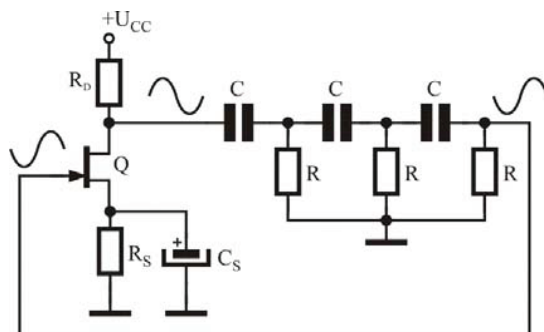
$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot RC\sqrt{6}} ; \quad \text{за осцилатор од втор вид.} \dots\dots\dots(5.9)$$

Колото за повратна врска, составено од RC-членови, создава слабење и одредува колкаво треба да биде засилувањето (поголемо од 29). Поради намалување на изобличувањата, засилувачот се става да работи во класа A.

Осцилаторите од прв вид се подобри за пониски фреквенции од 1KHz. За фреквенции повисоки од 1KHz се препорачуваат осцилаторите од вториот вид. Ако осцилаторот треба да покрива одреден опсег на фреквенции, промената на фреквенцијата

се прави со едновремена промена на капацитетот на сите три кондензатори во колото за повратната врска.

На **слика 5.10** е дадена шема на RC-осцилатор со FET. Излезниот напон  $u_{iz}$  од засилувачот се носи на влез на колото за фазно поместување, составено од три RC-члена, а на неговиот излез се добива повратниот напон за гејтот, со намалена амплитуда и свртен за  $180^\circ$ . Овој напон ја има истата фаза како и претходно и со тоа се остварува позитивна повратна врска.



5.10: RC-осцилатор со FET.

### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

1. Од што е составено колото на повратната врска на RC осцилаторот?
2. Зошто е потребно засилувачот да работи во класа А?
3. Колкаво е фазното поместување на повратната врска?

## 5.5 Осцилатор со Винов мост

Овој осцилатор спаѓа во групата RC-осцилатори со операциски засилувач како активен елемент. Основната примена му е во областа на аудиофреквенциите. Шемата на осцилаторот е дадена на **слика 5.11a**, а истата шема е нацртана и на **слика 5.11б**, од која се гледа препознатливиот Винов мост од мерната техника.

Операцискиот засилувач е изведен како неинвертирачки засилувач со засилување:

$$A = \frac{u_{iz}}{u_p} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \dots\dots\dots(5.10)$$

На излезот се приклучени две импеданси:  $Z_1$ , како сериска врска на отпорник и кондензатор, и  $Z_2$ , како паралелна врска на отпорник и кондензатор. Овие две импеданси претставуваат напонски делител со кој се дели излезниот напон и еден дел се враќа на неинвертирачкиот влез на операцискиот засилувач. Факторот на повратната врска се пресметува според:

$$\beta = \frac{u_p}{u_{iz}} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \dots \dots \dots (5.11)$$

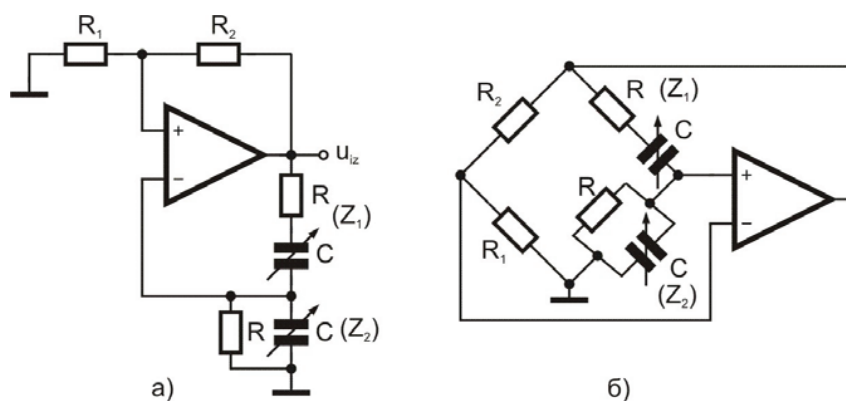
Со внесување на отпорностите и капацитивностите во изразите за импедансите  $Z_1$  и  $Z_2$  и со комбинирање на двете равенки, се добива фреквенцијата на осцилаторот како:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot CR} \dots \dots \dots (5.12)$$

И условот за добивање осцилации како:

$$R_2 = 2R_1 \dots \dots \dots (5.13)$$

Промената на фреквенцијата на осцилаторот се прави со едновремена промена на капацитивноста на кондензаторите  $C$  во импедансите  $Z_1$  и  $Z_2$ .



5.11: Електрична шема на осцилатор со Винов мост.

### НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

- Осцилаторното коло на Хартлеев осцилатор е составено од два калема и еден кондензатор.
- Осцилаторното коло на Колпицовиот осцилатор е составено од еден калем и два кондензатора.
- Кај RC осцилаторите колото за повратна врска е составено од RC-членови.
- Кај RC осцилаторите засилувањето треба да биде поголемо од 29.
- Осцилаторот со Винов мост претставува RC осцилатор со операциски засилувач како активен елемент.

### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

1. Кои се составните елементи на осцилаторот со Винов мост?
2. Кој услов треба да биде исполнет за добивање осцилации кај осцилаторот со Винов мост?
3. Како се врши промената на фреквенцијата на осцилаторот со Винов мост?

## 5.6 Осцилатори со кварц

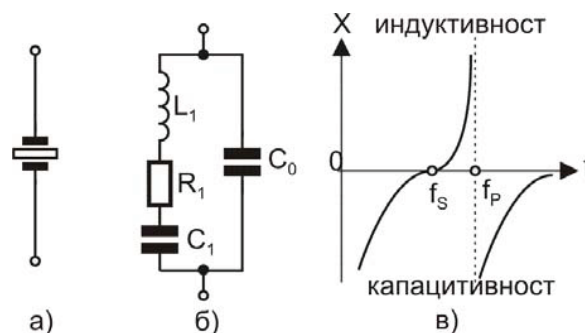
Во многу примени од осцилаторите се бара поголема стабилност на фреквенцијата од онаа што може да се постигне со до сега опишаните осцилатори. Овие барања најмногу се поставуваат во телекомуникации при воспоставување радиоврски, во мерната техника и во голем број електронски системи. Осцилатори со голема стабилност се прават со примена на кварцни кристали. Според начинот на примената на кристалот, овие осцилатори се делат на две групи: осцилатори со кварцна контрола и осцилатори со кварцни кристали.

Кај осцилаторите од првата група, кварцниот кристал само ја регулира работата на осцилаторот. Ако се извади кристалот, осцилаторот може и натаму да работи.

Кај осцилаторите од втората група, кварцниот кристал е составен дел на осцилаторното коло и без него осцилаторот не може да работи. Осцилаторите од втората група се многу повеќе во употреба од осцилаторите со кварцна контрола. Кварцниот кристал е кристална структура со хемиски состав силициумов двооксид ( $\text{SiO}_2$ ), ставен меѓу две метални плочки, на кои се приклучени електрични изводи. Се тоа е ставено во заштитно куќиште.

Ако се приклучи променлив напон на неговите изводи, кристалот ќе почне да трепери, односно механички да осцилира. Појавата на механичките осцилации со примена на електричен напон се вика пиезоелектричен ефект и таа е двонасочна. Тоа значи, ако се изложи кварцниот кристал на механичка сила, тој на изводите дава напон. Резонантната фреквенција на кварцниот кристал е онаа фреквенција на која амплитудата на механичките осцилации е најголема. Таа зависи од дебелината на кристалот, од начинот на сечењето во однос на неговата кристална решетка и од начинот на монтирањето.

Во електричен поглед, кварцниот кристал е еквивалентен на едно осцилаторно коло. Неговиот графички симбол, еквивалентната електрична шема и зависноста на неговата реактанса од фреквенцијата се дадени на **слика 5.12**. Елементите  $L_1$ ,  $R_1$  и  $C_1$  се динамички големини на кристалот, а  $C_0$  претставува капацитет на плочите со кои е обложен кристалот и лежат паралелно со него.



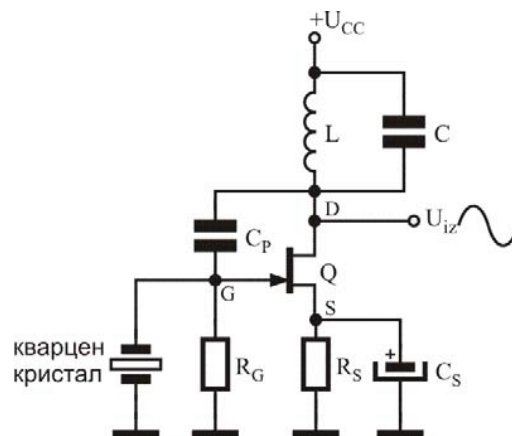
5.12: Графички симбол, еквивалентна електрична шема и зависноста на реактансата од фреквенцијата на кварцниот кристал.



Предноста на кварцниот кристал над осцилаторното коло, кое би било направено според еквивалентната шема е во редот на големината на параметрите. Индуктивноста  $L_1$  има вредност од редот на хенри, а капацитетот  $C_1$  од неколку стоти или илјадити делови од пикофарад. Големината на овие параметри зависи од димензиите на кристалот, односно од начинот на сечењето на плочките на кристалот при обработката. Графикот покажува дека кварцниот кристал има двоен карактер, тој се однесува како паралелно и како сериско осцилаторно коло. На графикот се покажани двете резонантни фреквенции: сериската  $f_s$  и паралелната  $f_p$ . Во опсегот меѓу двете резонантни фреквенции кварцот се однесува како индуктивност, а надвор од тој опсег како капацитивност. Факторот на квалитетот (добрината) на кварцот е:

$$Q = \omega_1 \frac{L_1}{R_1}, \dots\dots\dots(5.14)$$

и тој изнесува неколку десетини илјади, што е многу повеќе од она што може да се добие со обични осцилаторни кола.



5.13: Осцилатор со кварцен кристал.

На **слика 5.13** е дадена шема на осцилатор со кварц, кој е приклучен на гејтот од FET-от Q. Во колото на дрејнтот е ставено осцилаторно коло со елементите L и C, а преку кондензаторот  $C_p$  се остварува повратната врска во колото. Овој осцилатор осцилира на фреквенција  $f_0$  која лежи меѓу резонантните фреквенции на кварцот  $f_s$  и  $f_p$ , што значи дека кварцот е тој што ја диктира фреквенцијата на осцилаторот.

Фреквенцијата на осцилаторот е многу стабилна и не зависи од надворешни фактори. Стабилноста на кварцниот осцилатор со едноставна примена на кварцниот кристал достигнува од  $1:10^4$ , а со примена на посебни мерки, како, на пример, со ставање на кварцот во термостат до  $1:10^7$ . Тоа може да се претстави како промена на фреквенцијата за 1Hz, кога осцилаторот дава излез со фреквенција од 10MHz.

## ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

1. Нацртај ја еквивалентна електрична шема на кварцниот кристал.
2. Како се однесува кварцот во опсегот меѓу двете резонантни фреквенции, а како надвор од тој опсег?

## 5.7. Стабилизација на амплитудата и фреквенцијата на осцилациите

Како што е нагласено, работните услови на хармониските осцилатори се одредуваат со поставување на работната точка во класа С за да се добие најголем степен на искористување. Овие услови се одредуваат автоматски со помош на отпорникот  $R_E$  во паралелна врска со кондензаторот  $C_E$  во колото на емитерот. Во колото на базата тече струја само за време на еден дел од периодата на наизменичниот напон на базата. Таа струја се насочува со емитерскиот спој на транзисторот и во отпорникот  $R_E$  тече еднонасочна компонента во истиот дел од периодата на сигналот. Така создадениот пад на напон на отпорникот  $R_E$  ја поларизира базата, така што базната струја да тече само во дадениот дел на периодата. Во останатиот дел од периодата транзисторот е неспроводен.

Со колото  $R_E, C_E$  се постигнува и стабилизација на амплитудата на осцилациите. Тоа се покажува со следнава анализа. Ако се зголеми амплитудата на осцилациите, се зголемува напонот на базата, се зголемува и струјата на базата. Поголема базна струја значи и поголема колекторска струја и поголем пад на напонот на отпорникот  $R_E$ . Тоа значи дека напонот на емитерот расте, а напонот база емитер се враќа на претходната вредност и се се враќа на состојбата пред зголемувањето на амплитудата на осцилациите.

Влијанието на колото база емитер врз фреквенцијата на осцилаторот е поголемо кога е поголема базната струја. Базната струја може да се намали ако се зголеми вредноста на отпорот  $R_E$ . Но, тоа носи нова опасност од појавата на периодично прекинување на осцилациите. Со вклучувањето на напонот за напојување, амплитудата на осцилациите прво расте до одредена вредност, па потоа се стабилизира на таа вредност по кратко осцилирање околу неа. Но, ако временската константа  $R_E C_E$  е многу голема, напонот на базата не може да ги следи толку бргу промените на амплитудата, па амплитудата на осцилациите почнува да опаѓа, поминува низ минимум и осцилациите престануваат. Прекилот на осцилациите трае се додека кондензаторот  $C_E$  не се испразни преку отпорникот  $R_E$ . Во тој момент повторно се создаваат услови за отпочнување на осцилациите, амплитудата на осцилациите расте, поминува преку максимум, па се намалува. На тој начин целата појава се повторува. За воспоставување на стабилен режим на работа, временската константа  $R_E C_E$  не смее да прејде одредена граница.

Во најголемиот дел од примените на осцилаторите, основно барање што се поставува е стабилност на фреквенцијата на осцилирањето. Врз стабилноста на фреквенцијата најголемо влијание имаат елементите на осцилаторното коло и параметрите на активниот елемент.

Промените на вредностите на елементите на осцилаторното коло имаат најважна улога. До промена на индуктивноста на калемот доаѓа поради промена на надворешната температура, промена на температурата на жицата на калемот поради течење на струја, поради стареење на материјалот, како и поради промена на атмосферскиот притисок и влажноста.

Од сите промени, најголемо влијание има промената на надворешната температура. Таа влијае и на промената на капацитивноста на кондензаторот во осцилаторното коло. Влијанието на температурата може да се намали со ставање на осцилаторното коло во термостат (уред во кој се одржува постојана температура).

Влијанието на параметрите на транзисторот се гледа во тоа што за високи фреквенции тие стануваат комплексни, добиваат и реактивна компонента. Поради тоа се менува и фазното поместување помеѓу влезот и излезот, што може да влијае врз фреквенцијата на осцилаторот. Поради тоа, потребно е да се избере транзистор кој работи во фреквенциското подрачје на осцилаторот.

### **НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!**

- **Осцилаторите со кварцен кристал имаат голема стабилност на фреквенцијата.**
- **Кристалот на кварцот се однесува како осцилаторно коло со пиезоелектричен ефект (под дејство на електричен напон се добиваат механички осцилации).**
- **На стабилноста на амплитудата и фреквенцијата на осцилациите влијание имаат параметрите на активните елементи и промената на вредностите на осцилаторното коло.**

### **ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ**

1. Со кое коло се постигнува стабилизација на амплитудата на осцилациите?
2. Што се случува кога ќе се зголеми амплитудата на осцилациите?
3. Објасни го принципот на работа на осцилатор со Винов мост.
4. Кои се предностите на осцилаторите со кварц?
5. Кои се причините за нестабилноста на фреквенцијата кај осцилаторите и како се отстрануваат?

## ТЕМАТСКО УТВРДУВАЊЕ

### I Прашања со заокружување

#### (Заокружи ги точните одговори)

1. Основен услов за осцилирање е кружното засилување да е:

- а) помало од 1
- б) еднакво на 1
- в) поголемо од 1.

2. Формулата за резонантна фреквенција која се нарекува Томсонова формула е:

а)  $f_0 = \frac{\sqrt{LC}}{2\pi}$

б)  $f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot LC}$

в)  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ .

3. Мајснеровиот осцилатор е осцилатор со:

- а) индуктивна повратна врска
- б) капацитивна повратна врска
- в) RC врска.

4. Осцилаторното коло на Колпицовиот осцилатор е составено од:

- а) еден кондензатор и два калема
- б) еден калем и два кондензатора.

5. Кај RC осцилаторите засилувањето треба да биде:

- а) <29
- б) = 29
- в) >29.

6. Кристалот на кварцот се однесува како:

- а) осцилаторно коло
- б) засилувачко коло.

## II Прашања со поврзување

7. Поврзи ја резонантната фреквенција со соодветниот осцилатор:

$$1. f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot CR}$$

а) RC осцилатор \_\_\_\_\_

$$2. f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{LC_1C_2}}$$

б) Хартлеев осцилатор \_\_\_\_\_

$$3. f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot RC\sqrt{6}}$$

в) Осцилатор со Винов мост \_\_\_\_\_

$$4. f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C(L_1 + L_2)}}$$

г) Колпицов осцилатор \_\_\_\_\_.

## III Прашања со дополнување

8. Условот за добивање позитивна повратна врска, фазите на влезниот и на вратениот сигнал се \_\_\_\_\_, се случува кога е кружното засилување еднакво на \_\_\_\_\_.

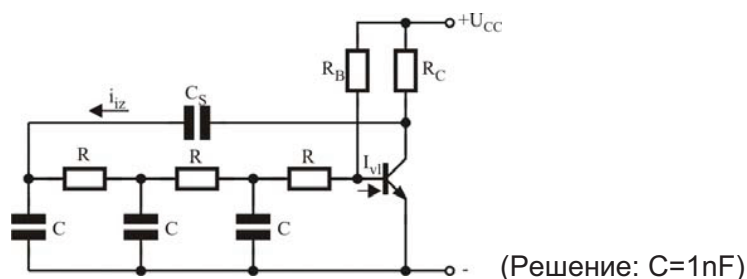
9. Уредите кои, со примена на позитивна повратна врска, еднонасочната струја од изворот за напојување ја претвораат во наизменична се нарекуваат \_\_\_\_\_.

10. Осцилаторите со кварцен кристал имаат голема стабилност на \_\_\_\_\_.

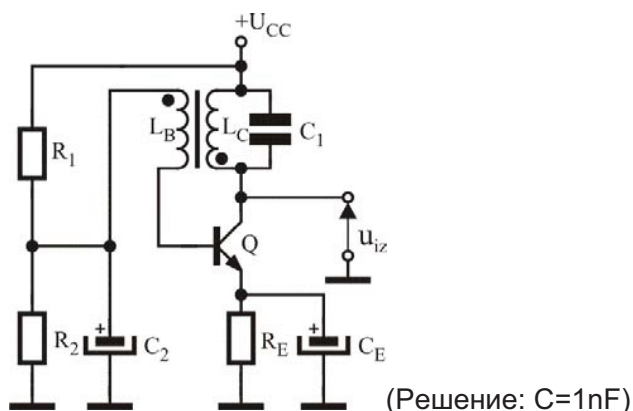
11. RC осцилатор со операциски засилувач како активен елемент се нарекува \_\_\_\_\_.

## IV Задачи

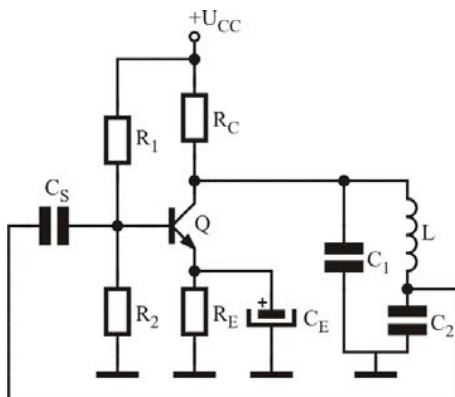
1. За RC осцилатор од втор вид, даден на сликата, кој осцилира на фреквенција од 440Hz, да се најде вредноста на капацитивноста на кондензаторите, ако е вредноста на отпорот на отпорниците  $R = 6,5\text{K}\Omega$ .



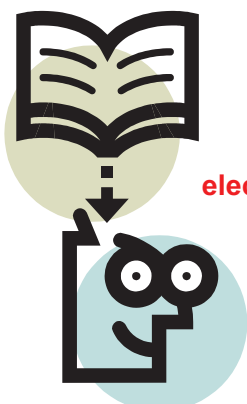
2. Во осцилаторното коло на осцилаторот од сликата е ставена индуктивност од  $25\mu\text{H}$ . Да се најде вредноста на капацитивноста  $C$  со која осцилаторот ќе осцилира на фреквенција од  $1\text{MHz}$ .



3. Одреди ја резонантната фреквенција на осцилаторот од сликата ако  $C_1=1\text{nF}$ ,  $C_2=22\mu\text{F}$  и  $L=0,2\text{mH}$ .



### Вежби за активно учење:



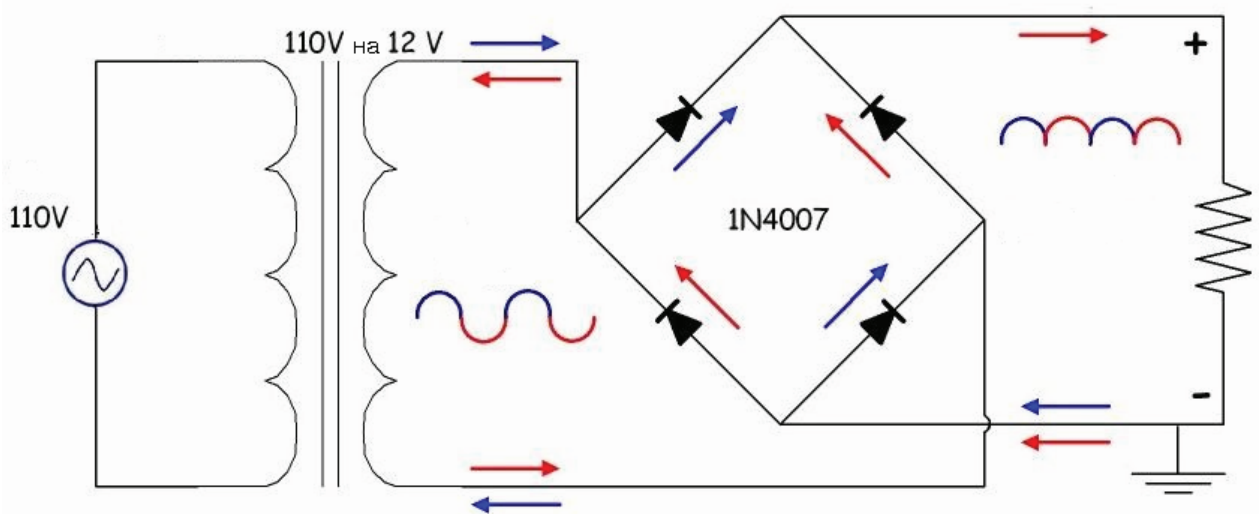
- Изработи ги сите видови осцилатори во програмскиот пакет **electronic workbench** и на осцилопот следи ги осцилациите кои ги дава осцилаторот.
- Истражувај на интернет за видовите осцилатори и врз основа на истражувањето изработи проект.

# 6.

## ИЗВОРИ ЗА НАПОЈУВАЊЕ

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 ја разбираш блок-шемата на стабилизирани извор;
- да разликуваш стабилизирани и нестабилизирани извори на напојување;
- да го објаснуваш начинот на насочување на наизменичен сигнал преку полубранови и целобранови шеми за насочување;
- да ја опишуваш градбата и функцијата на насочувачките филтри;
- да познаваш компензациони стабилизатори на еднонасочен напон;
- да познаваш стабилизатор со континуирана регулација на излезниот 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 два вида извори за напојување, кои се во масовна употреба за сите електронски уреди:

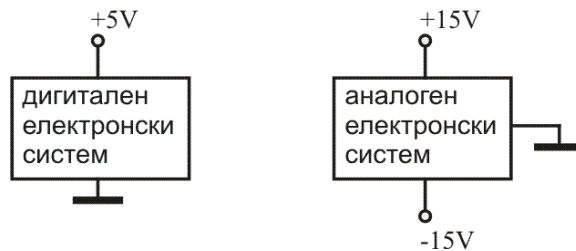
- а) батерии и акумулатори;
- б) уреди со прекинувачки систем на напојување.

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

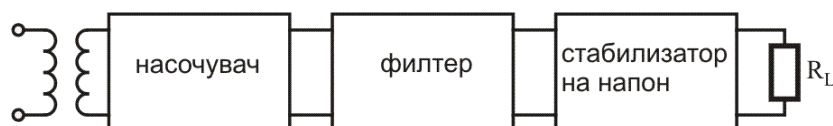
До сега најмасовна употреба имаат уредите за напојување од градската мрежа на наизменичен напон, која е на располагање речиси на секој чекор. Напонот на градската мрежа, во најдобар случај, кај нас е 220V - 240V.



6.1: Типичен начин на напојување на дигитални и аналогни системи.

Дигиталните електронски системи обично работат на напон од +5V, а понови системи работат и со +3,3V. За аналогните електронски системи е потребен широк спектар на разни напони со позитивен и со негативен поларитет (слика 6.1).

На слика 6.2 е дадена блок-шема на еден комплексен уред за напојување од мрежа со наизменичен напон со примена на мрежен трансформатор. Со овој уред се извршуваат три основни функции: промена на мрежниот напон со трансформатор, насочување и стабилизација на излезниот напон.



6.2: Блок-шема на извор за напојување од мрежен 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

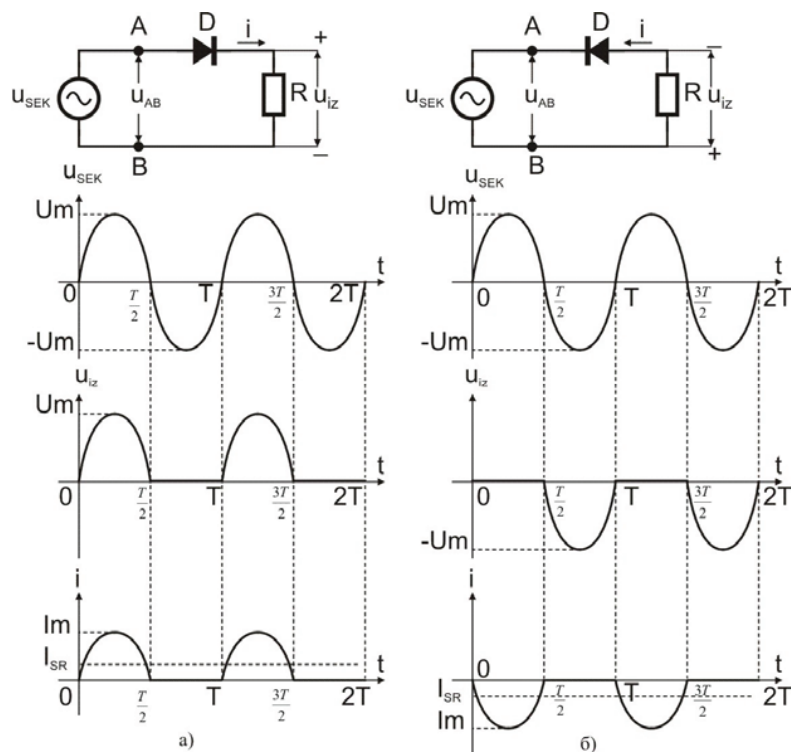
примарниот напон и на односот на трансформацијата  $n = \frac{N_{SEK}}{N_{PRIM}}$ , каде што со N се означува

бројот на навивките. Трансформаторот има уште една задача, а тоа е да направи галванско одвојување 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 нестабилизирани напон за напојување. Многу електронски уреди бараат напонот за напојување да има константна вредност и за тоа се применува коло за стабилизација.

## 6.2. Полубранов насочувач

Полубрановото насочување е наједноставниот процес со кој наизменичниот напон се претвора во еднонасочен. Тоа се прави со коло во кое една насочувачка диода ја пропушта само едната полупериода на наизменичниот напон, а другата полупериода ја блокира.



6.3: Полубранов насочувач.

Колото на полубрановиот насочувач е дадено на **слика 6.3**.

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 6.3 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.

Насочената струја низ потрошувачот се менува во широки граници и долго време е нула. Односот меѓу ефективната и средната вредност на наизменичната струја низ потрошувачот се дефинира како **факторот на брановитост** што претставува мерка за квалитетот на уредот за напојување. За добар насочувач, факторот на брановитост треба да биде што е можно помал.

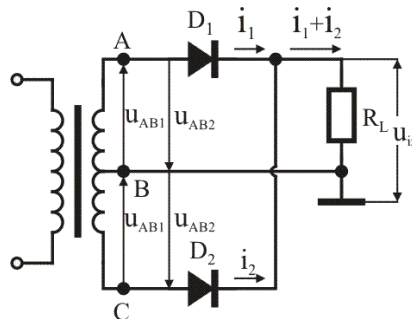
Полубрановиот насочувач има фактор на брановитост 1,21 и мала средна струја што го прави насочувач од пониска класа. Средната струја, како еднонасочна компонента, го магнетизира јадрото на трансформаторот и го носи во заситување со што се зголемуваат загубите во железото.

### НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

- Со уредот за напојување се извршуваат три основни функции: промена на мрежниот напон со трансформатор, насочување и стабилизација на излезниот напон.
- Односот меѓу ефективната и средната вредност на наизменичната струја низ потрошувачот се дефинира како факторот на брановитост што претставува мерка за квалитетот на уредот за напојување.
- Полубрановиот насочувач има една насочувачка диода која ја пропушта струјата само за време на едната полупериода на наизменичниот напон.
- Полубрановиот насочувач има фактор на брановитост 1,21.

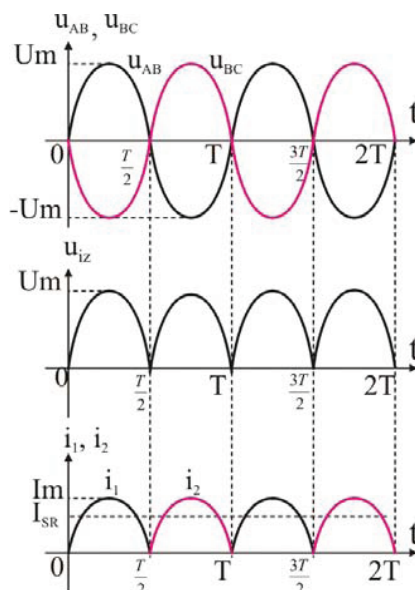
### 6.3. Целобранов насочувач

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 6.4** е прикажан целобранов насочувач со 2 диоди. За оваа конфигурација се користи трансформатор со секундар кој има среден извод B, врзан на маса. Секундарните напони  $u_{AB}$  и  $u_{CB}$  имаат иста амплитуда и спротивна фаза, така што кога е во точката A позитивната полупериода, во исто време, во точката C имаме негативна полупериода на наизменичниот напон на секундарот.



6.4: Целобранов насочувач со две диоди.

За време на позитивната полупериода на напонот  $u_{AB}$ , диодата  $D_1$  е директно поларизирана и спроведува струја  $i_1$  преку отпорот  $R_L$ . Во исто време, во точката C е негативната полупериода на напонот  $u_{CB}$ , за која диодата  $D_2$  е инверзно поларизирана и струјата  $i_2$  е нула. Во следната полупериода ситуацијата се менува, така што на точката A имаме негативна полупериода и инверзно поларизирана диода  $D_1$ , а во точката C позитивна полупериода и директно поларизирана диода  $D_2$  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 6.5**).



6.5: Бранови форми на целобранов насочувач.

Вкупната струја во времетраење на една периода на наизменичниот напон, изнесува:

$$i = i_1 + i_2, \dots\dots\dots(6.3)$$

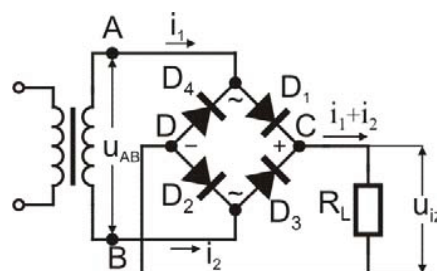
а нејзината средна вредност е:

$$I_{sr} = \frac{2I_m}{\pi} = 0,64I_m. \dots\dots\dots(6.4)$$

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 демагнетизира 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 6.6**.



6.6: Целобранов насочувач со четири диоди - Грецов спој.

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.

Струјата низ оптоварувањето  $R_L$  е збир на струите  $i_1$  и  $i_2$ , и таа постои во текот на целата периода на наизменичниот напон. Графикот на струјата 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 "-". Изводите со знакот "~" се точките на спојување на анода и катода на две диоди, изводот со знакот "+" е точка во која се споени катодите, а изводот "-" точка на спојување на анодите на две диоди.

Двата целобранови насочувачи даваат иста средна вредност на струјата и имаат еднаков фактор на брановитост, сепак целобрановиот насочувач со мостна конфигурација користи едноставен трансформатор, затоа најчесто се користи во практика.

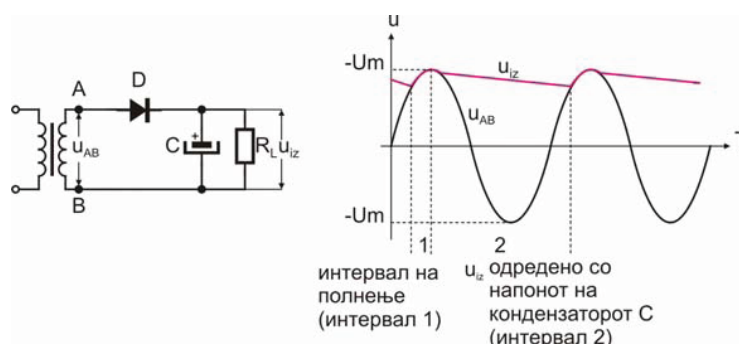
## 6.4. Капацитивни филтри

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 индуктивни калеми. Овие елементи имаат својство да акумулираат енергија, а потоа да ја вратат во колото во соодветен момент.

Најчесто употребуван капацитивен филтер 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 6.7**.



6.7: 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). 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  $R_L$ , полека се празни. Напонот на кондензаторот полека 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  $\tau$  (која обично се избира поголема од периодата на наизменичниот напон):

$$\tau = R_L C . \dots\dots\dots(6.5)$$

Факторот на брановитост за полубранов насочувач со капацитивен филтер се подобрува. Да се добие подобар 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 2 е пократок два пати и факторот на брановитост е подобар во однос на оној кај насочувач без филтер но и во однос на полубрановиот насочувач со ист таков филтер.

### „Проширени знаења“

Еднонасочниот напон на излезот може да се одреди од релацијата:

$$U_{iz} = U_m - \frac{1}{2fC} I_L$$

каде што:

$$I_L = \frac{U_{iz}}{R_L}$$

е еднонасочната струја низ потрошувачот. Еднонасочниот напон кај целобрановиот насочувач се одредува со:

$$U_{iz} = U_m - \frac{1}{4fC} I_L$$

### НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

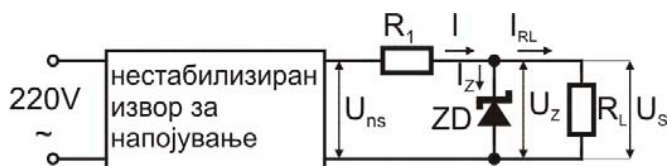
- Целобраново насочување се прави со две или четири насочувачки диоди во Грецов спој;
- Со целобраново насочување се добива фактор на брановитост кој изнесува 0,48.
- Со примена на капацитивни филтри се подобрува факторот на брановитост.

## ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

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 насочувачкиот филтер?

### 6.5. 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 нестабилизирани извор за напојување, стабилизатор на напон, изведен со отпорникот  $R_1$  и зенер диодата  $ZD$  и отпор на оптоварување  $R_L$ . Нестабилзирираниот 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

$$I = I_z + I_{R_L} , \dots\dots\dots(6.6)$$

а стабилизираниот напон е:

$$U_S = R_L I_{R_L} , \dots\dots\dots(6.7)$$

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



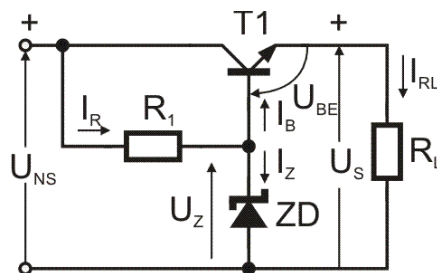
струја  $I_Z$ , а струјата  $I_{R_L}$  и напонот  $U_S$  остануваат непроменети. Во случај на намалувањето на нестабилизираниот напон, процесот се одвива во спротивната насока, така што се намалува струјата на зенер диодата.

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 да струјата  $I_{R_L}$  се зголеми и обратно. Во двата примера напонот  $U_S$  останува непроменет, односно тој е стабилизан.

Употребата на овој стабилизатор е ограничена со дозволената струја на зенер диодата, а најчесто за струја од неколку милиампери 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.

## 6.6. Сериски стабилизатор на напон со транзистор

Ограничувањето на струјата кај стабилизаторот со зенер диода 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 зенер диода, со која се добива стабилизан напонот на базата на транзисторот T1. Од колото за излезниот напон  $U_S$  може да се напише:

$$U_S = U_Z - U_{BE}, \dots\dots\dots(6.8)$$

Бидејќи напоните  $U_Z$  и  $U_{BE}$  се константни, тогаш и излезниот напон  $U_S$  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 намали и излезниот напон  $U_S$ , кој ќе предизвика зголемување на напонот  $U_{BE}$ , бидејќи напонот  $U_Z$  е константен. Зголемувањето на напонот  $U_{BE}$  ќе предизвика зголемување базната струја  $I_B$ , која ќе предизвика пораст на емитерската струја која всушност е и струја низ потрошувачот  $I_{RL}$ . Краен ефект од намалувањето на отпорноста  $R_L$  е зголемување на струјата  $I_{RL}$ , при што

напонот на потрошувачот останува непроменет. Во случај на зголемување на отпорот  $R_L$ , се намалува базната, односно колекторската струја и се добива истиот стабилизирани напон како и пред тоа.

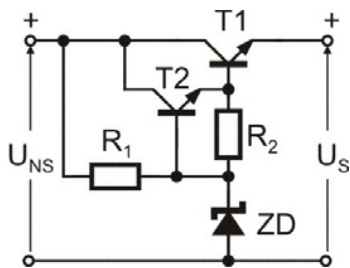
Промените на нестабилизираните напон  $U_{NS}$ , се компензираат со промена на напонот меѓу колекторот и емитерот  $U_{CE}$  на транзисторот.

Бидејќи:

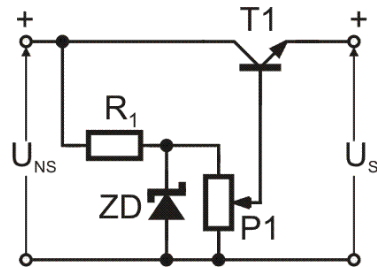
$$U_S = U_{RL} = U_{ns} - U_{CE}, \dots\dots\dots(6.9)$$

излезниот напон  $U_{RL}$  останува непроменет.

Серискиот транзистор во овој стабилизатор има најтешки работни услови, 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.



6.10: Стабилизатор на напон со меѓустепен.



6.11: Стабилизатор со регулација на излезниот напон.

За стабилизатори со поголема струја на серискиот транзистор се користи еден меѓустепен, како што е прикажано на **слика 6.10**. Без приклучено оптоварување, тече само струја низ зенер диодата.

Со приклучување потенциометар паралелно на зенер диодата, како на **слика 6.11**, може да се добие стабилизирани напон со регулација.

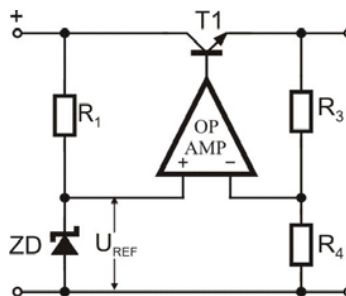
### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

1. Кои се составните елементи на нестабилизираните 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?

## 6.7. Интегрирани линеарни стабилизатори на напон

Линеарните интегрирани стабилизатори на напон содржат сериски регулатор на излезната струја и управувачко коло со кое се надгледува излезниот напон и се управува со серискиот регулатор да го држи излезниот напон на бараната вредност.

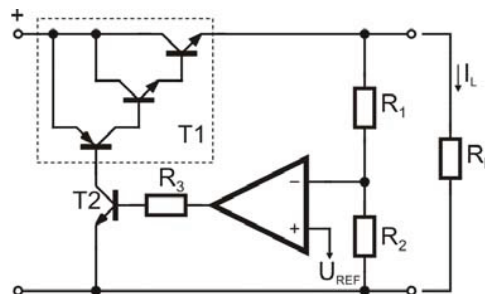
Принципот на примена на операциски засилувачи за стабилизација на напон, е прикажан на **слика 6.12**.



6.12: Стабилизатор на напон со операциски засилувач.

Јамката на повратната врска, која управува со излезниот напон, започнува со напонскиот делител  $R_1 - R_2$ , 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 нагодува својот излез (струјата низ  $T_1$ ) 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.

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 електронска компензација и целосно се стабилни без примена на надворешни компоненти. Надворешната компензацијата најчесто се прави со капацитивност врзана на излезниот крај кон маса.

Со  $T_1$  и со испрекинатите врски е означен серискиот регулатор, составен од еден NPN Дарлингтонов транзистор, побудуван со PNP-транзистор. Струјата на серискиот

регулатор, која излегува од емитерот на Дарлингтоновиот 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  $I_{RL}$ .

Интегрираните линеарни стабилизатори на напон се пакуваат во куќиште со три изводи, а начинот на нивното поврзување е даден на **слика 6.14**.

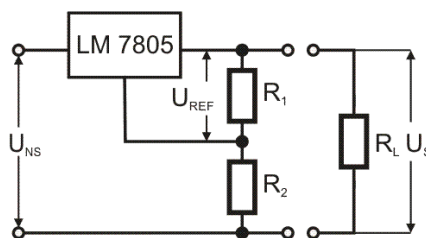


6.14: Приклучување на интегриран стабилизатор на напон.

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 внесуваат вредностите на стабилизираниот напон за кој е наменет стабилизаторот, како на пример, 05).

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:

$$U_S = \frac{U_{REF}(R_1 + R_2)}{R_1} \dots\dots\dots(6.10)$$



6.15: Стабилизатор на напон со напонски делител.

Од податоците, наведени на слика 6.14, се гледа дека на самиот стабилизатор (на неговиот сериски регулатор) постои одреден пад на напонот, одреден како разлика меѓу влезниот нестабилизиран 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 Дарлингтон транзистор како сериски регулатор) и
- стабилизатор со мал пад на напон (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.

### НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

- Наједноставен стабилизатор на напон користи зенер диода, како елемент кој во карактеристиката во подрачјето на пробив има особина на краевите да држи константен напон.
- Линеарните интегрирани стабилизатори на напон содржат сериски регулатор на излезната струја и управувачко коло.
- Со приклучување потенциометар паралелно на зенер диодата во серискиот стабилизатор на напон со транзистор се добива стабилизирани напон со регулација.

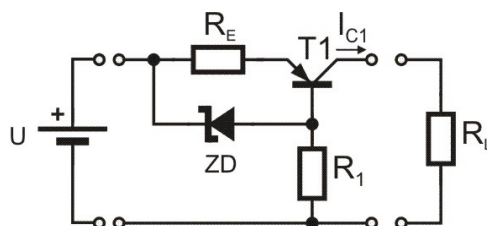
### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

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 Дарлингтонов транзистор како сериски регулатор?
4. Кој стабилизатор користи еден PNP транзистор за сериски регулатор?

## 6.8. Струен стабилизатор

Струјниот стабилизатор претставува извор на константна струја низ оптоварувањето независно од промената на неговата отпорност. Регулацијата е можна за промена на отпорот на оптоварувањето во одредени граници (од 0 до некое  $R_{max}$ ).

Едноставно коло на струен стабилизатор е дадено на **слика 6.16**.



6.16: Извор на константна струја – коло на струен стабилизатор.

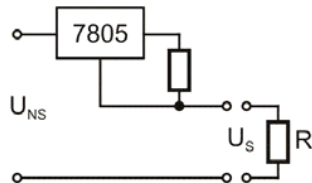
Со помош на зенер диодата и отпорникот во колото на емитерот се држи константна струјата на колекторот на транзисторот. Струјата на емитерот се дели на две компоненти: струја на колекторот и базна струја. При промена на отпорноста на потрошувачот, напонот на потрошувачот може да се менува во широк опсег (сè додека транзисторот работи во нормално активно подрачје). Инаку, емитерската струја (и приближно – колекторската) изнесува:

$$I_E = \frac{U_Z - U_{EB}}{R_E}$$

и не зависи од напонот т.е. отпорот на потрошувачот.

Струјниот генератор функционира коректно сè додека напонот на потрошувачот е помал од  $U - U_Z$ . 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.

Кај овие регулатори е искористена особината на напонскиот стабилизатор низ заедничкиот приклучок да тече релативно мала и константна струја на поларизација, независно од струјата низ потрошувачот.

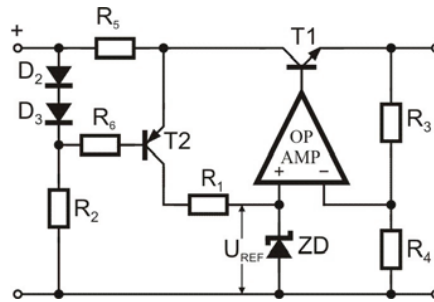
### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

1. Објасни го процесот на стабилизација на струјниот стабилизатор.
2. Каде се користи струјниот стабилизатор?

## 6.9. 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.

На **слика 6.18** е прикажано користење на операциски засилувач како стабилизатор на напон, заедно со коло за ограничување на струјата.

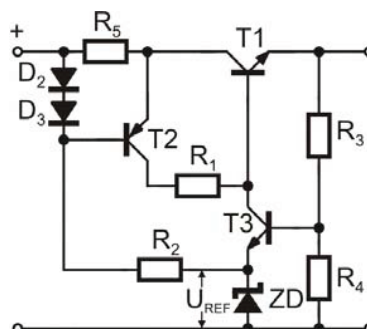


6.18: Стабилизатор на напон со операциски засилувач.

Со  $D_2$ ,  $D_3$  и  $R_2$ , се добива константен напон од  $1,4V$  за директно поларизирање на базата на транзисторот  $T_2$ . Бидејќи  $R_5$  има мала вредност (на пр.  $0,7\Omega$  за ограничување од  $1A$ ), а  $R_6$  обично изнесува колку и  $R_1$ , при мали струи низ  $R_5$  (кои преку  $T_1$  течат во потрошувачот), транзисторот  $T_2$  ќе биде вклучен во заситување и ќе го поврзе  $R_1$  на приклучокот  $+$ . Ако сега струјата низ  $T_1$  порасне, таа ќе направи пад на напон на  $R_5$ , ќе го спушти потенцијалот на емитерот од  $T_2$  и при вредности околу  $0,7V$  (т.е. струја  $1A$ )  $T_2$  ќе почне да се исклучува бидејќи напонот емитер-база му се намалува под  $0,7V$ . Со тоа  $T_2$  ќе ја укине струјата на зенер-диодата и референтниот напон ќе падне, а операцискиот засилувач ќе се погрижи соодветно да падне и излезниот напон. Вредноста на која ќе се задржи излезниот напон ќе биде токму онаа при која струјата низ потрошувачот изнесува  $1A$ .

### “Проширено знаење”

**Слика 6.19** покажува електрична шема на стабилизатор на напон во која се додадени елементи за ограничување на струјата. Со диодите  $D_2$  и  $D_3$  се добива стабилен напон од  $1,4V$  за базата на  $T_1$ , за овој степен да работи како струен ограничувач. Ако струјата на оптоварувањето се зголеми толку за падот на напонот на  $R_5$  да стане поголем од  $0,7V$ , стартува колото за ограничување. Вредноста на отпорот на  $R_5$  изнесува  $0,7\Omega$  за ограничување на струја од  $1A$ ,  $0,35\Omega$  за струја од  $2A$  итн. Анализата на принципот на работа на овој стабилизатор се прави на сличен начин како на шемата од слика 18.



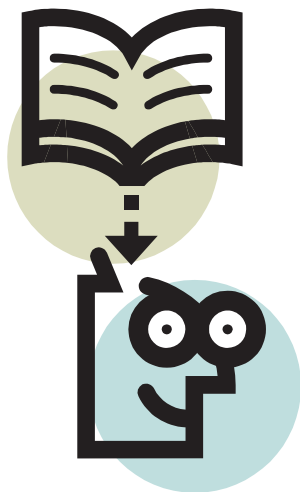
6.19: Стабилизатор на напон со ограничување на струјата.

## НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

- Струен стабилизатор е извор на константна струја која не се менува со промена на оптоварувањето.
- При краток спој на излезот на стабилизаторот на напон, низ серискиот транзистор ќе протече голема струја која може да го уништи транзисторот па затоа е потребно е да се ограничи струјата на оптоварувањето.

## ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

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.
3. Каде се применуваат изворите на еднонасочен напон?



### Вежби за активно учење:

- 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.



## 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:

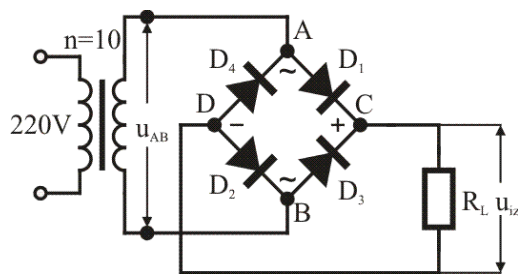
- 1. Идеален струен извор \_\_\_\_\_ а) Нула \_\_\_\_
- 2. Идеален напонски извор \_\_\_\_\_ б) Бесконечно голема \_\_\_\_

### 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 \_\_\_\_\_ .

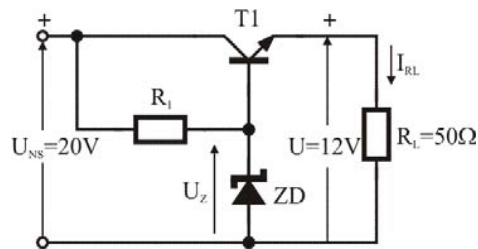
### Задачи

6.1 Колку изнесува средната вредност на излезниот напон на колото од сликата ако преносниот однос на трансформаторот е 10?



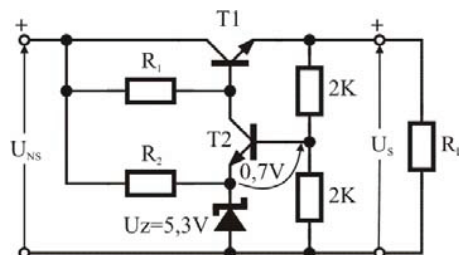
(Одговор 19,8V).

6.2 Колку изнесува дисипацијата на потрошувачот од сликата?



(Одговор 2,88W).

6.3 Колкав е стабилизираниот напон на колото од сликата?



(Одговор 12V).

# 7.

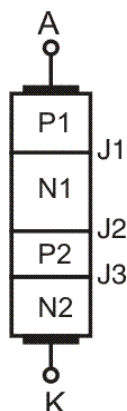
## ТИРИСТОРИ

**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.



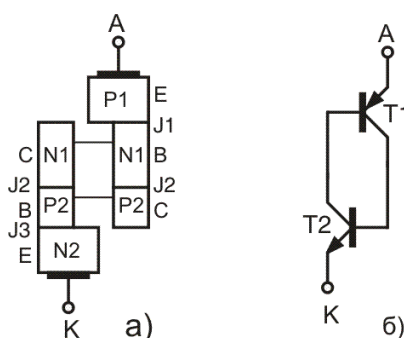
Тиристорите се група елементи со конфигурација од четири или повеќе полупроводни материјали, наредени така што да прават најмалку три PN-споеви и имаат најмалку два извода (слика 7.1). Меѓусебно, тиристорите се разликуваат според бројот на изводите, насоката на спроведувањето и формата на статичките 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.



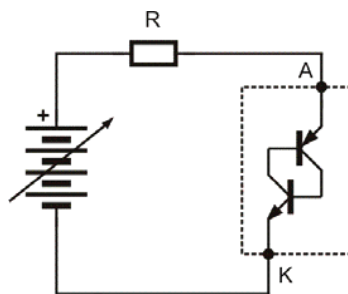
Слика 7.2: Еквивалентна шема на динисторот.

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.

За подобро објаснување на принципот на работа, ќе се послужиме со шематскиот приказ на динисторот со два транзистора, едниот PNP а другиот NPN, меѓусебно споени како на слика 7.2б.

Ако се приклучи позитивен крај на изворот за напојување на анодата, а негативен на катодата, PN-споевите J1 и J3 ќе бидат директно поларизирани, а спојот J2 инверзно. Оваа состојба е еднаква на состојбата на активниот режим на работа на двата транзистора.

Со приклучување еднонасочен напон, како на **слика 7.3**, ни еден транзистор нема да спроведува зашто кај ни еден од транзисторите нема струја база емитер. Со базната струја на долниот транзистор управува горниот транзистор, а базната струја на горниот транзистор ја управува долниот транзистор. Двата транзистора се држат меѓусебно во исклучена, неспроводлива состојба, без оглед колку го зголемуваме напонот на изворот за напојување.



Слика 7.3: Поларизација на динисторот.

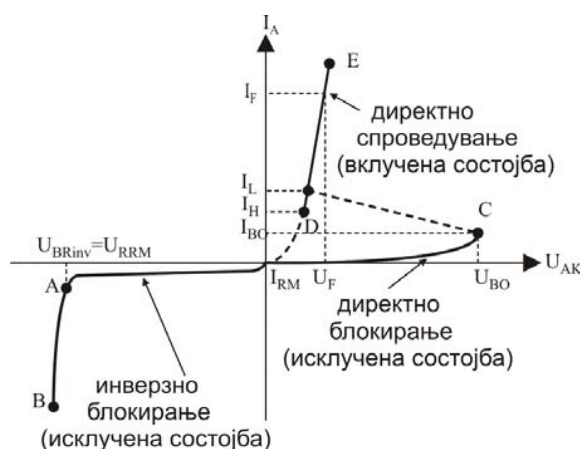
Такво толкување важи за идеални транзистори, тие никогаш нема да спроведат ако нема базна струја. Наспроти нив, реалните транзистори имаат некоја гранична вредност на напонот меѓу колектор и емитер, која можат да ја издржат без да пробиват и да почнат да спроведуваат. Ако пробие долниот транзистор, тој ќе овозможи да протече базната струја на горниот транзистор. Горниот транзистор станува спроводен и овозможува течење на базна струја на долниот транзистор. Краен резултат е спроведување на двата транзистора. Тоа е начинот на кој се изведува позитивна повратна врска меѓу транзисторите. Пробивањето на транзисторите во оваа ситуација не значи и нивно оштетување, што се случува кај стандардните транзистори.

За мали вредности на напонот, струјата низ динисторот е мала, така што може да се каже дека динисторот е неспроводен. Кога напонот на краевите на динисторот ќе ја надмине вредноста на напонот на пробив на спојот J2,  $U_{BO}$ , струјата на спојот расте и поради присуството на позитивна повратна врска меѓу транзисторите, за кратко време тие влегуваат во заситување и динисторот ќе се најде во состојба на директно спроведување. Во состојбата на спроведување, тече голема струја и имаме мал пад на напон на динисторот. Струјата на динисторот може да се ограничи само со приклучување на надворешна отпорност на оптоварување. Во оваа состојба динисторот може да остане се додека струјата не падне под минималната вредност, одредена со струјата на држење  $I_H$ . Како заклучок, директно поларизираните динистор може да се најде во една од двете состојби: состојба на директна неспроведливост и состојба на спроведување. Нема работен режим меѓу вклучена и

исклучена состојба, што значи дека не може да се користи како засилувачки елемент, тој е или вклучен или исклучен.

Состојба на инверзна поларизација имаме кога анодата е на негативен, а катодата на позитивен потенцијал. Споевите J1 и J3 се инверзно поларизирани, а J2 директно, што значи дека транзисторите се во режим на неспроведување и низ динисторот тече само инверзната струја. Но, кога инверзниот напон ќе стане поголем од  $U_{BRinv}$ , а тоа е напонот на пробив во инверзната насока, доаѓа до пробив на еден од споевите, а со тоа и на динисторот и тој се уништува.

Струјно-напонската карактеристика (слика 7.4) придонесува за појасна слика на се што досега е кажано за динисторот, како и за одредување на неговите параметри.



Слика 7.4: Струјно-напонска карактеристика на динисторот.

Делот на карактеристиката од 0 до точката C го покажува однесувањето на динисторот при мали напони на директна поларизација. Отпорот на динисторот е многу голем, од редот на стотици  $M\Omega$ , а струјата многу мала, од редот неколку  $\mu A$  и тој се наоѓа во состојба на директно неспроведување. Оваа состојба трае се додека напонот на динисторот не ја достигне вредноста  $U_{BO}$ , а тоа е напонот на пробивање, односно на неговото вклучување.

Делот DE на карактеристиката ја покажува состојбата на директно спроведување на динисторот. Овде динисторот има многу мала отпорност и голема струја, а напонот на неговите краеве паѓа до вредности 0,5 - 2V. Од состојба на спроведување, динисторот може да излезе ако неговата струја падне под вредноста  $I_H$ , наречена струја на држење.

Областа на инверзната поларизација на динисторот е дефинирана со делот на карактеристиката од 0 до точката A, во кој отпорноста му е многу голема (неколку стотици  $M\Omega$ ), а струјата многу мала (неколку  $nA$ ). Ако се зголеми инверзниот напон на поларизацијата до вредноста  $U_{BRinv}$ , која се вика инверзен пробивен напон, инверзната струја нагло се зголемува и доаѓа до пробив, односно до уништување на динисторот. Тоа е делот AB на карактеристиката.

**НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!**

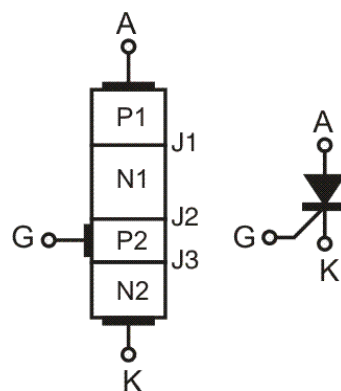
- Тиристорите се група елементи со конфигурација од четири или повеќе полупроводни слоеви.
- Динистор е четирислоен тиристорски елемент со три PN-слоеви и со два изводи (анода и катода).
- Директно поларизирианиот динистор има состојба на неспроведување при мали напони анода – катода.
- За напони поголеми од напонот на вклучувањето, динисторот е во состојба на директно спроведување.
- Инверзно поларизирианиот динистор се однесува како обична диода.

**ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ**

1. Објасни ја конфигурацијата на тиристорите.
2. Објасни го принципот на работа на динисторот преку шематската конфигурација.
3. Што се случува во состојбата на инверзна поларизација на динисторот?
4. Дефинирај ги состојбите на директно блокирање, директно спроведување и инверзно блокирање на динисторот.

**7.2. Тиристор**

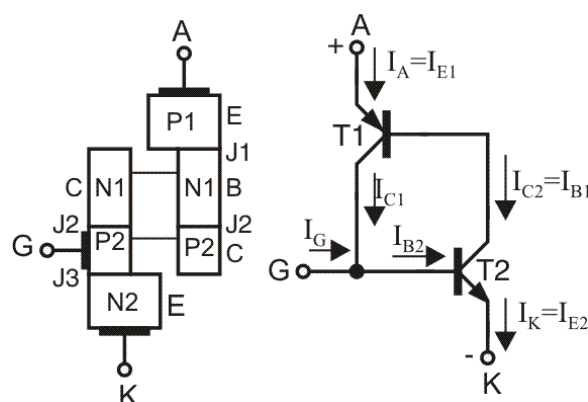
Со додавање на уште еден извод, приклучен на средниот P-слој на структурата од слика 7.1, се добива тиристорски елемент со три изводи, познат како SCR (Silicon Controlled Rectifier) – контролиран силициумски насочувач или едноставно **тиристор**, како што најчесто се среќава во практиката. Неговите приклучоци се означени како A - анода, K - катода и G - гејт или управувачка електрода (**слика 7.5**). Анодата и катодата имаат иста улога како и кај динисторот, а гејтот има улога на управувачка електрода за вклучување на тиристорот.



Слика 7.5: Структура и шематска ознака на тиристорот.



За анализа на работата на тиристорот ќе се послужи́ме, како и кај динисторот, со еквивалентна шема со два транзистора (слика 7.6).



Слика 7.6: Еквивалентна шема на тиристорот.

Кога колото на гејтот е отворено, тиристорот се однесува исто како и динисторот и се што е кажано за динисторот важи и за тиристорот.

Да видиме какво е влијанието на гејтот кога тиристорот е во состојба на директно неспроведување. 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 повратна врска: зголемена  $I_{B2}$  дава зголемена  $I_{B1}$ , таа дава зголемена  $I_{C1}$  итн., се зголемува и анодната струја  $I_A$ , 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 за напојување и отпорот на оптоварувањето приклучен во анодното коло.

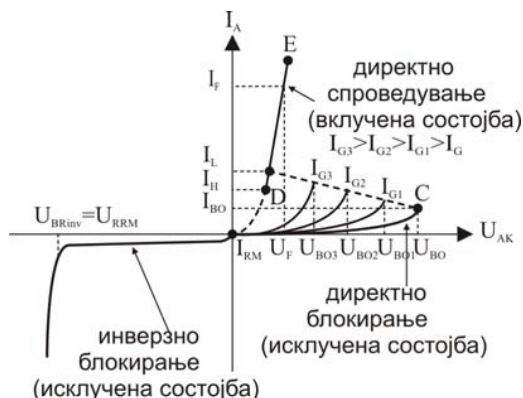
Од овој момент, колото на гејтот нема повеќе никакво влијание врз струјата на тиристорот. Струјата на гејтот може да се прекине, а струјата низ тиристорот продолжува да тече. Тоа значи дека струјата на гејтот има улога само да го поттикне процесот на позитивната повратна врска и спроведувањето на тиристорот и таа може да има импулсен карактер. Тиристорот може да се вклучува со краток позитивен напонски импулс.

Струјата на гејтот треба да има одредена вредност и траење за да може да го вклучи тиристорот при одреден напон  $U_{AK}$ . Со зголемувањето на струјата на гејтот се намалува напонот на вклучувањето на тиристорот  $U_{B0}$ , а тоа значи дека тиристорот ќе се вклучи и при помал напон  $U_{AK}$ .

Исклучувањето на тиристорот, исто како и кај динисторот, се случува само кога струјата на тиристорот ќе се намали под вредноста на струјата на држење  $I_H$ . Тоа значи дека треба да се прекине колото на анодната струја, или да се намали напонот за напојување толку што струјата да падне под вредноста  $I_H$ .

Тиристорите имаат две струјни кола: влезно (управувачко) и излезно (главно) струјно коло, па според тоа и две струјно-напонски карактеристики.

Излезните статички карактеристики ја покажуваат зависноста на анодната струја  $I_A$  од напонот меѓу анодата и катодата  $U_{AK}$  за различни вредности на струјата на гејтот  $I_G$  (слика 7.7). Се забележува дека карактеристиката за  $I_G = 0$  ја има истата форма како и карактеристиката на динисторот, што произлегува од истиот принцип на работа на двата елемента.



Слика 7.7: Излезна статичка карактеристика на тиристорот.

При директна поларизација и тиристорот има две стабилни состојби: состојба на директно неспроведување (исклучена состојба) и состојба на директно спроведување (вклучена состојба). Преминот од исклучена во вклучена состојба е во моментот кога напонот меѓу анодата и катодата ќе го надмине напонот на пробивање  $U_{BO}$ . Овој напон се менува во зависност од струјата на гејтот, за поголеми вредности на  $I_G$  напонот  $U_{BO}$  се намалува, како што е прикажано на карактеристиката.

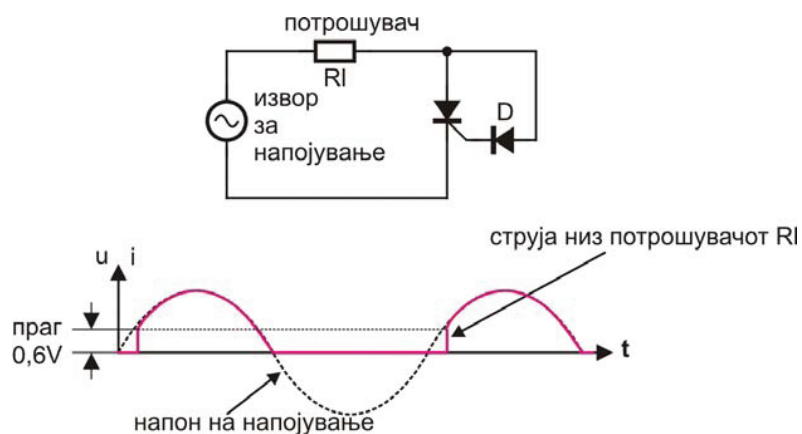
### 7.2.1. Побудување на тиристорот

Од претходно изложениот принцип на работа на тиристорот следува дека побудувањето на тиристорот (или окинување) може да се направи на два начина: со зголемување на напонот меѓу анодата и катодата над вредноста на напонот на вклучувањето  $U_{BO}$ , или со приклучување позитивен напон на гејтот. Во практиката секогаш се применува вториот начин. Побудниот напон може да биде: еднонасочен, наизменичен или импулсен. Од овие три начини, најчесто се применува побудување со позитивни струјни импулси.

### 7.2.2. Тиристор во коло на наизменична струја

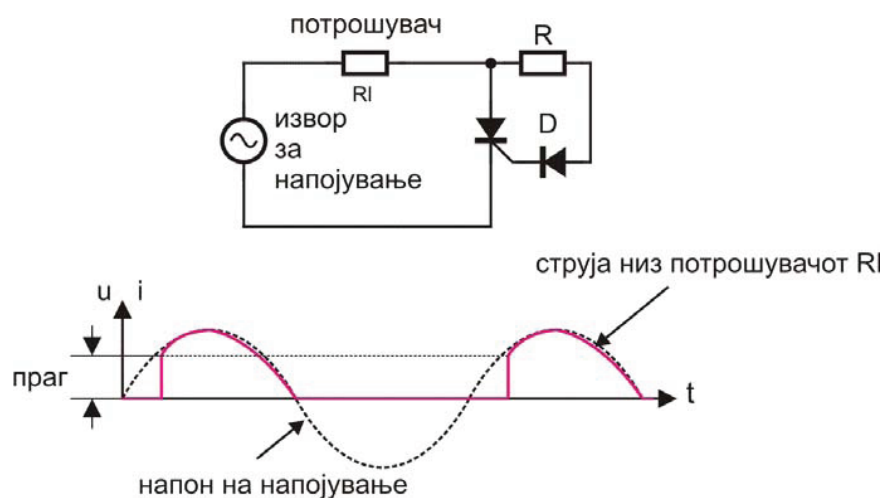
Наспроти фактот дека тиристорот е еднонасочен елемент, тој наоѓа најголема примена во управувањето со напојувањето со наизменичен напон. Ставен во коло за напојување на некое оптоварување со наизменичен напон, тој ќе функционира само за

време на позитивната полупериода на напонот. Без окинување на гејтот и при напон којшто е доста под напонот на пробивањето, тиристорот нема да спроведува.



Слика 7.8: Тиристорот во коло на наизменична струја.

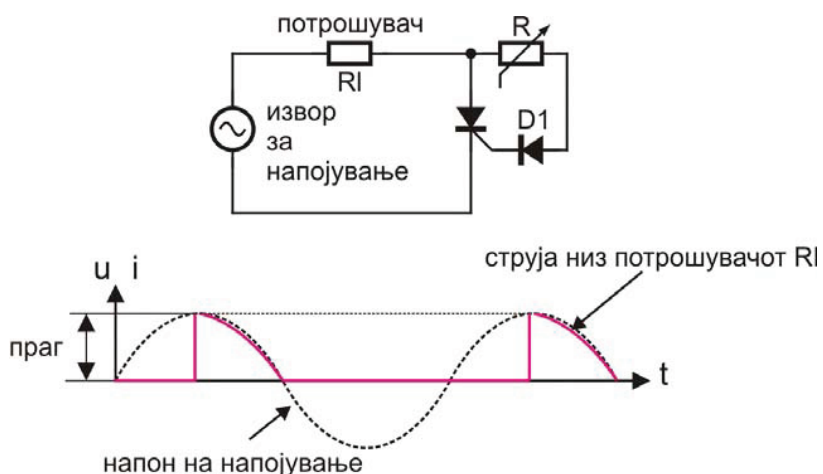
Да видиме што се случува ако се врзе гејтот со анодата на тиристорот преку една стандардна насочувачка диода (слика 7.8). Диодата е потребна да се сопре течење на инверзна струја преку гејтот кај тиристоры со вграден отпорник гејт – катода. Прагот на окинувањето и донесувањето на тиристорот во спроводна состојба се постигнува кратко време по почнувањето на секоја позитивна полупериода. Тоа е времето за кое напонот за напојување ја достигнува онаа вредност при која почнува да тече струјата на гејтот.



Слика 7.9: Окинување на тиристорот преку отпорник.

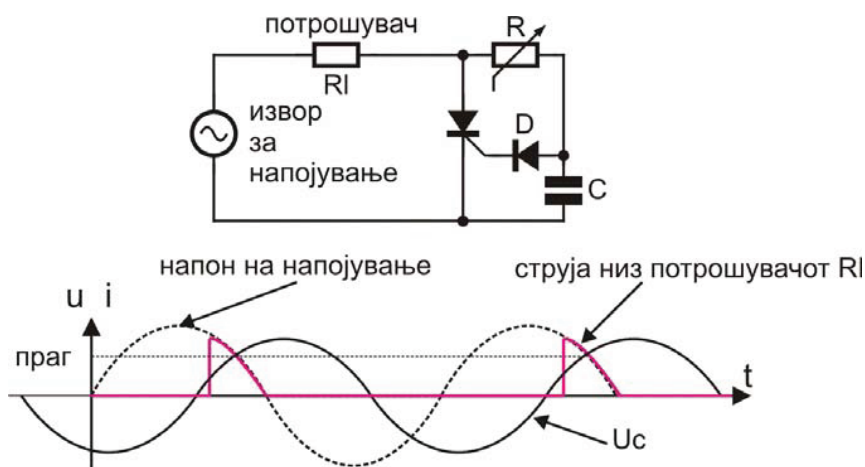
Моментот на окинувањето може да се задоцни со ставање отпорник во колото на гејтот (слика 7.9). Со падот на напонот на тој отпорник се намалува напонот на гејтот и окинувањето на тиристорот се одлага се додека напонот на напојувањето не ја достигне претходната вредност при која настапило окинувањето на тиристорот, зголемена за падот на напонот на отпорникот. Со поголем степен на отсекување на синусниот полубран,

добиено со задоцнето окинување на тиристорот, оптоварувањето добива помала средна моќност.



Слика 7.10: Регулација на моќноста на тиристорот.

Ако се направи серискиот отпорник во колото на гејтот да биде променлив (слика 7.10), се регулира испорачаната моќност на оптоварувањето по желба. Со зголемувањето на вредноста на отпорот се подига нивото на прагот на окинувањето и помала моќност се испорачува на оптоварувањето. Спротивното се случува со намалувањето на отпорот. За жал, оваа регулација е ограничена само на првата половина на полупериодата, до нејзиниот максимум. Колку и да го зголемуваме прагот на окинување, регулацијата не може да се пренесе во другата половина на полупериодата.



Слика 7.11: Поместување на фазата на окидниот бран.

Решението се наоѓа во додавање на кондензатор во колото, со кој се поместува фазата на окидниот бран (слика 7.11). Напонот на кондензаторот, како што се гледа и од дијаграмот, фазно е поместен за  $90^{\circ}$  во однос на напонот на напојувањето. Тоа важи за отпорно оптоварување, а за друг вид оптоварување, индуктивно или комбинирано, фазата

се поместува каде и да е меѓу  $0$  и  $90^{\circ}$ . Со фазното поместување, кретењето на полупериодата на струјата се постигнува подоцна од максималниот напон на изворот за напојување.

Во практиката, формата на напонот на кондензаторот е покомплексна од овде прикажаната, синусоидата е поизобличена секогаш кога тиристорот спроведува. Овој начин на окинување на тиристорот задоволува за едноставни примени како што е регулација на светлина.

### НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

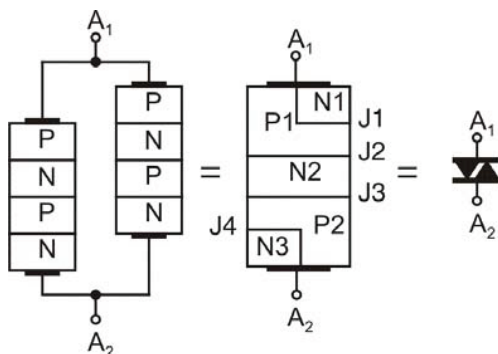
- Тиристорот или контролиран силициумски насочувач е елемент со три изводи: анода, катода и гејт.
- Тиристорот се побудува со позитивен напон на гејтот.
- Тиристорот може да се исклучи ако се прекине анодното коло, или ако се намали напонот анода – катода под вредноста на напонот на вклучувањето на тиристорот.
- При директна поларизација и тиристорот има две стабилни состојби: состојба на директно неспроведување (исклучена состојба) и состојба на директно спроведување (вклучена состојба).
- Тиристорот има најголема примена во управувањето со напојување со наизменичен напон.

### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

1. Како се добива структурата на тиристорот?
2. Каква е улогата на гејтот кај тиристорот?
3. Како се исклучува тиристорот?
4. Дефинирај ги состојбите на директно блокирање, директно спроведување и инверзно блокирање на тиристорот.
5. Како се побудува тиристорот?
6. Зошто се става диода во колото на гејтот?
7. Како се задоцнува окинувањето на тиристорот?
8. Што се добива со регулација на задоцнувањето на окинувањето?

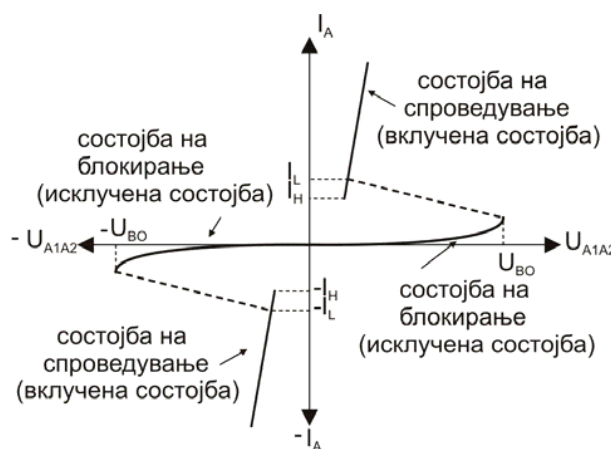
## 7.3. Дијак

Со паралелно врзување на два динистора, поставени во спротивни насоки, се добива еден од елементите на групацијата тиристори, наречен дијак. Еквивалентното коло и шематскиот приказ на диакот се дадени на **слика 7.12**. Направен на една силициумска плочка, дијакот претставува елемент со петслојна NPNPN-структура.



Слика 7.12: Структура и шематска ознака на дијакот.

Кога е приклучен на едностранен напон, дијакот се однесува како стандарден динистор, тој ќе спроведува во една насока од позитивниот кон негативниот крај на напонот на изворот. Ако ги свртиме 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  $A_1$  и  $A_2$  или со  $MT_1$  и  $MT_2$ .



Слика 7.13: Струјно-напонска карактеристика на дијакот.

Како и сите други тиристори, дијакот ќе почне да спроведува откако напонот на неговите краеве ја достигне вредноста на пробивниот напон. Струјно-напонската карактеристика на дијакот е дадена на **слика 7.13**.

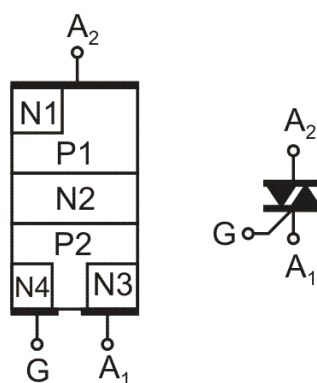
Дијакот ретко се користи самостојно, најчесто е во придружба на друг тиристорски елемент.

## ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

1. Што претставува дијак?
2. Во што се разликува дијакот од стандардните диоди?
3. Како изгледа струјно-напонската карактеристика на дијакот?

### 7.4. Тријак

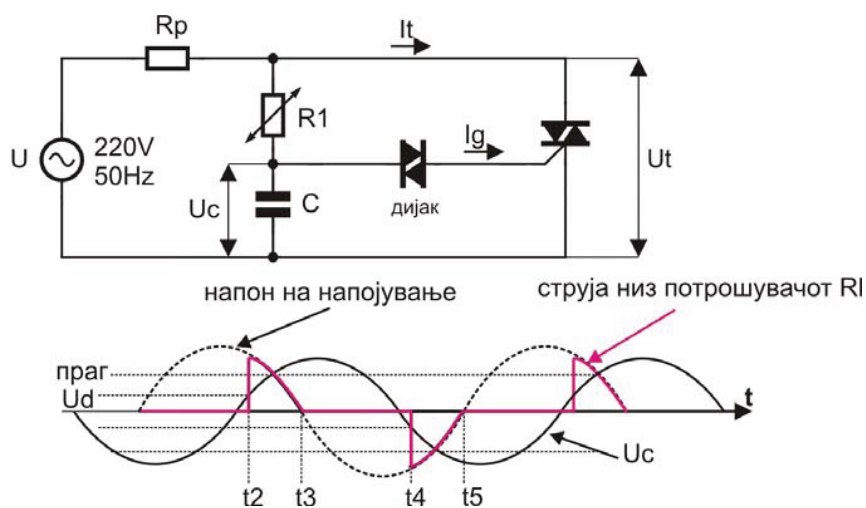
Со врзување два тиристора во паралела, слично на врзување на два динистора, се добива нов тиристорски елемент, познат како тријак. Тријакот може да се дефинира како двонасочен тиристор кој спроведува во двете насоки. Неговото еквивалентно коло и шематскиот приказ се дадени на **слика 7.14**. Тријакот 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 7.14: Структура и шематска ознака на тријакот.

И тријакот се носи 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.

Основен принцип на окинување на тријакот е со фазно поместување, слично како и кај тиристорот. Едно такво коло е прикажано на **слика 7.15**, тоа е истото коло од слика 7.11, во кое наместо тиристор стои тријак и наместо диода стои дијак. Напонот на кондензаторот  $U_c$  во почетокот расте се до вредноста  $U_d$ , до моментот  $t_2$  кога дијакот станува спроводен. Од моментот  $t_2$  до  $t_3$  низ тријакот и потрошувачот тече струја  $I_t$  која што престанува да тече во моментот  $t_3$ , кога наизменичниот напон на изворот за напојување станува нула.

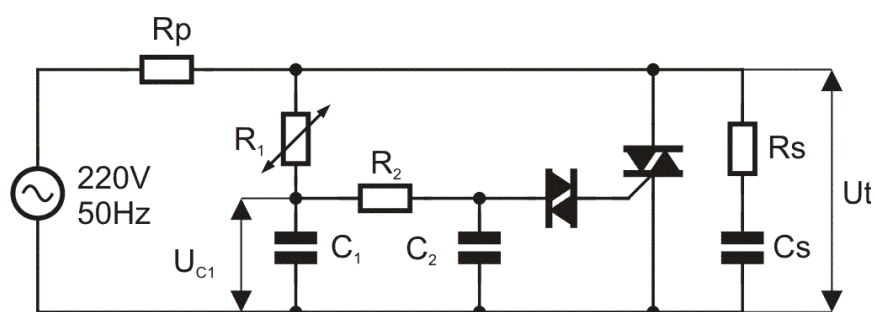


Слика 7.15: Принцип на работа на тријакот.

За време на негативната полупериода, во моментот  $t_4$ , повторно доаѓа до пробивање на дијакот, но сега во спротивната насока, се побудува тријакот и протекува струја низ тријакот и потрошувачот од моментот  $t_4$  до  $t_5$ .

Тријакот не се побудува симетрично за двете полупериоди на напонот на изворот, не се окинува точно на истото напонско ниво. Како последица се јавува голем број на хармонични фреквенции. Состојбата нешто ја подобрува присуството на дијакот.

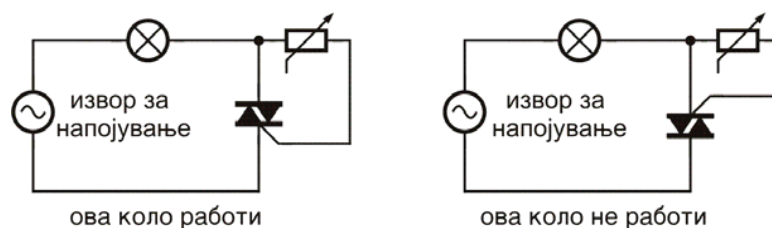
Подобрување се добива и со дополнително фазно поместување на напонот  $U_{C1}$  со  $R_2$  и  $C_2$  како што е направено во колото, дадено на **слика 7.16**. За потрошувачи со индуктивен карактер се ставаат елементите  $R_s$  и  $C_s$  за да не дојде до губење на контролата. Со нив се филтрираат многу брзи непожелни напонски скокови коишто можат да го окинат тријакот надвор од секаква контрола.



Слика 7.16: Дополнително фазно поместување на напонот за окинување.

Изводите анода 1 и анода 2 меѓусебно не се заменливи, што се гледа од две едноставни конструкции на **слика 7.17**, од кои едната работи а другата не. Поради поедноставување се изоставени дијакот и кондензаторот.





Слика 7.17: Приклучување на анодите на тријакот.

### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

1. Како може да се дефинира тријакот?
2. Која е разликата помеѓу тријакот и тиристорот?
3. Зошто во колото на гејтот се употребува дијак?
4. Зошто не можат изводите анода 1 и анода 2 меѓусебно да се заменат?

## 7.5. 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 како прекинувачи, овие компоненти се користат и во склопови за континуирана регулација на електричната моќност, како што се 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 моќност во кола 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 за 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.

### НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

- Дијакот е елемент со петослојна NPNPN-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.
- Основен принцип на окинување на тријакот е со фазно поместување.
- Тиристорите се користат за управување на струја со голема јачина со помош на мала струја на гејтот.



### Вежби за активно учење:

- Истражувај на интернет за видови тиристори.
- Изработи проект на тема тиристори.
- Изработи проект за практичната примена на тиристорите.

## ТЕМАТСКО УТВРДУВАЊЕ

### I Прашања со заокружување

(Заокружи ги точните одговори)

1. Полупроводнички елемент составен од четири полупроводнички слоеви, три PN-споја и три изводи претставува:

- а) Тиристор
- б) Дијак
- в) Тријак.

2. Тиристорот е во исклучена состојба кога се наоѓа во:

- а) Директно спроведување
- б) Директно блокирање
- в) Инверзно блокирање.

3. За регулација на моќни еднонасочни мотори во индустријата се користи:

- а) Дијак
- б) Тиристор
- в) Тријак.

4. Петослојна структура со три извода која спроведува во двете насоки е:

- а) Тиристор
- б) Дијак
- в) Тријак.

5. Електродата која има улога на управувачка електрода за вклучување на тиристорот е:

- а) Анода
- б) Катода
- в) Гејт.

## II Прашања со поврзување

6. Поврзи ги шематските симболи со елементите:



а)



б)



в)

1. Тиристор \_\_\_\_\_
2. Дијак \_\_\_\_\_
3. Тријак \_\_\_\_\_.

## III Прашања со дополнување

7. Електронските елементи со конфигурација од четири или повеќе полупроводни материјали, наредени така што да прават најмалку три PN-споеви и имаат најмалку два извода се нарекуваат \_\_\_\_\_.

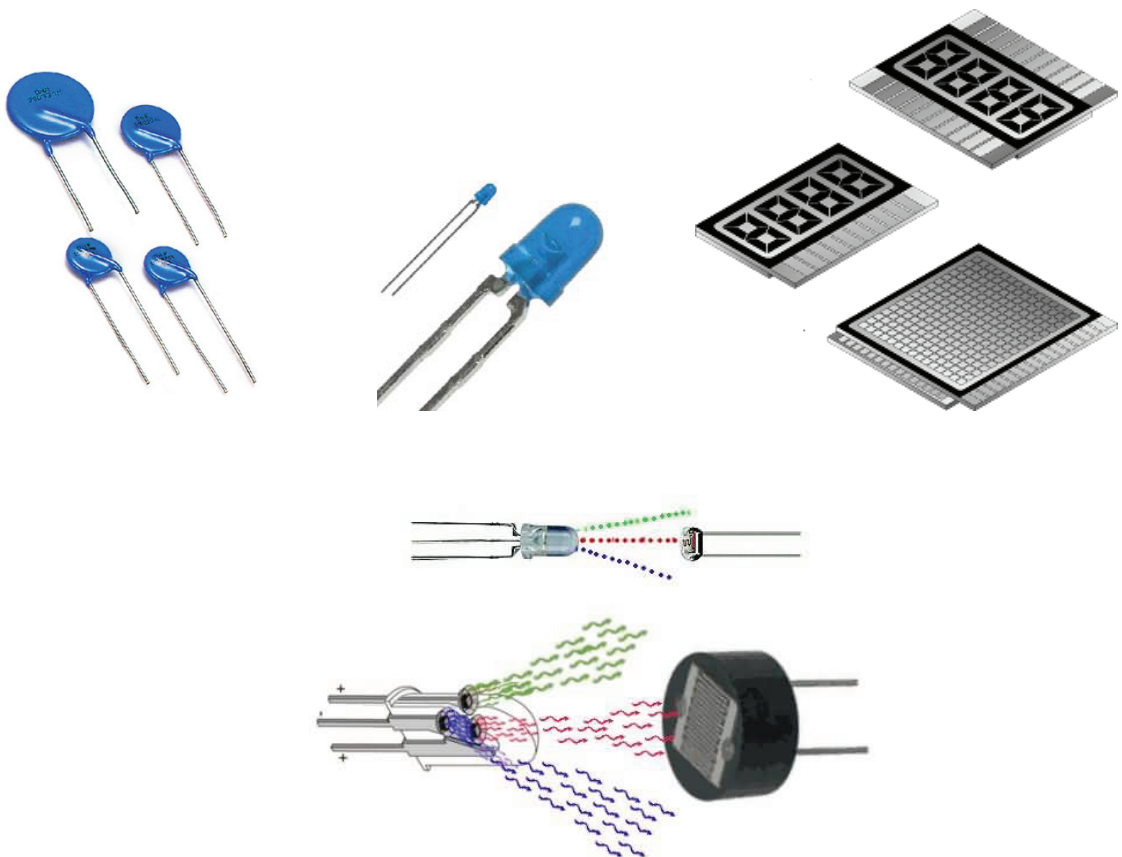
8. Карактеристиките кои ја покажуваат зависноста на струјата на гејтот од напонот меѓу гејтот и катодата  $U_{GK}$  се \_\_\_\_\_ карактеристики.

9. Двонасочен тиристор кој спроведува во двете насоки се нарекува \_\_\_\_\_.

# 8. 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:

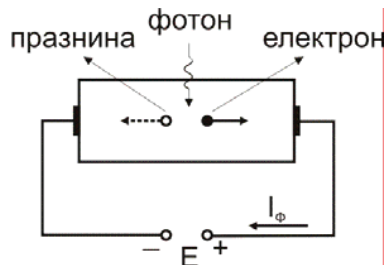
- да ја објаснуваш градбата и карактеристиките на фотоотпорниците;
- да ја познаваш примената на фотоотпорниците;
- да ги објаснуваш карактеристиките на фотогенераторите;
- да ја познаваш примената на фотогенераторите;
- да ги објаснуваш карактеристиките на варисторите;
- да ја познаваш примената на варисторите;
- да ја разликуваш градбата на дисплеј со LED диоди и со течен кристал (LCD).





## 8. 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.

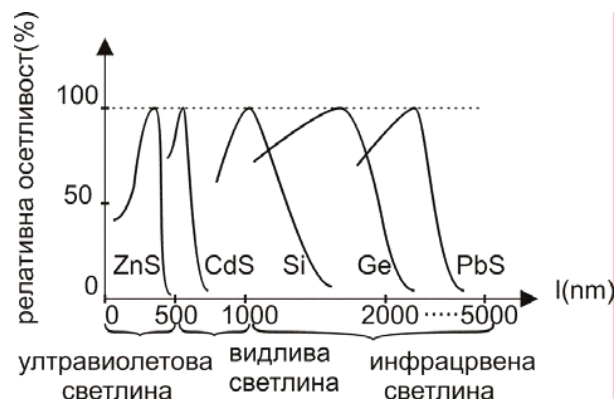


Слика 8.1: Фотоотпорник во електрично коло со извор за напојување.

Кога е ставен во електрично коло со извор за напојување, фотоотпорникот пропушта струја  $I_\phi$  пропорционална на вредноста на неговиот отпор (слика 8.1). Ако фотоотпорникот не е осветлен, во колото во кое се наоѓа тече струја  $I_{\phi 0}$  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.

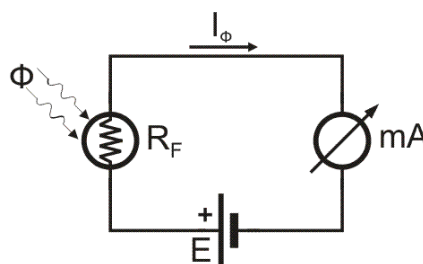
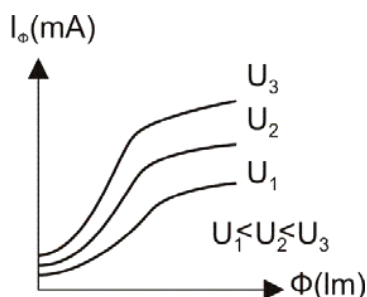
Процедурата на производство на фотоотпорникот се состои во нанесување фотоосетлив полупроводнички материјал на подлога од керамичка плочка. Нанесувањето се прави со таложење на испарлив материјал или со синтерување на полупроводнички прав на висока температура. На краевите на плочката се ставаат метални 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 8.2).



Слика 8.2: Спектрални карактеристики на фотоотпорникот за различни полупроводнички материјали.

Зависноста на струјата  $I_\phi$  од светлосниот флукс за разни вредности на напонот на фотоотпорникот е прикажана на **слика 8.3**. Оваа карактеристика не е линеарна, таа покажува струјно заситување за големи вредности на светлосниот флукс.



Слика 8.3: Дијаграм за осетливоста на фотоотпорникот. Слика 8.4: Електрична шема на светломер.

Фотоотпорниците се применуваат во едноставни инструменти за мерење на осветленоста, таканаречени светломери (**слика 8.4**) и како детектори на светлината во разни алармни и командни уреди.

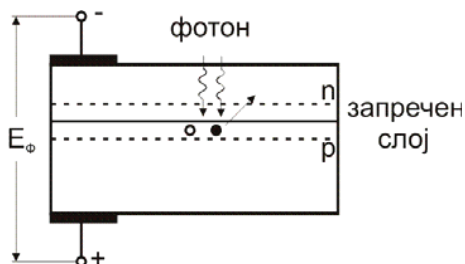
### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

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?



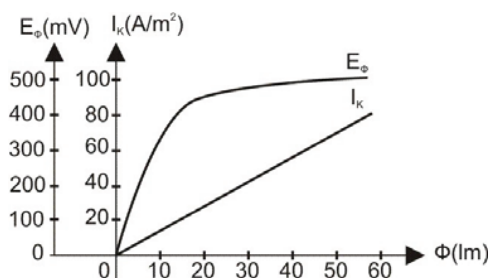
## 8. 2. Фотогенератори

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 8.5**. 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 8.5: 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  $E_\phi$  на изводите на фотогенераторот. Оваа електромоторна сила  $E_\phi$  се нарекува напон во празен од кога на изводите на фотогенераторот не е приклучен отпорник. Ако се приклучи отпорник, низ него ќе протече електрична струја пропорционална на светлосниот флукс кој паѓа на површината на фотогенераторот.



Слика 8.6: Светлосни карактеристики на фотогенераторот.

На **слика 8.6** се дадени светлосните карактеристики на фотогенераторот кои претставуваат зависност на напонот во празен од,  $E_{\phi}$ , и струјата на краток спој,  $I_k$ , од светлосниот флукс  $\Phi$ .

Фотогенераторите се основен извор на електрична енергија во космичките летала. Тие се нарекуваат **соларни ќелии**, бидејќи енергијата од сончевото зрачење ја претвораат во електрична.

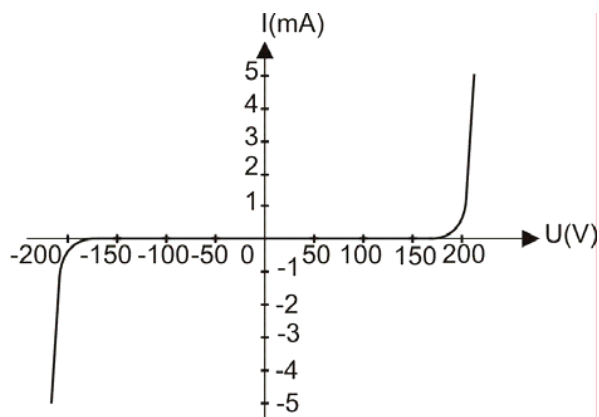
Голема е и примената на соларните ќелии на земјината површина како алтернативни извори на електрична енергија.

### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

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?

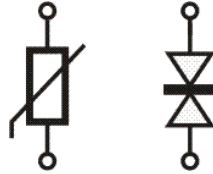
## 8.3. Варистори

Варисторите се електронски компоненти со специфични карактеристики. Називот варистор е кратенка од англискиот израз за променлив отпор (**V**ARiable res**I**STOR), што означува дека неговиот отпор се менува со промена на напонот на неговите краеве. Таа промена е нелинеарна и неговата струјно – напонска карактеристика (**слика 8.7**) ни малку не личи на карактеристиката на стандардните отпорници.



Слика 8.7: Струјно – напонска карактеристика на варисторот.

За варисторите постои уште еден назив: **VDR**-отпорници, како кратенка од **V**oltage **D**ependent **R**esistor. Електрички, тие се однесуваат како две зенер диоди споени со катодите и нивната шематска ознака се среќава во форма како на **слика 8.8**.



Слика 8.8: Шематска ознака на варисторот.

Кога на краевите на варисторот ќе дојде до голема напонска промена, како што е, на пример, напонскиот шилец, таа предизвикува голема промена на неговата импеданса. Во нормални услови, варисторот се однесува како отворено коло во кое не тече струја. Во услови на зголемен напон, тој станува високоспроводлив и на тој начин го придушува напонскиот скок на релативно сигурно ниво. Варисторот ја апсорбира енергијата на зголемениот напонски скок и така ги заштитува останатите компоненти во колото.

Варисторот е составен од цинк оксид со додаток на мали количества бизмут, кобалт, манган и други метални оксиди. Структурата на телото на варисторот е составена од компактна маса честички на цинк-оксид кои меѓусебно се допираат и така се здобиваат со полупроводнички карактеристики на еден PN-спој. Множество од овие случајно ориентирани споеви е еквивалентна на мрежа од по две диоди споени со катодите, секој пар диоди во паралелна врска со многу други парови диоди. Овие споеви се распоредени по целиот волумен на телото на варисторот. Тие го прават варисторот неспроводен при нормален работен напон и нелинеарен кога е во спроводна состојба.

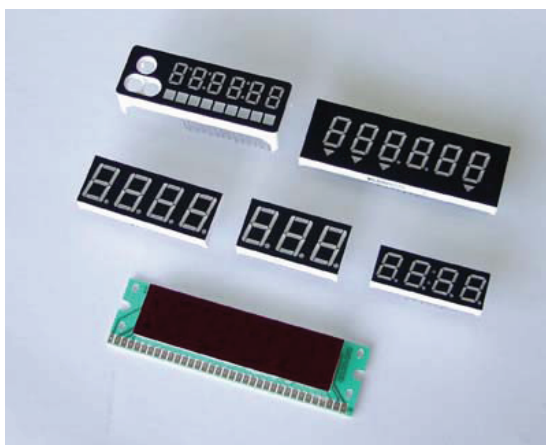
Во состојбата на спроведување, апсорбираната енергија се распределува на целото тело на варисторот, што го прави поиздржлив и поотпорен во однос на другите PN-структури, како, на пример, зерен диодата. Електричните особини на варисторот се одредени со физичките димензии на неговото тело, кое се изработува во разни форми (диск, цилиндар или цевка). Моќноста се одредува со волуменот, работниот напон со дебелината на телото или со должината на патеката на струјата, а струјата се одредува со површината, нормална на нејзината насока. Варисторите се изработуваат за наизменични напони од 2,5 до 6000V. Најмногу се користат за заштита на комуникациски линии (телефонски, коаксијални и др).

### ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

1. Дефинирај го поимот варистор.
2. Нацртај ја струјно – напонската карактеристика на варисторот.
3. Од што зависат електричните особини на варисторот?
4. За какви напони се изработуваат варисторите?
5. Каде се применуваат варисторите?

## 8.4. Дисплеј со LED диоди

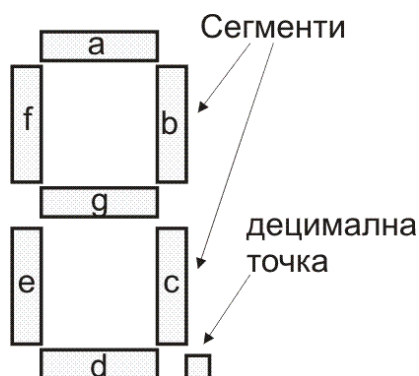
LED дисплеј претставува индикатор, составен од седум сегменти, осветлени со LED диоди. LED диодите на овие индикатори имаат форма којашто се разликува од стандардните LED диоди. Секој сегмент е една диода со издолжена форма, или светлината на LED диодата се насочува и на површината излегува како еден сегмент. На **слика 8.9** се дадени некои популарни конструкции на LED дисплеи.



Слика 8.9: Видови конструкции на LED дисплеи.

Дисплеј со заедничка анода е конструкција во која анодите на сите диоди на дисплејот се врзани во една заедничка точка, а дисплеј со заедничка катода ги има катодите на диодите врзани во една заедничка точка. Сегментите на дисплејот обично се означуваат со буквите: a, b, c, d, e, f, g, а можно е и присуство на децимални точки со ознаки DP1 и DP2 (**слика 8.10**). Кога сите седум сегменти емитираат светлина на дисплејот се прикажува цифрата 8. Другите цифри и букви се добиваат со соодветни комбинации на сегментите.

За управување со LED дисплејот се користат разни интегрирани кола кои содржат лач и управувач со дисплејот. Излезите од колото на управувачот со LED дисплејот може да бидат ниски или високи, со што соодветниот сегмент станува светол или темен.



Слика 8.10: Конструкција на еден елемент од седум сегментен дисплеј.

## ПРОВЕРИ ГО СВОЕТО ЗНАЕЊЕ

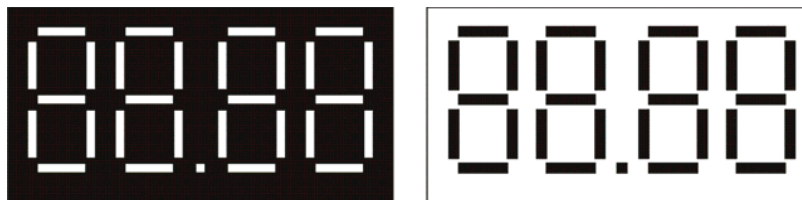
1. Што претставува LED дисплеј?
2. Објасни ја конструкцијата на дисплеј со заедничка анода.
3. Што се користи за управување со LED дисплејот?
4. Како сегментот станува светол или темен?

## 8.5 Дисплеј со течен кристал – LCD

Течен кристал 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 материи (група холестерини). Молекулите на тие материи 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.

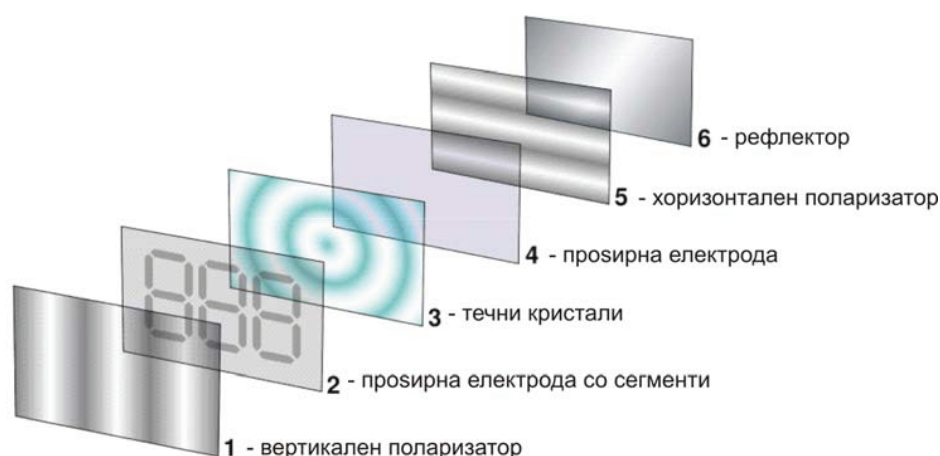
Дисплејот може да биде со темни знаци на светла заднина или со светли знаци на темна заднина (**слика 8.11**), односно со принцип на динамичка дисперзија на светлината или со принцип на ефект на електрично поле.



Слика 8.11: Видови на LCD дисплеи.

Дисплејот со течен кристал е составен од две стаклени плочи и тенок слој на течен кристал меѓу нив. Надворешната страна на долната стаклена плоча е пресвличена 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 знаците 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 8.12**). 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 8.12: 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. Густината 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.

### НЕ ЗАБОРАВИ ДЕКА...!

- **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, таканаречени светломери и како детектори на светлината во разни алармни и командни уреди**
- **Фотогенератори се фотоелектрични елементи со способност енергијата на светлосното зрачење да ја претвораат директно во електрична.**
- **Фотогенераторите се нарекуваат соларни ќелии, бидејќи енергијата од сончевото зрачење ја претвораат во електрична енергија.**
- **Варисторите се фотоелектрични елементи со способност отпорот на нивните краеве да се менува со промена на напонот на нивните краеве.**
- **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?



### Вежби за активно учење:

- Истражувај на интернет за видови електронски специфични елементи.
- Изработи проект за примена на фотоелектрични елементи
- Изработи проект за примена на дисплеј со LED диоди со течен кристал.

## ТЕМАТСКО УТВРДУВАЊЕ

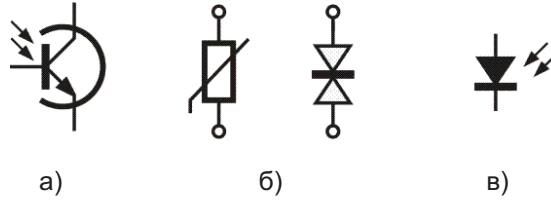
### I Прашања со заокружување (Заокружи ги точните одговори)

1. Елементите кај кои со промена на температурата се менува нивната отпорност се:
  - а) фотоотпорници
  - б) дисплеј со LED диоди
  - в) варистори.
2. Елементи кои енергијата од сончевото зрачење ја претвораат во електрична се:
  - а) фотогенератори
  - б) варистори
  - 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 кој се користи во екраните и мониторите е:
  - а) фотогенератори
  - б) фотоотпорници
  - в) дисплеј со течен кристал.



## II Прашања со поврзување

5. Поврзи ги шематските симболи со елементите:



1. Фотодиода \_\_\_\_\_
2. Фототранзистор \_\_\_\_\_
3. Варистор \_\_\_\_\_.

6. Поврзи ги специфичните електронски елементи со нивната примена како:

- |                   |                              |
|-------------------|------------------------------|
| 1. Дисплеј со LCD | а) Светломери _____          |
| 2. Фотогенератори | б) Дигитални часовници _____ |
| 3. Фотоотпорници  | в) Соларни ќелии _____.      |

## III Прашања со дополнување

8. Специфичниот електронски елемент чиј отпор се менува со промена на напонот на неговите краеве се нарекува \_\_\_\_\_ .

9. Материјалот кој на одредена температура има особини и на течност и на кристал се нарекува \_\_\_\_\_.

10. Електронските елементи чии електрични својства зависат од промената на енергијата на светлосното зрачење се нарекуваат \_\_\_\_\_.



## ИСТОРИЈА 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.



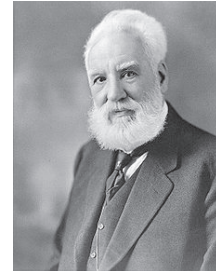
**James Clerk Maxwell**

**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 радио-брановите.



**Heinrich Herz**

**1897 година**, **Браун** ја конструира катодната цевка и ја применува во осцилоскоп.

**1904 година, Флеминг (John Fleming)**, применувајќи го Едисоновиот ефект, конструира елек-тронска цевка со два елемента и ја нарекува диода. Електронските цевки стану-ваат 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 одлу-ката, 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 елек-тронски 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, теле-визија, па и на првите компјутери.

**1912 година, Мајснер** конструира електронски осцилатор.

**1918 година, Армстронг (Edwin Armstrong)** го измислува суперхетеродинскиот 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 светска 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 полу-спроводничката 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**

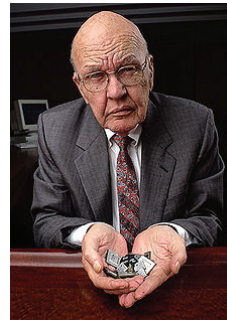


транзистор

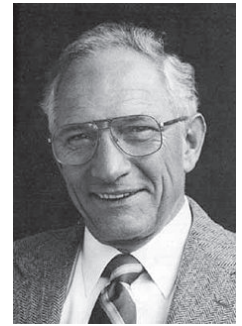
**1952 година**, американскиот физичар **Шокли** дал теоретска основа и идеја за транзистори со ефект на поле кои се произведувале и применувале неколку години подоцна.

**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 ниски 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 инстру-ментс (Texas Instruments) во **1958 година**, и на **Херни и Нојс (Jean Hoerni, Robert Noyce)** од фирмата Ферчајлд Семи-кондукторс (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 **1970 година** па сè до денес, дигиталните интегрирани кола се во постојан развој. На секаде се зборува за нови микропроцесори, побрзи, покомплексни и поевтини од претходните.

## СОДРЖИНА

<b>1. ПОЛУСПРОВОДНИЧКИ ДИОДИ</b> .....	1
1.1. Предмет и поделба на ЕЛЕКТРОНИКАТА.....	3
1.2. Полупроводници.....	5
1.2.1. Носители на електрицитет кај полупроводните материјали.....	6
1.3. Полупроводник од N-тип и P-тип.....	9
1.4. PN-спој.....	13
1.5. Управување со електричната струја низ PN - спојот.....	16
1.6. Полупроводнички диоди.....	18
1.6.1. Статичка карактеристика.....	18
1.7. Видови и примена на полупроводнички диоди.....	22
1.7.1. Диоди со точкест спој.....	22
1.7.2. Диоди со површински спој.....	23
1.7.2.1. Насочувачки диоди.....	23
1.7.2.2. Зенер диоди.....	24
1.7.2.3. Импулсни диоди.....	25
1.7.2.4. Фотодиоди.....	26
1.7.2.5. LED диоди.....	28
Прилог 1: Задачи со решени примери.....	27
<b>2. ТРАНЗИСТОРИ</b> .....	47
2.1. NPN-транзистор.....	49
2.1.1. Поларизација на NPN-транзистор.....	51
2.1.2. Струи кај транзисторот.....	52
2.2. PNP-транзистор.....	54
2.3. Карактеристики на транзисторот.....	56
2.3.1. Статички режим на работа.....	56
2.3.2. Статички карактеристики во спој со заеднички емитер.....	57
2.3.3. Ограничувања при работа на транзисторот.....	59
2.4. Динамички режим на работа.....	61
2.4.1. Еквивалентна шема на транзисторот со h-параметри.....	62
2.5. Транзистор како засилувачки елемент.....	66
2.5.1. Особини на транзисторот при високи фреквенции.....	67
2.6. Транзистор како прекинувачки елемент.....	68
2.6.1. Прекинувачко коло со транзистор во спој со заеднички емитер.....	69
2.7. Фототранзистори.....	73
2.8. Униполарни транзистори - транзистори со ефект на поле.....	75

2.8.1. Структура и принцип на работа на FET.....	76
2.8.2. Статички карактеристики на FET.....	77
2.8.3. FET во динамички режим на работа.....	79
2.8.3.1. Еквивалентна шема на FET.....	80
2.9. MOSFET.....	82
2.9.1. Структура и принцип на работа на MOSFET со индуциран канал.....	82
2.9.2. Статички карактеристики.....	84
2.9.3. MOSFET со вграден канал.....	85
2.9.4. MOSFET како прекинувачки елемент.....	86
2.10. Примена на транзисторите.....	88
Прилог 2: Задачи со решени примери.....	93
<b>3. ЗАСИЛУВАЧИ.....</b>	<b>101</b>
3.1. Засилување и улога на засилувачот.....	103
3.2. Поделба на засилувачите.....	105
3.3. Параметри на засилувачот.....	109
3.4. Видови конфигурации на засилувачите.....	111
3.4.1. Поларизација на транзисторот кај едностепените засилувачи.....	112
3.4.2. Одредување на параметрите кај засилувачот во спој со заеднички емитер.....	115
3.4.3. Засилувач со конфигурација на заеднички колектор.....	118
3.4.4. Засилувач со конфигурација на заедничка база.....	120
3.4.5. Дарлингтонов спој.....	122
3.4.6. Засилувач со конфигурација на заеднички сорс.....	124
3.5. Каскадно поврзани засилувачи.....	127
3.6. Видови спреги меѓу засилувачите.....	128
3.7. Диференцијален засилувач.....	131
3.7.1. Преносна карактеристика на реален диференцијален засилувач.....	133
3.7.2. Изведба на диференцијален засилувач со биполарни транзистори.....	133
3.7.3. Диференцијално засилување.....	134
3.7.4. Истофазно засилување.....	135
3.8. Засилувачи со повратна врска.....	137
3.8.1. Засилување со повратна врска .....	137
3.8.2. Видови на негативна повратна врска.....	139
3.8.3. Стабилност на засилувач со повратна врска.....	142
3.8.4. Постојаност на засилувањето на засилувач со негативна повратна врска.....	142
3.8.5. Проширување на пропусниот опсег.....	143
3.8.6. Видови изобличувања и влијание на негативната повратна врска врз шумовите.....	144
3.8.7. Влијание на негативната повратна врска врз влезната и врз излезната импеданса на засилувачот.....	145



3.9. Засилувачи на моќност.....	147
3.13.1. Излезен степен во класа А со биполарен транзистор.....	147
3.9.2. Комплементарни симетрични засилувачи .....	151
3.10. Операциски засилувачи.....	153
3.10.1. Идеален операциски засилувач.....	154
3.10.2. Повратна врска на операциски засилувач.....	155
3.10.3. Инвертирачки засилувач.....	156
3.10.4. Неинвертирачки засилувач.....	157
3.10.5. Коло за сумирање.....	159
3.10.6. Засилувач на разлика.....	160
3.10.7. Претворувач на струја во напон и напон во струја.....	161
3.10.8. Блок-шема на реален операциски засилувач.....	162
Прилог 3: Задачи со решени примери.....	169
<b>4. ИНТЕГРИРАНИ КОЛА</b> .....	183
4.1. Карактеристики на одделни видови интегрирани кола.....	185
4.2. Хибридни интегрирани кола.....	187
4.3. Монолитни интегрирани кола.....	187
4.3.1. Изработка на основата.....	188
4.3.2. Фотолиитографија.....	189
4.3.3. Дифузија.....	191
4.3.4. Епитаксијална надградба.....	191
4.3.5. Завршни операции.....	192
4.4. Примена на интегрираните кола.....	193
<b>5. ХАРМОНСКИ ОСЦИЛАТОРИ</b> .....	197
5.1. Осцилатори со позитивна повратна врска.....	199
5.2. Осцилатори со индуктивна врска.....	200
5.3. Осцилатори во три точки.....	202
5.3.1. Хартлеев осцилатор.....	202
5.3.2. Колпицов осцилатор.....	203
5.4 RC осцилатори.....	204
5.5 Осцилатор со Винов мост.....	206
5.6 Осцилатори со кварц.....	208
5.7 Стабилизација на амплитудата и фреквенцијата на осцилациите.....	210
<b>6. ИЗВОРИ ЗА НАПОЈУВАЊЕ</b> .....	215
6.1 Уреди за напојување од мрежен напон.....	217
6.2 Полубранов насочувач.....	218
6.3 Целобранов насочувач.....	220
6.4 Капацитивни филтри.....	222

6.5 Стабилизација на напон со зенер диода.....	224
6.6 Сериски стабилизатор на напон со транзистор.....	225
6.7 Интегрирани линеарни стабилизатори на напон.....	227
6.8 Струен стабилизатор.....	229
6.9 Стабилизатор на напон со ограничување на струјата.....	230
<b>7. ТИРИСТОРИ.....</b>	<b>235</b>
7.1. Динистор.....	237
7.2. Тиристор.....	240
7.2.1. Побудување на тиристорот.....	242
7.2.2. Тиристор во коло на наизменична струја.....	242
7.3. Дијак.....	246
7.4. Тријак.....	247
7.5. Примена на тиристорите.....	249
<b>8. СПЕЦИФИЧНИ ЕЛЕКТРОНСКИ ЕЛЕМЕНТИ.....</b>	<b>253</b>
8.1. Фотоотпорници.....	255
8.2. Фотогенератори.....	257
8.3. Варистори.....	258
8.4. Дисплеј со LED диоди.....	260
8.5. Дисплеј со течен кристал – LCD.....	261
Историја на електрониката.....	267

## КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

1. David Irwin David Kerns: Introduction to Electrical Engineering, Prentice Hall International Editions, 1995
2. Методија Камиловски: 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. Написи во списанието ЕМИТЕР, студио Емитер Скопје
10. Интернет прилози и податоци