

**НАТАША БОЖИНОВСКА
ЈАНИ СЕРВИНИ**

ЕЛЕКТРОНИКА

За II година

Електротехничка струка/ сектор електротехника

**Образовен профил/ квалификација
Електротехничар за
електроника и телекомуникации**

ЕЛЕКТРОНИКА за II (втора) година
образовен профил/квалификација
Електротехничар за електроника и телекомуникации

Автори:

Наташа Божиновска, дипл. ел. инж.
Јани Сервини, дипл. ел. инж.

Рецензенти:

Проф. д-р Фадиљ Ајредини,
Природно-математички Факултет при Универзитет во Тетово – Тетово
Софија Темкова, дипл.ел.инж.
Професор во СЕТУГС “Михајло Пупин” – Скопје
Гордана Мулева, дипл.ел.инж.
Професор во ССОУ “Коле Неделковски” – Велес

Главен уредник:

Иван Божиновски, машински инж.

Лектура:

Ивана Коцевска

Изработка на корица:

Јован Молкоски, инж. од областа на индустриски дизајн

Издавач:

Министерство за образование и наука на Република Северна Македонија,
ул „Свети Кирил и Методиј“ бр. 54, 1000 Скопје.
Со одлука бр. 26 - 1915/1 од 19.07.2023 година од Националната комисија
за учебници, се одобрува употребата на овој учебник.

CIP - Каталогизација во публикација
Национална и универзитетска библиотека "Св. Климент Охридски",
Скопје

**НАТАША БОЖИНОВСКА
ЈАНИ СЕРВИНИ**

ЕЛЕКТРОНИКА

за II (втора) година

**образовен профил/квалификација
Електротехничар за
електроника и телекомуникации**

**електротехничка струка/
сектор електротехника**

Скопје, 2023

ПРЕДГОВОР

Учебникот **ЕЛЕКТРОНИКА** за **II (втора) година** е резултат на промените во наставните програми во рамките на проектот за модернизација на техничкото образование. Содржината на учебникот е усогласена со наставната програма за предметот **ЕЛЕКТРОНИКА** за **II (втора) година** на образование, од Електротехничка струка/сектор Електротехника, за образовен профил/квалификација **Електротехничар за електроника и телекомуникации**, од 2019 година. При изработката на учебникот е користен прирачникот **“Концепција за изработка на учебник”** издаден од Бирото за развој на образованието и **„Концепцијата за модернизација на техничкото образование“**.

За успешно совладување на наставните содржини од овој учебник, потребно е претходно знаење од предметите физика, математика, електротехника, електротехнички материјали и техничка комуникација. Содржински, учебникот е конципиран во три целини, теоретски дел, нумерички задачи и практични вежби.

Согласно со наставната програма, теоретскиот дел на учебникот е поделен на **9 модуларни единици**.

1. **Електронски компоненти.** На почетокот е дадена класификацијата на електронските елементи, нивните графички симболи, реалниот изглед, означувањето, поларизацијата и статичките карактеристики со акцент врз полупроводничките диоди, униполарните и биполарните транзистори, тиристорите и интегрираните кола.
2. **Диоди.** Примена на диодата како прекинувач, стабилизирачко својство на Зенер диодата, LED диоди и фотодиоди се дел од содржините на оваа модуларна единица. Демонстрирана е реализација на диодни кола: насочувачи, ограничувачи, стабилизатори и логички кола, проверувајќи ја функционалноста на елементите во диодното коло.
3. **Транзистори.** Во овој модул 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.
4. **Засилувачи.** Најголемиот дел од содржината на учебникот е посветен на улогата, поделбата, параметрите и конфигурациите на засилувачите со биполарни и униполарни транзистори и различните конфигурации на засилувачки степени. Практичната реализација на линеарен засилувачки степен е прикажана во делот од лабораториските вежби.
5. **Засилувачи со негативна повратна врска.** Во овој модул е дефиниран поимот повратна врска, видовите и влијанието на повратната врска врз параметрите на засилувачот. Постапките за реализација на линеарен засилувачки степен со негативна повратна врска се прикажани од избор на електрична шема, преку користење каталози, до постапки за испитување.

6. **Операциски засилувач.** Анализа на карактеристиките на идеален и реален операциски засилувач, како и анализа на видовите операциски засилувачи се дел од содржините на оваа модуларна единица.

7. **Хармониски осцилатори.** Предмет на анализа се различни видови осцилатори, како RC осцилатор, LC-осцилатор, Колпицов осцилатор, осцилатор со Винов мост и осцилатор со кварц и принципи на стабилизација на нивната фреквенција.

8. **Мултивибратори.** Во овој модул е разработена важноста и улогата на мултивибраторите во имулсната електроника и нивната примена како тајмери и генератори на напонски такт сигнал со правоаголен периодичен облик. Фокусот е ставен врз изучување на блок-шемата и однесувањето на познатото и многу често користено временското интегрирано коло 555, како и врз функционирањето на моностабилниот и астабилниот мултивибратор реализирани со него.

9. **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.

Резултатите од учење се постигнуваат со разработка на соодветните содржини кои се прилагодени на возраста на учениците и нивните психофизички способности. Во секој модул има резимеа кои ги истакнуваат најважните моменти од претходно изложената материја а на крајот се дадени прашања за тематско утврдување на истиот.

Во делот од учебникот со нумерички задачи, дадени се решени примери и задачи за решавање со анализа на проблемот и синтеза на стекнатите теоретски основи.

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.

Практичните вежби овозможуваат испитување и практична реализација на реални шеми од содржините на модулите.

Авторите се надеваат дека учебникот ќе одговори на потребите на наставниците по предметната настава како и на потребата на учениците за усвојување и за утврдување на материјалот.

Авторите им изразуваат голема благодарност на рецензентите за корисните сугестии, забелешки и предлози при конечното оформување на учебникот. Свесни за можните грешки, сите добронамерни забелешки со благодарност ги прифаќаат.

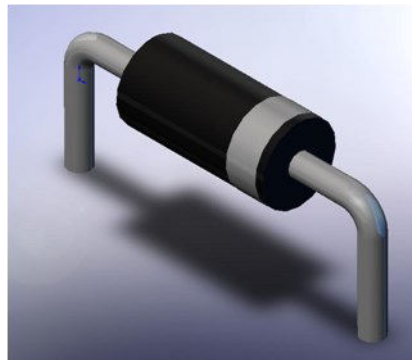
авторите

Модуларна единица



































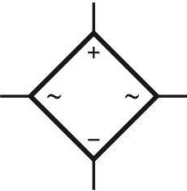


1. Електронски компоненти

Со изучување на содржините од оваа модуларна единица ученикот ќе стекне основни знаења за електронските компоненти и ќе може:

- да чита електрични шеми;
- да распознава графички симболи на електронски компоненти;
- да чита каталожки податоци;
- да објаснува поларизација на електронски компоненти;
- да претставува карактеристики на електронски компоненти во графички облик;
- да дискутира принцип на работа;
- да определува режим на работа;
- да класифицира електронски компоненти според нивната конструкција;
- да демонстрира лемење и одлемување на електронски компоненти;
- да ја познава постапката за тестирање на компонентите.



Симболи на електронските компоненти

	Отпорник (фиксен)		Насочувачка диода		транзистор од NPN-тип
	Потенциометар		Зенер диода		транзистор од PNP-тип
	Потенциометар		Зенер диода		P-канален JFET
	Тример		LED диода		N-канален JFET
	Тример		Фотодиода		MOSFET со вграден канал од P-тип
	Кондензатор фиксен		Варактор капацитивна диода		MOSFET со индуциран канал од P-тип
	Променлив неполаризиран кондензатор		Шоткиева диода		MOSFET со индуциран канал од N-тип
	Тимер неполаризиран кондензатор		Тунел диода		MOSFET со вграден канал од N-тип
	Електролитски кондензатор		Тиристор		Фототранзистор
	Електролитски кондензатор		Дијак		Транзистори во Дарлингтонов пар од NPN-тип
	Калем		Тријак		Транзистори во Дарлингтонов пар од PNP-тип
	Калем со НФ-феритно јадро		Грецов спој		
	Калем со ВФ-феритно јадро				
	Променлив калем				

На поимот „електроника“ му се даваат три основни значења:

а) **Електрониката** е наука која, како дел од физиката, се занимава со движењето на електроните во празен простор (електронски вакуумски цевки) и во полупроводнички материјали.

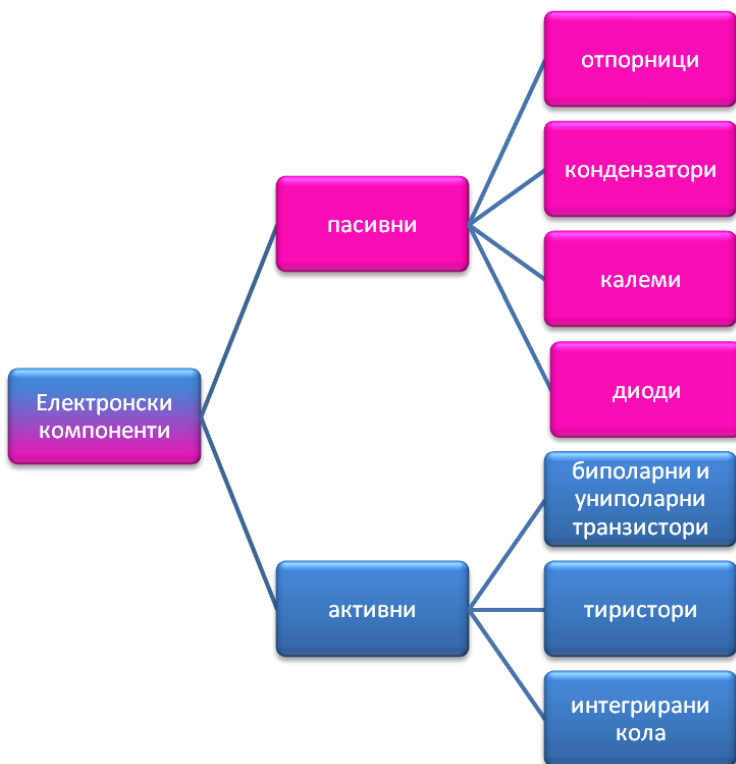
б) Како дел од електротехниката, **електрониката** се занимава со анализа, развој и производство на електронски елементи, компоненти, уреди и системи.

в) **Електроника**, како поим, се користи да означи дел од уред, произведен од електронски компоненти.

Електронска компонента е неделив градбен 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**. Електронските компоненти можат да бидат активни или 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, тиристоры, FET-ови, MOSFET-и, операциски засилувачи, микропроцесори и други интегрирани кола.

Пасивните компоненти ја извршуваат својата функција без напојување од еднонасочен извор. Пасивни компоненти се: отпорници, индуктивни калеми, кондензатори, диоди, варистори, NTC-термистори, PTC-термистори и VDR-отпорници и други.



Слика 1.1: Поделба на електронските компоненти



Способноста за слободно движење на слободните електрони во материјалот се вика спроводливост, а спротивставувањето на движењето се вика отпорност. Материјалите кои немаат забранета енергетска зона се нарекуваат **спроводници** ($E_g=0\text{eV}$), а оние со голема ширина на забранета зона, **изолатори** ($E_g>3,5\text{eV}^*$). Групата материјали, која по своите електрични својства се наоѓа меѓу спроводниците и изолаторите се **полупроводници** ($E_g<3,5\text{eV}$).

Електронските компоненти кои се изградени од полупроводнички материјали претставуваат основа на современата електрониката. Имаат најмалку два приклучока или изводи (англ. pin) преку кои се поврзуваат во електронско коло.

Современата технологија овозможува користење на мноштво електронски компоненти, почнувајќи од дискретните (поединечни) до интегрираните. Познавањето на најосновните технички карактеристики и на основните практични податоци е од голема важност за успешноста на интервенциите при откривање на неисправности (дефекти).

Бројот на електронските елементи е многу голем. За нивно поедноставно користење изработени се каталози во кои електронските елементи се категоризирани по ознака, материјал од кој се изработени, нивната функција и примена. Дополнителна информација која може да се добие од каталогот е и соодветната замена на електронскиот елемент. Постојат каталози во печатена форма и во електронска форма. Во поново време сè повеќе се користат каталозите во електронска форма, во кои може да се најдат многу повеќе параметри за електронските елементи, како и поради можноста за нивно поедноставно дополнување со нови податоци.

Читањето електрични шеми има важна улога во разбирањето на функциите на електронските склопови. Електричните шеми се составени од графички симболи на дискретни електронски елементи или на електронски склопови, прикажани како една целина. Во процесот на читањето се распознаваат основните функции на елементите и склоповите и нивното поврзување во комплетна функција на уредот.

За правилно читање и разбирање на електричните шеми потребно е познавање на електротехничките симболи на елементи и на сигнали, како и на одредени правила за нивното поврзување.

Симболите можат да се поделат на неколку групи на сродни елементи за полесно распознавање, како што се:

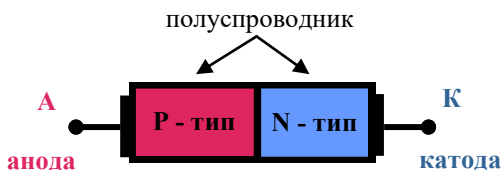
- пасивни и активни електронски компоненти;
- електроакустички и електромагнетни системи;
- инструменти;
- мотори и генератори и други.

Во понатамошниот текст се дадени најмногу употребуваните симболи на електронските елементи.

^{*)} $1\text{eV}=1,6\times 10^{-9}\text{J}$

1.1 Диоди

Диодата претставува полупроводничка електронска компонента која содржи еден PN спој (спој на полупроводник од P-тип и полупроводник од N-тип), кој преку метални контакти е поврзан со два извода, **анода (А)** и **катода (К)** (слика 1.2).



Слика 1.2: Шематски приказ на полупроводничка диода со PN спој

Денес се среќаваме со повеќе видови диоди, зависно од материјалите од кои се изработени и од нивната намена.

Според намената разликуваме: насочувачки, ограничувачки, прекинувачки, зерен, фотодиоди, LED диоди, кондензаторни и други диоди.

Во табела 1.1 даден е дел од каталог за диоди, кој е составен од четири колони во кои, во првата и втората колона се дадени ознаката и кодот на диодата, во третата колона е даден материјалот од кој е изработена а во последната колона се наоѓа описот и примената на диодата.

Табела 1.1: Дел од каталог за видови диоди

Ознака	Код	Матријал	Краток опис на елементот
AA	119	Ge	диода демудулатор, високо омска 30V, 35mA
AA	133	Ge	диода универзална, 130V, 50mA
BA	159	Si	диода прекинувач, 1000V/1A, 300ns

1.1.1 Насочувачки диоди

Основна карактеристика на диодата е да ја пропушта електричната струја само во една насока од анодата кон катодата. Во спротивна насока низ диодата тече инверзна струја многукратно помала од струјата во проводна насока.

На слика 1.3 е прикажан графичкиот симбол на насочувачка диода со ознака на приклучоците, **А-анода** и **К-катода**, додека на слика 1.4, е прикажан реален изглед на повеќе видови насочувачки диоди.



Слика 1.3: Графички симбол на диода



Слика 1.4: Реален изглед на насочувачки диоди

Насочувачкото својство на диодата се користи во *уреди кои претвораат наизменична во еднонасочна енергија*. Тие уреди се нарекуваат *насочувачи*.

Во табела 1.2 се прикажани каталожки вредности на струја и напон при директна и инверзна поларизација како и максимално дозволени вредности за неколку различни насочувачки диоди.

Табела 1.2: Каталожки вредности за насочувачки диоди

ознака	I_{dmax} -при директна поларизација (A)	директен напон (V)	I_{inv} -при инверзна поларизација (mA)	инверзен напон (V)	макс. дозволен инверзен напон U_{inmax} (V)	макс. 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

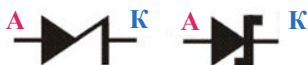


Истражувајќи на интернет, одреди ги каталожките вредности за диодите прикажани на слика 1.4 (1N4007, SKN 20/12, 1N5408 и BY329X)!

1.1.2 Зенер диоди

Зенер диодата има мала промена на напонот на нејзините краеве при големи промени на струјата при инверзна поларизација. Ова незино својство *се применува во електронски кола за стабилизација на еднонасочен напон*. Зенер диодите се изработуваат за напони на стабилизација од 3V до 75V, но можни се и напони надвор од овој опсег (до 200V).

Графичкиот симбол и реалниот изглед на Зенер диодата се прикажани на слика 1.5 и слика 1.6, соодветно.



Слика 1.5: Графички симбол на Зенер диода



Слика 1.6: Реален изглед на Зенер диода (BZX85C6V8)

Каталожки вредности за неколку различни Зенер диоди се прикажани во табела 1.3.

Табела 1.3: Каталожки вредности за неколку различни Зенер диоди (при максимална дозволена температура од 150°C):

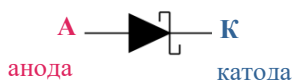
Ознака	Зенеров напон U_z (V)	$R_z = \Delta U_z / \Delta I_z$ (Ω)	при дадена I_z (mA)	I_d -при директна поларизација (mA)	при директен напон (V)	Мак. дозволена моќност на дисипација P_{dmax} (mW)	Макс. дозволена струја I_{zmax} (mA)
BZ1	0,6-0,75	5	5	100	<1	250	100
BZ2	2-3	70	5	100	<1	250	50
BZ3	3-4	75	5	100	<1	250	50
BZ4	4-5	65	5	100	<1	250	100
ZE4,7	4,1-5,2	65	5	100	<1	250	/
ZE5,6	5-6,3	35	5	100	<1	250	/
ZE6,8	6,1-7,5	4	5	100	<1	250	/
ZF1,4	1,3-1,5	20	1,4	/	/	400	130
ZF2,1	1,9-2,3	30	2,1	/	/	400	80
ZR2,7	2,5-2,9	70	5	100	<1	250	/

При проектирање на *стабилизатори со Зенер диода*, за добивање на потребната вредност на напонот, потребно е да се знаат максималните дозволени вредности на струјата низ диодата и моќноста на дисипација. Овие податоци се добиваат од каталог за применетата Зенер диода.

Диодите со лавински ефект имаат карактеристики слични на Зенер диодите. Тие се применуваат во фотодетекторите.

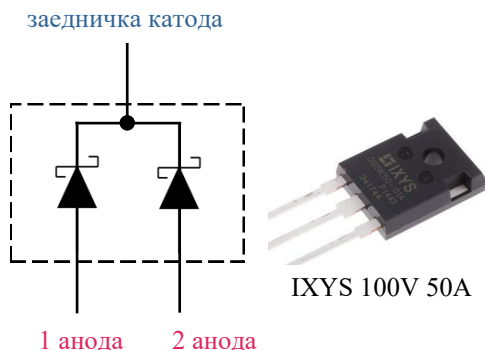
1.1.3 Импулсни диоди

Карактеристично за логичките операции во дигиталните кола е работа со импулси каде што имаме брза промена од логички ниско на логички високо ниво и мали вредности на струјата. 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. Насочувачката 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. Бараните карактеристики ги имаат диодите познати како **Шотки диоди** (слика 1.7).



Слика 1.7: Графички симбол на Шотки диода

Шоткиевите диоди се добиваат со нанесување на полупроводник од N-тип (катода) директно на метал (анода), односно, не претставуваат PN-спој. Со тоа се избегнува постоење на инверзна струја, отпорот во спроводна состојба станува многу мал додека брзината на насочување се зголемува. Прагот на спроведување на овие диоди е два пати понизок од прагот на спроведување на силициумските диоди и изнесува 0,3-0,4V. Тие може да бидат изведени и како две диоди во едно куќиште со заедничка катода или анода (слика 1.8).



Слика 1.8: Изведба и реален изглед на двојна Шотки диода

Се користаат како брзи прекинувачи во дигиталните системи и во микробрановата техника на фреквенции поголеми од 15GHz. Исто така се применуваат како насочувачи во импулсните системи за напојување (SMPS-Switch Mode Power Supply).

Табела 1.4: Каталогски вредности за неколку различни импулсни диоди

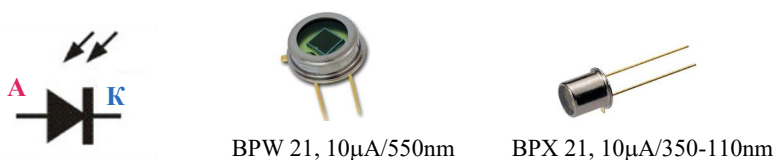
Ознака	I_{dmax} – струја при директна поларизација (A)	Директен напон (V)	I_{inv} – струја при инверзна поларизација (mA)	Инверзен напон (V)	Max. дозволен инверзен напон U_{imax} (V)
AAU13	30	0,4	15	20	25
AAU15	200	0,6	2,5	10	30
AAZ17	40	0,5	1,5	1,5	50
AAZ18	90	0,5	0,6	1,5	30

1.1.4 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 на јачината на светлината која и ја менува нејзината спроводливост. Струјата која тече во диодата кога не е осветлена се нарекува струја на црно. Една од најпознатите примени е како соларната ќелија во која се акумулира енергија добиена од светлината. Фотодиодите најмногу се среќаваат и во алармните системи. Се применуваат и во уреди за детекција на букви, видливи и невидливи објекти, во енкодери и оптички комуникации.

Како материјал за изработка на фотодиодите најчесто се користи силициум или галиум арсенид (GaAs), индиум антимонид (InSb), индиум арсенид (InAs), оловен селенид (PbSe) и оловен сулфид (PbS).

Графички симбол и реален изглед на фотодиода се дадени на слика 1.9.

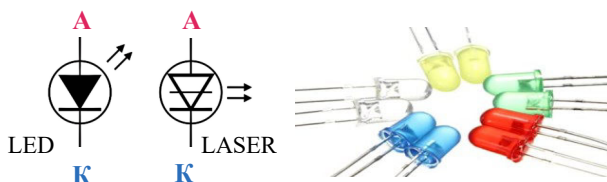


Слика 1.9: Графички симбол и реален изглед на фотодиода

1.1.5 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. За тоа е потребен надворешен извор за напојување. Во процесот на создавање на светлината, наречен електро-луминисценција, LED диодата е проводно поларизирана. Бојата на зрачење на LED диодите зависи од материјалот на изработка, таа може да биде црвена, зелена, жолта, сина и др.

Ласер диода е диода која емитура светлина со стимулиран процес (**LASER-Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**). Графичките симболи на светлечки диоди и реален изглед на LED диоди се дадени на слика 1.10.

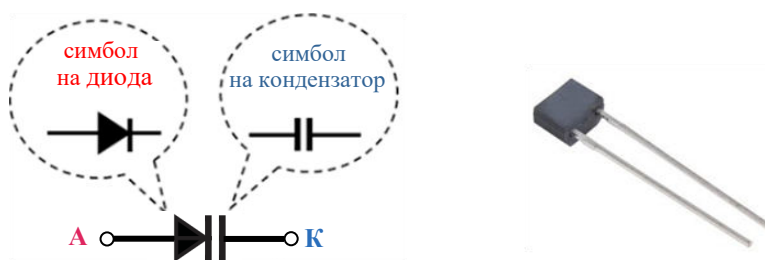


Слика 1.10: Графички симболи на светлечки диоди

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. LED диода со ултра светла бела боја со напон од 3V и моќност од околу 1W има примена во светлечки тела. Светлечки тела со поголема моќност (12W, 24W итн.) се добиваат со сериска врска на поголем број вакви диоди.

1.1.6 Капацитивни (варикап) диоди

Оваа диода се однесува како променлив кондензатор, при што промената на капацитивноста се добива со промена на напонот на нејзините краеве. Капацитивноста се постигнува со постоење на празен регион на PN-спојот кој дејствува како диелектрик. Најчесто се применува во радио и ТВ-приемниците. На слика 1.11 е прикажан нејзин изглед и графички симбол.



Слика 1.11: Графички симбол и реален изглед на капацитивна диода

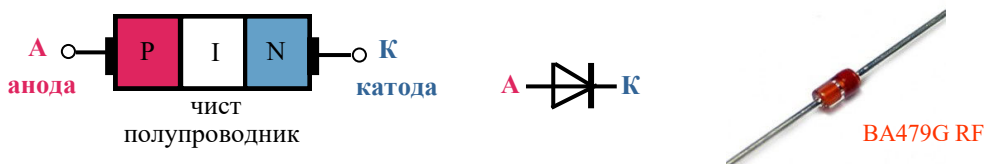
Табела 1.5: Каталогски вредности за неколку различни капацитивни диоди

Тип	C_{MIN} [pF]	C_{MAX} [pF]	U_{MAX} [V]	I [mA]	Примена
MV104	2	42	32	0.2	FM
KV1310	2	42	30	0.2	FM
MV2105	2	16	30	0.2	FM / TV
MV209	5	32	30	0.2	VHF

1.1.7 PIN диоди

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

Во поново време, I-подрачјето се заменува со полупроводник од N-тип со многу помало ниво на примеси, со што се постигнува дејство како ултра брзи диоди (многу поголема брзина на премин од спроводна во неспроводна состојба и обратно).



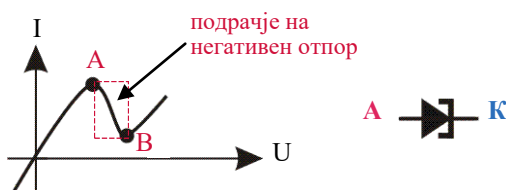
Слика 1.12: Структура, графичкиот симбол и реален изглед на PIN диода

Табела 1.6: Каталожки вредности за неколку различни PIN диоди

Тип	U_{MIN} [V] (инверзен)	C_{MAX} [pF]	R_{MAX} [Ω]	ширина на I-подрачјето [μm]
MA4P202-120	100	0,25	2,50	12
MA4P303-32	200	0,35	1,50	20
MA4P404-30	250	0,40	0,60	30

1.1.8 Тунел диоди

Тунел диодата претставува диода со ефект на тунел, кој се постигнува со поголема концентрација на примеси, со тоа се зголемува моќноста на носителите на полнежот и тие ја пробиваат бариерата (постапка слична на пробивање тунели). На слика 1.13 се дадени струјно-напонската карактеристика на тунел диодата и нејзиниот електричен симбол. Кај оваа диода, од интерес е подрачјето од карактеристиката помеѓу точките A и B кое се нарекува „**подрачје на негативен отпор**” бидејќи со зголемување на напонот на краевите на диодата се намалува струјата низ неа.

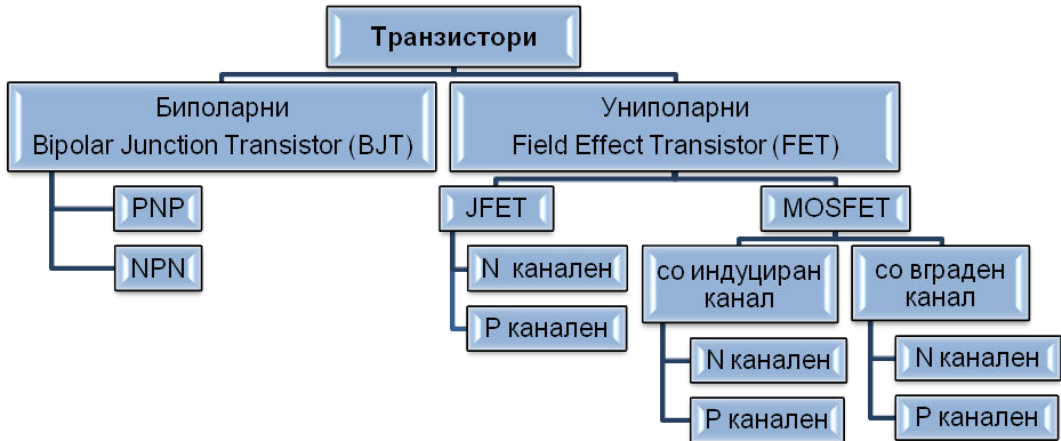


Слика 1.13: Струјно-напонската карактеристика и електричен симбол на тунел диодата

Ова подрачје овозможува употреба на тунел диодите во прекинувачките и засилувачките кола, а најчесто во *осцилаторите*. Тунел диодата е диода со голема брзина и има примена во *осцилатори во областа на микробранови и за релаксациони осцилатори*.

1.2 Транзистори

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. Транзисторите можат да се поделат на две основни групи: **биполарни** и **униполарни** или транзистори со ефект на поле (**FET** – **F**ield **E**ffect **T**ransistor) (слика 1.14). Двете групи се со слична конструкција со примена на PN-споеви, но со различен принцип на работа.



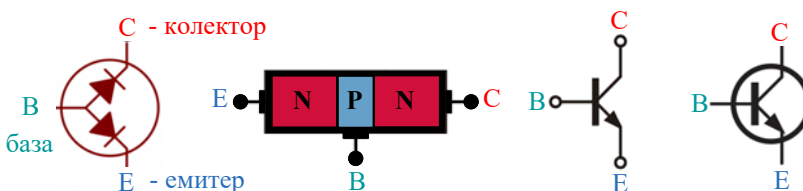
Слика 1.14: Видови транзистори

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

1.2.1 Биполарни транзистори

Биполарните транзистори претставуваат полупроводнички компоненти со два PN-споја и три електроди (приклучоци): **емитер (E)**, **база (B)** и **колектор (C)**. Струјата на транзисторот, која тече од колекторот до емитерот, низ двата PN-споја, се формира од двата вида носители на електричниот полнеж: негативно поларизирани електрони и позитивно поларизирани празнини. Постојат два вида биполарни транзистори: NPN-транзистор и PNP-транзистор.

NPN-транзисторот претставува „сендвич“ од два PN-споја со заеднички P-подрачја. Неговата структура и графички симбол се дадени на слика 1.15.

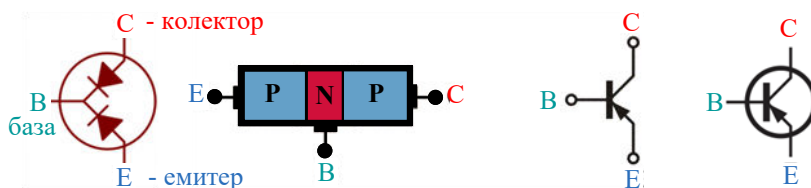


Слика 1.15: Структура и графички симбол на NPN-транзистор

Средниот регион на транзисторот се означува како **база (B)** и во конструкцијата на транзисторот има многу помала ширина од другите два региона.

Едниот крај на N-подрачјето е означен како **емитер (E)**, тоа е подрачје од кое се емитираат електрони, кои патуваат преку базата (B) и се собираат на спротивниот крај на транзисторот, означен како **колектор (C)** под услов на поларизација на транзисторот која ќе биде објаснета во понатамошниот текст.

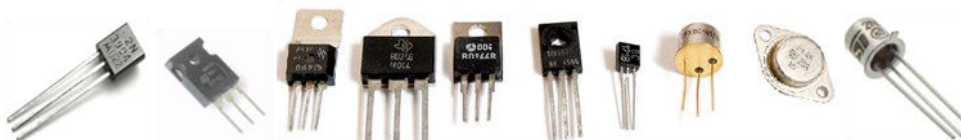
PNP-транзисторот претставува „сендвич“ од два PN-споја, со заедничко N-подрачје. Неговата структура и графички симбол се дадени на слика 1.16.



Слика 1.16: Структура и графички симбол на PNP-транзистор

Целата негова конструкција е иста со конструкцијата на NPN-транзисторот, со таа разлика што P и N-полупроводниците ги менуваат местата, односно, емитерот и колекторот се од P-тип, додека базата е од N-тип.

На слика 1.17 е прикажан реален изглед на различни видови транзистори.



Слика 1.17: Видови биполарни транзистори

Транзисторите се применуваат во сите гранки на електрониката и електротехниката – при изработка на засилувачи, осцилатори, предавателни уреди и склопови за регулација, како и прекинувачки и засилувачки елементи.

Во табела 1.7 се дадени каталожки податоци за видови транзистори и материјали за изработка според дадени ознаки.

Табела 1.7: Дел од каталог за видови транзистори

Ознака	Код	Тип	Материјал	Краток опис на елементот
AC	187k	NPN	Ge	NF транзистор 25V/1A, 1W
AF	239S	PNP	Ge	UHF транзистор 20V/10mA, 780MHz
AL	102	PNP	Ge	Транзистор на моќност 130V/6A, 30W (TG=55°C)
BD	139	NPN	Si	Транзистор на моќност 100V/1,5A, 12,5W, 250MHz

Во табела 1.8 се дадени каталожки податоци за вредности на параметри на транзистори, примена и можна замена според дадена ознака.

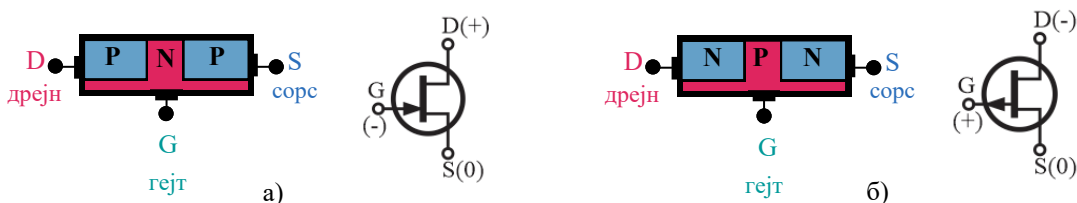
Табела 1.8: Дел од каталог за транзистори

Ознака	за I_C (mA)	за U_{CE} (V)	β	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
BC875	7	10	2000	Нискофреквентен аудиозасилувач	BC876
BF421	25	20	>40	Излезен видеозасилувач во ТВ-приемници	/

1.2.2 Униполарни транзистори

Како што е прикажано на слика 1.14, постојат два вида униполарни или FET (Field Effect Transistor) транзистори: **спојни FET (JFET)** и **MOSFET**.

Транзисторите со ефект на поле или FET, имаат слични карактеристики со биполарните транзистори. Имаат три приклучоци соодветно на приклучоците на биполарните транзистори (слика 1.18). Тоа се приклучоците **дрејн D**, **гејт G** и **сорс S**, соодветни на колектор, база и емитер.

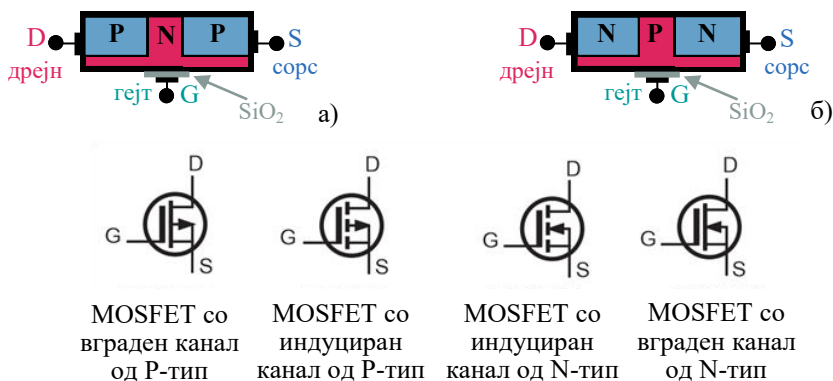


Слика 1.18: Физичка структура на а) N-канален и б) P-канален JFET и нивни графички симболи

Во зависност од видот на полупроводникот на плочката, на која е нанесен полупроводник од спротивен тип, разликуваме **N-канален FET** со N-тип полупроводник на плочката (слика 1.18 а) и **P-канален FET**, со P-тип полупроводник на плочката (слика 1.18 б).

Спојните транзистори со ефект на поле имаат неколку особини што ги прават посупериорни од биполарните транзистори во некои примени. Тоа се: поголемата влезна отпорност, помали сопствени шумови, помали димензии и поголемо напонско засилување, како излезни степени.

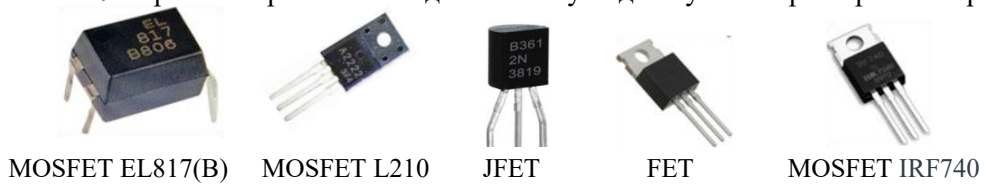
Кај MOSFET-от се подобрени одредени карактеристики на JFET. Називот MOSFET претставува кратенка од **Metal Oxide Semiconductor FET**, а може да има и ознака IGFET (Insulated Gate FET) што значи FET со изолиран гејт. Неговата конструкција е слична како кај JFET-от со таа разлика што под плочката гејт е поставен слој од силициум диоксид (стакло), кој се однесува како изолатор и електрично го одделува гејтот од подлогата (слика 1.19). Постојат два вида MOSFET транзистори: MOSFET со индуциран канал (канал кој се создава при поларизација) и MOSFET со вграден канал (вграден канал при процесот на производство).



Слика 1.19: Структура на N-канален а) и P-канален MOSFET б) и нивни графички симболи

Кај униполарните транзистори, во формирањето на струјата учествуваат само носители на еден поларитет, електрони или празнини.

На слика 1.20 е прикажан реален изглед на неколку видови униполарни транзистори.



Слика 1.20: Изглед на видови униполарни транзистори



Резиме - видови диоди и транзистори

- **Насочувачка диода:** пропушта електрична струја само во една насока, од анодата кон катодата. Составен дел е на насочувачите.
- **Зенер диода:** мала промена на напон при големи промени на струјата при инверзна поларизација. Се користи за стабилизација на напон.
- **Фото диода:** ја претвора светлосната енергија во електричен сигнал.
- **LED диода:** ја претвора електричната струја која тече низ неа во светлосна енергија.
- **Капацитивна диода:** го менува својот капацитет во зависност од големината на инверзниот напон приклучен на нејзините краеве.
- **PIN диода:** ја менува отпорноста со промена на струјата низ неа. Се применува како прекинувачки елемент.
- **Тунел диода:** во карактеристиката има подрачје на негативен отпор - со зголемување на напонот на краевите на диодата се намалува струјата низ неа. Се применуваат кај осцилаторите.
- Според режимот на работа, транзисторите од двете групи можат да се поделат на засилувачи и на прекинувачи.
- Биполарниот транзисторот има два PN-споја и три електроди: емитер (E), база (B) и колектор (C).
- Постојат два вида униполарни транзистори: спојни FET-ови (JFET) и MOSFET-и (Metal – Oxide – Semiconductor FET).
- Приклучоците на униполарниот транзистор се означуваат со G (гејт), D (дрејн) и S (сорс).
- Транзисторите се применуваат при изработка на засилувачи, осцилатори, предавателни уреди и склопови за регулација.



Истражувајќи на интернет, креирај табели со видови диоди и транзистори и нивна примена!

1.3 Означување на диодите и транзисторите

Диодите можат да бидат означени на самото тело со сребрен прстен на страната на катодата, со точка на страната на анодата (кај постарите германиумски диоди), со симбол од кој се одредуваат анодата и катодата (кај диоди со голема моќност – диоди со поголеми димензии).

Покрај ознаките за изводите на диодата, има и ознаки за типот на диодата. Овие ознаки се алфа-нумерички (со броеви и букви), многу поретко со бои, при што постојат европски, американски, руски и јапонски начин на обележување. Според европскиот стандард за обележување, диодите за комерцијална употреба се обележуваат со 2 букви и 3 бројки, а диодите за професионална употреба со 3 букви и 2-3 бројки.

Првата буква го означува материјалот од кој е изработена диодата (табела 1.9):

Табела 1.9: Ознака на првата буква кај диодите

Прва буква од знаката	Материјал од кој е изработена диодата
A	германиум
B	силициум
C	галиум арсенид
D	индиум антимионид

Втората ја означува примената на диодата, односно нејзината функција (табела 1.10):

Табела 1.10: Ознака на втората буква кај диодите

Втора буква од знаката	Примената на диодата
A	диода за општа намена, со мала моќност
B	капацитивна – варицап диода
E	тунел диода
Q	светлечка (LED) диода
P	фотодиода
T	насочувачка
X	варактор - варицап
Y	диода за голема моќност
Z	Зенер диода

Третата буква ја имаат само диодите за професионална (индустриска) примена, со што поблиску се означува нивната примена.

Бројот што следува по буквите е каталожки реден број, кој служи за меѓусебно разликување на разни типови диоди. Кај Зенер диодите бројот го означува зенеровиот напон. Во Велика Британија за Зенер диодите по првите три букви следува двоцифрен број кој ја означува серијата, потоа буква која ја означува толеранцијата на зенеровиот напон ($A=\pm 1\%$, $B=\pm 2\%$, $C=\pm 5\%$, $D=\pm 10\%$), и на крај бројот кој скратено ја дава вредноста на зенеровиот напон.

Примери на означување диоди:

1. AA113 – германиумска диода, се применува во детектори на радиоприемници;
2. BB104 – две силициумски варикап диоди во едно куќиште;
3. BA124 - силициумска варикап диода, се применува како променлив кондензатор во радио и ТВ-приемници, осцилатори;
4. BA157 - силициумска насочувачка диода;
5. BAУ80 – силициумска прекинувачка диода, се применува во уреди со логички кола;
6. BZY9,1 – силициумска Зенер диода со зенеров напон од 9,1 V;
BZY88C4V7 – силициумска Зенер диода од серијата 88 со точност од $\pm 5\%$ и зенеров напон од 4,7 V.

Транзисторите се означуваат при самото производство со нивната комерцијална ознака. Таа ознака истовремено дава најосновни технички податоци за транзисторот. Американскиот стандард за означување обично почнува со 2N (на пр., 2N3055) и тешко е да се разликува дали станува збор за нискофреквентен или високофреквентен транзистор, како и транзистор за големи моќности или за мали. Според европскиот стандард, транзисторите се означуваат со две-три букви и три бројки. Исто како и кај диодите, првата буква го означува материјалот од кој е изработен транзисторот (A – од германиум и B – од силициум). Втората буква дава поблиски податоци за примената на транзисторот, односно дава информација дали транзисторот е предвиден за засилување при ниски фреквенции (C) или при високи фреквенции (F). Ако втората буква е D транзисторот е нискофреквентен засилувач на моќност (излезен транзистор – на пр., BD675 е нискофреквентен силициумски транзистор за големи моќности од 40W). Буквата U на второто место дава податок дека транзисторот е за големи напони (на пр., BU208 со $U_{CEO}=700V$, $U_{CES}=1500V$). Ако, пак, втората буква е S, станува збор за прекинувачки транзистор (на пр., BSY54), P за фототранзистори. Трета буква не постои секогаш. Буквата R на третото место означува транзистор за високи фреквенции (на пр., 5GHz), додека буквата Q – микробранови транзистори. Броевите што следуваат по буквите даваат податок за конкретен тип на транзистор и негови карактеристики.

Во следната табела се дадени примери за европски ознаки за различни видови транзистори.

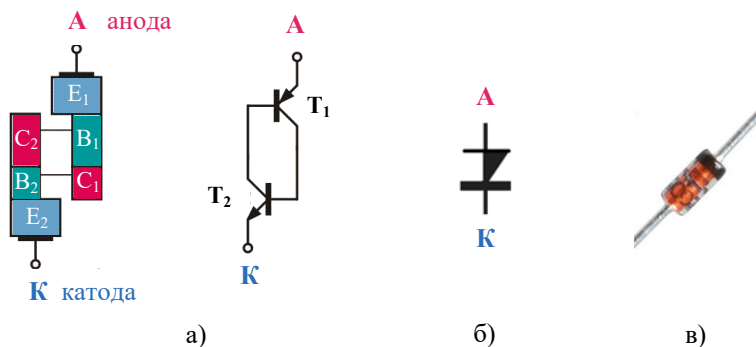
Табела 1.11: Ознаки на транзисторот

Ознака на транзисторот	Тип на транзисторот
AC	германиумски нискофреквентен транзистор за мали моќности
ACУ	германиумски нискофреквентен транзистор за мали моќности, професионална изведба
AD	германиумски нискофреквентен транзистор на моќност
AF	германиумски високофреквентен транзистор за мали моќности
BC	силициумски нискофреквентен транзистор за мали моќности
BD	силициумски нискофреквентен транзистор на моќност
BF	силициумски високофреквентен транзистор за мали моќности
BSY	силициумски прекинувачки транзистор

1.4 Тиристоры

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 изводи. Меѓусебно, тиристорите се разликуваат според бројот на изводите, насоката на спроведувањето и формата на статичките карактеристики.

Елементот со структура како на слика 1.21 а) претставува еднонасочен диоден тиристор, наречен **динистор** или Шоклиева диода. Неговите изводи се означени со **A** - **анода** и **K** - **катода**. Графичкиот симбол и реалниот изглед на Шоклиевата диода се прикажани на слика 1.21 под б) и в), редоследно.

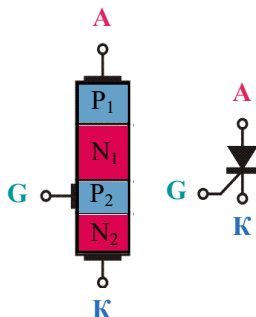


Слика 1.21: Динистор - Шоклиева диода

Со додавање на уште еден извод, приклучен на средниот P слој на структурата од слика 1.21, се добива еднонасочен триоден тиристор со три изводи, познат како **SCR** (**S**ilicon **C**ontrolled **R**ectifier) – контролиран силициумски насочувач или едноставно **тиристор**, како што најчесто се среќава во практиката.

Неговите приклучоци се означени како **A** - **анода**, **K** - **катода** и **G** - **гејт** или порта (слика 1.22). Анодата и катодата имаат иста улога како и кај динисторот, а гејтот има улога на управувачка електрода за вклучување на тиристорот.

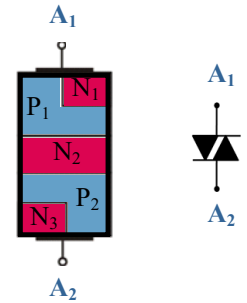
Тиристорите имаат голема примена во индустриската електроника и автоматика за контрола на моќноста на големи потрошувачи, а во секојдневниот живот за регулација на јачината на светлото на електричните светилки како и за регулација на брзината на електричните мотори во разни апарати во домаќинствата.



Слика 1.22: Структура и графички симбол на тиристор

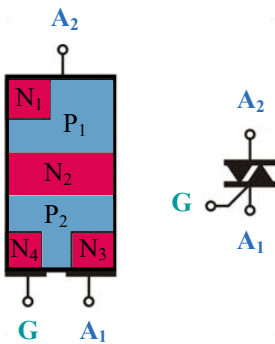
1.4.1 Дијак

Со паралелно врзување на два динистора, поставени во спротивни насоки, се добива диоден двонасочен тиристор, наречен **дијак** (**Diode Alternating Current switch**). Структурата и графичкиот симбол на дијакот се дадени на слика 1.23. Направен на една силициумска плочка, дијакот претставува елемент со петослојна NPNPN-структура со два извода **анода 1** (A_1) и **анода 2** (A_2). Низ дијакот тече струја во двете насоки меѓу анодите A_1 и A_2 . Има примена во кола за вклучување на тиристори и триаџи формирајќи тригер импулси.



Слика 1.23: Структура и графички симбол на дијак

1.4.2 Тријак



Слика 1.24: Структура и симбол на тријак

Со врзување два тиристора во паралела, свртени спротивно, слично на врзување на два динистора, се добива триоден двонасочен тиристор, познат како **тријак** (**Triode Alternating Current switch**), кој спроведува во двете насоки. Неговата структура и шематскиот приказ се дадени на слика 1.24. Тријакот спроведува во двете насоки а неговите изводи се означуваат како **анода 1** (A_1), **анода 2** (A_2) и управувачка електрода **гејт** (G). Струјата која протекува низ тријакот тече меѓу двете аноди (A_1 - A_2), додека управувачка електрода-гејтот служи за негово вклучување.

На слика 1.25 се прикажани различни изгледи на тиристори.



Слика 1.25: Реален изглед на видови тиристори

Во табела 1.12 се дадени каталожки податоци за модели на тријак кои се користат за регулирање на брзината на моторот во машини за перење алишта, вакуум чистачите и други уреди во домаќинството.

Табела 1.12: Дел од каталожки податоци за параметрите на видови тријак

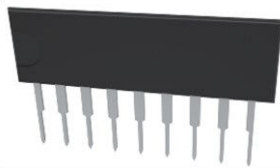
Ознака/модел	V_{DRMS} [V]	I_{TRMS} [A]	I_{TSM} [A]	I_{GT} (max.) [mA]
BCR3LM-12LB	600	3	30	20
BCR5LM-12LB	600	5	50	20
BCR10LM-12LB	600	10	100	30
BCR3LM-14LB	700	3	30	30
BCR16LM-14LB	700	16	160	30

1.5 Интегрирани 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. Интегрираното коло се јавува под назив: микроколо, микрочип, силициумски чип или само чип. Постојат два вида на интегрирани кола: **хибридни** и **монолитни**. Хибридните се изработуваат со микроелектронски активни и пасивни елементи, прицврстени на заедничка подлога, додека монолитните, се изработуваат на една кристална плочка, со што е постигната голема густина на пакување на составните делови.

На слика 1.26 се прикажани видови интегрирани кола според начинот на пакување.

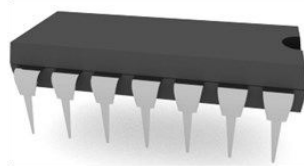
SIP (Single Inline Package)



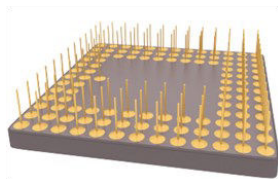
ZIP (Zig-zag Inline Package)



DIP (Dual In-line Package)



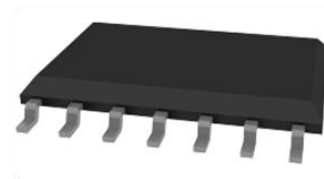
PGA (Pin Grid Arrays)



SVP (Surface Vertical-Mount)



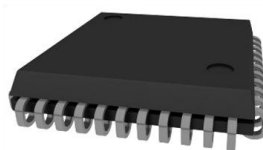
SOP (Small-Outline Package)



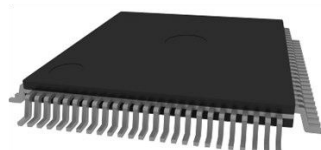
TSOP (Thin-Small-Outline Package)



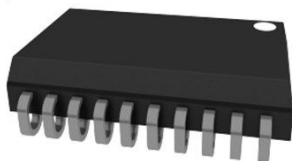
LCC (Leadless Chip Carrier)



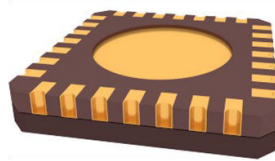
QFP (Quad Flat Packages)



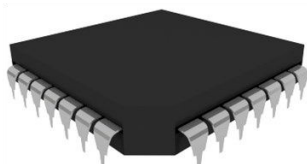
SOJ (Small Outline J-leader Package)



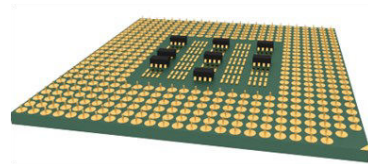
QFJ (Quad Flat J-leader Packages)



LCC SOJ (Leadless Chip Carrier, Small Outline J-leader Package)



BGA (Ball Grid Arrays)



Слика 1.26: Реален изглед на видови интегрирани кола

Провери го своето знаење!



I Прашања со заокружување (заокружи ги точните одговори)

1. Кој електронски елементи содржат еден PN-спој и два извода?
 - а) Транзистор
 - б) Диода
 - в) Тиристор.
2. Како се означуваат изводите на биполарните транзистори?
 - а) А-анода и К-катода
 - б) G-гејт, D-дрејн и S-сорс
 - в) Е-емитер, В-база и С-колектор.
3. Како се означуваат изводите на тиристорот?
 - а) А-анода, К-катода и G-гејт
 - б) G-гејт, D-дрејн и S-сорс
 - в) Е-емитер, В-база и С-колектор.
4. Кој електронски елемент се користи за регулација на моќни еднонасочни мотори во електронската индустрија?
 - а) Диода
 - б) Тиристор
 - в) Транзистор.
5. Тиристор, кој нема гејт, е:
 - а) еднонасочен тиристор
 - б) дијак
 - в) тријак.

II Прашања со поврзување

6. Поврзи ги електричните симболи со соодветните диоди:



а)



б)



в)



г)



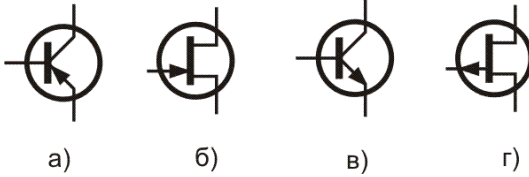
д)

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

7. Поврзи ја диодата со нејзината примена:

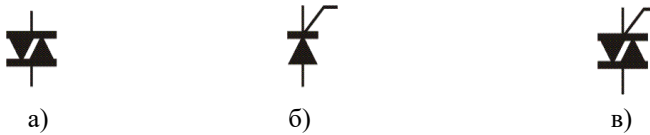
- | | |
|----------------------------|----------------------|
| 1. Осцилатори | а) Зенер диода _____ |
| 2. Модулатори | б) варикап _____ |
| 3. Стабилизатори на напони | в) тунел диода _____ |
| 4. Радио и ТВ-приемници | г) PIN диода _____ . |

8. Поврзи ги електричните симболи со видовите транзистори:



- | | |
|-------------------|-------|
| 1. NPN-транзистор | _____ |
| 2. PNP-транзистор | _____ |
| 3. N-канален FET | _____ |
| 4. P-канален FET | _____ |

9. Поврзи ги електричните симболи со видовите транзистори:



- | | |
|-------------|-------|
| 1. Тиристор | _____ |
| 2. Дијак | _____ |
| 3. Тријак | _____ |

III Прашања со дополнување

10. Приклучокот на диодата од страната на полупроводникот од P-тип се нарекува _____ (анода/ катода) и се означува со буквата _____ (A/K), додека од страната на полупроводникот од N-тип се нарекува _____ (анода/ катода) и се означува со буквата _____ (A/K).

11. 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 _____ .

12. Дијакот има _____ (два/ три/ четири) PN-споја.

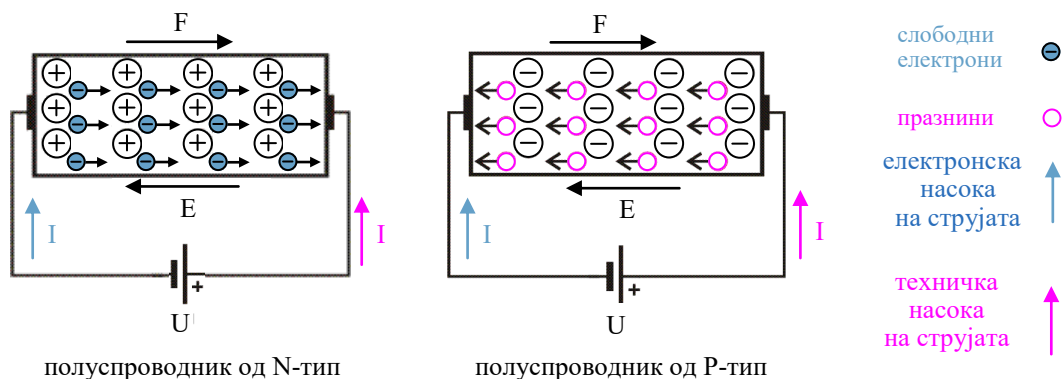
13. Двонасочен триоден тиристор кој спроведува во двете насоки се нарекува _____ .

14. Повеќе електронски елементи, меѓусебно поврзани и сместени во заедничко кукиште, кои извршуваат одредена функција, се нарекуваат _____ .



Слободните електрони и празнините во полупроводник на температура повисока од апсолутната нула ($-273^{\circ}\text{C}=0\text{K}$) се во постојано хаотично движење, како резултат на прекин на валентните врски. Без какво и да е надворешно влијание, движењето на носителите на полнеж нема никаква одредена насока.

Ако приклучиме полупроводник на еднонасочен извор на напојување U , како на слика 1.27, во него ќе се создаде електрично поле 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 I од негативниот кон позитивниот пол на изворот преку полупроводникот која се нарекува електронска насока на струјата. Сепак, усвоено е да се употребува техничка насока на струјата која е спротивна со насоката на движењето на електроните.



Слика 1.27: Поларизација на полупроводник од N и P-тип

PN-спој се добива кога двата типа полупроводници, од N и од P-тип, меѓусебно се комбинираат во еден кристал. 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 (тривалентни атоми) во подлога од N-тип или обратно, донори (петовалентни атоми) во подлога од P-тип. Поради повисоката концентрација, новите примеси 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.

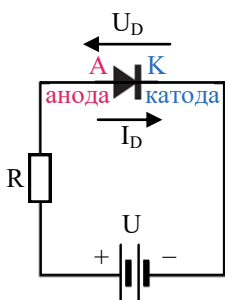
Во почетниот момент на допир, поради различна концентрација на слободни носители, доаѓа до нивно дифузионо движење, како и процес на рекомбинација (пополнување на празнините со електрони) во непосредна близина на спојот. На тој начин на самата гранична површина се формира т.н. потенцијална бариера која го спречува понатамошното движење на слободните електрони од N кон P-подрачјето и празнините од P кон N-подрачјето.

1.7 Поларизација на диодата

Прв и основен претставник меѓу електронските елементи базиран врз PN-спојот е полупроводничката диода. Ако се стават метални приклучни места на краевите на кристалот на PN-спој и на тие места се приклучи извор на еднонасочен напон, ќе настапат различни промени, во зависност од тоа како е приклучен изворот.

Директно поларизирана диода

Ако се поврзе позитивниот пол на изворот со приклучокот на P-подрачјето (анодата на диодата), а негативниот пол на приклучокот на N-подрачјето (катодата на диодата), тогаш низ диодата ќе протече струја само во една насока, од анодата кон катодата. (слика 1.28). Отпорникот R во колото служи за ограничување на струјата низ диодата, за заштита од топлински пробив.

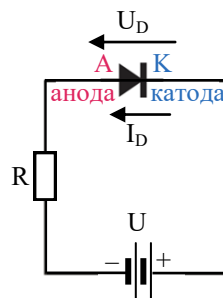


Слика 1.28: Директна поларизација на диодата

Со зголемување на вредноста на еднонасочниот напон U , почнувајќи од $0V$, вредноста на струјата низ диодата ќе има вредност $0A$ сè додека напонот не достигне некоја одредена вредност. Прагот на спроведување, U_p , претставува вредност на напонот на краевите на диодата во моментот кога струјата низ неа наеднаш ќе ја зголеми својата вредност. Тој изнесува околу $0,6V$ за Si диода, односно околу $0,2V$ за Ge диода. Кога струјата ќе протече низ диодата, напонот скоро и не се менува, тој претставува работен напон на диодата и изнесува околу $0,7 V$.

Инверзно поларизирана диода

Со промена на поларитетот на изворот U , диодата станува инверзно поларизирана, при што низ неа тече многу мала струја (од редот на $100\mu A$), со константна вредност, од катодата кон анодата (слика 1.29). Оваа струја се нарекува инверзна струја на заситување I_D . Со зголемување на инверзниот напон, на одредена вредност, струјата почнува нагло да се зголемува. Оваа појава се нарекува пробив, а напонот при кој доаѓа до пробив, пробивен напон U_{BR} (break).



Слика 1.29: Инверзна поларизација на диодата

Својството на диодата да пропушта струја само при директна поларизација, овозможува нејзина примена во уредите кои претвораат наизменична струја во еднонасочна - насочувачи.

Зенер диодите работат при инверзна поларизација, при напони поголеми од пробивниот напон U_{BR} на диодата и притоа не доаѓа до нејзино уништување. Во областа на пробив, напонот на краевите на Зенер диодата скоро и не се менува. Ова својство на Зенер диодата се применува во уредите наречени стабилизатори.

1.7.1 Статички карактеристики на диодата

Статичката карактеристика на диодата 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 приклучен на нејзините краеве, при одредена константна температура на околината.

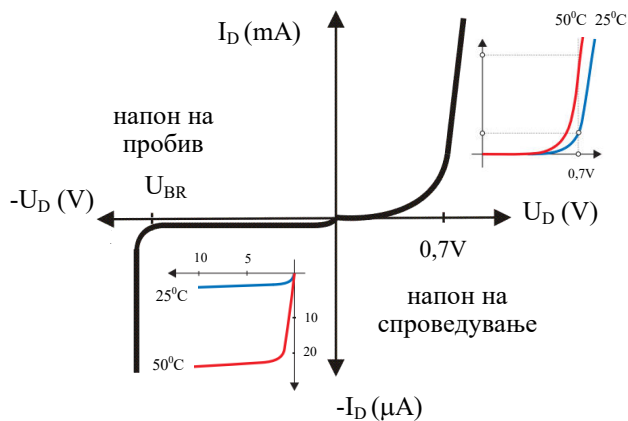
Статичката карактеристика на диодата математички се претставува со:

$$I_D = f(U_D) \quad \text{кога} \quad T = \text{const.}$$

во која со:

- I_D е претставена струјата низ диодата,
- U_D напонот на краевите на диодата и
- T температура на околината.

Статичката карактеристиката на директно поларизирана диода е прикажана во првиот квадрант на слика 1.30. Во третиот квадрант на карактеристиката, при инверзна поларизација на диодата, тече инверзна струја на заситување I_D со многу мала вредност, што е причина да биде прикажана на у-оската во μA . Оваа струја во сите практични анализи може да се занемари. Снимањето на карактеристиката детално е објаснето во вежбите.



Слика 1.30: Струјно-напонска карактеристика на диодата

1.7.2 Ограничување при работа на диодата

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 при големи инверзни напони, кој на електроните што се движат преку потенцијалната бариера им дава голема кинетичка енергија и забрзување. Електроните, по напуштање на бариерата се судираат со атомите на кристалната решетка при што 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 ја дава вредноста на инверзниот пробивен напон (U_{BR}) 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_{BR} , настанува истргнување на електроните од ковалентните врски поради големите сили што врз нив ги создава електричното поле во бариерата, при тоа се зголемува бројот на слободните електрони и инверзната струја нагло расте. Се намалува внатрешниот отпор на диодата до одредена вредност 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. Диоди кои работат во режим на електричен пробив се Зенер диоди.

Топлински пробив настапува кога се нарушува температурната рамнотежа на PN-спојот. Може да се јави и при директна и при инверзна поларизација на диодата. При големи јачини на струјата во внатрешниот отпор на диодата се создава топлина, која плочката на кристалот ја пренесува на околината. Термичкиот пробив, може да се каже, е недостаток на сите компоненти изработени од полупроводнички материјали. Од таа причина производителот дава податоци за параметрите кои во текот на работата не смее да се надминат:

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



Резиме-поларизација, статички карактеристики и ограничување на работата на диодата

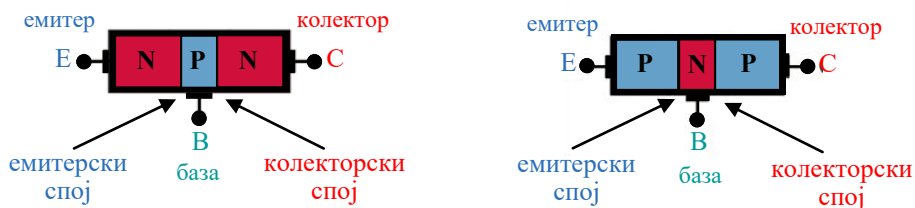
- Диодата е директно поларизирана ако се поврзе позитивниот пол на изворот со приклучокот на P-подрачјето (анодата на диодата), а негативниот пол на приклучокот на N-подрачјето (катодата на диодата).
- Диодата е инверзно поларизирана ако се поврзе позитивниот пол на изворот со нејзината катодата, а негативниот пол со анодата на диодата.
- При работа на диодата потребно е да се ограничат следните параметри: најголема дозволена струја во директна насока, максимален дозволен инверзен напон и максимална дозволена моќност на дисипација.
- Лавинскиот ефект се јавува при големи инверзни напони.
- Статичката карактеристика на диодата ја претставува зависноста на струјата на диодата од еднонасочниот напон приклучен на нејзините краеве, при одредена константна температура на околината.

1.8 Поларизација на биполарен транзистор



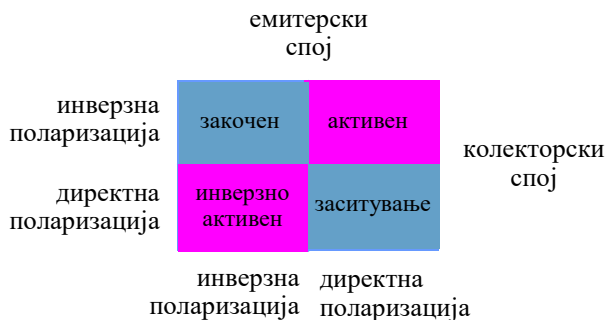
Електронската компонента биполарен транзистор претставува полупроводнички елемент кој, за разлика од диодата (која има еден PN-спој и две електроди, А-анода и К-катода) има два PN-споја и три електроди: Е-емитер, В-база и С-колектор.

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. Бидејќи базата се наоѓа во средина, помеѓу емитерот и колекторот, двата PN-споја се нарекуваат **емитерски спој** (помеѓу базата и емитерот) и **колекторски спој** (помеѓу базата и колекторот) (слика 1.31).



Слика 1.31: PN-споеви на транзисторот од NPN-тип и PNP-тип

Според начинот на поларизација на PN-споевите, транзисторот може да се најде во еден од следните режими на работа (слика 1.32, табела 1.13):

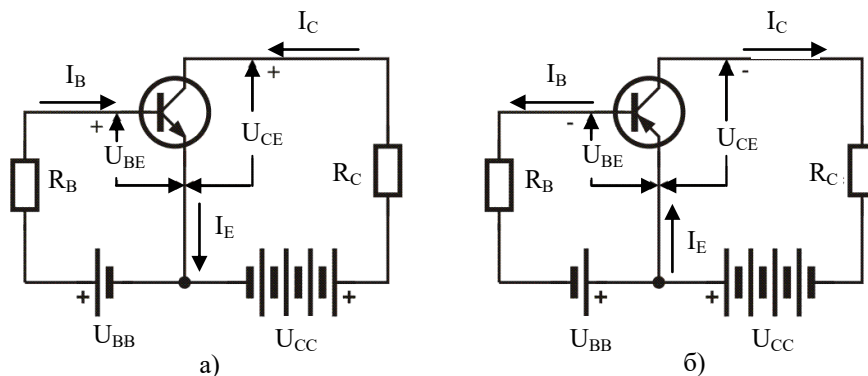


Слика 1.32: Режији на работа на транзисторот

Табела 1.13: Режији на работа на транзисторот

Режим на работа на транзисторот	Поларизација на емитерскиот спој	Поларизација на колекторскиот спој
Нормално активно подрачје	Директна	Инверзна
Инверзно активно подрачје	Инверзна	Директна
Подрачје на заситување	Директна	Директна
Подрачје на закочување/исклучување	Инверзна	Инверзна

На сликата 1.33 е прикажано коло за поларизација на транзисторот со два извора за поларизација U_{BB} и U_{CC} . Со изворот U_{BB} емитерскиот спој се поларизира директно, додека со изворот U_{CC} колекторскиот спој инверзно. Отпорникот R_B ја регулира базната струја I_B а со отпорникот R_C се регулира колекторската струја I_C .



Слика 1.33: Коло за поларизација на а) NPN и б) PNP-транзистор

Овој транзистор е поврзан „во спој со заеднички емитер“ бидејќи емитерот е заедничка електрода и за базната и за колекторската струја.

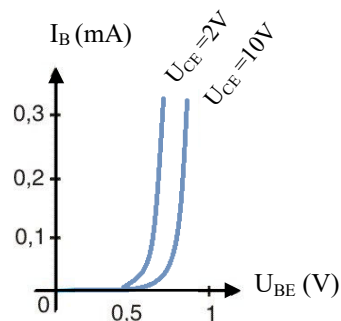
Напомена! За поларизација на транзисторот се користат еднонасочни извори на напон! Транзисторот се наоѓа во статички режим на работа!

1.8.1 Статички карактеристики на транзисторот

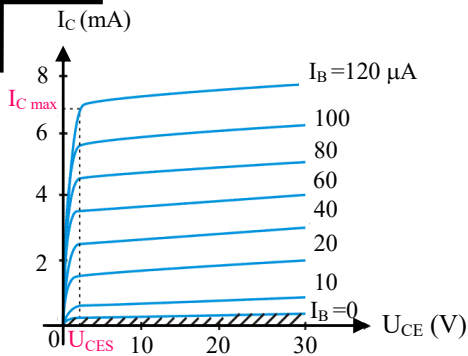
Од колото за поларизација на транзисторот (слика 1.33) четири големини се со јасно изразена меѓусебна зависност. Тоа се: базната струја I_B и напонот база-емитер U_{BE} , како влезни, и колекторската струја I_C и напонот колектор-емитер U_{CE} , како излезни големини. Нивните зависимости можат да се претстават графички преку статичките карактеристики на транзисторот. Статичките карактеристики најверодостојно го опишуваат принципот на работа на транзисторот. Најзначајни се: **влезните карактеристики, излезните карактеристики и преносните карактеристики.**

Карактеристиката која ја претставува промената на базната струја I_B во зависност од промените на напонот база-емитер U_{BE} при константни вредности на напонот колектор - емитер U_{CE} се нарекува **влезна карактеристика** на транзисторот. За различни вредности на напонот U_{CE} се добива фамилија карактеристики (слика 1.34). Математички се претставува со:

$$I_B = f(U_{BE}) \text{ кога } U_{CE} = const.$$



Слика 1.34: Влезни карактеристики



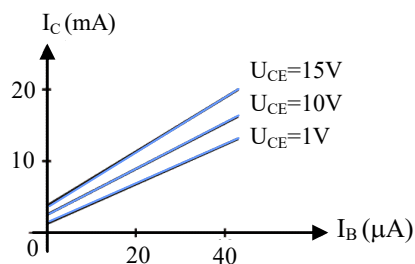
Слика 1.35: Излезни карактеристики

Додека влезната карактеристика дава зависност на две влезни голедини, излезната на две излезни, преносната карактеристика дава зависност на една влезна и една излезна големина. Кај транзисторот во спој со заеднички емитер, преносната карактеристика се дефинира како зависност на излезната колекторска струја I_C од влезната базна струја I_B при константен излезен напон U_{CE} (слика 1.36).

На слика 1.35 се прикажани фамилија карактеристики 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:

$$I_C = f(U_{CE}) \text{ кога } I_B = const.$$

Овие карактеристики на транзисторот во спој со заеднички емитер се нарекуваат **излезни карактеристики**.



Слика 1.36: Преносни карактеристики

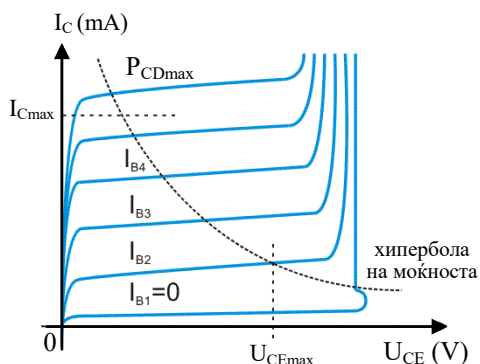
$$I_C = f(I_B) \text{ кога } U_{CE} = const.$$

Практично, снимањето на статичките карактеристики, подетално е објаснето во делот од учебникот со практични вежби.

1.8.2 Ограничување 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 активен режим 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 1.37 се дадени излезните карактеристики на транзистор во спој со заеднички емитер, продолжени до областа на пробивот на колекторскиот спој.



Слика 1.37: Преносни карактеристики

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. Работните услови 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 одведувањето 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.

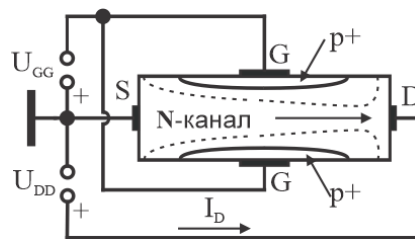
Во табела 1.14 се дадени каталожки податоци за максимални дозволени вредности на колекторска струја, напон колектор-емитер, моќноста на дисипација на транзистори според дадена ознака.

Табела 1.14: Дел од каталог за транзистори со максимални дозволени вредности

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

1.9 Поларизација на униполарен транзистор

Структурата на FET е прикажана шематски на слика 1.38. Тој е составен од тенка плочка со правоаголен пресек од силициумски полупроводник од N-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 поврзани преку металните приклучоци и претставуваат влезна електрода, наречена **гејт (G)**.



Слика 1.38: Структура на N-канален FET

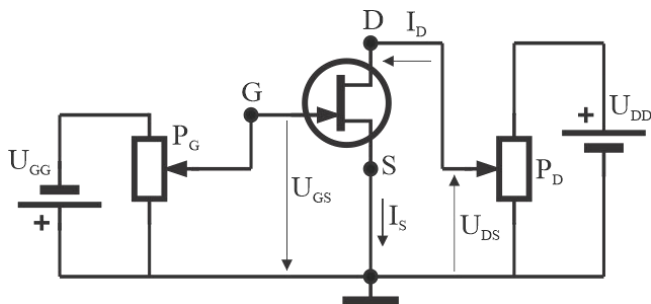
На другите краеве на плочката се поставени метални приклучоци за изводите **дрејн (D)** и **сорс (S)**. Стеснетиот дел на плочката меѓу сорсот и дрејнот се вика **канал**. Со промена на формата, односно ширината на каналот, се менува јачината на струјата на дрејнот.

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.

Ако се прави паралела со биполарниот транзистор, електродата гејт одговара на базата, сорсот на емитерот, а дрејнот на колекторот.

FET-от се поларизира со извор на еднонасочен напон U_{GG} , врзан меѓу гејтот и сорсот, кој инверзно ги поларизира двата PN-споја создадени меѓу гејтот и каналот. Изворот U_{DD} 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, заеднички гејт и во спој со заеднички дрејн. Сепак, најмногу се користи спојот со заеднички сорс.

1.9.1 Статички карактеристики на униполарен транзистор

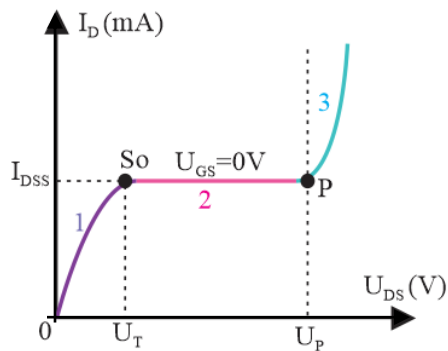


Слика 1.39: Електрично коло за снимање на статичките карактеристики на FET

Најзначајни статички карактеристики на FET-от, се излезната карактеристика $I_D = f(U_{DS})$ и преносната к-ка $I_D = f(U_{GS})$, при што со I_D е означена излезната струја на дрејнот, со U_{DS} излезниот напон меѓу дрејн и сорс и со U_{GS} влезниот напон меѓу гејт и сорс. Тие можат да се снимаат со колото дадено на слика 1.39.

Излезната карактеристика $I_D = f(U_{DS})$ за $U_{GS} = 0V$ ќе има изглед како на слика 1.40.

За мали напони U_{DS} , каналот се однесува како отпорност, што придонесува карактеристиката да има линеарен тек. Тој дел се дефинира како **област 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_{DSS} и не се менува со зголемувањето на напонот U_{DS} .



Слика 1.40: Излезна карактеристика на FET

На карактеристиката тоа е делот означен со 2 и е наречен **област на заситување** или подрачје на константни струи.

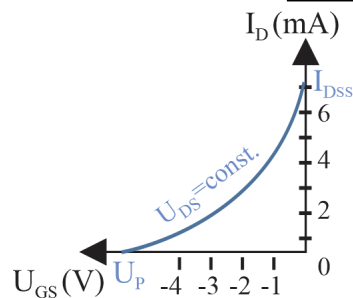
Третиот дел од карактеристиката, означен со 3, е **област на пробив** и започнува од точката P. Во оваа точка напонот U_{DS} ја надминува вредноста на пробивниот напон на PN-спојот и струјата на дрејнот нагло се зголемува. Пробивот е од областа на зенеров ефект, што значи реверзибилен и може да се врати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

Преносната карактеристика $I_D=f(U_{GS})$ за $U_{DS}=\text{const.}$ е дадена на слика 1.41.

Статички параметри на транзисторот се:

- Струјата при целосно отворен канал (I_{DSS}) која се добива во пресек со ординатата.
- 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 во пресек со апсцисата.

Големините на овие параметри се даваат во каталози, на пр., за BF245 изнесуваат (табела 1.15):



Слика 1.41: Преносна карактеристика на FET

Табела 1.15: Каталожки податоци за униполарен транзистор BF245

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

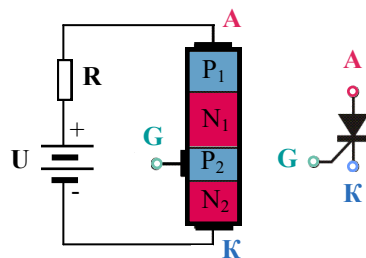


Резиме - поларизација, статички карактеристики и ограничување на работата на транзисторот

- Транзисторот е во активен режим на работа кога емитерскиот спој е директно поларизиран а колекторскиот спој инверзно;
- Карактеристиката која ја претставува промената на влезната струја во зависност од промените на влезниот напон при константни вредности на излезниот напон се нарекува влезна карактеристика на транзисторот.
- Карактеристиката која ја претставува промената на излезната струја во зависност од промените на излезниот напон при константни вредности на влезната струја се нарекува излезна карактеристика на транзисторот.
- Карактеристиката која ја претставува промената на излезната струја од влезната струја при константен излезен напон се нарекува преносна карактеристика на транзисторот.
- За заштита од топлински пробив на транзисторот се ограничуваат: максималната дозволена колекторска струја I_{Cmax} , максималниот дозволени колекторски напон U_{CEmax} и максималната дозволена дисипација P_{CDmax} .
- Излезната карактеристика на FET во спој со заеднички сорс се дефинира како зависност на излезната струја I_D од излезниот напон U_{DS} при константен влезен напон U_{GS} .
- Преносната карактеристика на FET во спој со заеднички сорс се дефинира како зависност на излезната струја I_D од влезниот напон U_{GS} при константен излезен напон U_{DS} .

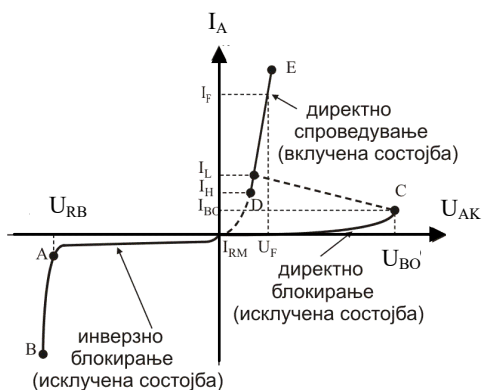
1.10 Поларизација на тиристорот

Тиристорот е директно поларизиран при приклучување на анодата на позитивниот пол на изворот U , а катодата на негативниот, како што е поврзан на слика 1.42. Вклучување на тиристорот, односно негово побудување (окинување) може да се направи на два начина: со зголемување на напонот меѓу анодата и катодата U_{AK} над вредноста на напонот на вклучувањето U_{B0} , или со приклучување позитивен напон на гејтот. Во практиката секогаш се применува вториот начин.



Слика 1.42: Поларизација на тиристорот

1.10.1 Статички карактеристики на тиристорот



Слика 1.43: Статичка карактеристика на тиристорот

$$I_A = f(U_{AK}) \quad \text{кога} \quad I_G = const.$$

Во состојба на спроведување (делот од точката D до точката E), тече голема струја и имаме мал пад на напон на тиристорот. Струјата низ него може да се ограничи со приклучување на надворешна отпорност R . Пробивањето во оваа подрачје не значи и негово оштетување. Во оваа состојба тиристорот може да остане сè додека струјата не падне под минималната вредност, одредена со струјата на држење I_H .

Како заклучок, директно поларизираниот тиристор може да се најде во една од двете состојби: состојба на спроведување и состојба на директно блокирање. 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 приклучена на негативниот, а катодата на позитивниот пол на изворот. Кога инверзниот напон ќе стане поголем од U_{RB} (*RB-Reverse Break*), а тоа е напонот на пробив во инверзната насока, делот на карактеристиката од точката A до точката B, доаѓа до пробив на тиристорот и негово уништување.



I Прашања со заокружување (заокружи ги точните одговори)

- При која поларизација на изводите на диодата таа е директно поларизирана?
 - $\varphi_A > \varphi_K$
 - $\varphi_A = \varphi_K$
 - $\varphi_A < \varphi_K$
- Кои диоди работат при инверзна поларизација, при напони поголеми од пробивниот напон на диодата и притоа не доаѓа до нејзино уништување?
 - Насочувачка диода
 - Зенер диода
 - Варикап диода.
- Во кој режим на работа транзисторот работи како засилувач?
 - Режим на заситување
 - Режим на закочување
 - Нормално активно подрачје.
- Која карактеристика на транзисторот дава зависност на влезна од излезна големина?
 - Влезна
 - Преносна
 - Излезна.

II Прашања со поврзување

5. Поврзи ја карактеристиката на транзисторот со соодветната релација!

$1. I_B = f(U_{BE}) / U_{CE} = const.$	а) преносна	_____
$2. I_C = f(I_B) / U_{CE} = const.$	б) влезна	_____
$3. I_C = f(U_{CE}) / I_B = const.$	в) излезна	_____.

6. Поврзи ја состојбата на транзисторот со поларизација на неговите PN-споеви!

1. Засилувач	а) емитерски-директно, колекторски-инверзно	_____
2. Отворен прекинувач	б) двата PN-споја директно	_____
3. Затворен прекинувач	в) двата PN-споја инверзно	_____.

III Прашања со дополнување

- Статичка карактеристика на тиристорот се дефинира како зависноста на _____ (струјата/напонот/работната температура) низ тиристорот од _____ (струјата/напонот/работната температура) на неговите краеве за различни вредности на _____ (струјата/напонот/работната температура).
- Статичката карактеристика на директно поларизирана диода е прикажана во _____ квадрант, при инверзна поларизација на диодата, во _____ квадрант.
- Транзисторот е во активен режим на работа кога емитерскиот спој е _____ (директно/инверзно) поларизиран а колекторскиот спој _____ (директно/инверзно) поларизиран.

Прашања за утврдување на знаењата од МЕ 1

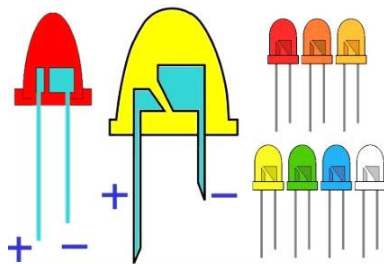
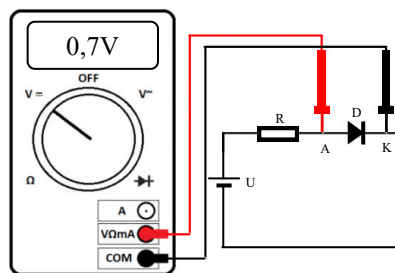
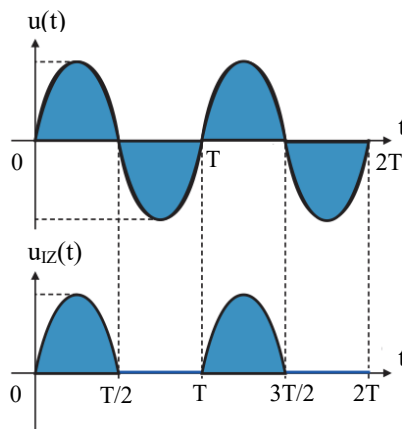
1. Кои елементи припаѓаат во групата активни електронски елементи?
2. Кој електронски елемент содржи само еден PN-спој и има два извода?
3. Како се означуваат изводите на полупроводничката диода?
4. Зошто е потребно електронските елементи да се претставуваат со нивни симболи?
5. Кои диоди се користат за добивање еднонасочна струја од наизменичен извор на напон?
6. Која диода се користи за стабилизација на еднонасочен напон?
7. Која диода работи во подрачје на пробив?
8. Каде се применуваат Шоткиевите диоди?
9. Која диода претставува фотодетектор?
10. Каде наоѓаат примена фотодиодите?
11. Кои диоди се користат во фиброоптичките влакна поради големата брзина на вклучување и исклучување?
12. Која диода има својство да ја менува својата капацитивност со промена на напонот приклучен на нејзините краеве?
13. Кои диоди се нарекуваат ултрабрзи диоди?
14. Каде се применуваат тунел диодите?
15. Кои електронски елементи содржат два PN-споеви и имаат три изводи?
16. Како се означуваат изводите на биполарниот транзистор?
17. Како се именуваат изводите на униполарниот транзистор?
18. Како се делат униполарните транзистори?
19. Како се делат транзисторите според режимот на работа?
20. Кои електронски елементи содржат најмалку три PN-споеви и имаат најмалку два извода?
21. Како се нарекува управувачката електрода на тиристорот?
22. Како се нарекува диодниот двонасочен тиристор?
23. Како се нарекува триодниот двонасочен тиристор?
24. На кој пол од изворот треба да се приклучи анодата на диодата за низ неа да тече струја?
25. На кој пол од изворот треба да се приклучи катодата на диодата за да биде инверзно поларизирана?
26. Што претставува статичка карактеристика?
27. Како е поларизирана диодата во првиот квадрант од нејзината статичка карактеристика?
28. Зошто има потреба од ограничувања при работа на диодата?
29. При која поларизација на диодата се јавува Зенеров ефект?
30. Како се поларизирани емитерскиот и колекторскиот спој на транзисторот за да биде во активен режим на работа?
31. Која карактеристика ја прикажува зависноста на излезниот напон од излезната струја на транзисторот?
32. Дефинирај ги влезните карактеристики на транзисторот!
33. Која статичка карактеристика на транзисторот ја дава зависноста на една влезна и една излезна големина?

Модуларна единица

2. Диоди

Со изучување на содржините од оваа модуларна единица ученикот ќе стекне основни знаења за диодните кола и ќе може:

- да претставува диода како прекинувач;
- да наведува разлики меѓу LED и фотодиода;
- да го објаснува стабилизирачкото својство на Зенер диодата;
- да прикажува симболи на компоненти во диодни кола;
- да дискутира принцип на работа на полубранов насочувач со една диода;
- да дискутира принцип на работа на ограничувач со една диода;
- да демонстрира лемење и одлемување на компоненти за изработка на печатена плочка;
- да решава задачи и графички да анализира диодни кола;
- да реализира практични вежби со едноставни диодни кола.



Полупроводнички диоди

1. Насочувачка диода

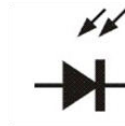
Се применува во уреди кои претвораат наизменична во еднонасочна енергија - насочувачи.

2. Зенер диода

Се применува во електронски кола за стабилизација на еднонасочен напон - стабилизатори.

3. Импулсни диоди

Се користаат како брзи прекинувачи во дигиталните системи и во микробрановата техника.

4. Фотодиоди

Се користат како соларна ќелија, но најмногу се среќаваат во алармни системи.

5. LED диоди

Се користат за пренос на дигитални информации преку фиброоптички влакна со голема брзина, но имаат голема примена и во светлечки тела.

6. Капацитивни диоди

Се применуваат во радио и ТВ-приемниците.

7. PIN диоди

Се користат како модулатор и како променлив отпорник во електрични кола со автоматска регулација на засилувањето.

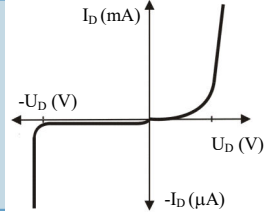
8. Тунел диоди

Се применуваат во прекинувачките и засилувачките кола, а најчесто во осцилаторите.

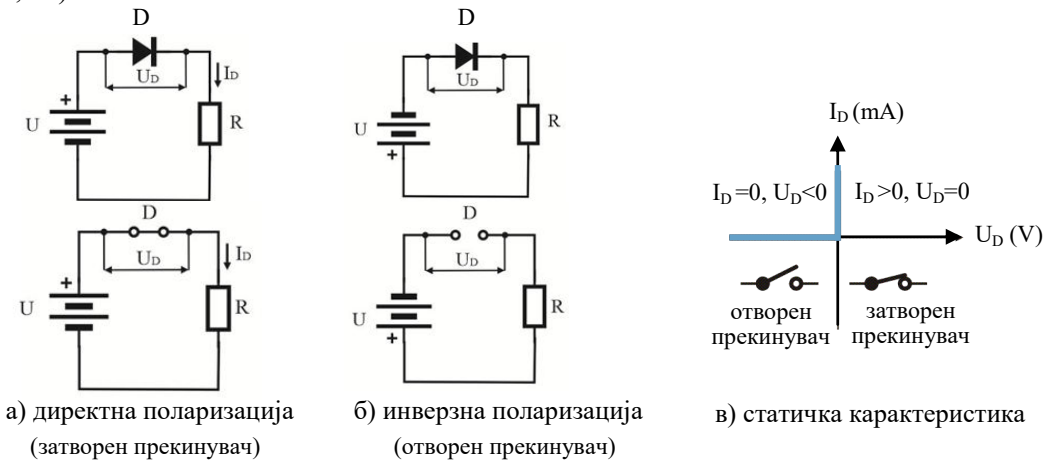
2.1 Диодни кола



Струјно-напонската карактеристика на диодата ја претставува зависноста на струјата низ диодата од еднонасочниот напон приклучен на нејзините краеве, при одредена константна температура на околината.

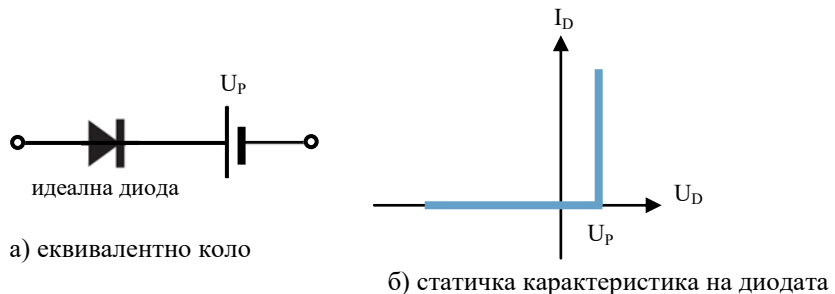


Дефинираната струјно-напонска карактеристика на диодата се однесува на физички реална диода. За анализа на многу електронски кола се користи модел на **идеална диода**, која во директната насока има отпор нула и претставува совршен спроводник (слика 2.1 а), а во инверзната насока нејзината струја е нула и има бесконечен отпор (слика 2.1 б). Оваа апроксимација на нејзината карактеристика е дадена на слика 2.1 в). Идеалната диода дејствува како **бесконтактен прекинувач** - затворен прекинувач, кога е директно поларизирана, и како отворен прекинувач, кога е инверзно поларизирана. Овој линеарно сегментен модел ги задоволува резултатите во режим на големи сигнали, односно, напони во колото многу пати поголеми од напонот на диодата при директна поларизација (околу 0,7V).



Слика 2.1: Идеална диода како прекинувач

При помали напони на изворот, не многу поголеми од напонот на спроведување на диодата U_p , таа се апроксимира со сериска врска на идеална диода и еднонасочен извор на напон со вредност U_p . Со ваква апроксимација се добива линеарно-сегментниот модел на диодата како на слика 2.2.



Слика 2.2: Линеарно-сегментен модел на диодата

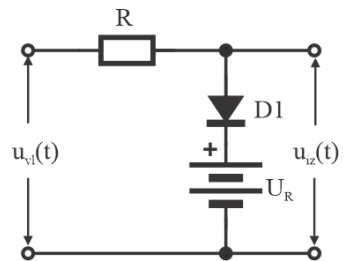
Во понатамошниот текст ќе биде разгледана примената на диодата како ограничувач, насочувач и стабилизатор на напон.

2.1.1 Диодни ограничувачи

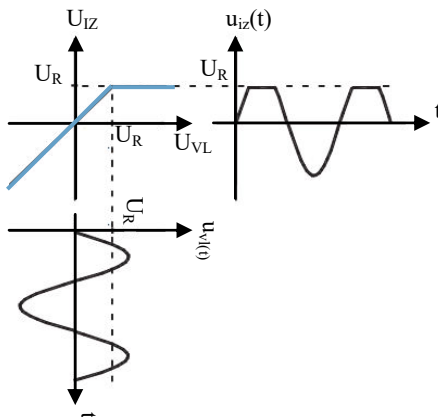
Во електрониката многу често има потреба од ограничување на порастот на напонот над одредена вредност. Електронските кола кои ја вршат оваа функција се нарекуваат **ограничувачи (лимитери)**. Во нив се користи прекинувачкото својство на диодата. Во зависност од начинот на поврзување на диодата, односно нејзината поларизација, излезниот напон ќе има иста форма со влезниот напон со одредено ограничување. Ограничувањето може да биде од горе, од долу или од двете страни. Доколку во колото сервиски со диодата се поврзе и еднонасочен извор на напон како референтен напон U_R , ќе се добие ограничувач на напонско ниво под или над вредноста на референтниот напон.

Едностранни ограничувачи се реализираат со редна врска на отпорник и диода. Во зависност од поставеноста на диодата во однос на напонскиот извор, се добиваат редни и паралелни ограничувачи.

Колото прикажано на слика 2.3 претставува паралелен ограничувач од горе. Диодата се користи како прекинувачки елемент, при директна поларизација - затворен прекинувач а при инверзна - отворен. При анализата на принципот на работа ќе бидат земени влезни напони почнувајќи од „големи“ негативни вредности до „големи“ позитивни вредности, при што диодата ќе се замени со нејзиниот идеален еквивалент.



Слика 2.3: Паралелен ограничувач од горе



Слика 2.4: Преносна карактеристика на паралелен ограничувач од горе

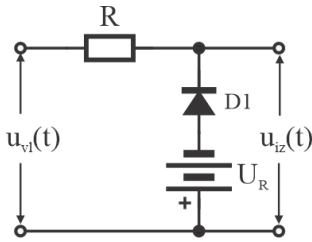
За $U_{VL} < 0$, диодата ќе биде инверзно поларизирана, заменета во колото со нејзиниот модел - отворен прекинувач, во колото нема да протекува струја бидејќи на излезот не е приклучен потрошувач, нема да има пад на напон на отпорникот R и притоа влезниот напон се пренесува на излез, односно, $U_{IZ} = U_{VL}$.

Преносната карактеристика (зависноста на излезот од влезот) ќе има линеарен облик ($y=x$) (слика 2.4). Излезот ќе го следи влезот сè додека влезниот напон не ја достигне вредноста на напонот на еднонасочниот извор U_R .

За влезни напони $U_{VL} \geq U_R$ диодата ќе биде директно поларизирана при што во колото се заменува со куса врска. Во тој момент излезниот напон е директно, паралелно, приклучен на краевите на референтниот извор U_R , односно, $U_{IZ} = U_R$. Преносната карактеристика ќе биде паралелна со x -оската ($y = \text{const.}$).

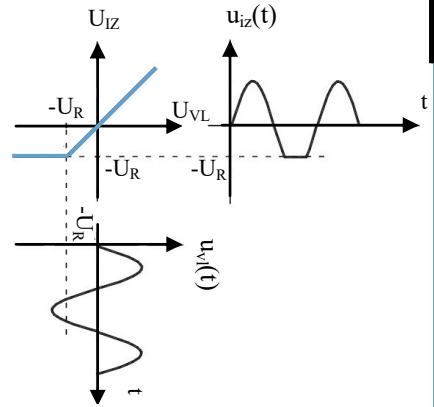
Да се нацрта преносна карактеристика на паралелен ограничувач од горе доколку во колото не се приклучи извор на референтен напон ($U_R = 0V$).

Паралелен ограничувач од долу се добива доколку во шемата од слика 2.5, диодата и референтниот извор се поврзат во обратна насока. Анализата е идентична како кај паралелен диоден



Слика 2.5: Паралелен ограничувач од долу

ограничувач од горе. За влезни напони $U_{VL} < -U_R$ диодата е директно поларизирана (куса врска), $U_{IZ} = -U_R$, додека за влезни напони поголеми од референтниот, диодата е инверзно поларизирана и во колото не тече струја, излезот го следи влезот.

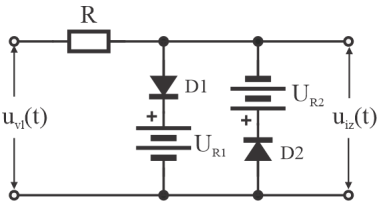


Слика 2.6: Преносна карактеристика на паралелен ограничувач од долу

Еднаков ефект се постигнува и со сериски диоден ограничувач каде диодата е сериски поврзана со влезниот напон. Анализата е дадена во делот од учебникот со нумерички задачи а реализацијата во делот лабораториски вежби.

Доколку има потреба од ограничување на излезниот напон истовремено и од горе и од долу, на исти или различни референтни нивоа, се употребуваат двострани ограничувачи. На слика 2.7 е прикажана електрична шема на двостраниот ограничувач. Во паралелната гранка интегрирани се двете претходни изведби.

За одредување на обликот на преносната карактеристика (слика 2.8), анализата ќе се спроведе во три чекори:

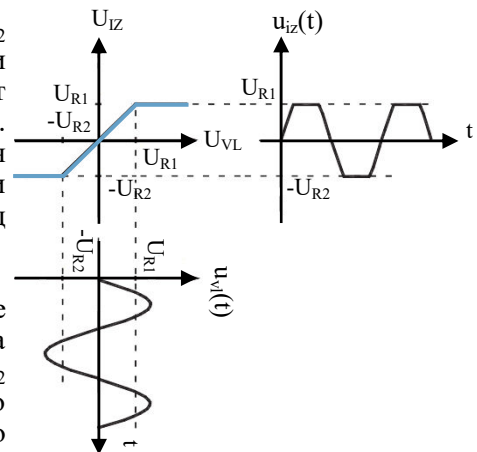


Слика 2.7: Двостран ограничувач

1. За вредности на влезни напони $U_{VL} < -U_{R2}$, катодата на диодата D_2 е на понизок потенцијал од нејзината анода што ја прави спроводна. Таа се заменува со затворен прекинувач при што излезниот напон е паралелно приклучен на изворот U_{R2} ($U_{IZ} = -U_{R2}$). Диодата D_1 е инверзно поларизирана, низ неа не тече струја и се еквивалентира со отворен прекинувач.

2. За влезни напони $-U_{R2} < U_{VL} < U_{R1}$, диодата D_2 ќе се поларизира инверзно, диодата D_1 и понатаму е исклучена сè додека влезниот напон не ја достигне вредноста на изворот U_{R1} . Двете диоди се еквивалентираат со отворен прекинувач, па излезниот напон го следи влезниот напон $U_{IZ} = U_{VL}$ (линеарниот дел од преносната карактеристиката).

3. За влезни напони $U_{VL} \geq U_{R1}$ анодата на D_1 ќе биде на повисок потенцијал од нејзината катода, таа ќе се вклучи, додека диодата D_2 останува исклучена. Под овие услови во колото, излезниот напон ќе биде паралелно приклучен на изворот U_{R1} ($U_{IZ} = U_{R1}$).



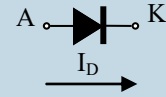
Слика 2.8: Преносна карактеристика на двостран ограничувач

Добиениот излезен напон е ограничен од горе на вредност U_{R1} а од долу на $-U_{R2}$.

2.1.2 Диодни насочувачи

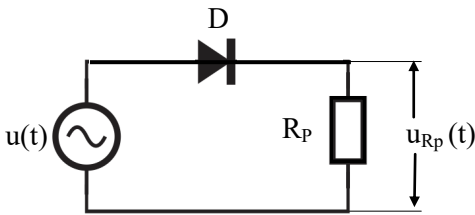


При директна поларизација на диодата, приклучокот на анодата е на повисок потенцијал во однос на катодата, низ неа протекува струја, во насока од анодата кон катодата. Самиот симбол ја покажува насоката на струјата низ диодата.



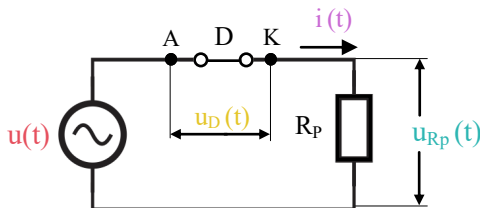
Својството на диодата да пропушта струја во една насока овозможува нејзина примена во уреди кои служат за добивање еднонасочни напони од наизменичниот напон на електричната мрежа (т.н. **насочувачи**). Потребата од насочувачи произлегува од фактот дека голем број електронски уреди работат на еднонасочни напони за напојување.

Наједноставен насочувач е полубрановиот насочувач. Тој е составен од една диода приклучена во серија со потрошувачот во колото претставен со отпорност R_p (слика 2.9).



Слика 2.9: Полубранов насочувач со диода

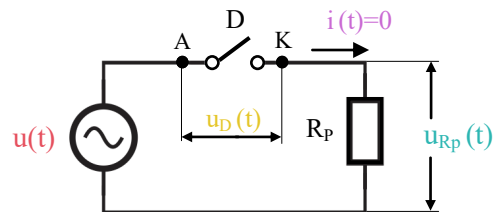
За време на позитивната полупериода на влезниот напон $u(t)$, анодата на диодата ќе биде на повисок потенцијал од нејзината катода. Диодата ќе биде директно поларизирана, претставена со затворен прекинувач, нема пад на напон на нејзините краеве, но ќе тече струја низ неа во насока од анодата кон катодата. Таа е истовремено и струја низ потрошувачот R_p со насока означена на слика 2.10.



Слика 2.10: Полубранов насочувач со диода за време на позитивна полупериода на $u(t)$

На влез на колото е приклучен наизменичен синусоидален извор на напон $u(t)$ а на излез потрошувач. Колото ќе се анализира за време на позитивна и негативна полупериода на наизменичниот влезен напон $u(t)$. При анализата диодата ќе биде заменета со нејзиниот идеален еквивалент.

Во временскиот интервал од $T/2$ до T на напонот $u(t)$, катодата на диодата ќе биде на повисок потенцијал од нејзината анода. Диодата ќе биде инверзно поларизирана, претставена со отворен прекинувач, и нема да протекува струја низ колото (слика 2.11). Притоа нема пад на напон на потрошувачот R_p . Напонот на диодата ќе биде идентичен со приклучениот наизменичен напон $u(t)$.

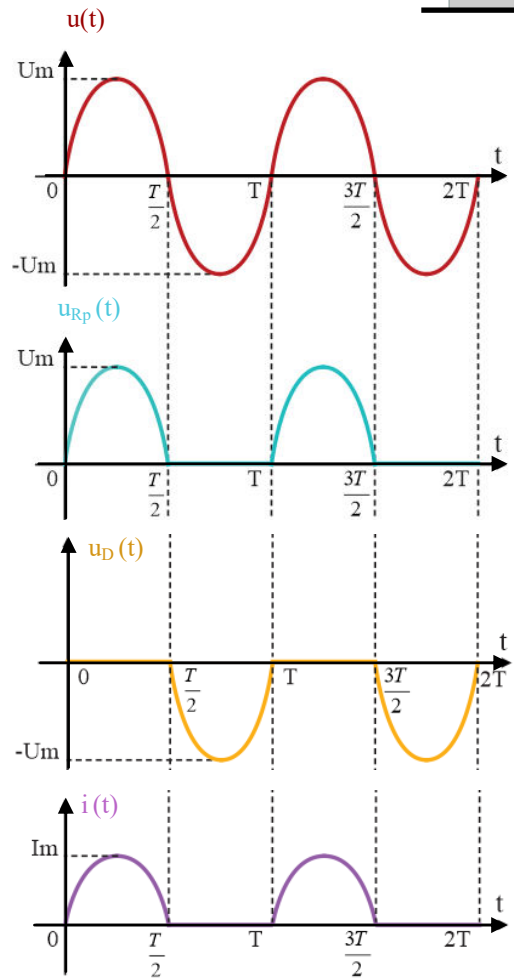


Слика 2.11: Полубранов насочувач со диода за време на негативната полупериода на $u(t)$

На слика 2.12 се прикажани брановите облици на влезниот синусен напон $u(t)$, напонот на потрошувачот $u_{Rp}(t)$, напонот на диодата $u_D(t)$ и струјата $i(t)$ на полубранов насочувач за време од две периоди. Во временскиот интервал од 0 до $T/2$, како и од T до $3T/2$ (поради периодичноста на синусниот напон) на напонот $u(t)$, напонот на потрошувачот е $u_{Rp}(t)=u(t)$, додека во временскиот интервал од $T/2$ до T ($3T/2$ до $2T$) напонот на потрошувачот е $u_{Rp}(t)=0$.

Брановата форма на струјата низ потрошувачот $i(t)$ е со иста форма со напонот $u_{Rp}(t)$ но со помала амплитуда. Бидејќи струјата низ потрошувачот тече само за време од една полупериода, овој насочувач е наречен полубранов насочувач.

Од извршената анализа може да се забележи дека напонот на диодата е идентичен со влезниот напон, кога таа е неспроводна. Затоа е потребно да се конструира колото со диода која има поголем напон на пробив од приклучениот влезен напон за да не дојде до нејзино пробивање. Во насочувачките кола најчесто се користат силициумски диоди.



Слика 2.12: Бранови облици на карактеристични големини



Резиме - Диодни ограничувачи и насочувачи

- Идеалната диода дејствува како бесконтактен прекинувач - затворен прекинувач, при директна поларизирација, и како отворен прекинувач, при инверзна поларизирација.
- Електронските кола кои го ограничуваат порастот на напонот над одредена вредност се нарекуваат ограничувачи (лимитери).
- Ограничувачите можат да бидат еднострани (од горе или од долу) и двострани.
- Насочувачи се преобразувачи на напон кои служат за добивање еднонасочен напон од наизменичниот напон на електричната мрежа.
- Полубрановиот насочувач е составен од една диода приклучена во серија со потрошувач.

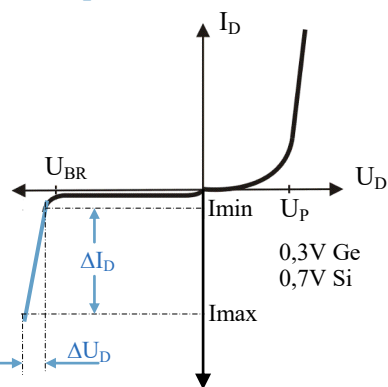
2.1.3 Диодни стабилизатори на напон



Зенер диодата има мала промена на напонот на нејзините краеве при големи промени на струјата при инверзна поларизација. Инверзниот напон на пробив - Зенеров напон е значително помал од напонот на пробив кај другите диоди.

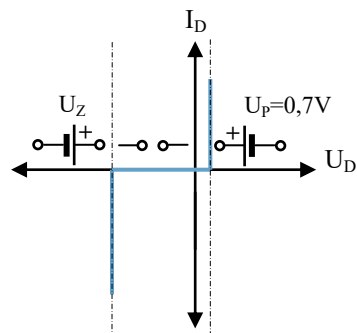
Зенер диодата според конструкција е силициумска диода со зголемен процент на хемиски примеси во полупроводниците од P и N-тип. Ги има истите својства како и насочувачката диода при директна поларизација. При напони поголеми од напонот на спроведување U_p , низ неа протекува струја. Тие се разликуваат според нивните работни подрачја, за насочувачките диоди ограничувањето е во максималниот инверзен напон, а за Зенер диодите максималната инверзна струја. Низ Зенер диодата протекува струја со голема јачина при напони поголеми од инверзниот напон на пробив U_{BR} . Овој напон се нарекува **Зенеров напон**.

На слика 2.13 е прикажана струјно-напонската карактеристика на Зенер диодата. Со додавање на хемиски примеси во полупроводниците од P и N-тип, се постигнува поголема стрмнина и остро колено на кривата во делот на пробивниот напон. Во подрачјето на пробив, при големи промени на струјата низ диодата ΔI_D , промените на напонот на нејзините краеве ΔU_D се многу мали. Стабилизирачкото подрачје на Зенер диодата, се наоѓа во граници од I_{min} до I_{max} . При помали струи од I_{min} Зенер диодата го губи стабилизирачкото дејство и во колото не протекува струја. При работа во подрачјето на пробив, не доаѓа до оштетување на диодата. При надминување на вредноста на I_{max} се случува пробив кој е неповратен, односно уништување на диодата. Зенер диодата како елемент чија карактеристика во подрачјето на пробив има особина на стабилизирачко дејство, на краевите да одржува константен напон кој практично не зависи од струјата, се применува во уреди наречени стабилизатори на напон.



Слика 2.13: Струјно-напонска карактеристика на Зенер диода

Зенер диодата може да се апроксимира со еднонасочен извор $U_p=0,7V$ при директна поларизација, додека при инверзна поларизација за напони помали од напонот на пробив со отворен прекинувач а за поголеми напони со еднонасочен извор U_Z со поларитет како на слика 2.14.



Слика 2.14: Апроксимирана струјно-напонска карактеристика на Зенер диода

Големината на Зенеровиот напон се одредува при процесот на производство. Се произведуваат Зенер диоди со напони на пробив од неколку волти до неколку стотици волти. Најчесто се користат диоди со Зенеров напон 6-15V со моќност до 1W.

Наједноставен стабилизатор на напон изведен со отпорник R_1 , Зенер диода ZD (елемент чија карактеристика во подрачјето на пробив има особина на краевите да држи константен напон) и отпор на потрошувачот R_P , е даден на слика 2.15.

Колото треба да обезбеди стабилизирани напон на потрошувачот R_P . Нестабелизираниот влезен напон U_{VL} треба да биде поголем од напонот на стабилизација на зенер диодата U_Z . Според Вториот Кирхофов закон, се одредува големината на отпорникот R_1 кој служи за ограничување на струјата:

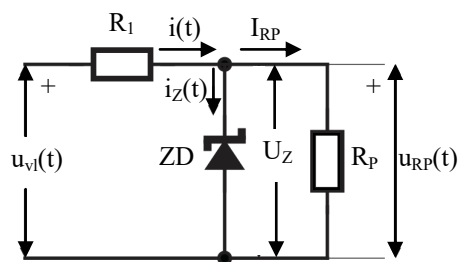
$$R_1 = \frac{U_{VL} - U_{RP}}{I}$$

каде за струјата I важи:

$$I = I_Z + I_{RP}$$

а за струјата I_{RP} важи:

$$I_{RP} = \frac{U_{RP}}{R_P}$$



Слика 2.15: Коло на стабилизатор на напон со Зенер диода

До промена на напонот на потрошувачот може да дојде со промена на нестабилизираниот влезен напон U_{VL} или поради промена на струјата I_{RP} , предизвикана со промена на отпорот на оптоварувањето R_P .

Ако дојде до зголемување на нестабилизираниот влезен напон U_{VL} , 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_{RP} и напонот U_{RP} остануваат непроменети. Во случај на намалувањето на нестабилизираниот напон, процесот се одвива во спротивната насока, така што се намалува струјата низ Зенер диодата.

Кога доаѓа до промена на отпорноста на потрошувачот R_P , обидот за промена на струјата I_{RP} се надоместува со промена на струјата на зенер диодата I_Z . Ако се намали отпорноста на отпорникот R_P , се зголемува струјата I_{RP} . За да остане напонот U_{RP} непроменет, се намалува струјата I_Z и обратно.

Во двата примера напонот U_{RP} останува непроменет, односно тој е стабилизирани.

Употребата на овој стабилизатор е ограничена со дозволената струја на Зенер диодата, а најчесто за струја од неколку mA дава добри резултати. Што се однесува до напонот, Зенер диодите со иста дозволена јачина на струја можат да се врзуваат сериски и со соодветна комбинација да се добие бараниот напон.



Резиме - Диодни стабилизатори

- Зенер диодата дејствува во подрачје на пробивен напон при инверзна поларизација.
- Во подрачјето на пробив, Зенер диодата има особина на краевите да држи константен напон.
- Зенер диодите се користат во уреди за стабилизација на напон.
- За правилно функционирање на Зенер диодата како стабилизатор на напон потребно е ограничување на I_{ZMAX} и I_{ZMIN} .

Провери го своето знаење!

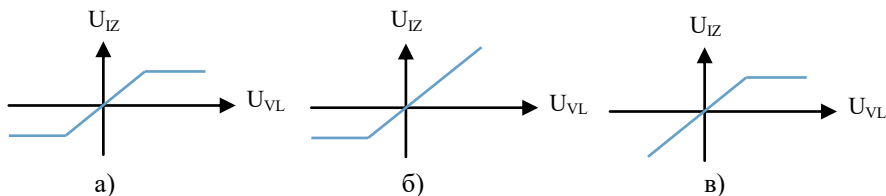


I Прашања со заокружување (заокружи ги точните одговори)

- Со кој еквивалент на моделот на идеална диода, таа се претставува при директна поларизација?
 - Отворен прекинувач
 - Затворен прекинувач
 - Бесконечна отпорност.
- Со кои уреди се добива еднонасочен напон од наизменичниот напон на електричната мрежа?
 - Насочувачи
 - Стабилизатори
 - Лимитери.
- Со кои електронски кола се ограничува порастот на напонот над одредена вредност?
 - Насочувачи
 - Стабилизатори
 - Лимитери.

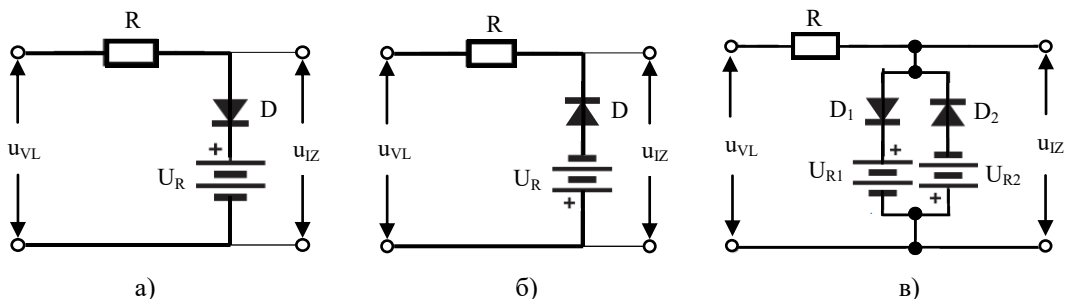
II Прашања со поврзување

- Поврзи ги видовите ограничувачи со соодветната преносна карактеристика!



- Ограничувач од горе _____
- Ограничувач од долу _____
- Двостран ограничувач _____.

- Поврзи ги видовите ограничувачи со соодветната изведба!



- Ограничувач од горе _____
- Ограничувач од долу _____
- Двостран ограничувач _____.

2.1.4 Светлечки LED диоди



LED или светлечка диода претставува извор на светлина при директна поларизација. Процесот на емитурање светлина при пополнување на празнините од валентниот опсег на донорите со електрони од спроводниот опсег на акцепторите се нарекува електролуминисценција.

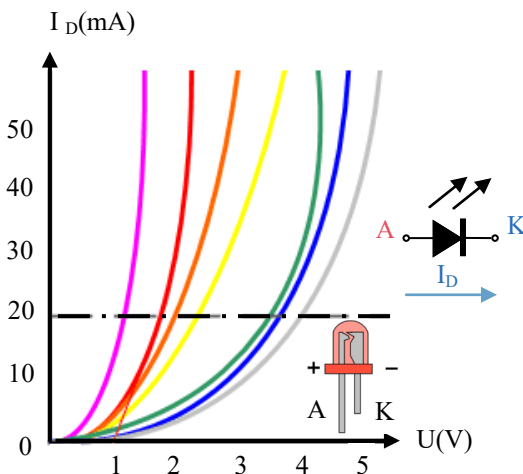
LED диодата емитура светлина при нејзина директна поларизација. Бојата на светлината не зависи од јачината на струјата низ диодата, туку од видот на полупроводниот материјал од кој е направена, односно од неговата ширина на енергетската зона.

Секој хемиски елемент има своја бранова должина на која зрачи 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 (Табела 2.1).

Табела 2.1: Карактеристики на LED диоди

Полупроводнички материјал	Бранова должина (nm)	Боја на зрачење	Директен напон (V) при 20mA
GaAs	850-940	инфрацрвена	1,2
GaAsP	630-660	црвена	1,8
GaAsP	605-620	портокалова	2,0
GaAsPN	585-595	жолта	2,2
AlGaP	550-570	зелена	3,5
SiC	430-505	плава	3,6
GaInN	450	бела	4,0

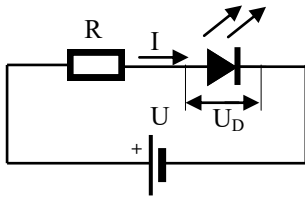
Разни бои можат да се добијат како комбинација на две или повеќе примарни бои (црвена, сина, зелена) на диоди ставени во исто куќиште и користејќи заедничка оптичка леќа. Такви диоди, на пр. се користат за видеодисплеи во спортски сали, стадиони и за реклами.



Слика 2.16: I-U карактеристика на LED диоди

На слика 2.16 се прикажани струјно-напонски карактеристики на LED диоди со различни бои на зрачење при директна поларизација (подолгиот извод е анода). При инверзна поларизација низ LED диодата не протекува струја и таа не зрачи светлина. За нормална работа, LED диодата се приклучува на напони од 1,6V до 3V, зависно од бојата. Типична работна струја на LED диода со стандардна големина изнесува околу 20mA, а максимален директен напон до 5V. Освен стандардните, постојат и високоефикасни LED диоди со работна струја од 2 до 8mA.

На слика 2.17 е прикажана поларизацијата на диодата. Редно со диодата се поврзува отпорник кој служи за ограничување на струјата во колото.



Слика 2.17: Поларизација на LED диода

Вредноста на отпорникот R кој служи за заштита на LED диодата, според Вториот Кирхофов закон, се пресметува со изразот:

$$U - U_D - R \cdot I = 0 \quad R = \frac{U - U_D}{I}$$

Пример: вообичаено на LED диода ѝ е потребен напон $U_D = 2V$ за да се вклучи и струја $15-20mA$ (табела 2.1).

Колкав отпор треба да се поврзе редно во колото со LED диодата при нејзино приклучување на еднонасочен напон од $9V$?

$$R = \frac{U - U_D}{I} = \frac{9 - 2}{20 \cdot 10^{-3}} = 0,35 \cdot 10^3 = 350 \Omega \quad \text{Според каталожките податоци се избира } R = 360 \Omega.$$

Во табела 2.2 се дадени вредности на напон и струја низ различни LED диоди при директна поларизација (U_D , I_D), максимални дозволени напони при директна и инверзна поларизација, интензитет на светлината и брановата должина на светлината која ја зрачат.

Табела 2.2: Каталожки податоци за LED диоди

Тип	Боја	I_D max. (mA)	U_D тип. (V)	U_D max. (V)	U_{INV} max. (V)	Интензитет на светлината (mcd)	Бранова должина (nm)
Стандардна	Црвена	30	1.7	2.1	5	5	660
Стандардна	Сјајно црвена	30	2.0	2.5	5	80	625
Стандардна	Жолта	30	2.1	2.5	5	32	590
Стандардна	Зелена	25	2.2	2.5	5	32	565
Висок интензитет	Сина	30	4.5	5.5	5	60	430
Супер сјајна	Црвена	30	1.85	2.5	5	500	660
Мала струја	Црвена	30	1.7	2.0	5	5	625

Најчесто LED диодите се применуваат како индикатори на состојба на уреди, за улично и амбиетално осветлување, во уреди опремени со LED диоди како информациски панели, „touch screen“ панели, спортски семафори, електронски курсни листи, дигитални часовници, автомобилски фарови, сообраќајни знаци и панели, мултимедијални екрани, мобилни екрани.

Предности на LED осветлувањето се:

- мали димензии;
- мала потрошувачка;
- мали загревања;
- голем век на траење.

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), индиум антимоид (InSb), индиум арсенид (InAs), оловен селенид (PbSe) и оловен сулфид (PbS). Овие материјали апсорбираат светлина од одреден опсег на бранови должини, на пр., од 250nm до 1100nm за силициумот, од 800nm до 2μm за галиум арсенид. Пресек на фотодиода е даден на слика 2.18.

Познато е 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**.



Слика 2.18: Пресек на фотодиода

Фотодиода без надворешна поларизација

Кај фотодиоди без надворешна поларизација светлината влегува во елементот преку тенок слој од Р-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.

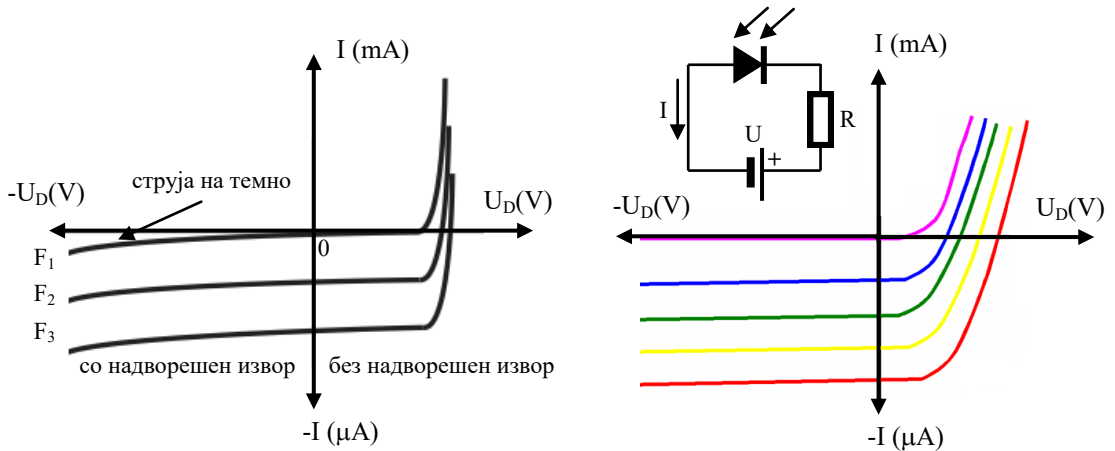
Фотодиода со надворешен извор за поларизација

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 линеарно 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 ($F_1 < F_2 < F_3$) е дадена на слика 2.19.

Фотодиодите најмногу се применуваат во алармните системи, на пр. за детекција на чад, во соларните ќелии, во фибер оптичките системи. Предности: мали димензии; голема осетливост и брз одзив.



Слика 2.19: Струјно-напонска карактеристика на фотодиода

За разлика од LED диодите, кои електричната енергија ја конвертираат во светлосна, фотодиодите имаат спротивна конверзија, светлосна во електрична енергија.

Резиме - Оптиелектронски компоненти



- LED диодата емитура светлина при нејзина директна поларизација.
- Бојата на светлината на LED диодата зависи од видот на полупроводниот материјал од кој е направена.
- Предности на LED осветлувањето се: мали димензии; мала потрошувачка; мали загревања и голем век на траење.
- Фотодиодата, како и другите фотодетектори, има задача да ја претвори светлосната радијација во електричен сигнал.
- Фотодиодата се применува како соларната ќелија која претставува еколошки извор на „чиста“ електрична енергија.
- Фотодиодите најмногу се применуваат во алармните системи, во соларните ќелии, во фибер оптичките системи.
- Кога фотодиодата не е осветлена, во колото тече само инверзната струја на диодата, наречена струја на темно.



I Прашања со заокружување (заокружи го точниот одговор)

1. Со кој полупроводнички елемент светлосната енергија се претвора во електрична?
 - а) LED диода
 - б) Фотодиода
 - в) Зенер диода.
2. Со кој полупроводнички елемент електричната енергија се претвора во светлосна?
 - а) LED диода
 - б) Фотодиода
 - в) Насочувачка диода.
3. Од што зависи бојата на светлината која ја емитира LED диодата?
 - а) Јачината на струјата која протекува низ неа
 - б) Поларизацијата на LED диодата
 - в) Видот на полупроводниот материјал од кој е направена.
4. Зошто е потребно да се поврзе отпорник сериски со LED диодата?
 - а) Ограничување на струјата низ LED диодата
 - б) Намалување на интензитетот на светлината
 - в) Зголемување на интензитетот на светлината.
5. Која диода се применува во алармните системи?
 - а) LED диодата
 - б) Фотодиодата
 - в) Зенер диодата.
6. Која диода се применува за улично и амбиентално осветлување?
 - а) LED диодата
 - б) Фотодиодата
 - в) Зенер диодата.

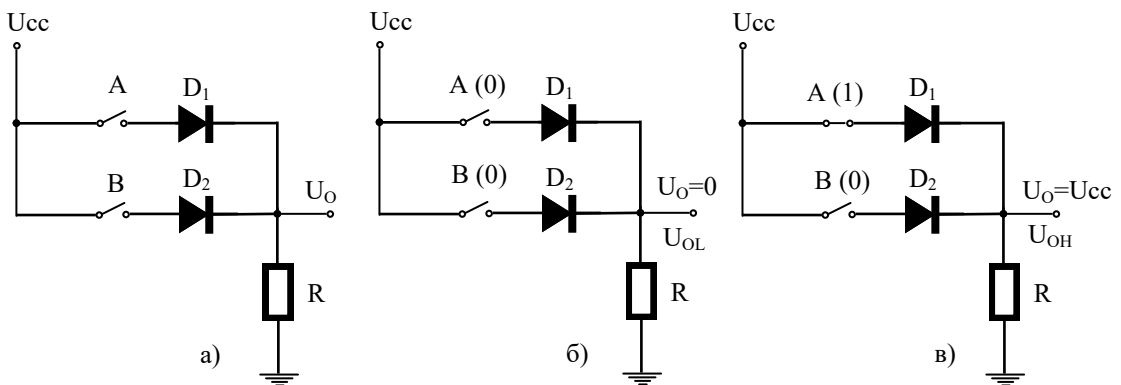
II Прашања со дополнување

7. LED диодата емитира светлина при _____ (директна/инверзна) поларизација.
8. Низ фотодиодата протекува струја на темно при _____ (директна/инверзна) поларизација.
9. За ограничување на струјата низ LED диодата на вредност од 20mA, за големина на напонот на диодата од 2V, во коло со напојување од 12V, во колото се приклучува отпорник со вредност од _____ Ω .

Дигиталните кола работат со сигнали кои се континуирани по време но дискретни по вредност. Во дигиталната електроника најчесто се користат бинарните дигитални сигнали кои имаат само две различни напонски нивоа, високо и ниско, кои се интерпретираат со цифрите 0 и 1.

Логичките кола се дигитални кола во кои полупроводничките елементи работат во прекинувачи режим на работа. На излез од логичкото коло се добиваат две вредности на напон U_{OL} или U_{OH} , односно, една од состојбите, „1“ - **високо (High)** логичко ниво или „0“ - **ниско (Low)** логичко ниво. Според логичката функција која ја реализираат, постојат различни видови логички кола. Основната логичка функција собирање се реализира со ИЛИ (OR) логичко коло, додека логичката функција множење со И (AND) логичко коло. Останатите логички кола се добиваат со комбинација на основните логички кола.

Колото за реализација на операцијата логичко собирање со два влезе е прикажано на слика 2.20 а). Составено е од две диоди D_1 и D_2 , кои преку прекинувачите А и В се поврзани со извор на напојување U_{CC} и потрошувач претставен со отпорник R. Во зависност од комбинациите на прекинувачите се добиваат четири состојби на поларизација на диодите D_1 и D_2 . При анализа на колото диодите ќе бидат еквивалентирани со моделот на идеален прекинувач. Ниско логичко ниво на излез се добива само под услов двата прекинувачи да се отворени (логичка 0), односно не се доведува напон на анодите на диодите и тие се инверзно поларизирани. Во колото не протекува струја и при тоа излезниот напон има вредност $0V$ (слика 2.20 б). Доколку кој било од прекинувачите е затворен (логичка 1), се доведува напонот U_{CC} на анодата на диодата, при што таа ќе биде директно поларизирана. Преку кусата врска на диодата (еквивалент при директна поларизација), на излезот се доведува напонот U_{CC} . На слика 2.20 в) е прикажана една од трите комбинации на прекинувачите (А-затворен, В-отворен) кога на излез од колото се добива високо напонско ниво (логичка 1). Истата анализа се спроведува и во случај на другите комбинации каде барем еден од прекинувачите е затворен. При анализа на функционирањето на колото земени се идеални диоди.



Слика 2.20: ИЛИ коло а) електрична шема б) состојба на ниско излезно ниво, в) состојба на високо излезно ниво

Табела на вистинитост и графички симбол на ИЛИ логичко коло се прикажани на слика 2.21.

Влезни состојби		Логичка функција собирање	Излезна состојба U_o
A	B		
0	0	$0+0=0$	0
0	1	$0+1=1$	1
1	0	$1+0=1$	1
1	1	$1+1=1$	1

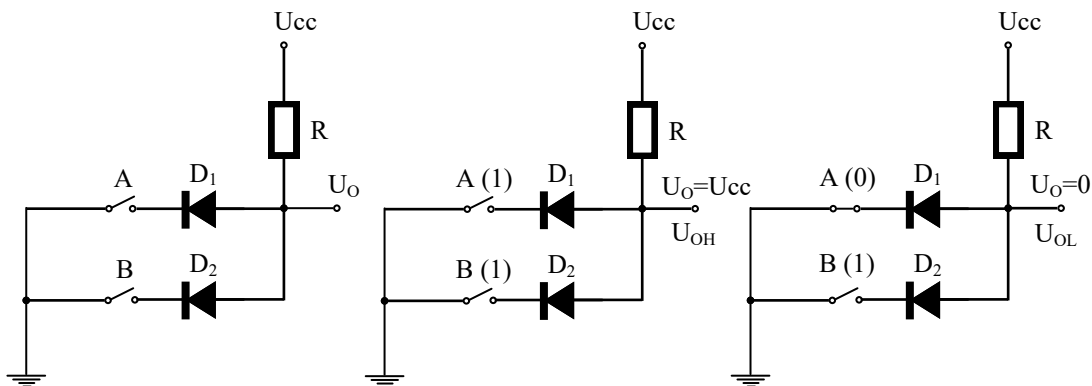


б)

а)

Слика 2.21: ИЛИ коло а) табела на вистинитост б) графички симбол

На слика 2.22 е прикажано диодно И логичко коло со два влезе и еден излез. За разлика од ИЛИ колото, прекинувачите се поврзани со маса, што значи влезниот сигнал е на логичка 0 во случај кога прекинувачот е затворен. Единствено во случај кога двата прекинувачи се отворени (логичка 1), во колото не тече струја, нема пад на напон на отпорникот R и при тоа напојувањето U_{cc} се пренесува на излез ($U_o=U_{cc}$), состојба на логичка 1 (слика 2.22 б). Доколку кој било од прекинувачите е затворен (логичка 0), соодветната диода се заменува со куса врска, во колото протекува струја притоа излезот директно се поврзува со масата состојба на логичка 0 (слика 2.22 в).



Слика 2.22: И коло а) електрична шема б) состојба на високо излезно ниво, в) состојба на ниско излезно ниво

На слика 2.23 се прикажани табела на вистинитост (а) и графички симбол на И логичко коло (б).

Влезни состојби		Логичка функција множење	Излезна состојба U_o
A	B		
0	0	$0 \times 0 = 0$	0
0	1	$0 \times 1 = 0$	0
1	0	$1 \times 0 = 0$	0
1	1	$1 \times 1 = 1$	1



б)

а)

Слика 2.23: И коло а) табела на вистинитост б) графички симбол

Прашања за утврдување на знаењата од МЕ 2

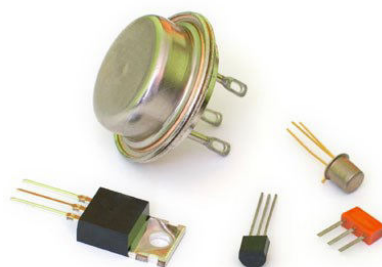
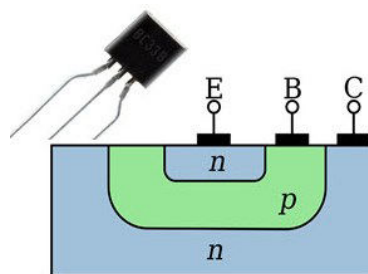
1. Дефинирај го моделот на идеална диода.
2. При која поларизација диодата се апроксимира со затворен прекинувач?
3. Како се апроксимира диодата по инверзна поларизација?
4. Со кои уреди се ограничува порастот на напонот над одредена вредност?
5. Со кои уреди се добива еднонасочен напон од наизменичен?
6. Кој насочувач е проектиран само со една диода?
7. Во која насока тече струја низ диодата, во однос на нејзините приклучоци, при директна поларизација?
8. Зошто тече струја само за време на една полупериода во полубранов насочувач?
9. Што се приклучува на влез а што на излез од насочувач на напон?
10. При која поларизација на Зенер диодата напонот на нејзините краеве скоро и не се менува при големи промени на струјата?
11. Како се поврзува потрошувачот во однос на Зенер диодата во колата за стабилизација на напон?
12. Што се случува со Зенер диодата при напони поголеми од напонот на пробив?
13. Кој напон се нарекува Зенеров напон?
14. Кои диоди се користат во колата за стабилизација на напон?
15. Зошто е потребно да се користат каталози за избор на Зенер диода при проектирање на стабилизатор на напон?
16. Која диода работи во подрачјето на пробив?
17. При која поларизација LED диодата емитува светлина?
18. Зошто е потребно да се приклучи отпорник во колото со LED диода?
19. Од што зависи бојата на светлината на LED диодите?
20. Каде се применуваат LED диодите?
21. Кои диоди конвертираат електрична во светлосна енергија?
22. Што е потребно да се приклучи во колото за ограничување на струјата низ LED диодата?
23. Во што се разликуваат фотодиодата и светлечката LED диода?
24. Кои диоди детектираат светлина?
25. Која диода се применува во алармните системи?
26. Каде се применуваат фотодиодите?
27. Кои диоди конвертираат светлосна во електрична енергија?
28. При која поларизација на фотодиодата тече струја на темно кога не паѓа светлина на нејзината површина?
29. Кои логички состојби се дефинирани во дигиталните кола?
30. Која логичка операција се реализира со ИЛИ диодно логичко коло?
31. Со кое диодно логичко коло се реализира логичката операција множење?
32. Кое логичко коло на својот излез дава високо логичко ниво единствено кога двата влезе се на високо логичко ниво?
33. Кое логичко коло на својот излез дава високо логичко ниво доколку барем еден влез се наоѓа на високо логичко ниво?

Модуларна единица

3. Транзистори

Со изучување на содржините од оваа модуларна единица ученикот ќе стекне основни знаења за транзисторските кола и ќе може:

- да одредува поларизација и подрачја на работа на биполарен и униполарен транзистор;
- да дефинира струи и напони во транзисторско коло со биполарен транзистор и со MOSFET;
- да објаснува прекинувачки режим на работа на биполарен транзистор;
- да објаснува прекинувачки режим на работа на MOSFET транзисторот;
- да објаснува работа на инвертор со биполарен и униполарен транзистор;
- да решава едноставни задачи за поларизација на транзисторско коло со биполарен транзистор и со MOSFET;
- да демонстрира испитување функционалност на транзисторско коло по пат на мерења.



Регистар на ознаки и поими:

- 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
- I_{CB0} - струја колектор-база при отворен емитер
- I_{CEO} - струја колектор-емитер при отворена база
- α - коефициент на струјно засилување на транзисторот во спој со заедничка база
- β - коефициент на струјно засилување на транзисторот во спој со заеднички емитер
- I_{CS} - колекторска струја на заситување
- I_{BS} - базна струја на заситување
- $U_{CE(SAT)}$ – напон колектор – емитер во заситување
- $U_{BE(SAT)}$ – напон база – емитер во заситување
- U_{OL} - излезно ниско напонско ниво (логичка нула)
- U_{OH} - излезно високо напонско ниво (логичка единица)
- U_{INL} - влезно ниско напонско ниво (логичка нула)
- U_{INH} - влезно високо напонско ниво (логичка единица)
- U_T - напон на праг на спроведување на униполарен транзистор
- U_{GS} – напон гејт– сорс
- U_{DS} – напон дрејн - сорс
- I_D - струја на дрејнот
- I_G - струја на гејтот
- I_S - струја на сорсот
- U_{PR} - напон на пробив на MOSFET при директна поларизација
- I_{DSS} - струја на дрејнот во режим на заситување
- I_{GSS} - инверзната струја на заситување на спојот гејт-канал
- $U_{DS(SAT)}$ – напон дрејн - сорс во заситување

Стандардно означување на електрични величини (напони и струи)
(Г-голема, М-мала, Б-буква):

- Напојување: ГБ – дупла ГБ (U_{CC}, U_{DD}, \dots)
- Еднаонасочни: ГБ – ГБ ($U_C, U_{BE}, U_{CE}, I_B, I_C, \dots$)
- Моментални вредности: МБ – ГБ со/без (t) ($u_C, u_{BE}, u_{CE}(t), i_B, i_C(t), \dots$)
- Наизменична компонента моментална вредност: МБ – МБ со/без (t) ($u_C, u_{ce}(t), i_b, i_c(t), \dots$)
- Ефективна вредност на наиз. комп.: ГБ – МБ ($U_C, U_{be}, U_{ce}, I_b, I_c, \dots$)
- Макс. вредност (амплитуда) на наиз. комп.: ГБ – МБм ($U_{cm}, U_{bem}, U_{cem}, I_{bm}, I_{cm}, \dots$)

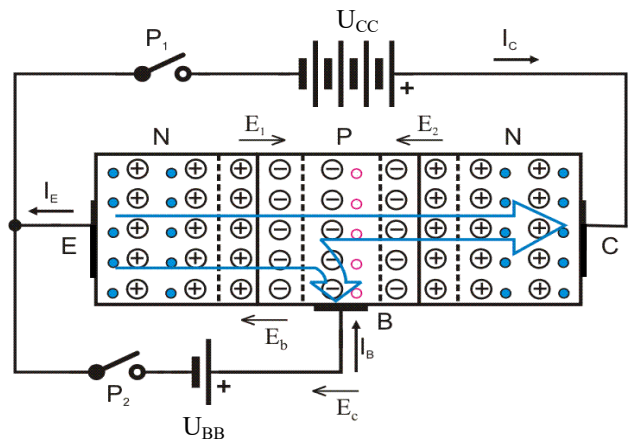
3.1 Поларизација на биполарен транзистор



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: нормално активно подрачје, инверзно активно подрачје, подрачје на заситување и подрачје на исклучување.

Во кое подрачје на работа ќе се најде транзисторот зависи од неговата поларизација. На слика 3. 1 е прикажано колото за поларизација на NPN-транзистор. За поларизација на споевите се потребни два еднонасочни извори. Со изворот U_{BB} , поврзан меѓу базата и емитерот, директно се поларизира емитерскиот спој, а со изворот U_{CC} , врзан помеѓу колекторот и емитерот, кој треба да е поголем од изворот U_{BB} , колекторскиот спој се поларизира инверзно. При ваква поларизација на транзисторот, тој работи во **нормално активно подрачје**.

Со затворање на прекинувачите P_1 и P_2 , еднонасочниот извор U_{BB} 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 (насочено од емитерот кон базата) и го поларизира емитерскиот спој директно. Слободните електрони во голем број преминаваат од регионот на емитерот преку емитерскиот спој и навлегуваат во регионот на базата.



Слика 3.1: NPN-транзистор поларизиран во нормално активно подрачје

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 **со помош на мал напон U_{BB} и малата базна струја I_B се управува голема колекторска струја а со тоа и емитерска, што е суштина на транзисторскиот ефект**. Тоа се случува кога е исполнет условот:

$$U_{CE} \geq U_{BE} \quad U_{BE} \approx (0,6 - 0,7)V \quad \text{кај силициумскиот транзистор.}$$

Бидејќи емитерскиот спој во нормалното активно подрачје работи во режим на релативно големи струи (од редот на mA), напонот на директно поларизиранитот спој база-емитер сосем малку се менува. Низ транзисторот ќе течат струите I_E и I_C со големи јачини при што ќе важи:

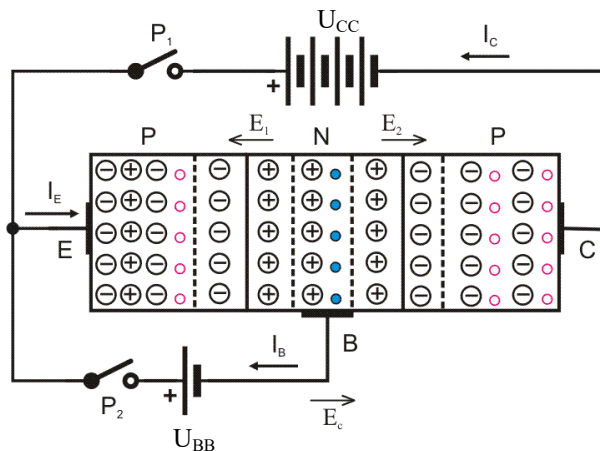
$$I_E = I_B + I_C$$

Ако на сликата 3.1 се промени поларитетот само на напонот база-емитер U_{BB} , 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.

Доколку се промени поларитетот само на напонот за поларизација на колекторскиот спој, транзисторот од нормално активно подрачје преминува во **подрачје на заситување**. Во тоа подрачје 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 3.1, при вклучени прекинувачи P_1 и P_2 , 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.

Истата анализа се спроведува за PNP-транзистор земајќи ги сите напони и струи со спротивна насока.



Слика 3.2: PNP-транзистор поларизиран во нормално активно подрачје

На сликата 3.2 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 $U_{CC} > U_{BB}$ обезбедува поларизација во нормалното активно подрачје. Сега наместо електрони емитерот ќе емитира празнини кои минуваат низ тенката база и преминуваат во колекторот. Тие сега претставуваат основни/главни носители на струјата во транзисторот.

Патем, ако ги споредиме насоката на стрелката од емитерот во шематската ознака на транзисторот и техничките насоки на струите прикажани на слика 3.2, ќе видиме дека се поклопуваат. Сепак, треба 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).

Ако прекинувачот P_2 од слика 3.1 се остави отворен (базата виси), напонот колектор-емитер ќе се распредели меѓу двата споја така што скоро цел ќе се појави на инверзно поларизируваниот спој колектор-база, а мал дел на спојот база-емитер кој ќе биде директно поларизиран поради што ќе тече мала колекторска струја I_{CEO} наречена „струја колектор-емитер при отворена база”.

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

Кога ја дискутиравме 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} , а параметарот β многупати поголем од 1 (50-500), изразот може да се апроксимира:

$$I_C \approx \beta I_B.$$

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 β се нарекува **коэффициент на струјно засилување на транзисторот во спој со заеднички емитер**.

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

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.

Параметарот α се нарекува **коэффициент на струјно засилување на транзисторот во спој со заедничка база**.

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}.$$

Неговата вредност се движи во опсег 0,9-0,995 од причина што колекторската и емитерската струја се идентични.

Врска помеѓу параметрите α и β :

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{\frac{I_C}{I_B}}{\frac{I_C}{I_E}} = \frac{I_E}{I_B} = \frac{I_B + I_C}{I_B} = 1 + \frac{I_C}{I_B} = 1 + \beta. \Rightarrow \alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} \Rightarrow \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Транзисторот во нормално активно подрачје работи како засилувач на струја, напон или моќност.

Во режим на заситување транзисторот се еквивалентира со затворен прекинувач а со отворен во режим на закочување.

За даденото коло на транзисторот на слика 3.3, влезни големини се базната струја I_B и напонот база-емитер U_{BE} , а колекторската струја I_C и напонот колектор-емитер U_{CE} , се излезни големини. Со изворот U_{BB} директно се поларизира емитерскиот спој (влезна контура), додека со отпорникот R_B се одредува големината на базната струја. Вредностите на напонот U_{CE} и колекторската струја се одредуваат со изворот U_{CC} и отпорникот R_C (излезна контура). Анализата на функционирањето на транзисторот ќе се спроведе со следење на промена на напоните помеѓу електродите во зависност од надворешната поларизација.

Со примена на II Кирхофов закон за влезната контура во коло се добива:

$$U_{BB} - R_B I_B - U_{BE} = 0$$

од каде за базната струја се добива изразот:

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B}$$

При директна поларизација на емитерскиот спој важи:

$$U_{BE} \geq U_P \quad \text{при што} \quad U_P \approx 0,7V$$

Во влезното коло ќе тече константна базна струја.

Ако напонот на изворот $U_{CC}=0V$, спојот база-колектор е директно поларизиран, следи:

$$U_{BC} \approx U_P$$

Низ транзисторот протекува струја од влезното коло во насока база-емитер:

$$I_E \approx I_B \quad \text{додека} \quad I_C \approx 0A$$

Зголемувањето на напонот U_{CC} доведува до пораст на напонот U_{CE} , односно, намалување на напонот U_{BC} . Низ транзисторот протекува колекторска струја. Со примена на II Кирхофов закон за излезната контура во коло се добива:

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

од каде за колекторската струја се добива изразот:

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

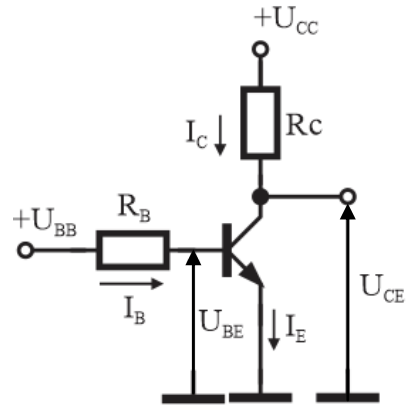
Колекторската струја расте со намалување на директната поларизација на спојот база-колектор U_{BC} . Ова намалување во еден момент доведува до инверзна поларизација на спојот база-колектор.

Колото на транзисторот влегува во нормално активно подрачје и работи како засилувач:

$$U_{BC} \leq 0V \quad U_{CE} \geq U_P = 0,7V$$

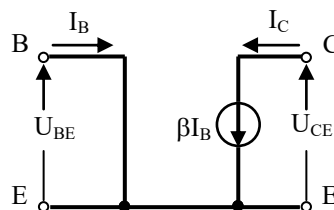
Во колото тече константна колекторска струја:

$$I_C = \beta I_B$$



Слика 3.3: Коло за поларизација NPN-транзистор

На слика 3.4 е прикажана еквивалентна шема на транзисторот во спој со заеднички емитер во активен режим на работа. Бидејќи во овој режим на работа тече константна колекторска струја, во еквивалентната шема таа е прикажана со извор на константна струја βI_B .



Слика 3.4: Еквивалентна шема на транзистор во активен режим на работа

Ако напонот на изворот $U_{BE}=0V$, спојот база-емитер не е директно поларизиран, поради тоа не тече базна струја, исто така и колекторска и емитерска струја. Транзисторот е закочен, односно, се наоѓа во подрачје на исклучување. Низ него течат само инверзните струи на заситување на PN-споевите кои при собна температура може да се занемарат.

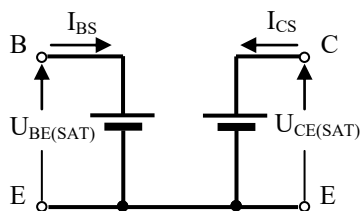
Со зголемување на напонот на изворот U_{BE} до вредност која спојот база-емитер директно го поларизира, низ транзисторот ќе протече базна струја. Со зголемување на напонот U_{BE} се зголемува и базната струја што како последица ја зголемува и колекторската струја. Меѓутоа зголемувањето на колекторската струја предизвикува намалување на напонот U_{CE} бидејќи падот на напонот на отпорникот R_C се зголемува:

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

Со намалување на напонот U_{CE} доаѓа до директна поларизација на спојот база-колектор, струјата I_C нагло се намалува и колото не работи како засилувач. Двата PN-споја се директно поларизирани. Граничната вредност на напонот U_{CE} при која зголемувањето на струјата I_B не предизвикува зголемување на струјата I_C се нарекува напон на заситување $U_{CE(SAT)}$. Во овие услови транзисторот се наоѓа во работен режим заситување. Напонот на заситување има мала вредност:

$$U_{CE(SAT)} \approx 0,2V$$

На слика 3.5 е прикажана еквивалентна шема на транзисторот во спој со заеднички емитер во режим на заситување.



Слика 3.5: Еквивалентна шема на транзистор во режим на заситување

Кога транзисторот работи во **инверзно активно подрачје**, емитерскиот спој е директно а колекторскиот инверзно поларизиран, струјното засилување е многу мало.

3.1.2 Транзистор како прекинувачки елемент



Транзисторот е во подрачје на заситување кога и емитерскиот и колекторскиот PN-спој се директно поларизирани а во подрачје на исклучување кога двата PN-споја се инверзно поларизирани.

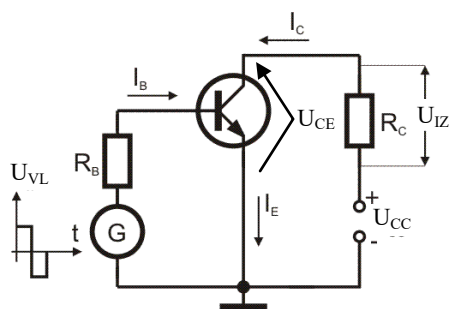
Следејќи го принципот на работа на диодата, видовме дека таа функционира и како прекинувач, отворен кога диодата е инверзно поларизирана, а затворен кога е директно поларизирана. Тоа се должи на карактеристиката на PN-спојот. Сепак, таа не може да изврши една од неопходните функции во дигиталните логички 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.

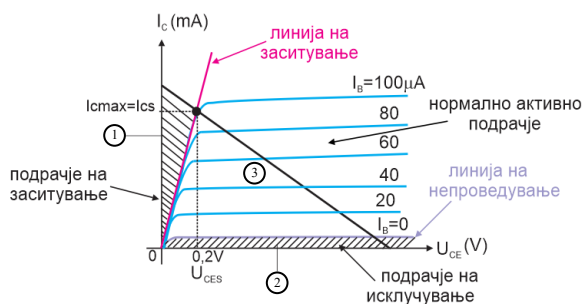
Режимот исклучен се дефинира со инверзна поларизација на емитерскиот и на колекторскиот спој. Во овие услови транзисторот се однесува како **отворен прекинувач**. Подрачјето на заситување е одредено со директна поларизација на двата споја, а транзисторот се однесува како **затворен прекинувач**. Овие две состојби 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.

Во прекинувачките кола вообичаено се користи транзистор во спој со заеднички емитер (слика 3.6). Во колото на базата е приклучен извор на напон со правоаголна форма G , со кој се менува поларизацијата на базата и режимот на работа на транзисторот.

Дијаграмот на излезните карактеристики е даден на слика 3.7 на кој се маркирани три подрачја: 1—подрачје на заситување, 2—подрачје на неспроведување и 3—нормално активно подрачје.



Слика 3.6: Транзистор како прекинувач



Слика 3.7: Дијаграм на работни подрачја

Подрачје на неспроведување-исклучување

При негативен влезен напон и спојот база-емитер е инверзно поларизиран па низ базата течат инверзните струи на заситување на двата PN-споја. Бидејќи тие струи при собна температура се многу мали можат да се занемарат, при што струјата во базата има вредност 0. Со тоа, подрачјето на исклучување на транзисторот во излезните карактеристики е претставено со хоризонталната линија $I_B=0$.

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} .

Состојбата на заситувањето се карактеризира со мали напони $U_{CE(SAT)}$ на колекторот (околу $0,2V$ кај силициумските транзистори). Во графикот на излезните карактеристики таа претставува скоро вертикална линија во која се слеваат хоризонталните линии (означена со линија на заситување на сликата). Во колото ќе протече колекторската струја на заситување:

$$I_{CS} = \frac{U_{CC} - U_{CE(SAT)}}{R_C}$$

Од карактеристиките може да се види и базната струја при која транзисторот бил доведен во подрачјето на заситување. За неа сè уште 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:

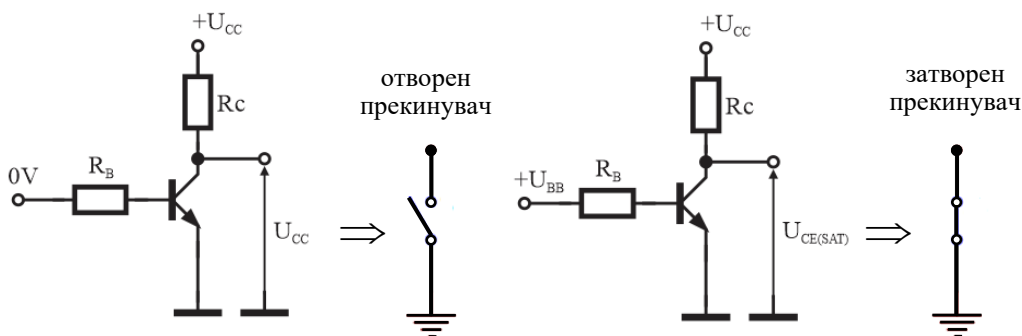
$$I_{BS} \geq \frac{I_{CS}}{\beta}$$

Отпорноста на транзисторот во заситување се пресметува според релацијата:

$$R_{SAT} = \frac{U_{CE(SAT)}}{I_{CS}}$$

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.

На слика 3.8 е прикажана еквиваленцијата на транзисторот како прекинувач.



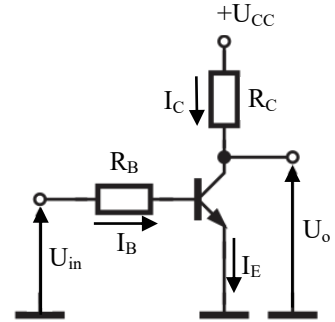
Слика 3.8: Еквиваленција на транзистор како прекинувач

3.1.3 Инвертор со биполарен транзистор

Основната конфигурација на инвертор содржи отпорници R_C и R_B и еден NPN-транзистор (слика 3.9).

Сè додека влезниот напон е помал од напонот на спроведување на емитерскиот спој, транзисторот се наоѓа во подрачје на исклучување, не тече колекторска струја и за излезниот напон се добива $U_O = U_{CC} = U_{OH}$.

Со зголемување на влезниот напон до вредност поголема од напонот на спроведување на емитерскиот спој, транзисторот преминува во спроводна состојба и работи во активен режим на работа. Со понатамошно зголемување на влезниот напон, излезниот напон се намалува сè додека транзисторот не влезе во заситување и за излезниот напон се добива $U_O = U_{CE(SAT)} = U_{OL}$.



Слика 3.9: Коло на инвертор со транзистор

Од спроведената анализа се заклучува дека колото работи како инвертор, односно, при ниво на логичка нула на влез, на излез се добива ниво на логичка единица:

$$U_{in} < 0,7V \Rightarrow U_{OH} = U_{CC}$$

додека при ниво на логичка единица на влез, на излез се добива ниво на логичка нула:

$$U_{in} \geq 0,7V \Rightarrow U_{OL} = U_{CE(SAT)} \approx 0,2V$$

Колекторската струја во транзисторот во услов на заситување се одредува со изразот:

$$I_{CS} = \frac{U_{CC} - U_{CE(SAT)}}{R_C}$$

додека базната струја со:

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

Минималната вредност на напонот на влезна логичка единица се одредува од изразот:

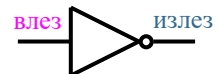
$$U_{INH} - R_B I_B - U_{BE} = 0 \quad U_{INH} = U_{BE} + \frac{R_B}{R_C} \cdot \frac{U_{CC} - U_{CE(SAT)}}{\beta}$$

Типична вредност за овој напон е 2V.

На слика 3.10 се прикажани табела на вистинитост (а) и графички симбол на НЕ логичко коло (б). На високо напонско ниво одговара логичка 1 а на ниско, логичка 0.

влезна состојба	излезна состојба
0	1
1	0

а)



б)

Слика 3.10: НЕ коло а) табела на вистинитост б) графички симбол



Резиме - Поларизација и подрачје на работа на биполарен транзистор

- Транзисторот се наоѓа во нормално активно подрачје при директна поларизација на емитерскиот PN-спој и инверзна поларизација на колекторскиот PN-спој.
- Главни носители на колекторската струја во NPN-транзистор се електроните, додека кај PNP-транзисторот се празнините.
- Зависноста на струите кај транзисторите се претставува со изразот: $I_E = I_B + I_C$.
- Транзисторот во нормално активно подрачје работи како засилувач на струја, напон или моќност.
- Подрачјето на заситување е одредено со директна поларизација на двата споја, а транзисторот се однесува како затворен прекинувач.
- Во подрачјето на заситување напонот на колекторскиот спој има многу мала вредност ($U_{ces} = 0,2 \text{ V}$).
- Низ транзисторот во подрачје на исклучување течат многу мали инверзни струи на заситување кои при собна температура може да се занемарат.
- β претставува коефициент на струјно засилување на транзисторот во спој со заеднички емитер.
- α претставува коефициент на струјно засилување на транзисторот во спој со заедничка база.
- Режимот исклучен се дефинира со инверзна поларизација на емитерскиот и на колекторскиот спој. Во овие услови транзисторот се однесува како отворен прекинувач.
- Подрачјето на заситување е одредено со директна поларизација на двата споја, а транзисторот се однесува како затворен прекинувач.
- Во инверзно активно подрачје на работа на транзисторот, струјното засилување е многу мало.
- Транзисторот работи како инвертор, при ниво на логичка нула на влез, на излез се добива ниво на логичка единица и обратно.
- Колекторската струја се управува со помош на мал влезен напон на изворот за поларизација и малата влезна струја I_B што е суштина на транзисторскиот ефект.

Провери го своето знаење!



I Прашања со заокружување (заокружи ги точните одговори)

1. Кои се главни (мнозински) носители на колекторската струјата во NPN-транзистор?
 - а) Празнини
 - б) Слободни електрони
 - в) Донорски јони.
2. При која поларизација на транзисторот тој работи како засилувач?
 - а) Двата PN-споја директно поларизирани
 - б) Емитерски спој директно а колекторски инверзно поларизиран
 - в) Двата PN-споја инверзно поларизирани.
3. Со кој израз е дадена зависност на струите во транзисторот?
 - а) $I_E = I_B + I_C$
 - б) $I_B = I_E + I_C$
 - в) $I_C = I_B + I_E$.

II Прашања со поврзување

4. Поврзи го вледеењето на транзисторот со подрачјето на работа!

1. Засилувач	а) подрачје на заситување	_____
2. Отворен прекинувач	б) подрачје на исклучување	_____
3. Затворен прекинувач	в) нормално активно подрачје	_____.
5. Поврзи поларизацијата на транзисторот со подрачјето на работа!

1. $U_B = 4V, U_C = 10V, U_E = 8V$	а) подрачје на заситување	_____
2. $U_B = 9V, U_C = 3V, U_E = 6V$	б) подрачје на исклучување	_____
3. $U_B = -1V, U_C = 2V, U_E = 1V$	в) нормално активно подрачје	_____.

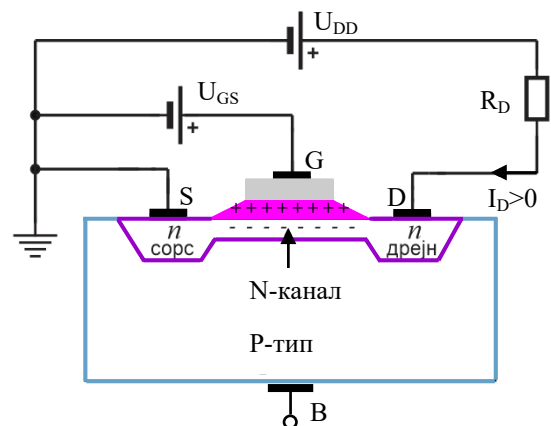
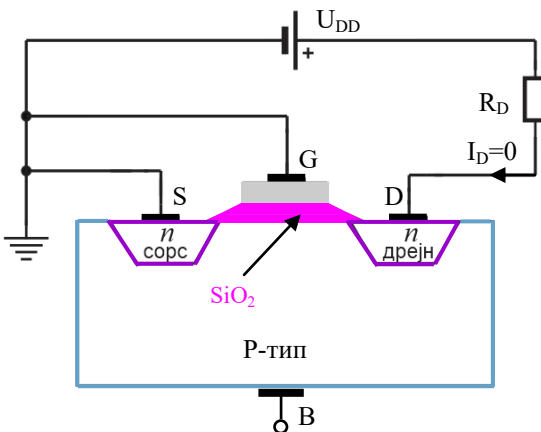
III Прашања со дополнување

6. Кога NPN-транзисторот работи во нормално активно подрачје, потенцијалот на базата е _____ (повисок/понизок) од потенцијалот на емитерот.
7. Транзисторот е во заситување во случај на _____ (директна/инверзна) поларизација на спојот база-емитер и _____ (директна/инверзна) поларизација на спојот база-колектор.
8. Со параметарот β се одредува колку пати струјата на _____ (колекторот/базата) е поголема од струјата на _____ (колекторот/базата).
9. Колекторската струја во транзисторско коло има вредност од _____ mA, при базна струја од 40 μ A и коефициент на струјно засилување 100.
10. Колекторската струја се _____ (зголемува/намалува) со намалување на директната поларизација на спојот база-колектор U_{BC} .



Транзисторот со ефект на поле кој има структура составена од полупроводник врз кој се поставува метален слој, по што и го добил називот MOSFET (Metal – Oxide – Semiconductor FET) може да биде N–канален или P–канален и тие можат да бидат со индуциран или со вграден канал.

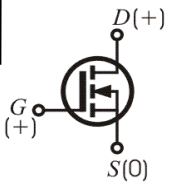
N–канален MOSFET со индуциран канал има основа од силициумски полупроводник од P-тип, со мал процент на акцепторски примеси со дебелина од неколку стотинки од mm. Со технолошка постапка, наречена оксидација, на горната површина на основата се формира тенок слој на изолација од силициум диоксид (стакло) со дебелина од околу 0,1 mm. Во натамошната постапка, на горната површина на основата, прекриена со изолациониот слој, се отвораат два „прозорци“ 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 изолациониот слој, покривајќи го просторот меѓу сорсот и дрејнот, се нанесува метален слој за изводот на гејтот. Основата, исто така, има свој електричен контакт, означен со B. За најголем број дигитални кола, овој извод е поврзан со сорсот и задачата му е да изолира еден транзистор од друг кога се на ист силициумски чип. Освен овој вид со три изводи, се среќаваат и транзистори со четири изводи, каде што изводот B служи како втор гејт. Во оваа структура нема вграден канал меѓу сорсот и дрејнот (слика 3.11). Напонот меѓу гејтот и сорсот е донесен на нула со кратко спојување на гејтот и сорсот. Во оваа состојба не постои начин да протече струја меѓу дрејнот и сорсот поради присуството на двата PN-споја, кои дејствуваат како две спротивно насочени диоди врзани во серија. Кога дрејнот е на позитивен потенцијал во однос на сорсот, меѓу нив тече само инверзната струја на едниот PN-спој и таа е помала од 1nA. Овој тип на MOSFET се вика нормално неспроводен.



Слика 3.11: Структура на N–канален MOSFET

Слика 3.12: Формирање на индуциран канал

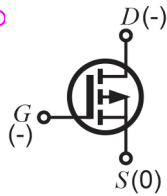
Меѓутоа, ако се донесе доволно голем позитивен напон на гејтот ($U_{GS} > U_T$) (слика 3.12), струја ќе протече во колото меѓу дрејнот и сорсот. Напонот U_T се вика **напон на праг** и за современите MOSFET-и од овој вид се движи во опсегот 0,3 до 0,8V. Струја нема да тече преку изводот на гејтот ($I_G = 0A$) зашто тој е целосно електрично изолиран од останатиот дел.



Позитивниот напон донесен на гејтот ќе предизвика 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 пришто се формира каналот. Овој принцип на работа го одредува MOSFET-от со индуциран канал „во режим на збогатување“.

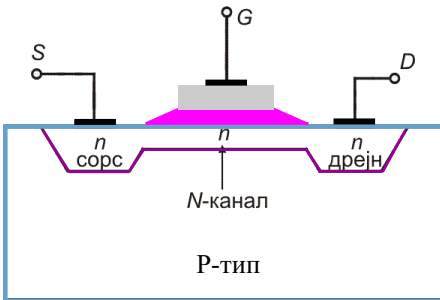
Низ N-канален MOSFET тече струја при $U_{GS} > U_T$ и $U_{DS} > 0$

Низ P-канален MOSFET тече струја при $U_{GS} < 0$ и $U_{DS} < 0$ $|U_{GS}| > U_T$



P-каналниот 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. Струјата низ MOSFET-от и сите напони се со спротивен поларитет во однос на N-каналниот MOSFET, а направената анализа останува непроменета, со тоа што носителите на полнеж се празнините.

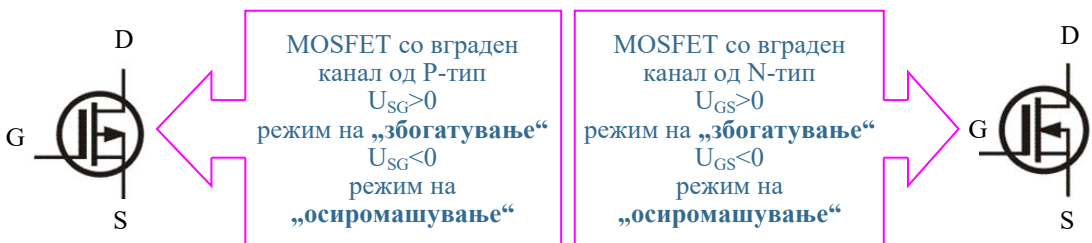
Структурата на MOSFET со вграден канал се разликува по тоа што регионот на спроводниот канал се вградува со додавање примеси во подрачјето под гејтот за време на неговата изработка. Каналот ги поврзува областите на сорсот и на дрејнот и постои без оглед на тоа каква е поларизацијата на транзисторот (слика 3.13).



Слика 3.13: Структура на p-канален MOSFET со вграден канал

Кога ќе се стави овој транзистор во коло, како на слика 3.12, 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-от 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 I_D . Во тој случај, MOSFET-от 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



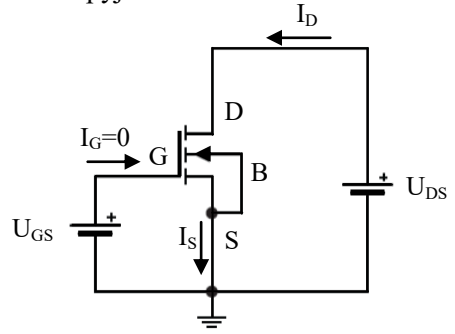
3.2.1 Принцип на работа на MOSFET транзистор

Функционирањето ќе биде објаснето на N-канален MOSFET во спој со заеднички сорс, кој во колото на слика 3.14 е приклучен на извори за напојување U_{GS} и U_{DS} . За напони $U_{GS} > U_T$, каналот помеѓу сорсот и дрејнот се индуцирал, и при $U_{DS} > 0$ обезбедени се услови низ каналот да протече струја.

$I_S = I_D$ бидејќи $I_G = 0$ (гејтот е изолиран).

Со зголемување на напонот на гејтот, струјата на дрејнот I_D , односно I_S , ќе се зголемува. Доколку напонот помеѓу гејтот и сорсот не се менува ($U_{GS} = \text{const.}$), и при мали напони дрејн-сорс (U_{DS}), ширината на каналот е рамномерна, па со зголемување на напонот U_{DS} струјата низ каналот линеарно ќе се зголемува.

Бидејќи транзисторот се однесува како отпорник, ова подрачје на работа се нарекува **омско или линеарно подрачје на работа**.



Слика 3.14: Поларизација на N-канален MOSFET со индуциран канал

Со понатамошно зголемување на напонот U_{DS} се стеснува каналот во близина на дрејнот, неговата отпорност се зголемува со што е оневозможено понатамошно зголемување на струјата на дрејнот, односно таа има константна вредност и не зависи од напонот U_{DS} . Транзисторот влегува во заситување, односно се наоѓа во **подрачје на заситување или подрачје на константни струи** ($I_D = \text{const.}$). Напонот $U_{DS(\text{SAT})}$ се нарекува напон на заситување:

$$U_{DS} = U_{DS(\text{SAT})} = U_{GS} - U_T$$

При напони $U_{GS} < U_T$ во MOSFET-от не е формиран спроводниот канал и не тече струја, $I_D = 0$, транзисторот се наоѓа во **подрачје на запирање**.

Подрачјата на работа на MOSFET-от се прикажани на слика 3.15, на излезната струјно-напонска карактеристика:

$$I_D = f(U_{DS}) / U_{GS} = \text{const.}$$

1. Подрачје на запирање:

$$U_{GS} < U_T, I_G = 0, I_D = 0, I_S = 0$$

2. Линеарно подрачје:

$$U_{GS} > U_T, U_{DS} < U_{GS} - U_T, I_G = 0, I_D = I_S \neq 0$$

3. Подрачје на заситување:

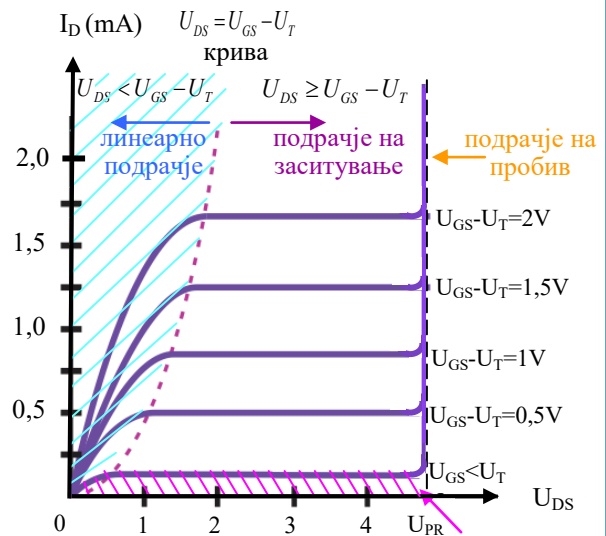
$$U_{GS} > U_T, U_{DS} \geq U_{GS} - U_T, I_G = 0, I_D = I_S = \text{const.}$$

4. Подрачје на пробив:

$$U_{DS} > U_{PR}, U_{GS} = 0$$

(U_{PR} напон на пробив)

Кривата $U_{DS} = U_{GS} - U_T$ е граница помеѓу линеарното омско подрачје и подрачјето на заситување.



Слика 3.15: Излезни карактеристики на N-канален MOSFET со индуциран канал

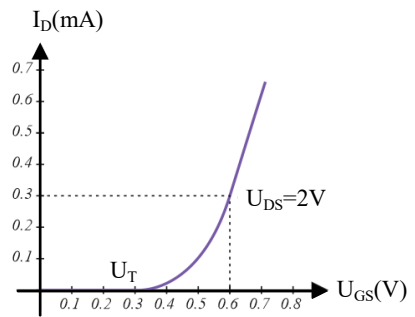
Преносната карактеристика на MOSFET со индуциран канал е прикажана на слика 3.16 и претставува зависност на струјата на дрејнот од напонот помеѓу гејтот и сорсот:

$I_D = f(U_{GS})$ кога $U_{DS} = \text{const}$.

Од графикот може да се забележи дека струјата на дрејнот не тече сè додека не е исполнет условот:

$$U_{GS} > U_T.$$

Со понатамошно зголемување на напонот U_{GS} струјата I_D расте.



Слика 3.16: Преносна карактеристика на N-канален MOSFET со индуциран канал

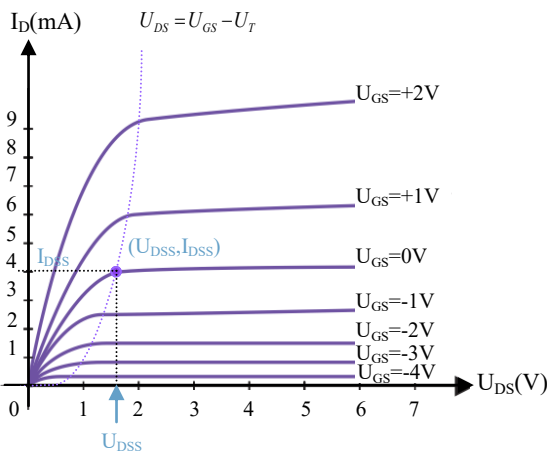
Преносните карактеристики на MOSFET-от се може да се прикажат со релацијата:

$$I_D = K \cdot (U_{GS} - U_T)^2$$

во која струјата на дрејнот I_D е зависна а напонот U_{GS} независна големина, додека K и U_T се константни параметри. Големината на параметарот K (A/V^2) претставува каталожски податок за конкретен MOSFET.

Анализата на функционирањето на P-каналниот MOSFET е идентична, сите напони и струи во дефинираните подрачја на работа се со спротивна насока во однос на N-каналниот MOSFET.

Зависноста на струјата на дрејнот од напонот помеѓу дрејнот и сорсот кај MOSFET со вграден канал е прикажана на слика 3.17. Со оваа зависност се дефинираат излезни карактеристики при константен влезен напон U_{GS} :



Слика 3.17: Излезни карактеристики на N-канален MOSFET со вграден канал

$I_D = f(U_{DS})$ кога $U_{GS} = \text{const}$.

За разлика од MOSFET-от со индуциран канал, во колото тече струјата I_D и при негативни влезни напони U_{GS} . Поради стеснување на каналот, при негативни вредности на напонот U_{GS} , тече струја со мала јачина, додека за позитивни вредности на напонот U_{GS} тече струја со голема јачина поради зголемување на ширината на каналот. Работата во омско подрачје се карактеризира со зависност на струјата на дрејнот од напоните U_{GS} и U_{DS} , додека во подрачјето на заситување таа зависи само од напонот U_{GS} .

Линијата која го раздвојува омското подрачје од подрачјето на заситување кај N-канален MOSFET со вграден канал аналитички се одредува со релацијата:

$$U_{DS} = U_{GS} - U_T.$$

Со точката (U_{DSS}, I_{DSS}) , која се наоѓа на кривата $U_{GS} = 0V$, се одредува параметарот I_{DSS} кој претставува најзначајниот статички параметар на MOSFET-от. Се дефинира како струја на дрејнот која протекува низ MOSFET-от кога каналот е најширок, при $U_{GS} = 0V$. Неговата вредност зависи од димензиите на каналот и неговата спроводливост, односно концентрацијата на примеси во полупроводникот.

Со статичкиот параметар U_P (*pinch-off voltage*) се дефинира напонот при кој униполарниот транзистор преминува од линеарното подрачје во подрачје на заситување.

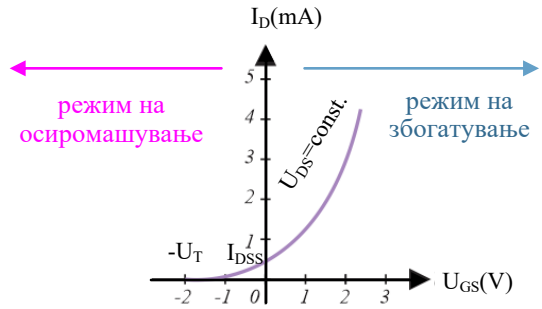
Статичкиот параметар I_{GSS} се нарекува инверзната струја на заситување на спојот гејт-канал, и претставува струја на гејтот при краток спој дрејн-сорс ($U_{DS}=0V$). Овој параметар е од посебно значење при одредувањето на влезната отпорност на MOSFET-от. Големината на струјата I_{GSS} зависи од температурата. При собна температура има вредност околу десетина nA, а влезната отпорност е од редот стотина mΩ.

Преносната карактеристика на MOSFET со вграден канал (слика 3.18) претставува зависност на струјата на дрејнот I_D од напонот помеѓу гејтот и сорсот U_{GS} при константен напон помеѓу дрејнот и сорсот U_{DS} :

$$I_D = f(U_{GS}) \text{ кога } U_{DS} = \text{const.}$$

Од графикот може да се заклучи дека каналот е спроводен и при $U_{GS}=0$ а напонот на проведување $U_T < 0$.

I_{DSS} претставува струја на дрејнот во режим на заситување при $U_{GS}=0$.



Слика 3.18: Преносна карактеристика на N-канален MOSFET со вграден канал

Преносната карактеристика на MOSFET-от може да се прикаже со следната релација:

$$I_D = I_{DSS} \cdot \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_T}\right)^2$$

во која струјата на дрејнот I_D и напонот гејт-сорс U_{GS} се зависно променливи големини, додека I_{DSS} и U_T се константни параметри на конкретен MOSFET.

Со оваа релација се претставува струјата на дрејнот кога MOSFET-от работи во режим на константни струи (заситување).

Во N-канален MOSFET со вграден канал тече струја во двата режима, и во осиромашување и во збогатување, додека N-каналниот MOSFET со индуциран канал е спроводен само во режим на збогатување.

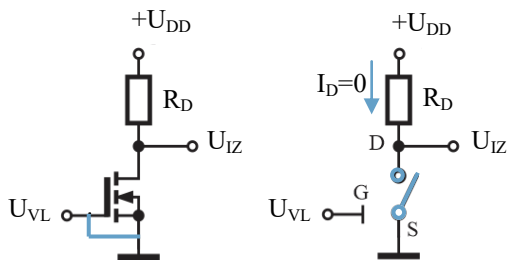
Во табела 3.1 се дадени условите за напоните U_{GS} и U_T при кои MOSFET-от би работел во режим на осиромашување и збогатување.

Табела 3.1: Услов за работа на MOSFET во режим на осиромашување и збогатување

Режим на работа на MOSFET-от	N-канален MOSFET		P-канален MOSFET	
режим на осиромашување (MOSFET со вграден канал)	$U_{GS} < 0$	$U_T \leq 0$	$U_{GS} > 0$	$U_T \geq 0$
режим на збогатување (MOSFET со индуциран канал)	$U_{GS} > 0$	$U_T > 0$	$U_{GS} < 0$	$U_T < 0$

3.2.2 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 една од двете диоди (PN-споја) е инверзно поларизирана. Во овој режим на работа, MOSFET-от се однесува како отворен прекинувач меѓу дрејнот и сорсот (слика 3.19).



Слика 3.19: MOSFET како отворен прекинувач

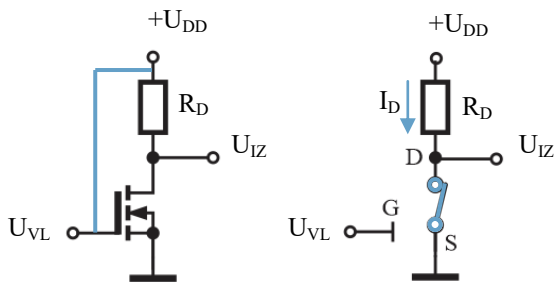
- Влезот кусо се спојува со масата.
- $U_{VL}=0V$.
- $U_{GS}<U_T$.
- MOSFET-от е во подрачје на запирање, заочување.
- $I_D=0A$, во колото не тече струја.
- $U_{IZ}=U_{DS}=U_{DD}$, „1”
- MOSFET-от се еквивалентира со отворен прекинувач.

Меѓутоа, со донесување на позитивен напон на гејтот U_{GS} , којшто е поголем од напонот U_T , доаѓа до индуцирање на спроводен канал и течење на струја меѓу дрејнот и сорсот. MOSFET-от при ваква поларизација на гејтот може да работи во:

- а) **подрачје на заситување;**
- б) **омско подрачје.**

MOSFET-от работи во омско подрачје кога е исполнет условот $U_{DS}<U_{GS}-U_T$. MOSFET-от во тоа подрачје се еквивалентира со затворен прекинувач (слика 3.20). Вредноста на струјата I_D зависи од напонот на изворот U_{DD} и отпорникот R_D .

- Влезот кусо се спојува со изворот U_{DD} .
- $U_{VL}>0V$.
- $U_{GS}>U_T$.
- MOSFET-от е во подрачје на заситување.
- $I_D=U_{DD}/R_D$.
- $U_{DS}=0V$.
- $U_{IZ}=U_{DS}$, „0”
- MOSFET-от се еквивалентира со затворен прекинувач.



Слика 3.20: MOSFET како затворен прекинувач

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

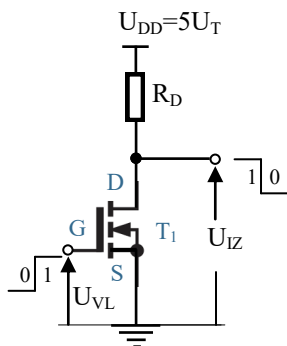
$$U_{DS} = U_{DD} - R_D I_D.$$

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

Во карактеристиките на слика 3.15 јасно се разграничени омското и подрачјето на заситување на MOSFET-от.

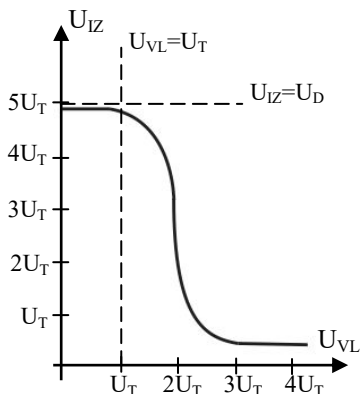
3.2.3 Инвертор со униполарен транзистор

За изработка на инвертори со униполарни транзистори се употребуваат N-канални MOSFET транзистори (слика 3.21), поради поголемата брзина при премин од едно во друго подрачје, во однос на P-каналните MOSFET-и.



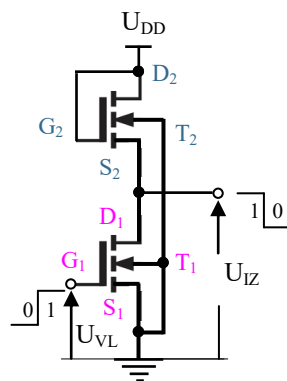
Слика 3.21: Инвертор со N-канален MOSFET

При влезни напони $U_{VL} < U_T$ (ниско влезно напонско ниво), транзисторот T_1 е закочен и не спроведува, излезниот напон ќе биде еднаков со напонот U_{DD} , што значи дека на излез се добива високо напонско ниво. За влезни напони $U_T < U_{VL} < U_{DD}$ (високо влезно напонско ниво), транзисторот T_1 спроведува во омското подрачје, на излез се добива ниско напонско ниво.



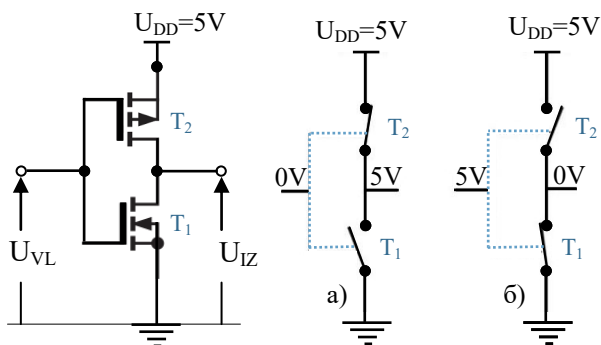
Слика 3.22: Преносна карактеристика на инвертор

На сликата 3.22 е прикажана преносна карактеристика на инвертор. Друга реализација на инвертор е прикажана на слика 3.23. Транзисторот T_1 дејствува како активен елемент, додека транзисторот T_2 има улога на пасивен елемент, потрошувач на транзисторот T_1 . Влезниот сигнал се доведува на управувачката електрода G_1 на транзисторот T_1 . Излезниот сигнал се добива на дрејнтот на истиот транзистор. Управувачката електрода G_2 на транзисторот T_2 е кратко споена со дрејнтот D_2 на истиот транзистор. Бидејќи дрејнтот D_1 е споен со сорсот S_2 , тие две N-подрачја може да се реализираат како едно заедничко подрачје што е причина инверторите да се реализираат со MOSFET-и со индуциран канал. За влезни напони помали од прагот на спроведување U_T на MOSFET-от (логичко ниско ниво „0“), транзисторот T_1 е закочен и не спроведува, излезниот напон ќе биде еднаков со напонот $U_{DD} - U_{GS2}$, притоа се добива $U_{IZ} = U_{DD}$ (логичка „1“).



Слика 3.23: Инвертор со два N-канални MOSFET-а

За влезни напони $U_T < U_{VL} < U_{DD}$ (логичко високо ниво „1“), транзисторот T_1 спроведува во омското подрачје, на излез се добива логичка „0“.



Слика 3.24: CMOS инвертор

CMOS инверторот (слика 3.24) е составен од еден N-канален и еден P-канален MOSFET кои имаат иста вредност на U_T но со спротивен знак. Анализа на колото:

1. $U_{VL} = 0V$, T_1 исклучен, T_2 во омско подрачје, $U_{IZ} = U_{DD} = 5V$ (слика 3.24 а).
2. $U_{VL} = U_{DD}$, T_1 во омско подрачје, T_2 исклучен, $U_{IZ} = 0V$ (слика 3.24 б).

Преминот од една состојба во друга е побрз во однос на претходните изведби на инвертор.



Резиме - Поларизација и подрачје на работа на MOSFET транзистор

- Во MOSFET гејтот е изолиран и не тече струја I_G .
- Низ N-канален MOSFET тече струја при $U_{GS} > U_T$ и $U_{DS} > 0$.
- Низ P-канален MOSFET тече струја при $U_{GS} < U_T$ и $U_{DS} < 0$.
- Каналот помеѓу сорсот и дрејнот се индуцира за напони $U_{GS} > U_T$.
- Во секое подрачје на работа $I_G = 0$ бидејќи гејтот е изолиран.
- Во подрачје на заситување струјата I_D не зависи од напонот U_{DS} .
- MOSFET-от е напонски управувана полупроводничка електронска компонента.
- 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.
- MOSFET-от работи во омско подрачје кога е исполнет условот $U_{DS} < U_{GS} - U_T$.
- MOSFET-от е во заситување кога е исполнет условот $U_{DS} > U_{GS} - U_T$.
- Во линеарното подрачје на работа на MOSFET-от струјата I_D линеарно се зголемува со порастот на напонот U_{DS} .
- Во подрачје на запирање низ MOSFET-от не тече струја.
- Со $U_{DS(SAT)}$ се означува напонот помеѓу дрејнот и сорсот кога транзисторот се наоѓа во заситување.
- За влезни напони помали од прагот на спроведување U_T на MOSFET-от, влезот се наоѓа на ниско логичко ниво „0“, излезот се наоѓа на логичка „1“.
- I_{DSS} претставува струја на дрејнот во режим на заситување при $U_{GS} = 0$.

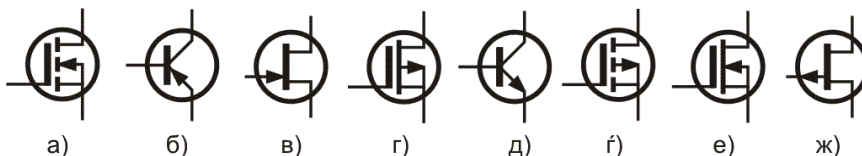


I Прашања со заокружување (заокружи ги точните одговори)

- Кои се главни носители на струјата на дрејнот во N-канален MOSFET?
 - Празнини
 - Слободни електрони
 - Неутрони.
- Во кое подрачје на работа MOSFET-от се однесува како отпорник?
 - Линеарно подрачје
 - Подрачје на заситување
 - Подрачје на запирање.
- Со кој израз е исполет условот за создавање на каналот во N-канален MOSFET со индуциран канал?
 - $U_{GS}=0V$
 - $U_{GS}>U_T$
 - $U_{GS}<U_T$.

II Прашања со поврзување

- Поврзи ги графичките симболи со видовите транзистори!



- NPN-транзистор _____
- PNP-транзистор _____
- FET од N-тип _____
- FET од P-тип _____
- N-канален MOSFET со индуциран канал _____
- P-канален MOSFET со индуциран канал _____
- N-канален MOSFET со вграден канал _____
- P-канален MOSFET со вграден канал _____

III Прашања со дополнување

- При $U_{DS} > U_{GS} - U_T$, MOSFET-от работи во _____ режим.
- Со релацијата $I_D = f(U_{DS})$ за $U_{GS} = \text{const.}$ дефинирана е _____ карактеристика на MOSFET во спој со заеднички сорс.
- Во подрачје на заситување струјата на дрејнот _____ (зависи/ не зависи) од U_{DS} .
- При $U_{GS} < U_T$, N-каналниот MOSFET во прекинувачки режим на работа се еквивалентира со _____ (отворен/затворен) прекинувач.
- За логичко ниво „1“ на влез на инвертор со униполарен транзистор, на излез се добива логичко ниво _____ („0“/„1“).

Прашања за утврдување на знаењата од МЕ 3

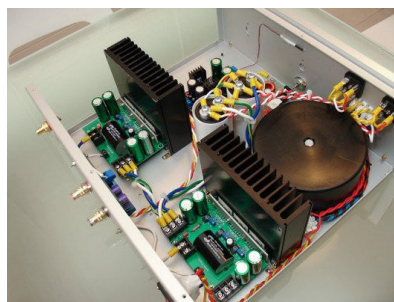
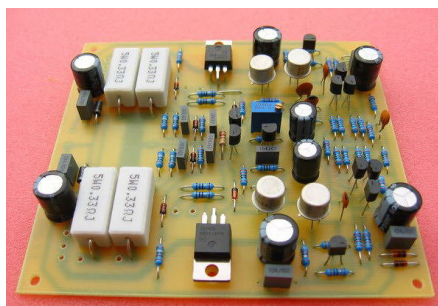
1. Дефинирај го поимот транзистор.
2. Какви видови транзистори постојат?
3. Нацртај ги шематските ознаки на видовите транзистори.
4. Колку електроди има транзисторот и како се нарекуваат?
5. Како се создава струјата при поларизацијата на NPN-транзисторот?
6. Каква насока имаат струите во PNP-транзисторот во однос на NPN-транзисторот?
7. Во кои подрачја работи транзисторот?
8. Колку PN-споја има транзисторот и како се нарекуваат?
9. Кои носители ја создаваат струјата во NPN-транзисторот?
10. Како се дефинира струјата I_{CE0} во транзисторот?
11. Дефинирај ја струјата I_{CB0} .
12. Која е основната релација за транзисторот според „Еберс-Молов модел“?
13. Која е релацијата помеѓу базната, емитерската и колекторската струја во транзисторот?
14. Дефинирај ги коефициентите α и β .
15. Како се дефинира излезна, влезна преносна и директно преносна карактеристика на биполарен транзистор?
16. Како треба да се поларизираат PN-споевите на транзисторот за да тој работи во нормално активно подрачје?
17. При кој режим на работа транзисторот функционира како засилувач?
18. Во кои режими на работа може да се најде транзисторот како прекинувач?
19. Каква е поларизацијата на емитерскиот и колекторскиот спој на транзисторот кога е во заситување?
20. Колкава е излезната струја кога транзисторот е во прекин?
21. Означи ја областа на непроведување во излезната карактеристика на транзисторот.
22. Во кое подрачје на работа се наоѓа транзисторот кога работи како засилувач?
23. Во кое подрачје на работа се наоѓа транзисторот кога се еквивалентира со затворен прекинувач?
24. Во кое подрачје на работа се наоѓа транзисторот кога се еквивалентира со отворен прекинувач?
25. Во кој режим на работа транзисторот се однесува како затворен прекинувач?
26. Кои видови на MOSFET постојат?
27. Објасни го процесот на формирање на индуцираниот канал со постапка на збогатување во MOSFET.
28. Кои се најзначајните статички карактеристики на MOSFET?
29. При кои напони U_{GS} , низ MOSFET со индуциран канал протекува струја?
30. Која е разликата помеѓу MOSFET со индуциран и со вграден канал?
31. Дали при $U_{GS} = 0$ тече струја низ MOSFET со вграден канал?
32. Објасни како се прекинува струјата низ каналот во MOSFET со индуциран канал.
33. Објасни како се прекинува струјата низ каналот во MOSFET со вграден канал?
34. При кои влезни напони на инверторот со N-канален MOSFET на излез се добива логичка „1“.
35. Во кои подрачја на работа се наоѓа N-каналниот MOSFET кога работи како прекинувач?

Модуларна единица

4. Засилувачи

Со изучување на содржините од оваа модуларна единица ученикот ќе стекне основни знаења за засилувачите и ќе може:

- да препознава основни карактеристики на засилувачи;
- да објаснува принцип на работа на засилувачи со биполарни транзистори за режим на мали сигнали и ниски фреквенции (линеарен модел во спој со заеднички емитер, база и колектор);
- да објаснува принцип на работа на засилувачи со униполарни MOSFET транзистори за режим на мали сигнали и ниски фреквенции (линеарен модел во спој со заеднички сорс, дрејн и гејт);
- да анализира однесување на различни конфигурации на засилувачки степени (Дарлингтонов спој, диференцијален засилувач, каскадна врска на засилувачи, спреги кај засилувачите);
- да реализира линеарен засилувачки степен.



Регистар на ознаки и поими:

- A_U - напонско засилување, однос на излезниот и влезниот напон.
 - A_I - струјно засилување, однос на излезната и влезната струја.
 - A_P - засилување на моќност, однос на излезната и влезната моќност (или производ на напонското и струјното засилување).
 - R_{VL} - влезна отпорност, однос на влезниот напон и влезната струја.
 - R_{IZ} - излезна отпорност, однос на излезниот напон на празен од (кога потрошувачот не е приклучен) и излезната струја на краток спој (кога излезните приклучоци се краткоспоени).
 - f_g - горна гранична фреквенција (фреквенција за која засилувањето опаѓа за 3dB).
 - f_d - долна гранична фреквенција (фреквенција за која засилувањето опаѓа за 3dB).
 - B - пропусен опсег на засилувачот (разлика на горната и долната гранична фреквенција).
 - h_i - параметар на транзисторот кој претставува влезна отпорност при краткоспоен излез.
 - h_f - параметар на транзисторот кој претставува коефициент на струјното засилување при краткоспоено излезно коло.
 - h_r - параметар на транзисторот кој претставува коефициент на напонска повратна спрега при отворено влезно коло.
 - h_o - параметар на транзисторот кој претставува излезна спроводност.
-
- **Засилувач** - електронски склоп кој има задача да го засили сигналот што се приклучува на неговиот влез за да на неговиот излез се добие сигнал што има ист облик како влезниот сигнал, но со поголема амплитуда.
 - **Четворопол** - мрежа со четири краја со четири променливи од кои два краја се влезни и два излезни.
 - **Засилување** - мала промена на влезниот напон и струја предизвикува голема промена на излезниот напон, што се толкува како засилен влезен напон или струја.
 - **Амплитудно-фреквенциска карактеристика** - зависност на засилувањето од фреквенцијата
 - **Фазно-фреквенциска карактеристика** - покажува како се менува фазното поместување на излезниот во однос на влезниот сигнал со промена на фреквенцијата.
 - **Изобличување на сигналот** - несакана промена на брановата форма на сигналот.
 - **Амплитудни изоблучувања** - нееднакво засилување на сигналот во различни полупериоди.
 - **Фреквентни изобличувања** - нееднакво засилување на сигналот на различни фреквенции.
 - **Фазни изобличувања** - се појавуваат при нелинеарна промена на фазната карактеристика на засилувачот од фреквенцијата.

4.1 Блок-шема на засилувач

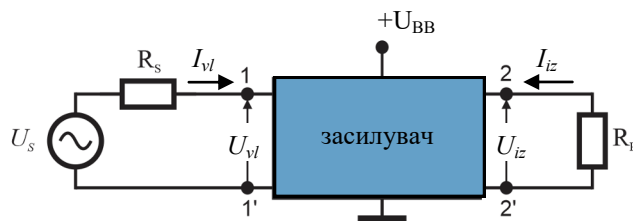


Биполарниот транзистор во електричните кола се применува како засилувач или прекинувач. Кога работи како засилувач се наоѓа во нормално активно подрачје, а како прекинувач во две подрачја: заситување (затворен прекинувач) и исклучување (отворен прекинувач).

Многу често е потребно да се засили амплитудата или моќноста на електричните сигнали. **Засилувачот е електронски склоп кој има задача да го засили сигналот што се приклучува на неговиот влез и на неговиот излез да се добие сигнал што има ист облик како влезниот сигнал, но со поголема амплитуда.** 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. Математички гледано, засилувачот го пресликува влезниот сигнал врз потрошувачот множејќи го со некоја (константна) вредност. Таа вредност всушност претставува засилувањето на засилувачот.

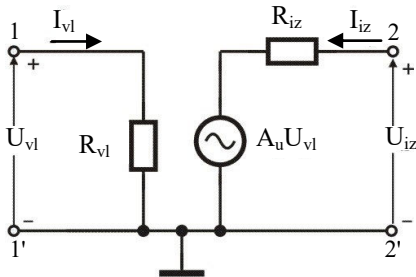
Засилувачите можат да бидат едноставни сколпови со еден транзистор, но и сложени структури од голем број транзистори, кондензатори, калеми и други компоненти. Сепак, нивното поведење во однос на сигналот може да се прикаже поедноставено со помош на едноставно електрично коло наречено четворопол. Четворополот има четири краја со четири променливи од кои два се влезни (1-1') и два излезни (2-2'). Се користи како заменска шема на дел од колото и дава прегледна слика на сложеното коло. Компонентите од кои е составен четворополот всушност се параметри на засилувачот. На слика 4.1 е претставен засилувач како линеарен четворопол, на чии влезни краеви е приклучен изворот на сигнал U_s со неговата внатрешна отпорност R_s и на парот излезни краеви потрошувачот прикажан со отпорникот R_p . Засилувачот се напојува со еднонасочен извор на напон $+U_{BB}$. На влезот на засилувачот се означени ефективните вредности на наизменичниот влезен напон U_{vl} и влезна струја I_{vl} , а на излез ефективните вредности на излезниот напон U_{iz} и излезната струја I_{iz} .



Слика 4.1: Блок-шема на засилувач

4.2 Параметри на засилувач

Основни параметри на транзисторот се засилување, влезна и излезна отпорност. Засилувачот од слика 4.1 се еквивалентира со шемата прикажана на слика 4.2.



Слика 4.2: Еквивалентна шема на засилувач

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

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

Во зависност од влезниот сигнал, засилувањето може да биде напонско, струјно или засилување на моќност.

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

$$A_u = \frac{U_{iz}}{U_{vl}}$$

Кога напонското засилување е позитивно, тоа значи дека излезниот напон е со ист поларитет со влезниот, односно излезниот напон е во фаза со влезниот. Ако напонското засилување е негативно, тоа значи дека напоните се во против фаза.

Струјно засилување се дефинира како однос на излезната и влезната струја:

$$A_i = \frac{I_{iz}}{I_{vl}}$$

Засилување на моќност се дефинира како количник на моќностите на наизменичните сигнали на излезот P_{iz} и на влезот P_{vl} на засилувачот:

$$A_p = \frac{P_{iz}}{P_{vl}} = \frac{U_{iz} \cdot I_{iz}}{U_{vl} \cdot I_{vl}} = |A_u \cdot A_i|$$

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

$$A_u (dB) = 20 \log \left| \frac{U_{iz}}{U_{vl}} \right| \quad A_i (dB) = 20 \log \left| \frac{I_{iz}}{I_{vl}} \right| \quad A_p (dB) = 10 \log \left| \frac{P_{iz}}{P_{vl}} \right|$$

Коефициентот на корисното дејство η 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:

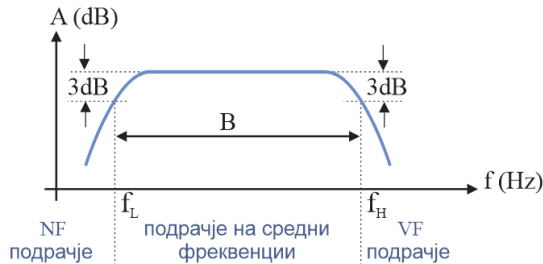
$$\eta = \left| \frac{P_k}{P_o} \right| \cdot 100(\%)$$

Излезната отпорност се дефинира со:

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

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

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 4.3).



Слика 4.3: Амплитудна карактеристика на засилувач

Реалниот 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 .

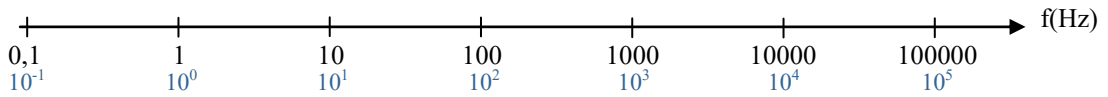
Разликата меѓу горната и долната гранична фреквенција:

$$B = f_g - f_d$$

се вика **пропусен опсег B** на засилувачот. Пропусниот опсег претставува интервал на фреквенции при кои амплитудната карактеристика на засилувачот е константна, во рамки на отстапување од 3dB.

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 изобличена. Тоа ние го чувствуваме како „сиромашен звук“ бидејќи низ засилувачот нема да бидат засилени ниту ниските фреквенции (басовите) ниту високите фреквенции (чинелите).

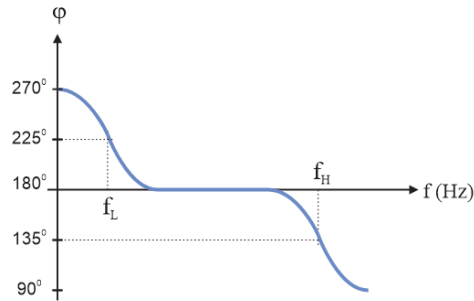
Вообичаено во фреквентните карактеристики фреквенцијата се прикажува на логаритамска скала (оска). Се користи логаритамска скала од причина што е потребно да се прикаже широк опсег на фреквенции. На слика 4.4 е прикажана логаритамска скала за претставување на фреквенцијата во фреквентните карактеристики на засилувачот.



Слика 4.4: Логаритамска скала

Засилувањето се претставува во dB (децибел) кој се користи како мерна единица за изразување на логаритамски однос.

Фазно-фреквенциска карактеристика (или само фазна карактеристика) (слика 4.5) покажува како се менува фазното поместување на излезниот во однос на влезниот сигнал со промена на фреквенцијата.



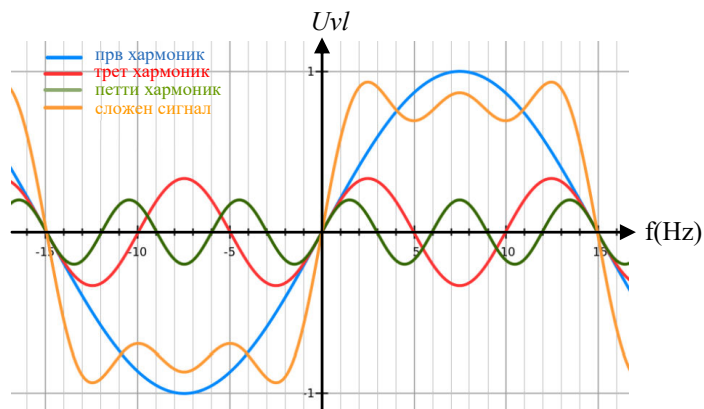
Слика 4.5: Фазна карактеристика на засилувач

Се забележува намалување на фазната разлика за високи фреквенции и зголемување за ниските фреквенции. За горната гранична фреквенција фазната разлика се намалува за 45° , а за долната се зголемува за 45° . Со зголемувањето и со намалувањето на фазната разлика во однос на 180° се јавуваат фазни изобличувања на сигналот.

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

Основните засилувачи вообичаено фазно го поместуваат сигналот на излез за 180° во однос на влезниот (противфаза) или немаат фазно поместување (во фаза).

Ако на влез на засилувач, кој не внесува фазно изобличување, се доведе сигнал со сложен бранов облик (слика 4.6) кој се состои од прв, трет, петти хармоник, на неговиот излез се добива напон со ист облик како и влезниот, но засилен, притоа фазното поместување на сите хармоници е 0° .

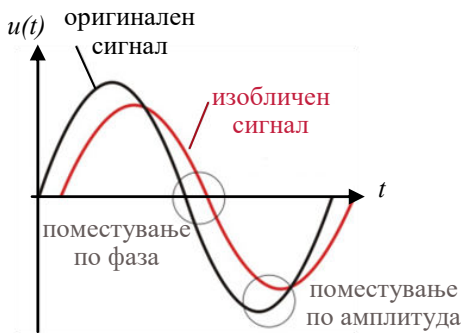


Слика 4.6: Хармоници на сложен влезен напон

4.4 Изобличувања кај засилувач

Изобличување на сигналот се дефинира како несакана промена на неговата брановата форма. Разликуваме два случаја на изобличување на сигналот на излез од засилувачот: без генерирани нови компоненти и со генерирани нови компоненти кои не биле присутни на влезот. Во првиот случај станува збор за линеарни, а во вториот за нелинеарни изобличувања на сигналот.

Линеарните изобличувања не генерираат нови фреквенции, но ефективно ја менуваат амплитудата и временскиот однос помеѓу постоечките фреквенциски компоненти во сигналот и притоа тој поприма нов и различен облик. Линеарните изобличувања можат да бидат амплитудни и фазни (слика 4.7).

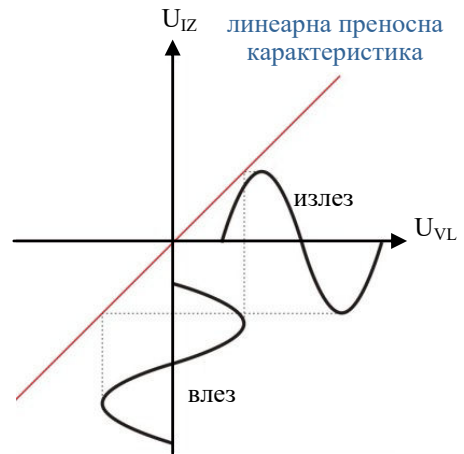


Слика 4.7: Линеарни изобличувања

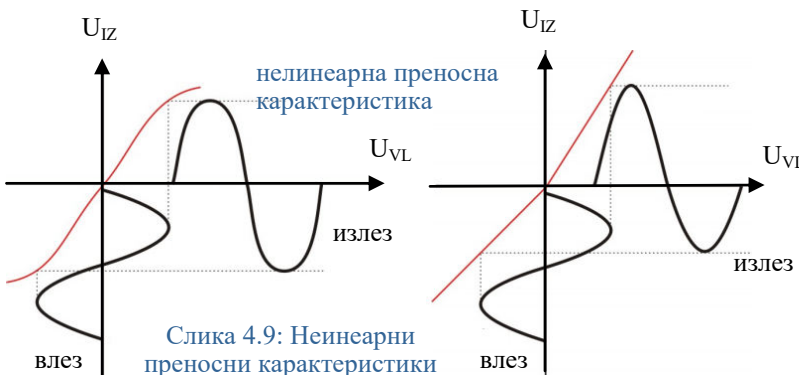
Амплитудните изобличувања се појавуваат при промена на засилувањето со промена на фреквенцијата. Во аудиозасилувачите и звучниците овие изобличувања се неизбежни, а се појавуваат и во случаи на ограничување или промена на фреквенциската карактеристика на аудиоуредите, односно аудиокомпонентите. Амплитудните изобличувања ја претставуваат фреквенциската, односно амплитудната карактеристика на засилувачот, зависност на засилувањето од фреквенцијата на сигналот.

Фазните изобличувања се појавуваат при нелинеарна промена на фазната карактеристика на засилувачот од фреквенцијата. Фазните изобличувања вообичаено се јавуваат при вклучување на реактивни елементи во колото на засилувачот со цел ограничување или моделирање на фреквенциската карактеристика. Најголеми промени на фазниот агол има во околината на граничните фреквенции. Фазните изобличувања се нарекуваат и временски изобличувања.

Изобличување на сигнал не се јавува кај уреди со линеарна преносна карактеристика. Се добива излезен сигнал со иста бранова форма, односно $U_{IZ} = k \cdot U_{VL}$ (слика 4.8).



Слика 4.8: Линеарна преносна карактеристика



Слика 4.9: Нелинеарни преносни карактеристики

На слика 4.9 се прикажани нелинеарни изобличувања на излезниот сигнал поради нелинеарна преносна карактеристика на уредот.

Доколку не постои директна пропорционалност помеѓу влезните и излезните големини на засилувачот, станува збор за нелинеарни уреди, во кои се јавуваат **нелинеарни изобличувања** кои можат да бидат хармониски и нехармониски. Основна карактеристика на нелинеарните изобличувања е појава на нови излезни компоненти кои не постојат во спектарот на влезниот сигнал.

Хармониски изобличувања се јавуваат кога нелинеарен елемент се побудува со еден синусен сигнал. При побуда со синусен сигнал:

$$u_{vl}(t) = U_m \sin \omega t$$

на излез покрај основната фреквенција се појавуваат компоненти со фреквенции 2ω , 3ω , 4ω , итн. Компонентата со двојно поголема фреквенција 2ω се нарекува втор хармоник, компонентата со фреквенција 3ω , трет хармоник итн.

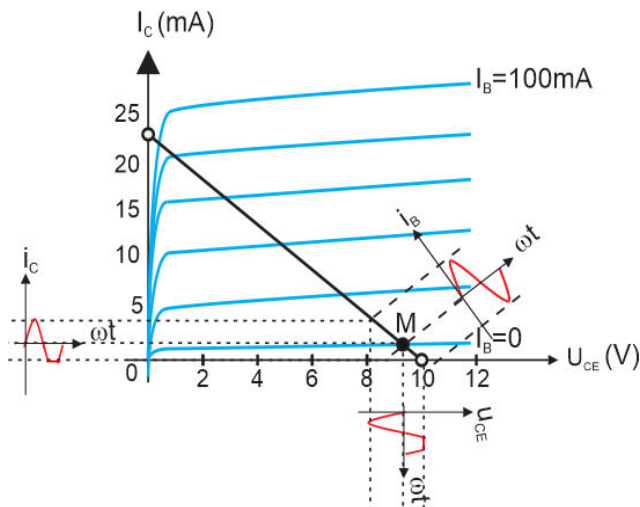
Инструментот за мерење на изобличувања се нарекува фреквенциски анализатор. Доколку се познати компонентите на излез, може да се одреди колкаво изобличување внесува нелинеарниот елемент, односно засилувачот.

Нехармонични изобличувања се јавуваат кога нелинеарен елемент се побуди со два или повеќе сигнали. При побуден напон:

$$u_{vl}(t) = U_{m1} \sin \omega_1 t + U_{m2} \sin \omega_2 t$$

на излез покрај основната фреквенција се појавуваат компоненти со фреквенции $2\omega_1$, $2\omega_2$, $\omega_1 + \omega_2$, $\omega_1 - \omega_2$, $2\omega_1 + \omega_2$, $\omega_1 + 2\omega_2$, $2\omega_1 - \omega_2$, $\omega_1 - 2\omega_2$, итн. Добиените компоненти се резултат на мешање или интермодулација на двата сигнала.

Изобличувања кај засилувачите се јавуваат од причина што нивната преносна карактеристика не е потполно линеарна. Исто така, тие се јавуваат и поради лошиот избор на работната точка (што ќе биде објаснето во понатамошниот текст) (слика 4.10).



Слика 4.10: Изобличувања поради лош избор на положба на работна точка

Поради лошиот избор на работната точка М од графичкиот приказ е видно отсекувањето на едната полупериода на излезниот напон u_{CE} и излезната струја i_C . Со правилен избор на положбата на работната точка не се јавуваат изобличувања на излезниот напон и струја на засилувачот.

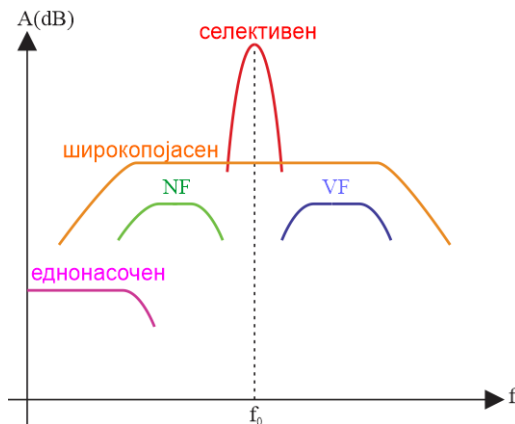
4.5 Поделба на засилувачите

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 на големите на крајот.

Според видот на засилувањето има засилувачи на напон, засилувачи на струја и засилувачи на моќност. Во една 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 4.11 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 4.11: Идеални амплитудно-фреквенциски карактеристики на разни засилувачи

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

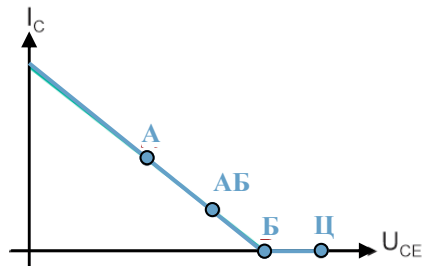
Широкопојасните засилувачи можат да засилат сигнали во широк фреквенциски опсег. Такви се засилувачите на видеосигнали (т.н. видеозасилувачи) или засилувачите на импулсни сигнали (т.н. импулсни засилувачи).

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.

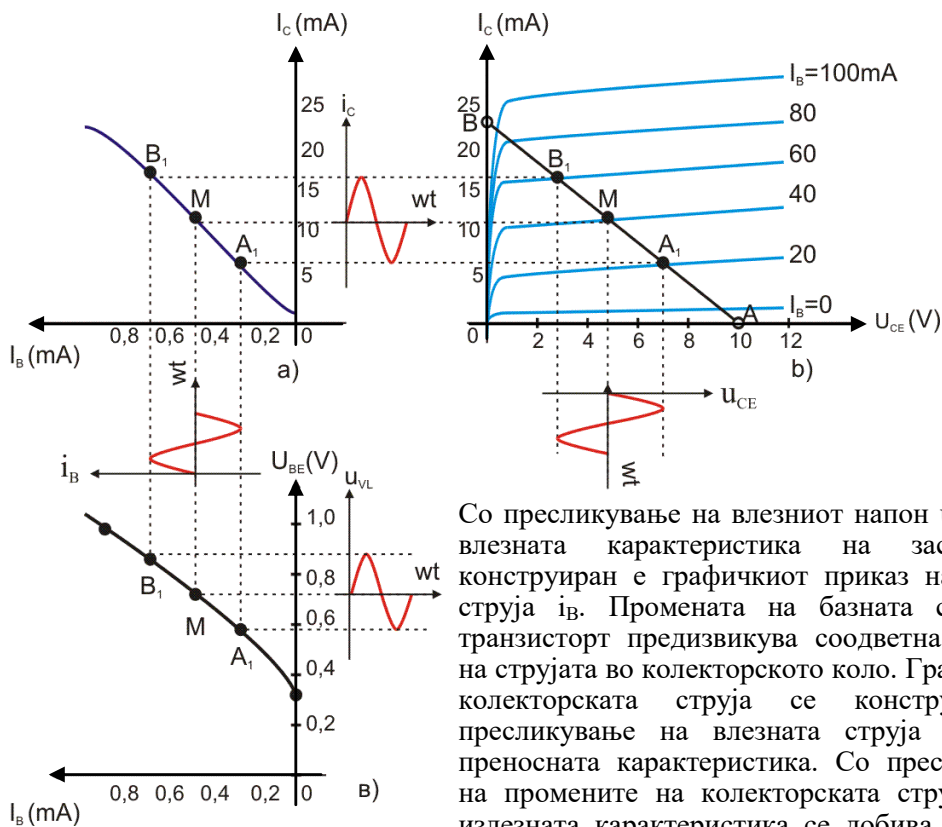
Високофреквенциските (VF) засилувачи ги засилуваат сигналите кои го заземаат горниот дел од фреквенцискиот спектар и тие се слични на селективните засилувачи, само со поширок фреквенциски опсег. Тие се користат во разни радио, радарски, сателитски и други уреди.

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 Б и класа Ц, а се среќаваат и специјални класи како Е, Ф, Г или Д. Местото на работната точка на работната права во излезната, струјно-напонската карактеристика на транзисторот е прикажано на слика 4.12. Од сликата се гледа дека работната права, од точката В па натаму лежи на апсцисната оска.



Слика 4.12: 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. На слика 4.13 е прикажано графичко одредување на излезниот сигнал u_{CE} кај засилувач во класа А преку влезната (в), излезната (б) и преносната карактеристика (а) на транзисторот.

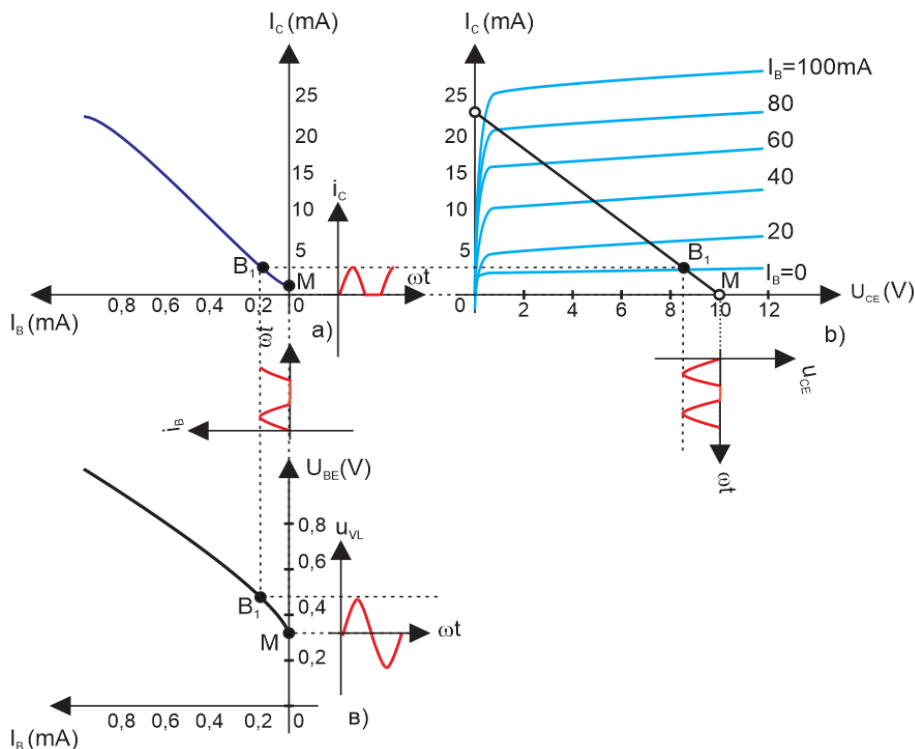


Со пресликување на влезниот напон u_{VL} преку влезната карактеристика на засилувачот конструиран е графичкиот приказ на базната струја i_B . Промената на базната струја на транзисторт предизвикува соодветна промена на струјата во колекторското коло. Графикот на колекторската струја се конструира со пресликување на влезната струја i_B преку преносната карактеристика. Со пресликување на промените на колекторската струја преку излезната карактеристика се добива графикот на напонот u_{CE} .

Слика 4.13: Графичко одредување на излезниот сигнал кај засилувач во класа А

При пренесувањето на точките од преносната на излезната карактеристика се забележува дека движењето на работната точка од M кон B_1 предизвикува зголемување на колекторската струја, но и намалување на напонот колектор-емитер. 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° .

Работната точка на транзисторот кај **засилувачот во класа Б** се наоѓа на почетокот на работната права (слика 4.14).

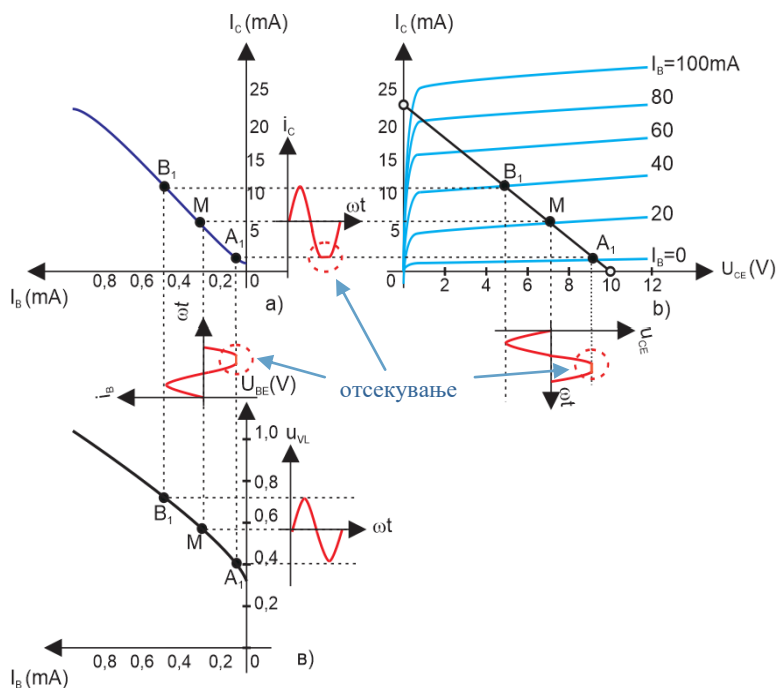


Слика 4.14: Графичко одредување на излезниот сигнал кај засилувач во класа Б

Графичкото пресликување и конструирање на графици на струите и напоните се спроведува на идентичен начин како кај засилувачот во класа А. Од графикот може да се забележи отсекување на негативната полупериода на базната и колекторската струја, како и позитивната полупериода на напонот u_{CE} .

Засилувачот во класа Б редовно се изведува со два транзистора така што при наизменичен сигнал едниот транзистор ја засилува позитивната, а другиот негативната полупериода на сигналот.

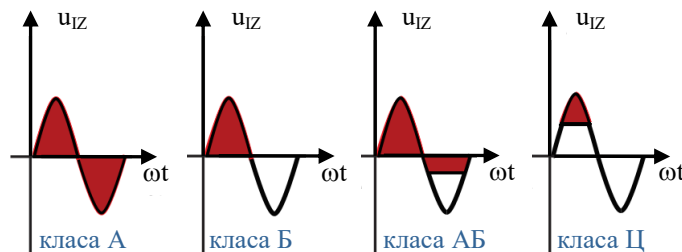
Засилувачот во класа АБ има работна точка која се наоѓа меѓу точките А и В. Со таква поставеност на работната точка, се добиваат помали изобличувања во однос на класата Б. Од претходните анализи може да се заклучи дека кај засилувачите во класа А во излезното коло протекува струја за време на цела периода на влезниот сигнал, кај засилувачите во класа Б само за време на една полупериода, додека кај засилувачите во класа АБ, повеќе од половина периода а помалку од цела периода. На слика 4.15 прикажано е графичкото одредување на излезниот напон кај засилувач во класа АБ.



Слика 4.15: Графичко одредување на излезниот сигнал кај засилувач во класа Б

Работната точка на транзисторот кај **засилувачот во класа Ц** е поставена во областа на инверзната поларизација. Тоа значи дека засилувачот нема да реагира на сигналот сè 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.

На слика 4.16 се прикажани излезни сигнали кај засилувачи во класа А, Б, АБ и Ц. Обидете се графички да го одредите излезниот сигнал кај засилувач во класа Ц врз основа на претходните анализи и прикажаната форма на излезниот сигнал!



Слика 4.16: Споредба на излезните сигнали кај засилувач во класа А, Б, АБ и Ц

Класата Д 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*).



Резиме - Карактеристики на засилувачите

- Засилувачот е електронски склоп кој има задача да го засили сигналот што се приклучува на неговиот влез и на неговиот излез да се добие сигнал што има ист облик како влезниот сигнал, но со поголема амплитуда.
- Основни параметри на транзисторот се засилување, влезна и излезна отпорност.
- Зависноста на засилувањето од фреквенцијата се нарекува амплитудно-фреквенциска карактеристика.
- Фазно-фреквенциската карактеристика покажува како се менува фазното поместување на излезниот во однос на влезниот сигнал со промена на фреквенцијата.
- Според видот на засилувањето имаме засилувачи на напон, засилувачи на струја и засилувачи на моќност.
- Изобличувањето на сигналот се дефинира како несакана промена на неговата брановата форма.

Провери го своето знаење!



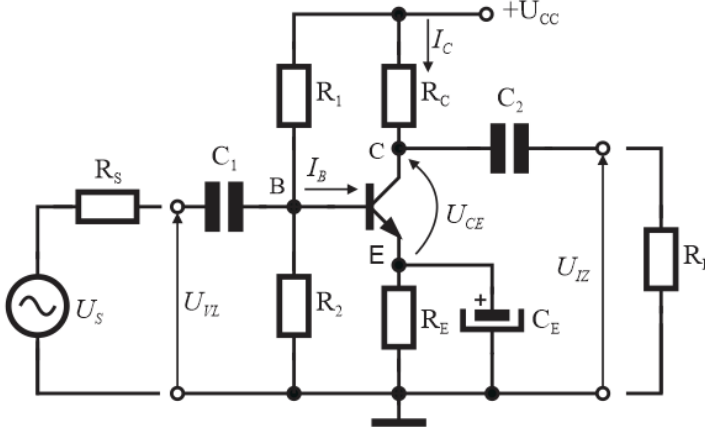
I Прашања со заокружување

1. Во која мерна единица се изразува напонското засилување?
 - a) V
 - б) W
 - в) неименуван број.
2. Што се дефинира со зависноста на засилувањето од фреквенцијата?
 - a) Фреквентна карактеристика
 - б) Фазна карактеристика
 - в) Амплитудна карактеристика.

II Прашања со дополнување

3. Најмали изобличувања има засилувач во класа _____ (А/Б/АБ/Ц/Д).
4. Гранична фреквенција на засилувачот се смета фреквенцијата при која засилувањето опаѓа за _____ V во однос на засилувањето при средните фреквенции.
5. Пропусен опсег на засилувач претставува интервал на фреквенции при кои амплитудната карактеристика е константна, во рамки на отстапување од _____ dB.
6. При напонско засилување 150 а засилување на моќност 15000, струјното засилување на засилувачот изнесува _____.

Транзисторот ќе работи како засилувач кога се наоѓа во нормално активно подрачје, односно неговите PN-споеви се правилно поларизирани и тоа емитерскиот спој директно а колекторскиот инверзно поларизиран.



Слика 4.17: Засилувач со биполарен транзистор во конфигурација со заеднички емитер

Со делителот на напон, составен од отпорниците R_1 и R_2 , директно се поларизира емитерскиот PN-спој на транзисторот (слика 4.17), 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 температура стабилизација на работната точка (објаснето во понатамошниот текст).

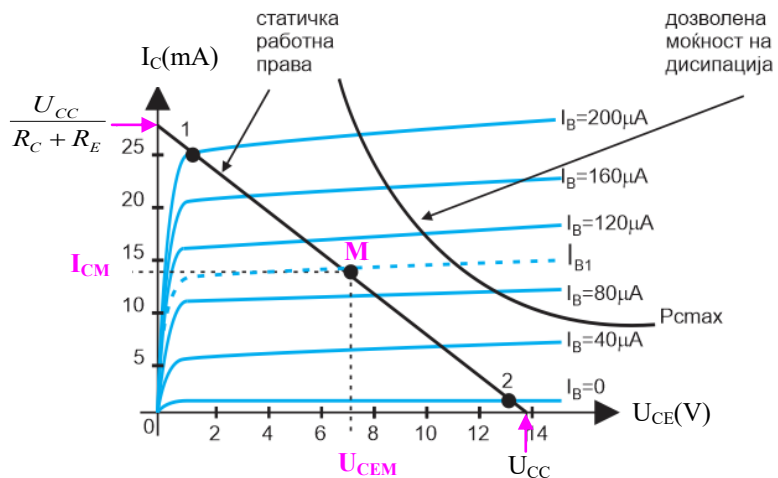
Паралелно приклучениот електролитски кондензатор C_E на отпорникот R_E прави краток спој за наизменичниот сигнал и го елиминира влијанието на овој отпорник врз засилувањето. Кондензаторите за спрега C_1 и C_2 , исто така претставуваат краток спој за наизменичниот сигнал. Од друга страна, овие кондензатори ја блокираат еднонасочната струја и сè 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:

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

Ова е **равенката на статичката работна права** што се добива со примена на II Кирхофов закон во контурата напојување-колектор-емитер.

Во излезните карактеристики на транзисторот, за работната права се бира најповолната положба, а тоа е под дозволената моќност на дисипацијата и да обезбеди најголем опсег на движење на работната точка во линеарниот дел на карактеристиките од точка 1 до точка 2 (слика 4.18).



Слика 4.18: Графичко одредување на статичката работна точка на транзисторот

Од пресечната точка на работната права со апсцисната оска се одредува потребната вредност на напонот на еднонасочниот извор U_{CC} (при $I_C=0$).

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 .

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

$$\frac{U_{CC}}{R_1 + R_2} \gg I_B$$

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

$$I_{R_1} \approx I_{R_2} \approx \frac{U_{CC}}{R_1 + R_2}$$

а напонот на базата:

$$U_B = U_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Напонот на емитерот U_E е:

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

и така доаѓаме до вредноста на R_E :

$$R_E = \frac{U_E}{I_C + I_B} \approx \frac{U_E}{I_C}$$

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

$$U_C = U_{CE} + U_E$$

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

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

Графички работната точка M (U_{CEM}, I_{CM}) се добива во пресекот на работната права со една од излезните карактеристики ($I_{B1}=\text{const}$) која одговара на струјата во базното коло. Поставувањето на работната точка на средина на работната права ($U_{CE1}=U_{CC}/2$) би била најповолна нејзина положба.

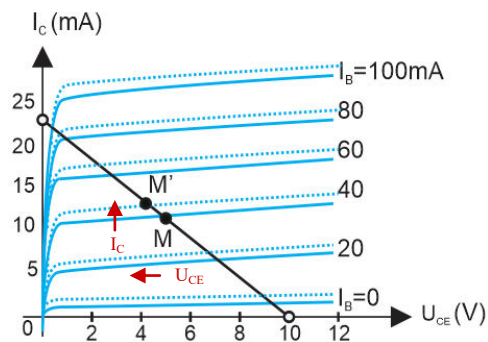
Дизајнирањето на засилувачот е комплексна задача во која треба да се разрешат многу компромиси. Опишаната постапка е само пример за еден пристап во кој се прават некои претпоставки: може да се избере напојувањето, може да се изберат базни отпорници така што базната струја да биде занемарлива во однос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

Статичката работна права се однесува само на статички 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 .

Напомена! Вредностите на компонентите на засилувач со биполарен транзистор се пресметуваат во статички (еднонасочен) режим на работа!

Со зголемување на температурата се зголемува спроводноста на полупроводникот, односно колекторската струја во транзисторот. Воедно, оваа зависност претставува еден од најголемите недостатоци на транзисторот.

Поради температурната зависност на излезните статички карактеристики, доаѓа до нивно поместување нагоре (прикажани со испрекинати линии на слика 4.19), што повлекува поместување на работната точка од положба M во M' . Притоа, работната точка останува во пресекот на работната права со поместената излезна карактеристика. До промена на вредноста на базната струја I_B не доаѓа бидејќи напонот на базата зависи од напојувањето U_{CC} и отпорничкиот делител R_1 - R_2 , кои во многу мала мера зависат од температурата.



Слика 4.19: Дијаграм на излезни карактеристики на транзистор при различни температури

Со поместување на работната точка нагоре, се зголемува колекторската струја I_C што повлекува намалување на напонот U_{CE} . Овие промени на излезниот напон на засилувачот, кои не се предизвикани со промена на влезниот напон а се резултат на поместувањето на работната точка, се манифестираат како изобличувања. Во некои случаи можно е и поместување на работната точка надвор од нормалното активно подрачје, односно во нелинеарниот дел на карактеристиките. Поместување на работната точка може да предизвика и сопственото загревање на засилувачот.

Од претходно наведеното може да се заклучи дека проблемот со стабилизација на работната точка се решава со стабилизација на колекторската струја. Стабилизацијата се постигнува со отпорникот R_E . 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 :

$$U_E = R_E \cdot I_E = R_E (1 + \beta) \cdot I_C$$

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 .

$$U_{BE} = U_B - U_E$$

Намалувањето на напонот U_{BE} предизвикува намалување на струјата I_B , а со тоа се намалува и струјата I_C , бидејќи $I_C = \beta I_B$.

Краен резултат, струјата I_C се враќа на претходната вредност со што се компензира влијанието на порастот на температурата и работната точка на засилувачот не ја менува својата положба.

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.

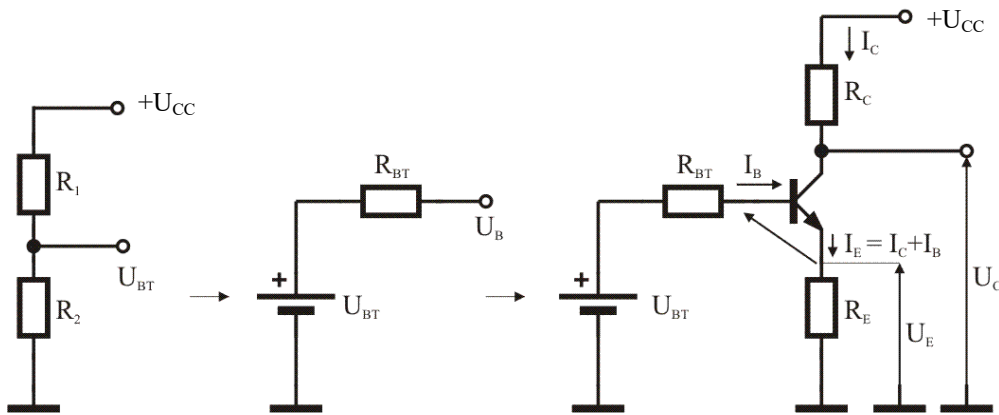
Заклучуваме дека струјата на излезното коло I_E повратно дејствува на влезот поради што овој начин на стабилизација се нарекува стабилизација со негативна струјна повратна спрега.

При засилување на наизменичниот напон, колекторската струја треба да се менува, колото за стабилизација на работната точка не треба да влијае на наизменичната компонента. Тоа се постигнува со паралелно поврзување на кондензаторот C_E со отпорникот R_E кој практично претставува куса врска за наизменична струја. Брзите промени на колекторската струја кај засилувањето на наизменичниот напон не предизвикуваат промени на напонот на отпорникот R_E . На овој начин колото за стабилизација на работната точка не влијае на работата на засилувачот при засилување на наизменичните компоненти.

Стабилната работна точка е идеален услов за работа на засилувачот.

*** Проширени знаења ***

Ако не се применува претпоставката дека струјата на напонскиот делител R_1 - R_2 е многу поголема од струјата на базата I_B , односно да не се занемари базната струја, колото за поларизација може да се трансформира според Тевененовата теорема (слика 4.20), за да се направи пресметката на струјата I_B .



Слика 4.20: Електрично коло на засилувачот за одредување на статичката работна точка

$$U_{BT} = U_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad R_{BT} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

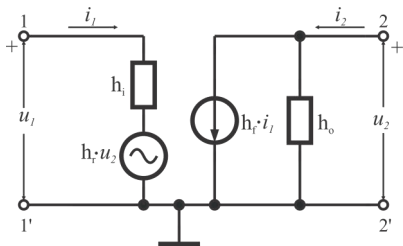
За контурата на колото база–емитер важи равенката:

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

а за струјата I_B се добива:

$$I_E = I_C + I_B = \beta I_B + I_B = I_B (\beta + 1) \quad I_B = \frac{I_E}{\beta + 1}.$$

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 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 неспроведување 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.



Слика 4.21: Еквивалентна шема на транзистор со h-параметри

За анализа на транзисторот, кога работи со нискофреквенциски сигнали со мали амплитуди најповолни се хибридниот h-параметри (слика 4.21). Шемата со h-параметри важи само за променливите сигнали и служи за поедноставување на анализата на неговата работа така што може 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 u_1 и влезната струја i_1 кон излезниот напон u_2 и излезната струја i_2 . Наизменичните напони и струи, во тој случај, можат да се претстават како мали промени на еднонасочните вредности и системот на равенките со h-параметрите може да се напише како:

$$\begin{cases} \Delta U_1 = h_i \cdot \Delta I_1 + h_r \cdot \Delta U_2 \\ \Delta I_2 = h_f \cdot \Delta I_1 + h_o \cdot \Delta U_2 \end{cases}$$

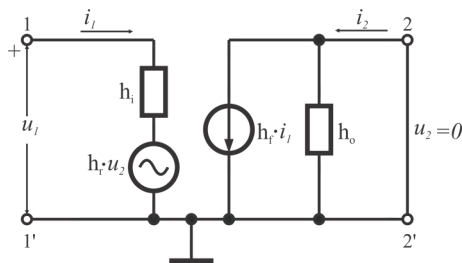
Со кратко спојување на излезното коло на транзисторот во однос на наизменичната струја, промената на излезниот напон ΔU_2 станува нула (слика 4.22). Од првата равенка на системот се добива:

$$h_i = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1}$$

Овој параметар претставува **влезен отпор** на транзисторот при краткоспоен излез,

$$h_f = \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1}$$

додека од втората равенка се добива:



Слика 4.22: Еквивалентна шема на транзистор со h-параметри при краткоспоен излез

$$\begin{cases} \Delta U_1 = h_i \cdot \Delta I_1 + h_r \cdot 0 \\ \Delta I_2 = h_f \cdot \Delta I_1 + h_o \cdot 0 \end{cases}$$

Овој параметар го претставува **коэффициентот 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:

$$h_f = \frac{I_2}{I_1}$$

Кога влезното коло е отворено, не тече влезната струја (слика 4.23), па имаме $\Delta I_1 = 0$, а од првата равенка се добива:

$$hr = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2}$$

Овој параметар претставува **коэффициент 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 изоставена.

За отворено влезно коло, од втората равенка се добива:

$$ho = \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2}$$

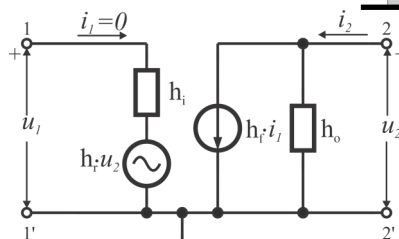
Овој параметар претставува **излезна спроводност** (реципрочна вредност на отпорност) и се мери во сименс (S). Поради малата вредност, параметарот ho може, во повеќето случаи, исто така да се изостави.

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 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.

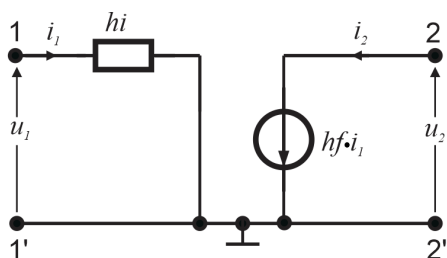
Од друга страна, за режим на работа со мали сигнали нема потреба да се користат сите четири параметри за да се добие прифатливо добар модел на транзисторот. Се покажува дека параметрите hr и ho во голем број случаи имаат толку мали вредности што можат да се занемарат. Во тие случаи транзисторот се претставува само со два параметри hi и hf .

Упростената еквивалентна шема на транзистор во спој со заеднички емитер со h -параметрите сега добива изглед како на слика 4.24.



Слика 4.23: Еквивалентна шема на транзистор со h -параметри при отворен влез

$$\begin{cases} \Delta U_1 = hi \cdot 0 + hr \cdot \Delta U_2 \\ \Delta I_2 = hf \cdot 0 + ho \cdot \Delta U_2 \end{cases}$$



Слика 4.24: Упростена еквивалентна шема на транзистор со h -параметри

Таа во влезното коло содржи влезна отпорност, додека во излезното коло струен генератор. Занемарените параметри на транзисторот скоро и да немаат влијание на вредноста на параметрите на засилувачот.



Одреди ги ознаките на влезните и излезните напони и струи кај транзистор во спој со заеднички емитер, заедничка база и заеднички колектор!



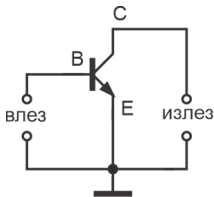
Транзисторот е активен електронски елемент со влез и излез. Во електрично коло тој може да се претстави како четворопол. Но, бидејќи тој има само три изводи, едниот од нив ќе биде заеднички за влезот и за излезот.

Зависно од тоа кој извод на транзисторот е заеднички за влезот и за излезот, разликуваме три вида на транзисторски споеви (слика 4.25):

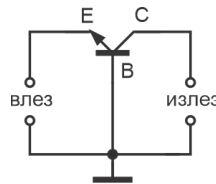
- транзистор во спој со заеднички емитер, во кој влезот е меѓу базата и емитерот, а излезот меѓу колекторот и емитерот;

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

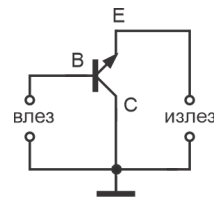
- транзистор во спој со заеднички колектор, во кој влезот е меѓу базата и колекторот, а излезот меѓу емитерот и колекторот.



а) заеднички емитер



б) заедничка база



в) заеднички колектор

Слика 4.25: Видови споеви 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.

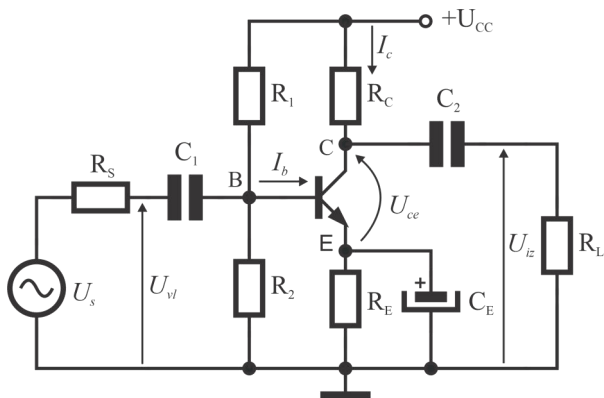
Врз основа на системот на равенките за h -параметрите, може да се нацрта еквивалентна шема која одговара на генералната шема на засилувач (со струјно засилување h_{fe} , влезна и излезна отпорност). Во зависност од видот на спрегата на транзисторот во колото, се менуваат и вредностите на h -параметрите. 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
$h_o (S)$	$0,49 \times 10^{-6}$	24×10^{-6}	25×10^{-6}

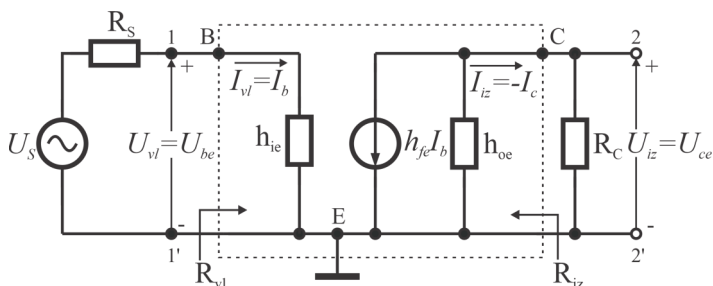
Ако се познати еден вид h -параметри, можат да се пресметаат и параметрите од друг вид спрега.

За пресметките на засилувањето ќе користиме еквивалентна шема на транзисторскиот засилувач на наизменични напони и струи со транзистор во спој со заеднички емитер, од слика 4.17 во режим на мали сигнали и ниски фреквенции. Во подрачје на ниски фреквенции сите кондензатори во колото (C_1 , C_2 , C_E) имаат многу мала импеданса и во еквивалентната шема за наизменичен режим на работа, кондензаторите се премостуваат со куса врска како и изворот за напојување $+U_{CC}$ (слика 4.26).



Слика 4.26: Шема на засилувач со транзистор во спој со заеднички емитер во режим на мали сигнали и ниски фреквенции

Со замена на транзисторот со упростената шема со h -параметри се добива шемата на засилувачот како на слика 4.27.



Слика 4.27: Еквивалентно коло на засилувач со заеднички емитер

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.

Да воочиме дека излезниот напон во колото на слика 4.27 се добива на паралелната врска од отпорностите R_C и $1/h_{oe}$. Ако нивната еквивалентна отпорност ја означиме со R_{ekv} :

$$R_{ekv} = \frac{R_C \cdot \frac{1}{h_{oe}}}{R_C + \frac{1}{h_{oe}}} = \frac{R_C}{1 + h_{oe}R_C}$$

тогаш за излезниот напон ќе се добие:

$$U_{iz} = -h_{fe} I_b \cdot R_{ekv}$$

а за влезниот напон важи:

$$U_{vl} = h_{ie} I_b$$

Оттука за **напонското засилување**, кое претставува количник на напонот на потрошувачот - излезниот напон и влезниот напон, ќе се добие изразот:

$$A_u = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = \frac{-h_{fe} I_b R_{ekv}}{h_{ie} I_b} = -h_{fe} \frac{R_{ekv}}{h_{ie}}.$$

За струјата во излезниот дел од колото може да се запише:

$$I_{iz} = \frac{U_{iz}}{R_C} = -\frac{h_{fe} I_b R_{ekv}}{R_C}$$

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

$$A_i = \frac{I_{iz}}{I_{vl}} = \frac{-h_{fe} I_b R_{ekv} / R_C}{I_b} = -h_{fe} \frac{R_{ekv}}{R_C}.$$

За **засилувањето на моќноста**, со комбинирање на претходните равенства, се добива:

$$A_p = \frac{P_{iz}}{P_{vl}} = \frac{U_{iz} I_{iz}}{U_{vl} I_{vl}} = A_u A_i = h_{fe}^2 \frac{R_{ekv}^2}{h_{ie} R_C}$$

За повеќето транзисторски засилувачки кола отпорноста $1/h_{oe}$ е многу поголема од отпорноста R_C (барем неколку десетици пати). Во тој случај од неравенството:

$$\frac{1}{h_{oe}} \gg R_C \text{ следува: } h_{oe} R_C \ll 1 \text{ што значи дека: } R_{ekv} \approx R_C$$

Земајќи ги предвид овие занемарувања, поради многу малата вредност на параметарот h_{oe} , за претходно дефинираните изрази за засилувањата се добива:

$$A_u \approx -\frac{h_{fe}}{h_{ie}} R_C \quad A_i \approx -h_{fe} \quad A_p \approx \frac{h_{fe}^2 R_C}{h_{ie}}$$

Влезната отпорност на засилувачот се одредува под услов излезниот напон U_{iz} да е еднаков на нула, односно кусо споен излез:

$$R_{vl} = \frac{U_{vl}}{I_{vl}} = h_{ie}$$

Излезната отпорност се одредува под услов влезното коло да е отворено, притоа нема да тече базната струја I_b што повлекува струјниот генератор $h_{fe} \cdot I_b = 0$:

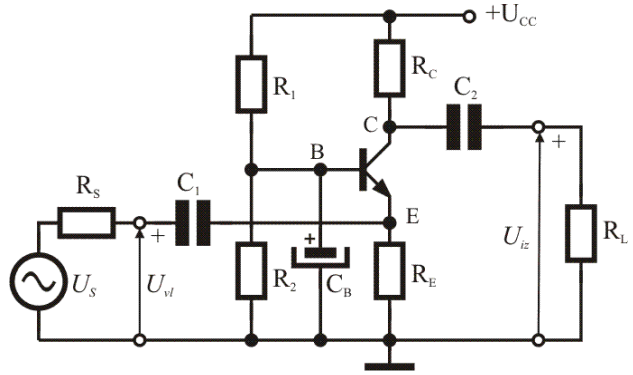
$$R_{iz} = \frac{U_{iz}}{I_{iz}} = \frac{1}{h_{oe}}$$

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 4.27 параметарот h_{oe} може да се изостави.

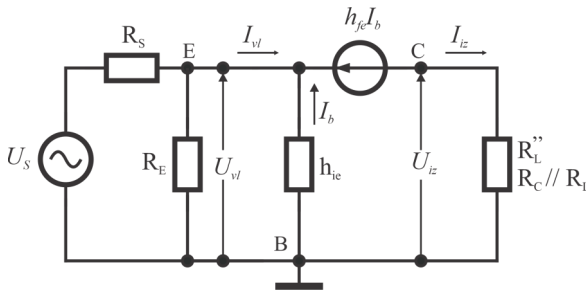
Напонското засилување е линеарно зависно од вредноста на отпорот на оптоварувањето и обично има голема вредност. Струјното засилување на засилувачот е еднакво на струјното засилување на транзисторот, влезниот отпор на засилувачот е еднаков на влезниот отпор на транзисторот, а излезниот е обратно пропорционален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

Знакот „-“ во изразите за засилување покажува дека излезните и влезните големини се во противфаза.

На слика 4.28 е дадена шема на засилувач 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 доведе 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.



Слика 4.28: Шема на засилувач со транзистор во спој со заедничка база



Слика 4.29: Еквивалентна шема на засилувач со транзистор во спој со заедничка база

Еквивалентната шема на засилувачот е дадена на слика 4.29. 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 за влезната и излезната струја се добива:

$$I_{vl} = -I_b - h_{fe} I_b = -(1 + h_{fe}) I_b$$

$$I_{iz} = -h_{fe} I_b$$

Струјното засилување се пресметува како:

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

За **напонското засилување** се добива изразот:

$$A_U = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = \frac{-h_{fe} I_b R_L''}{-h_{ie} I_b} = \frac{h_{fe} R_L''}{h_{ie}} \quad \text{каде} \quad R_L'' = \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L}$$

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

Влезниот отпор е:

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

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

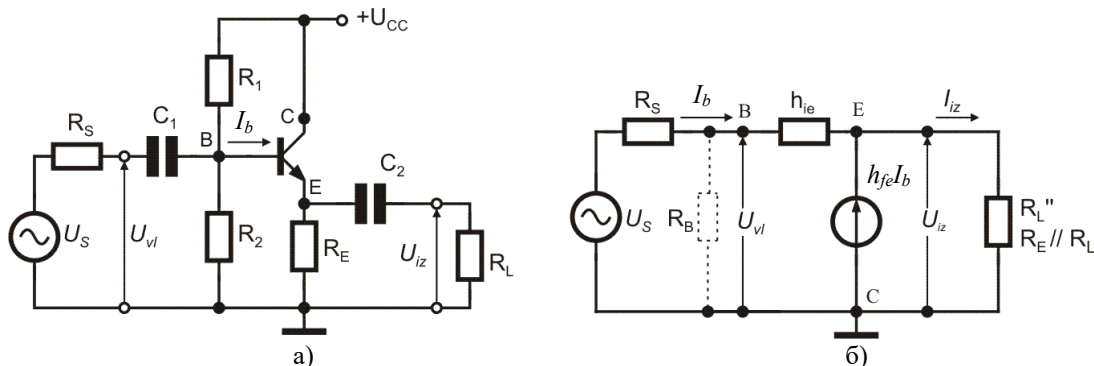
Излезната отпорност е многу голема $R_{iz} \rightarrow \infty$.

Елементите R_1 , R_2 и R_E служат за стабилизација на еднонасочната работна точка и немаат значајна улога во засилувањето на наизменичниот сигнал.

Недостаток на овие засилувачи е малата влезна отпорност, затоа се комбинираат со засилувачи со заеднички емитер или колектор.

4.11 Засилувач во спој 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 4.30 а). 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 4.30: Засилувач со транзистор во спој со заеднички колектор
а) електрична шема, б) еквивалентна шема

Еквивалентната шема на степенот за наизменични сигнали е дадена на слика 4.30 б). 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 I Кирхофов закон за точката Е важи:

$$I_{iz} = h_{fe} I_b + I_b = (h_{fe} + 1) I_b$$

Струјното засилување се изразува како:

$$A_I = \frac{I_{iz}}{I_{vl}} = \frac{(h_{fe} + 1) I_b}{I_b} = h_{fe} + 1 \approx h_{fe}.$$

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 изразот:

$$R_{vl} = \frac{U_{vl}}{I_b} = \frac{h_{ie} I_b + U_{CE}}{I_b}.$$

Со замена на изразот за излезната струја во U_{CE} се добива:

$$U_{CE} = R_L'' I_{iz} = R_L'' (1 + h_{fe}) I_b$$

а за влезната отпорност:

$$R_{vl} = \frac{h_{ie} I_b + R_L'' (1 + h_{fe}) I_b}{I_b} = h_{ie} + R_L'' (1 + h_{fe}).$$

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

Напонското засилување може да се одреди според релацијата:

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

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.

За 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 4.31.

Според Омовиот закон за излезната отпорност важи:

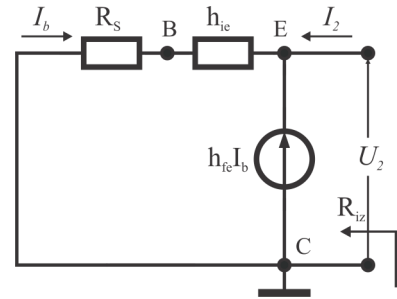
$$R_{iz} = \frac{U_2}{I_2}$$

додека според I Кирхофов закон во точката E може да се запише:

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

Според II Кирхофов закон за влезниот дел од колото се добива релацијата:

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



Слика 4.31: Еквивалентна шема за пресметување на излезниот отпор

со замена на изразите за I_2 и U_2 во изразот за R_{iz} се добива:

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

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.

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

Табела 1: Вредности на параметрите на засилувачи во различни конфигурации

Параметри	заеднички емитер	заеднички колектор	заедничка база
A_I струјно засилување	$-h_{fe}$ големо	$1+h_{fe}$ големо	$\frac{h_{fe}}{1+h_{fe}} \cong 1$ 1
R_{vl} влезна отпорност	h_{ie} средно голема	$h_{ie} + R_L''(1+h_{fe})$ голема	$\frac{h_{ie}}{1+h_{fe}}$ мала
A_U напонско засилување	$\frac{-h_{fe}R_L''}{h_{ie}}$ големо	$\frac{R_L''(1+h_{fe})}{h_{ie} + R_L''(1+h_{fe})} \cong 1$ 1	$\frac{h_{fe}R_L''}{h_{ie}}$ средно големо
R_{iz} излезна отпорност	$\frac{1}{h_{oe}}$ голема	$\frac{h_{ie} + R_S}{1+h_{fe}}$ мала	∞ голема



Резиме - Засилувачи со биполарни транзистори во режим на мали сигнали и ниски фреквенции

- Транзисторот работи како засилувач при директна поларизација на емитерскиот PN-спој и инверзна поларизација на колекторскиот PN-спој.
- Графички работната точка се добива во пресекот на работната права со една од излезните карактеристики која одговара на струјата во базното коло.
- Стабилизацијата на работната точка при температурни промени се постигнува со отпорникот R_E .
- Параметарот h_i претставува влезен отпор на транзисторот при краткоспоен излез.
- Параметарот h_o претставува излезена спроводност на транзисторот при отворено влезно коло.
- Параметарот h_r претставува коефициент на напонска повратна спрега при отворено влезно коло и тој е неименуван број.
- Параметарот h_f го претставува коефициентот на струјното засилување на транзисторот при краткоспоено излезно коло и тој е неименуван број.



Провери го своето знаење!

I Прашања со заокружување

1. Која е правилна положба на работната точка?
 - а) На почеток на работната права
 - б) На крајот на работната права
 - в) На средина на работната права.
2. Графички, во излезните карактеристики, работната права се добива од релацијата:
 - а) $U_{CC} = U_{CE} + (R_C + R_E)I_C$
 - б) $U_E = U_B - U_{BE} = R_E I_E = R_E (I_C + I_B)$
 - в) $U_{CE} = U_{CC} + (R_C + R_E)I_C$

II Прашања со дополнување

3. Параметарот h_{fe} претставува коефициент на _____ (струјно/напонско) засилување на засилувачот.
4. Отпорникот R_E во засилувач со заеднички емитер служи за _____ на работната точка при температурни промени.
5. Кај засилувач со заеднички емитер, параметри со големо засилување се: _____, _____ и _____ ($A_i/A_u/R_{iz}/R_{vl}$).
6. Струјното засилување има приближна вредност 1 кај засилувач во спој со заеднички _____ (емитер/база/колектор), а напонското кај засилувач во спој со заеднички _____ (емитер/база/колектор).
7. Кај засилувач во спој со заедничка база влезен напон е _____ (U_{EB}/U_{CB}) а излезен _____ (U_{EB}/U_{CB}).

4.12 Поларизација на MOSFET-от во засилувачот



MOSFET-от работи како засилувач кога се наоѓа во подрачје на заситување, а како прекинувач во две подрачја: линеарно (затворен прекинувач) и подрачје на запирање (отворен прекинувач).

Електрична шема на засилувач со N-канален MOSFET во конфигурација со заеднички сорс е дадена на слика 4.32.

Влезниот сигнал се приклучува на гејтот а излезот се добива на дрејнот. Со отпорничкиот делител R_1 - R_2 се поларизира гејтот, а со отпорникот R_D дрејнот, така што работната точка да се најде во подрачје на заситување, односно, во подрачјето на константни струи на излезната карактеристика. За така поставената работна точка се одредуваат параметрите за мали сигнали и ниски фреквенции.

Од отпорничкиот делител, се добива напонот на поларизација на гејтот:

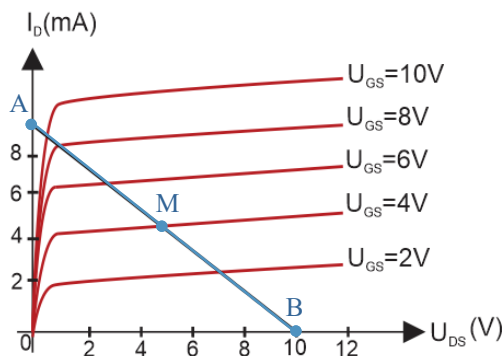
$$U_G = U_{DD} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

земајќи предвид дека поради големата влезна отпорност $I_G=0$.

Работната точка M лежи на карактеристиката U_{GS} (слика 4.33), одредена со оваа равенка во пресек со работната права која се запишува според II Кирхофов закон за излезниот дел од колото:

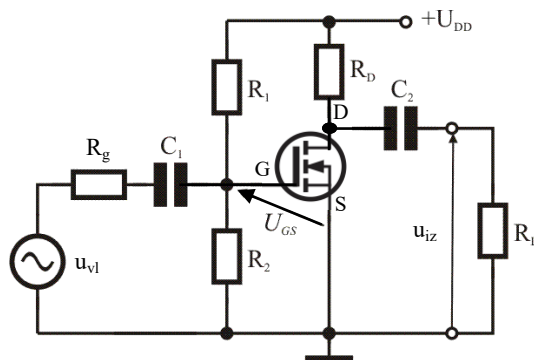
$$U_{DD} - R_D I_D - U_{DS} = 0$$

со што прецизно е одредена положбата на работната точка.

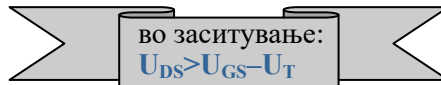


Слика 4.33: Работна права и работна точка на излезните карактеристики кај N-канален MOSFET со индуциран канал

Со поврзување на точките A и B, графички се одредува работната права.



Слика 4.32: Електрична шема на засилувач со MOSFET во конфигурација со заеднички сорс



Со замена за $U_{DS}=0$ во равенката на работната права се добива вредноста на зависно променливата големина I_D (точката A):

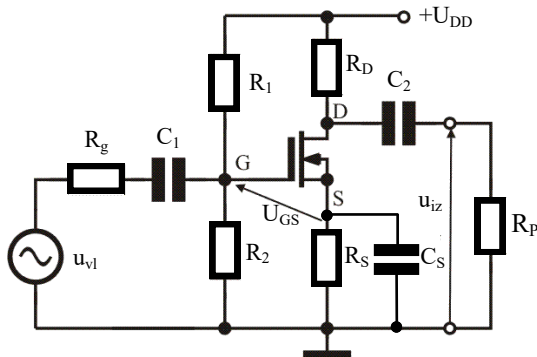
$$U_{DD} - R_D I_D = 0$$

$$I_D = \frac{U_{DD}}{R_D}$$

Со замена за $I_D=0$ во равенката на работната права се добива вредноста на независно променливата големина U_{DS} (точката B):

$$U_{DS} = U_{DD}$$

Поради влијанието на температурата врз работата на транзисторот, потребно е да се изврши компензација, односно стабилизација на работната точка. Со додавање на отпорник R_S во колото на сорсот (слика 4.34), се обезбедува потребната стабилизација на работната точка. Во ова коло употребен е еден еднонасочен извор за напојување U_{DD} со кој се обезбедува соодветна поларизација и на гејтот и на дрејнтот.



Слика 4.34: Електрична шема на засилувач со отпорник R_S за стабилизација на работната точка

Температурата влијае на стабилноста на работната точка. Со промена на температурата, работната точка се придвижува по работната права, притоа доаѓа до промена на струјата на дрејнтот а со тоа и промена на излезниот напон, промена која не е предизвикана со промена на влезниот напон. Придвижувањето може да ја доведе работната точка во друг режим на работа. Од таа причина потребно е да се стабилизира нејзината положба.

Со зголемување на температурата се зголемува и струјата на дрејнтот I_D во MOSFET-от. Притоа доаѓа и до зголемување на напонот на сорсот U_S :

$$U_S = R_S I_D$$

Бидејќи напонот на гејтот е константен, претходно определен со отпорничкиот делител:

$$U_G = U_{DD} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

напонот гејт-сорс ќе се намали:

$$U_{GS} = U_G - U_S$$

Со намалување на напонот U_{GS} се намалува и струјата на дрејнтот I_D а со тоа и напонот на отпорникот R_S :

$$U_S = R_S I_D$$

На овој начин се врши „саморегулација“ на положбата на работната точка.

Електричната шема на слика 4.34 го претставува колото на MOSFET-от во динамички режим на работа. Динамичките параметри на униполарните транзистори се одредуваат при неизменен режим на работа. Со нив се дефинираат мали промени (Δ) на напоните и струите. Во продолжение на текстот се дадени најзначајните динамички параметри на униполарните транзистори.

Динамичката влезна отпорност r_{vl} на MOSFET може да се дефинира како:

$$r_{vl} = \frac{\Delta U_{GS}}{\Delta I_G} \quad \text{кога} \quad \Delta U_{DS} = 0$$

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 g_m или транскондуктанса се дефинира со релацијата:

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \quad \text{кога} \quad \Delta U_{DS} = 0$$

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 r_{iz} се дефинира за областа на заситување со:

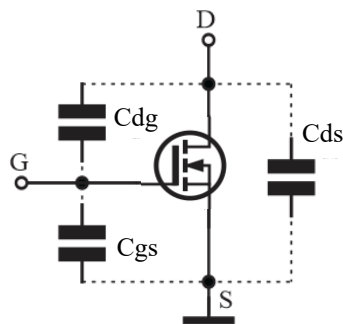
$$r_{iz} = \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta I_D} \quad \text{кога} \quad \Delta U_{GS} = 0 \Rightarrow \quad g_o = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{DS}} = \frac{1}{r_{iz}} \quad \text{Динамичка излезна спроводност } g_o$$

r_{iz} има вредност од неколку десетини до неколку стотини килооми.

Со μ се дефинира коефициентот на напонско засилување:

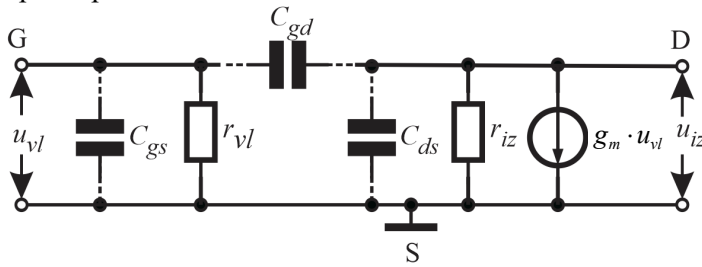
$$\mu = - \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta U_{GS}} \quad \text{кога} \quad \Delta I_D = 0.$$

Меѓуелектродните капацитивности имаат значително влијание врз карактеристиките на MOSFET при високи фреквенции. Тие се прикажани на слика 4.35. 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 4.35: Распоред на меѓуелектродните капацитивности

На слика 4.36 е прикажана еквивалентна шема на MOSFET со сите претходно дефинирани параметри.

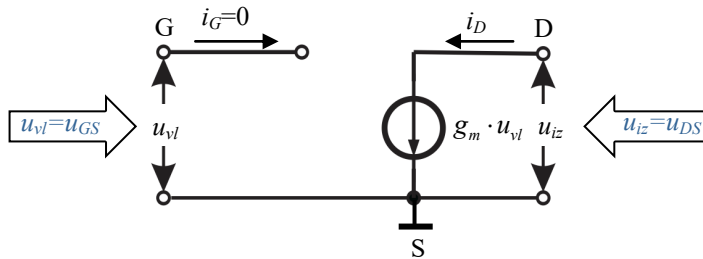


Слика 4.36: Еквивалентна шема на MOSFET

Динамичката влезна отпорност на MOSFET-от е изоставена поради нејзината многу голема вредност. На излезот е прикажан напонски контролиран струен генератор кој на излезот дава струја пропорционална на преносната спроводност и напонот на влезниот сигнал:

$$i_D = g_m u_{vl}$$

Кога засилувачот со MOSFET работи во режим на мали сигнали и ниски фреквенции, неговото еквивалентно коло се упростува со отстранување на сите кондензатори што ги претставуваат меѓуелектродните капацитивности, а често и големата паралелна отпорност r_{iz} . Така, добиената упростена шема е прикажана на слика 4.37.

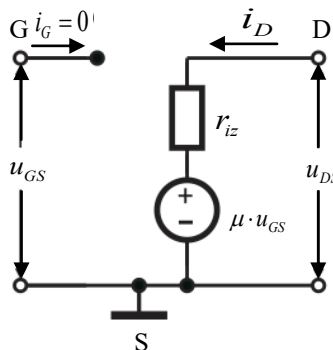


Слика 4.37: Упростена еквивалентна шема на MOSFET

При трансформација на струјниот генератор со напонски, притоа не занемарувајќи ја излезната отпорност, се добива еквивалентна шема како на слика 4.38 каде за напонскиот генератор се добива:

$$r_{iz} \cdot g_m \cdot u_{vl} = \mu \cdot u_{GS}$$

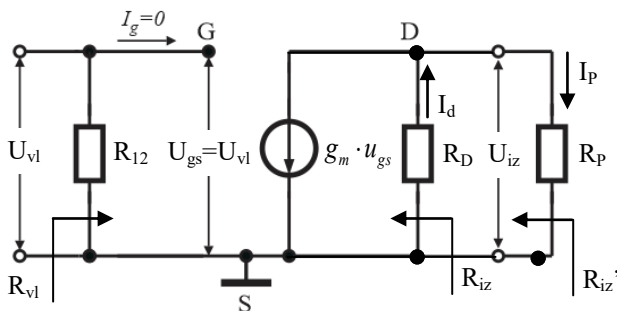
каде со μ е претходно дефиниран коефициентот на напонско засилување.



Слика 4.38: Еквивалентна шема на MOSFET со напонски генератор

4.15 Засилувач во спој со заеднички сорс

За одредување на параметрите на засилувач во конфигурација со заеднички сорс ќе ја користиме електричната шема дадена на слика 4.34 заменувајќи го MOSFET-от со упростено еквивалентно коло за мали сигнали и ниски фреквенции (слика 4.39). 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.



Слика 4.39: Еквивалентна шема на засилувач во спој со заеднички сорс

Напонското засилување A_U се дефинира како однос на излезниот и влезниот напон:

$$A_U = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = \frac{I_p \cdot R_p}{U_{gs}} = -g_m \cdot \frac{R_p \cdot R_D}{R_p + R_D} = -g_m \cdot R_p' \quad \text{каде} \quad R_p' = R_D // R_p = \frac{R_D \cdot R_p}{R_D + R_p}$$

Знакот „-“ во изразот за напонско засилување значи дека влезниот и излезниот напон се во противфаза, односно овој засилувач внесува фазно поместување од 180° .

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

$$R_{vl} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = R_{12}$$

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 MOSFET-от R_{iz} претставува однос на излезниот напон во празен од и излезната струја низ краток спој I_{KS} :

$$R_{iz} = \frac{-R_D I_d}{I_{KS}} = \frac{-R_D \cdot g_m \cdot U_{gs}}{-g_m \cdot U_{gs}} = R_D$$

Вредноста на овој параметар е од редот на неколку $k\Omega$.

Излезниот отпор на засилувачот R_{iz}' се одредува како паралелна врска R_{iz} и R_p :

$$R_{iz}' = R_p'$$

Со R_{12} е означена паралелната врска отпорниците R_1 и R_2 :

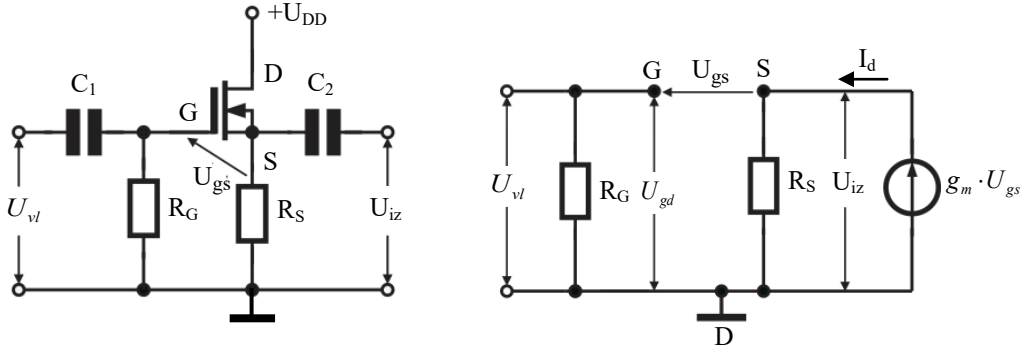
$$R_{12} = R_1 // R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Од струјниот делител, струјата на дрејнтот I_d и струјата низ потрошувачот I_p се одредува со:

$$I_d = g_m \cdot U_{gs} \cdot \frac{R_p}{R_D + R_p}$$

$$I_p = -g_m \cdot U_{gs} \cdot \frac{R_D}{R_D + R_p}$$

Електричната шема на засилувач во спој со заеднички дрејн со N-канален MOSFET е дадена на слика 4.40 а). Кај овој засилувач, потрошувачот преку кондензаторот за спрега C_2 , се приклучува на сорсот, додека влезниот сигнал, преку кондензаторот C_1 на гејтот. Кондензаторите за спрега имаат иста намена како во претходните споеви, служат за одвојување на наизменичната компонента на сигналот кој се засилува од еднонасочниот напон кој се користи за поларизација. Со замена на моделот на MOSFET во еквивалентната шема за мали сигнали, како што е претходно веќе опишано, се добива еквивалентна шема како на слика 4.40 б).



Слика 4.40: Засилувач во спој со заеднички дрејн: а) електрична шема, б) еквивалентна шема

Напонот гејт-сорс се добива како разлика на влезниот и излезниот напон:

$$U_{gs} = U_{vl} - U_{iz}$$

Со замена во изразот за струјата на дрејнот се добива:

$$I_d = g_m \cdot U_{gs} = g_m \cdot (U_{vl} - U_{iz}) = g_m \cdot U_{vl} - g_m \cdot U_{iz}$$

Од друга страна за струјата I_d може да се напише:

$$I_d = \frac{U_{iz}}{R_S}$$

и со замена во претходниот израз се добива:

$$\frac{U_{iz}}{R_S} = g_m \cdot U_{vl} - g_m \cdot U_{iz} \quad \frac{U_{iz}}{R_S} + g_m \cdot U_{iz} = g_m \cdot U_{vl} \quad \left(\frac{1}{R_S} + g_m \right) \cdot U_{iz} = g_m \cdot U_{vl}$$

од каде за **напонското засилување** се добива изразот:

$$A_U = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = \frac{g_m \cdot R_S}{1 + g_m \cdot R_S}$$

Напонското засилување на ова коло има приближна вредност 1 и не внесува фазно поместување.

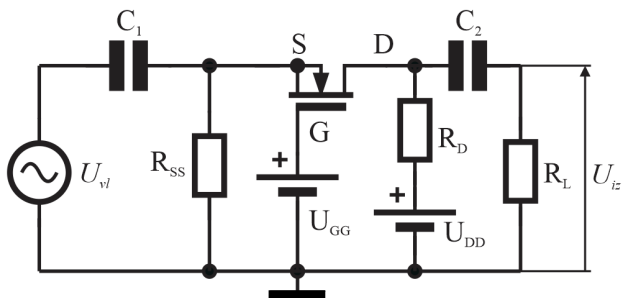
Излезната отпорност претставува однос на напонот на празен од и струјата низ краткиот спој, како што е претходно објаснето:

$$R_{iz} = \frac{U_2}{g_m \cdot U_1} \approx \frac{U_1}{g_m \cdot U_1} = \frac{1}{g_m}$$

Засилувачот во спој со заеднички дрејн има голема примена како засилувач за приспособување на импедансата бидејќи има многу голема влезна а мала излезна отпорност, додека напонското засилување му е приближно 1.

4.17 Засилувач во спој со заеднички гејт

Принципиелната шема на засилувачот е дадена на слика 4.41. Влезниот сигнал се доведува помеѓу сорсот и гејтот а потрошувачот се приклучува на дрејнот. Гејтот е на потенцијал на маса преку кусата врска на еднонасочниот извор за поларизација U_{GG} во услови на мали сигнали и ниски фреквенции.



Слика 4.41: Електрична шема на засилувач во спој со заеднички гејт

Со замена на MOSFET-от со упростена еквивалентна шема која ги содржи неговите параметри, се добива еквивалентна шема на засилувачот (слика 4.42) која ќе ни послужи за одредување на параметрите на засилувачот.

Со R_L' е означена паралелната врска на отпорниците R_D и R_L :

$$R_L' = \frac{R_D R_L}{R_D + R_L}$$

притоа струјата од струјниот генератор ќе протекнува низ еквивалентната отпорност R_L' , од каде за излезниот напон се добива:

$$U_{iz} = -g_m \cdot U_{gs} \cdot R_L'$$

За влезниот напон може да се запише:

$$U_{vl} = -U_{gs}$$

Со замена на изразите за влезен и излезен напон во изразот за **напонско засилување**, се добива:

$$A_U = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = \frac{-g_m \cdot U_{gs} \cdot R_L'}{-U_{gs}} = g_m R_L'$$

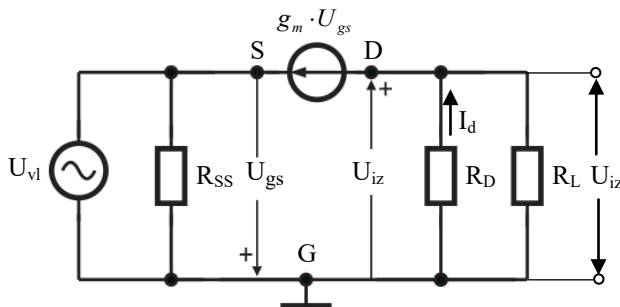
Односот на влезниот напон и влезната струја го дава **влезниот отпор на MOSFET-от** како:

$$R_{mosfet} = \frac{-U_{gs}}{-g_m U_{gs}} = \frac{1}{g_m}$$

додека **влезниот отпор на засилувачот** се одредува како паралелна врска на R_{mosfet} и R_{SS} :

$$R_{vl} = \frac{R_{SS} \frac{1}{g_m}}{R_{SS} + \frac{1}{g_m}}$$

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



Слика 4.42: Еквивалентна шема на засилувач во спој со заеднички гејт



Резиме - Засилувачи со униполарни MOSFET транзистори во режим на мали сигнали и ниски фреквенции

- Динамичката влезна отпорност на MOSFET со заеднички сорс се дефинира како однос на мала промена на напонот гејт-сорс и мала промена на струјата на гејтот и има многу голема вредност од редот на $G\Omega$.
- Преносната спроводливост g_m или транскондуктанса на MOSFET со заеднички сорс се дефинира како однос на мала промена на струјата на дрејнот и напонот гејт-сорс.
- Динамичката излезна отпорност r_{iz} на MOSFET со заеднички сорс се дефинира како однос на мала промена на напонот дрејн-сорс и струјата на дрејнот.
- Коэффициентот на напонско засилување μ на MOSFET со заеднички сорс се дефинира како однос на мала промена на напонот дрејн-сорс и напонот гејт-сорс.
- Поради многу големата вредност на влезната отпорност кај засилувач во спој со заеднички сорс, влезното коло се прикажува како отворено коло и не тече влезна струја.

Провери го своето знаење!



I Прашања со заокружување

1. Кој од засилувачите внесува фазно поместување на сигналот?
 - а) Засилувач во спој со заеднички сорс
 - б) Засилувач во спој со заеднички гејт
 - в) Засилувач во спој со заеднички дрејн.
2. Во еквивалентната шема засилувачот со MOSFET во режим на мали сигнали и ниски фреквенции, кондензаторите за спрега C_1 и C_2 се заменуваат со:
 - а) куса врска
 - б) отворена гранка
 - в) отпорност.

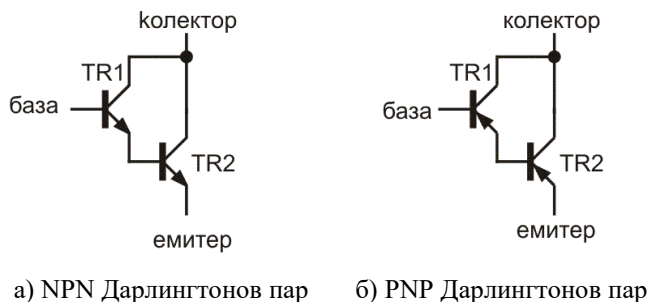
II Прашања со дополнување

3. Параметарот g_m се дефинира со релацијата _____.
4. Во засилувач со заеднички сорс отпорникот ____ ($R_S/R_D/R_P$) служи за стабилизација на работната точка при промена на температурата.
5. Во еквивалентната шема на MOSFET-от производот $g_m U_{gs}$ се претставува со _____ (напонски контролиран струен генератор/струјно контролиран напонски генератор).
6. Напонското засилување кај засилувач со заеднички дрејн има приближна вредност _____ и не внесува фазно поместување.

4.18 Дарлингтонов спој

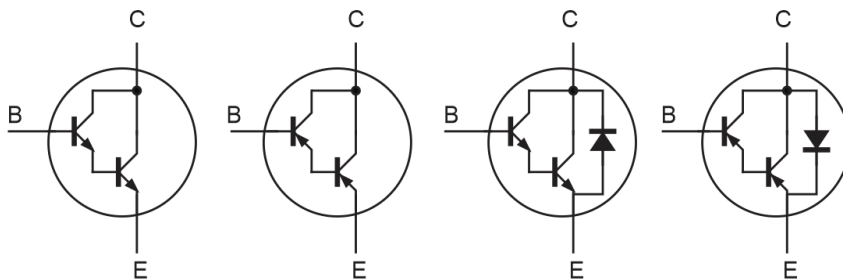
Кога од транзисторот во засилувачот се бара да има голем коефициент на струјното засилување h_{fe} (на пример, 10 000), може да се примени специјална врска на два транзистора, наречена Дарлингтонов спој или Дарлингтонов пар.

Врската може да се изведе со NPN или со PNP-транзистори (слика 4.43). 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.



Слика 4.43: Структура на Дарлингтонов транзистор

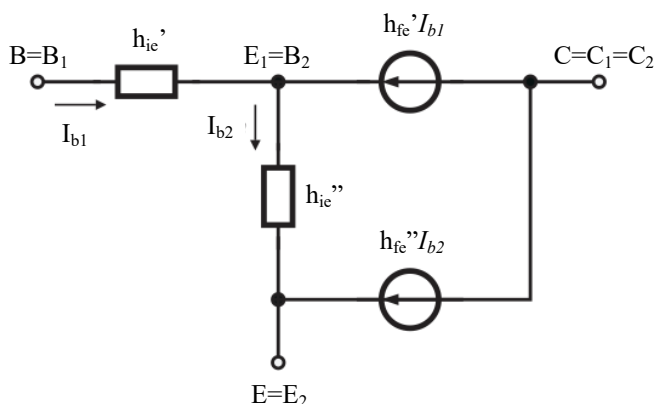
Електрични симболи на Дарлингтонов транзисторот се дадени на слика 4.44.



Слика 4.44: Електрични симболи на Дарлингтонов транзистор

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

За примената на Дарлингтонов спој важни се вкупните параметри h_{ie} и h_{fe} . Тие ќе бидат пресметани со помош на еквивалентна шема на Дарлингтонов спој од слика 4.43а) прикажана на слика 4.45. Параметрите на транзисторот TR1 се h_{ie}' и $h_{fe}'I_{b1}$ а на TR2, h_{ie}'' и $h_{fe}''I_{b2}$. За оваа пресметка се зема дека струите на колекторот и на емитерот кај секој од транзисторите се приближно еднакви.



Слика 4.45: Еквивалентна шема на Дарлингтонов спој

Струјата на базата на транзисторот TR1 е I_{b1} , а неговата колекторска струја:

$$I_{C1} = h_{fe}' I_{b1}$$

Според I Кирхофов закон за точката $E_1=B_2$, за базната струја I_{b2} на транзисторот TR2 се добива:

$$I_{b2} = I_{b1} + h'_{fe} I_{b1} \approx h'_{fe} I_{b1} \quad \text{бидејќи} \quad h_{fe} \gg 1$$

а неговата колекторска струја се пресметува според:

$$I_{C2} = h''_{fe} I_{b2} = h_{fe} h'_{fe} I_{b1} = h_{fe} I_{b1}$$

каде

$$h_{fe} = h'_{fe} \cdot h''_{fe}$$

Еквивалентниот коефициент h_{fe} на Дарлингтонов спој е еднаков на производот на коефициентите h_{fe} на одделните транзистори на спојот. Тој има многу голема вредност.

Струјното засилување се дефинира со односот на излезната струја на транзисторот TR2 и влезната струја на транзисторот TR1:

$$A_I = \frac{I_{C2}}{I_{b1}} = \frac{h_{fe} h'_{fe} I_{b1}}{I_{b1}} = h_{fe} h'_{fe} = h_{fe}$$

Струјното засилување на Дарлингтоновиот спој е еднакво на производот на коефициентите на струјно засилување на двата транзистора, односно на еквивалентниот коефициент h_{fe} на Дарлингтоновиот спој.

Влезниот напон е помеѓу приклучоците база-емитер на Дарлингтоновиот транзистор и се одредува преку изразот:

$$U_{BE} = U_{B1E2} = h_{ie}' I_{b1} + h_{ie}'' I_{b2} = h_{ie}' I_{b1} + h_{ie}'' (I_{b1} + h_{fe}' I_{b1}) = (h_{ie}' + h_{ie}'' + h_{fe}' h_{ie}'') I_{b1}$$

За влезната отпорност се добива:

$$R_{vl} = \frac{U_{BE}}{I_b} = \frac{(h_{ie}' + h_{ie}'' + h_{fe}' h_{ie}'') I_{b1}}{I_{b1}} = h_{ie}' + h_{ie}'' + h_{fe}' h_{ie}''$$

Влезната отпорност на Дарлингтоновиот спој е голема, поголема од влезната отпорност на првиот транзистор во врската.

Од претходната анализа може да се заклучи дека Дарлингтоновиот спој со два транзистора има голем коефициент на струјно засилување и голема влезна отпорност, што претставува негова предност во однос на конвенционалниот транзистор.

Бидејќи емитерската струја на првиот транзистор од Дарлингтоновиот транзисторски пар, претставува базна струја на вториот транзистор, се постигнува управување на голема струја (1A) со многу мала струја (10mA).

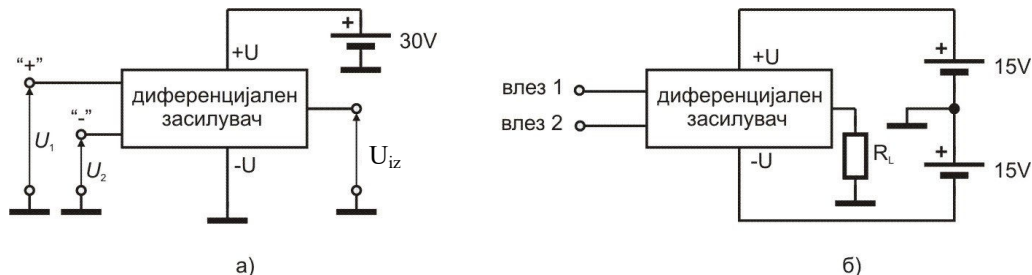
Недостаток на Дарлингтоновиот спој е температурната нестабилност на параметрите а со тоа и положбата на работната точка.

Еквивалентниот транзистор добиен со Дарлингтонов спој на два транзистора, се употребува кај засилувачи од кои се бара големо засилување (струјно и напонско) и голема влезна отпорност, односно кај засилувачите на моќност.

4.19 Диференцијален засилувач

Диференцијален засилувач е засилувач со два влеза, едниот означен со „-“ кој се нарекува **инвертирачки**, а другиот **неинвертирачки** и се означува со „+“. На двата влеза се доведуваат два различни сигнала, U_1 и U_2 . Засилувачот има само еден излез на кој се добива напон пропорционален со разликата од двата влезни напони.

Блок-шема на диференцијален засилувач е дадена на слика 4.46. Напонот за напојување може да биде едноделен, како на слика 4.46 а), или дводелен, како на слика 4.46 б). Точката со нулти потенцијал во колото (маса) е точката на поврзување помеѓу изворите $+U$ и $-U$.



Слика 4.46: 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** се означува со U_d : $U_d = U_1 - U_2$

додека **диференцијалното засилување** со A_d : $A_d = \frac{U_{iz}}{U_d}$.

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

$$U_c = \frac{U_1 + U_2}{2},$$

а **истофазното засилување** A_c како: $A_c = \frac{U_{iz}}{U_c}$.

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

$$U_{iz} = U_d A_d + U_c A_c.$$

Секој од влезовите има спротивно влијание врз излезот. 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.

Со односот на диференцијалното засилување A_d и истофазното засилување A_c се дефинира факторот на потиснување $CMRR$ (*Common-Mode Rjection Ratio*):

$$CMRR = \frac{A_d}{A_c}$$

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:

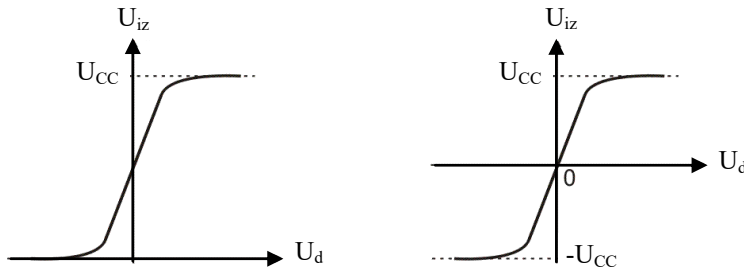
$$\rho = \frac{|A_d|}{|A_c|} \text{ кој треба да биде што е можно поголем.}$$

Овој фактор може да се изрази и во децибели како:

$$\rho(dB) = 20 \log \frac{|A_d|}{|A_c|} \text{ или } \rho(dB) = A_d(dB) - A_c(dB).$$

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 .

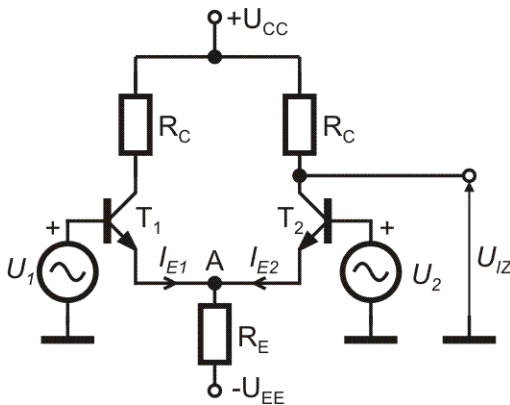
Преносна карактеристика на диференцијалниот засилувач е дадена на слика 4.47.



а) со едноделен напон за напојување б) со дводелен напон за напојување

Слика 4.47: 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 зголеми диференцијалниот влезен напон, излезниот напон не може да ја пречекори вредноста на напонот на напојувањето во негативната или во позитивната насока.



Слика 4.48: Електрична шема на диференцијален засилувач

Колото на основниот диференцијален засилувач со биполарен транзистор е дадено на слика 4.48. Колото е симетрично околу вертикалната линија преку средината. Идентична е изведбата и со MOSFET.

За поставување на положбата на работната точка се користат два извора за напојување $+U_{CC}$ и $-U_{EE}$. Ако нема сигнали на влезите, 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 низ отпорникот R_E се одредува според:

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

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

$$I_{E1} = I_{E2} = \frac{1}{2} I_{RE}.$$

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.

Идеален диференцијален засилувач има само диференцијално засилување, а засилувањето на истофазните сигнали е еднакво на нула. Во таков случај имаме:

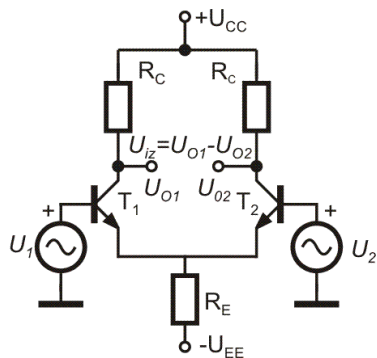
$$U_1 = \frac{U_d}{2} \text{ и } U_2 = \frac{-U_d}{2}$$

Со зголемувањето на диференцијалниот сигнал U_1 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 неизменен сигнал.

Сега анализата се упростила, така што половината од диференцијалниот засилувач претставува засилувач во спој со заеднички емитер, прикажан на слика 4.49. Неговото засилување е големо, тоа е диференцијалното засилување на целиот засилувач:

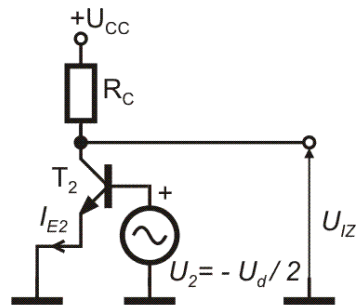
$$A_d \approx \frac{R_C}{2h_{ie}}.$$

За одредени намени, излезот може да биде приклучен на двата колектора, како што е прикажано на слика 4.50.



Слика 4.50: Диференцијален засилувач со излез помеѓу два колектора

Диференцијалниот засилувач најчесто е влезен степен во голем број интегрирани засилувачи. Се применува и кај уреди со мали влезни сигнали со голем шум (аудиосигнали, радиофреквентни сигнали).



Слика 4.49: Половина од диференцијален засилувач во спој со заеднички емитер

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

$$U_{iz} = U_{O1} - U_{O2}.$$

и тој е два пати поголем од претходниот пример.

Засилувањето на ова коло е:

$$A_d \approx -\frac{R_C}{h_{ie}}.$$



Работната точка кај засилувач во класа А е поставена на средината на работната права, кај засилувачот во класа Б се наоѓа на почетокот на работната права, кај засилувачот во класа АВ таа се наоѓа меѓу точките А и Б а кај засилувачот во класа С е поставена во областа на инверзната поларизација.

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 mW до стотина W.

б) максималната моќност на засилувачот се поврзува со одреден коефициент на нелинеарните изобличувања. Во еден повеќестепен засилувач, најголемите нелинеарни изобличувања ги создава излезниот степен. Така, на пример, за преносливи радиоприемници нелинеарните изобличувања достигнуаат до 10%, поквалитетните радиоприемници и засилувачи за озвучување од 2 до 6%, а висококвалитетните (*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 **коефициент на корисно дејство η** :

$$\eta = \frac{P_k}{P_0}$$

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.

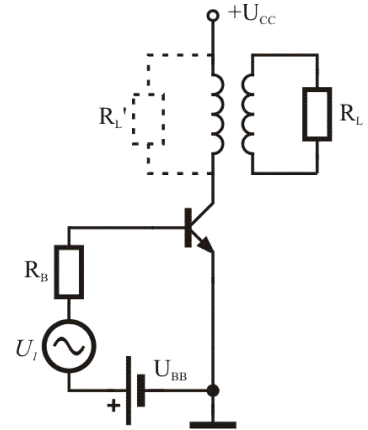
Излезниот степен може да работи во класа А, класа Б и класа АВ и во сите три вида споеви, со заеднички емитер, заедничка база, заеднички колектор, односно со заеднички сорс, заеднички гејт и заеднички дрејн. Најмногу се употребува спојот со заеднички емитер, односно заеднички сорс, затоа што има поголемо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

4.20.1 Засилувач на моќност во класа А

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 коефициент на корисно дејство. Работните услови диктираат низ транзисторот постојано да тече струја, без разлика 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 4.51. Со примена на трансформаторот се постигаат поповолни услови за работа. Како прво, се избегнува еднонасочната струја да тече преку потрошувачот, со што се подобрува коефициентот 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 4.51: Засилувач на моќност во класа А со трансформатор

Отпорот на оптоварувањето R_L се пресликува на примарната страна на трансформаторот според изразот:

$$R_L' = R_L \cdot n_p^2 = R_L \cdot \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2$$

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, дадена на слика 4.52.

На влезот на засилувачот е приклучен наизменичен напон:

$$u_{vl} = U_{vlm} \sin \omega t$$

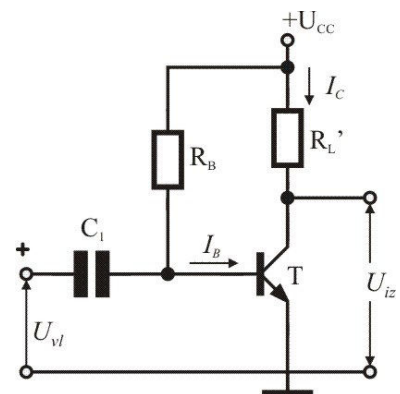
каде:

u_{vl} е моментална вредност на влезниот напон,

U_{vlm} е амплитуда, а

ω – кружна фреквенција.

Овој наизменичен напон му се додава на еднонасочниот напон на поларизација на базата U_{BE} .



Слика 4.52: Засилувач на моќност во класа А

Струјата на базата, исто така, содржи еднонасочна и наизменична компонента и има форма дадена со изразот:

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

каде 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:

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

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

Излезниот напон на засилувачот се добива од изразот:

$$u_{IZ} = u_{CE} = I_{C(M)} R'_L - I_{cm} R'_L \sin \omega t \quad \text{односно,} \quad u_{IZ} = U_{CE(M)} - U_{cem} \sin \omega t$$

За струјното, напонското и засилувањето на моќност важат претходно дефинираните изрази:

$$A_i = \frac{I_{izm}}{I_{vlm}} = \frac{I_{cm}}{I_{bm}}$$

$$A_u = \frac{U_{izm}}{U_{vlm}} = \frac{U_{cem}}{U_{bem}}$$

$$A_P = \frac{P_{iz}}{P_{vl}} = A_u \cdot A_i$$

Корисната моќност се пресметува според:

$$P_k = \frac{1}{2} \cdot I_{cm} \cdot U_{cem}$$

а потрошената моќност од изворот:

$$P_0 = U_{CC} I_{C(M)}$$

Претходно дефиниравме дека положбата на работната точка кај засилувачите на моќност во класа А е на средината на работната права (слика 4.53), од каде за $U_{CE(M)}$ се добива:

$$I_{cm} = I_{C(M)} \quad \text{и} \quad U_{cem} = U_{CE(M)} = \frac{U_{CC}}{2}$$

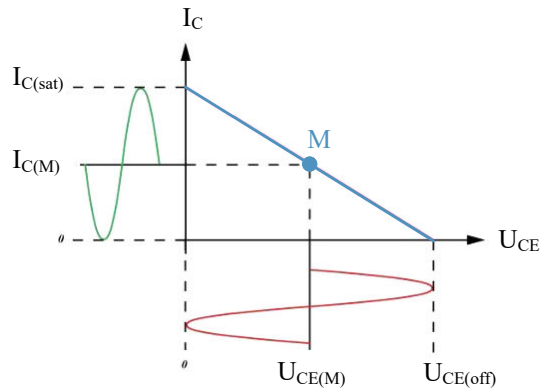
Со замена на претходните изрази во коефициентот на корисно дејство, се добива:

$$\eta = \frac{P_k}{P_0} \cdot 100 = \frac{\frac{1}{2} \cdot I_{cm} \cdot U_{cem}}{I_{C(M)} \cdot U_{CC}} \cdot 100 = \frac{\frac{1}{2} \cdot I_{C(M)} \cdot \frac{U_{CC}}{2}}{I_{C(M)} \cdot U_{CC}} = 0,25 \cdot 100 = 25\%$$

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:

$$P_D = P_0 - P_k$$

Малиот коефициент на корисно дејство и големите изобличувања на амплитудата, се причина засилувачите на моќност во класа А да се применуваат исклучиво како напонски засилувачи на мали сигнали.



Слика 4.53: Положба на работната точка кај засилувач на моќност во класа А

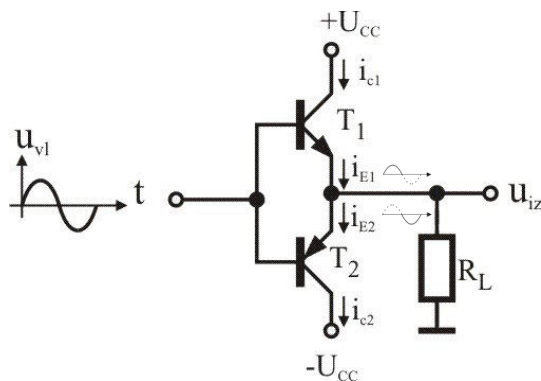
4.20.2 Пуш-пул засилувач на моќност во класа Б



Положбата на работната точка кај засилувачот во класа Б е на граница на исклучување. Во едната полупериода работи во подрачје на заситување а во другата тој е закочен, односно се наоѓа во подрачје на запирање.

Недостатокот на засилувачот на моќност, мал фактор на корисно дејство, се надминува со поврзување на два транзистора при што се добива поголема излезна моќност 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. Излезниот трансформатор во симетричните засилувачи има такви карактеристики што внесува и линеарни и нелинеарни изобличувања во сигналот, особено при ниски фреквенции. Со употреба на комплементарни транзистори, симетричниот засилувач може да се изведе и без излезен трансформатор. Комплементарен транзисторски пар е составен од два транзистора со идентични карактеристики, притоа едниот е од NPN-тип а другиот од PNP-тип.

Електрична шема на пуш-пул засилувач на моќност во класа Б е прикажана на слика 4.54. Напојувањето на колото е симетрично ($+U_{CC}$ и $-U_{CC}$), влезниот сигнал се доведува на базите на транзисторите а излезниот сигнал на спојот на двата емитера. Транзисторите не спроведуваат сè додека напонот на нивните бази не ја достигне вредноста $0,7V$ за T_1 (NPN-тип), односно $-0,7V$ за T_2 (PNP-тип).



Слика 4.54: Пуш-пул засилувач во класа Б

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:

$$u_{IZ} > U_{CC} - U_{CE(sat)}$$

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:

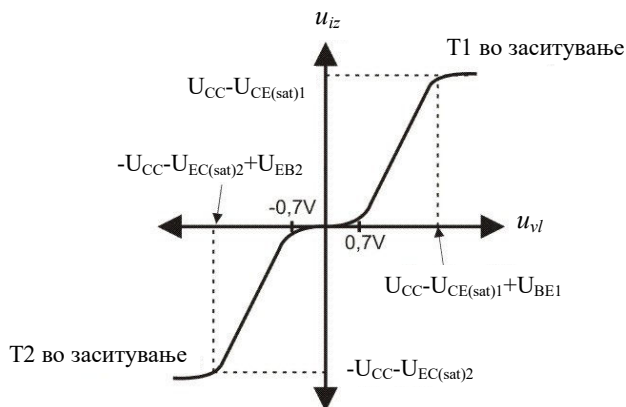
$$i_{RL} = -i_{E2} \approx -i_{C2}$$

Кога излезниот напон ќе ја достигне вредноста:

$$u_{IZ} < -U_{CC} + U_{CE(sat)}$$

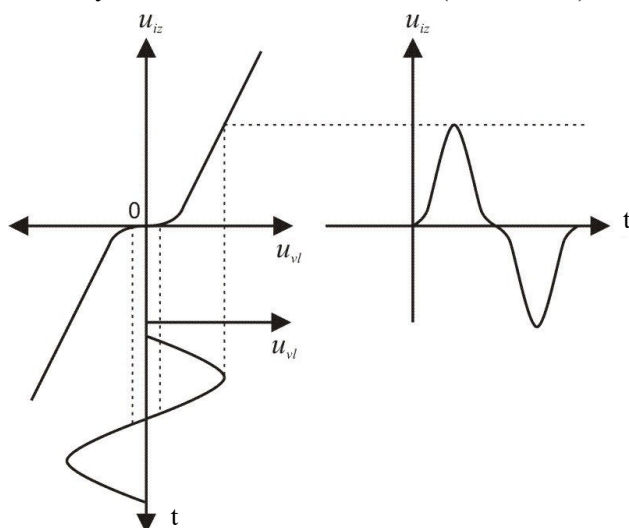
транзисторот T_2 влегува во заситување.

На слика 4.55 е дадена преносната карактеристика на комплементарен симетричен засилувач.



Слика 4.55: Преносната карактеристика

Во временскиот интервал кога не спроведуваат двата транзистора доаѓа до изобличување на излезниот сигнал (слика 4.56).



Слика 4.56: Изобличување на излезниот сигнал

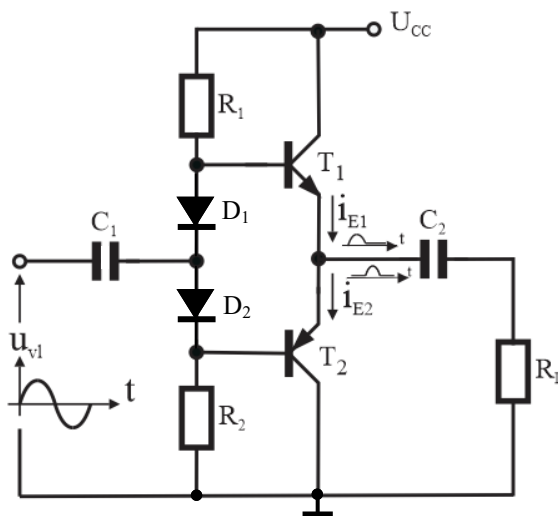
Ако двата транзистора имаат еднакви параметри, нивните колекторски струи ќе бидат симетрични, а нелинеарните изобличувања минимални. Со противфазна работа на комплементарните транзистори отпаѓа потребата од побуден трансформатор, што дава подобрување на фреквенциската карактеристика.

Бидејќи кај транзисторот во класа Б, работната точка се наоѓа во долниот дел на преносната карактеристиката, во точка во која престанува да тече колекторската струја, низ него, во отсуство на влезен наизменичен сигнал, не тече еднонасочна колекторска струја, па нема ниту колекторска дисипација (претворање на електричната струја во топлина). Колекторската струја протекува само при присуство на влезен сигнал и тоа кај NPN-транзисторите за време на позитивната полупериода, а кај PNP-транзисторите за време на негативната полупериода на влезниот наизменичен сигнал. Степенот на искористување е многу поголем од засилувачите во класа А, а исто така и корисната моќност е поголема. Ефикасноста, односно коефициентот на полезно дејство на засилувачите од класа Б, изнесува околу 75%. Дисипацијата на транзисторите е многу помала, па нема потреба од користење на големи ладилници дури и при поголеми моќности. За сметка на тоа, изобличувањето на сигналот е многу поголемо, што претставува основен недостаток на класата Б. Затоа во засилувачите од класа Б никогаш не се користи само еден транзистор, туку секогаш се користат два транзистора во симетрична спрега.

4.20.3 Пуш-пул засилувач на моќност во класа АБ

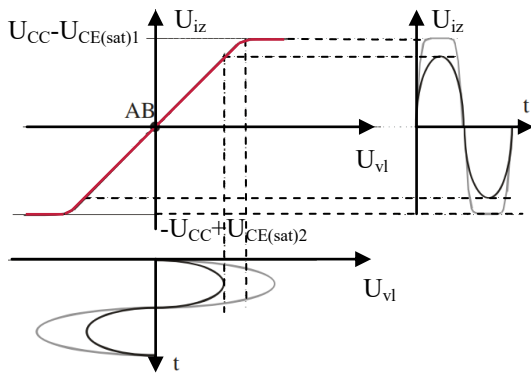
За да се намалат изобличувањата на корисниот сигнал, работната точка се поставува во една меѓукласа која се нарекува АБ. Тоа се постигнува така што преднапонот на базата од транзисторот се поставува повисоко во однос на преднапонот кај класата Б, но пониско од преднапонот кај класата А. На тој начин, при мирување (во отсуство на влезен сигнал), низ транзисторот протекува мала колекторска струја, но не толку голема како кај транзисторите во А класа.

На слика 4.57 е дадена изведба на пуш-пул засилувач во класа АБ. Во влезното коло се приклучени две диоди, D_1 и D_2 , низ кои тече еднонасочна струја од изворот на поларизација U_{CC} со константен пад на напон на нивните краеве ($0,7V$). И кај оваа класа (како во класата Б) мора да се користат два транзистори во симетрична спрега. Едниот (T_1 од NPN-тип), за засилување на позитивната полупериода а другиот транзистор (T_2 од PNP-тип) за засилување на негативната полупериода од влезниот наизменичен сигнал. Со кондензаторот за спрега C_{S2} , е оневозможено протекување на еднонасочната струја за поларизација низ потрошувачот.



Слика 4.57: Пуш-пул засилувач во класа АБ

За време на позитивната полупериода на наизменичниот влезен сигнал, потенцијалот на базата на транзисторот T_1 е на ист потенцијал со анодата на диодата D_1 , што овозможува спроведување на транзисторот T_1 . За време на негативната полупериода на влезен сигнал, потенцијалот на базата на транзисторот T_2 е на ист потенцијал со катодата на диодата D_1 , што овозможува спроведување на транзисторот T_2 . Транзисторите спроведуваат и за нулта вредност на влезниот сигнал со што изобличувањето на излезниот сигнал е незначително (слика 4.58).

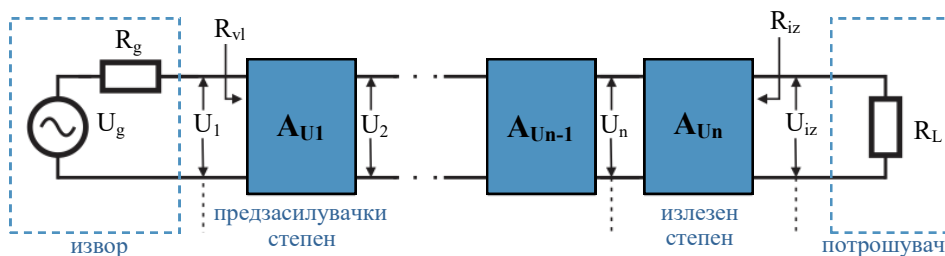


Слика 4.58: Преносна карактеристика

Ефикасноста, односно коефициентот на полезно дејство на засилувачите од класа АБ е поголема од ефикасноста на засилувач во класа А, но е помала од засилувач во класа Б (од 25% до 70%). Корисната моќност е помала од онаа во класа Б, но затоа изобличувањата се исто така многу помали како и топлотната дисипација. Компромисот помеѓу ефикасноста и изобличувањето на излезниот сигнал е постигнат кај овие засилувачи. Класа АБ се применува најчесто кај излезни транзистори во моќни аудио засилувачи, но и кај линеарни РФ-засилувачи.

Еден засилувачки степен се дефинира како засилувачко коло кое користи еден транзистор. Кога во системот е потребно поголемо засилување од засилувањето што го дава еден засилувачки степен, 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 зголемување на засилувањето.

Примерот на повеќестепен засилувач на нискофреквенциските аудиосигнали од опсегот 20 Hz до 20 kHz е даден на слика 4.59.



Слика 4.59: Каскадна врска на засилувачи

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

$$A_{U1} = \frac{U_2}{U_1} \quad A_{U2} = \frac{U_3}{U_2} \quad \dots \quad A_{Un-1} = \frac{U_n}{U_{n-1}} \quad A_{Un} = \frac{U_{iz}}{U_n}$$

$$U_2 = A_{U1} U_1 \quad U_3 = A_{U2} U_2 = A_{U2} A_{U1} U_1 \quad \dots \quad U_{iz} = A_{Un} U_n = A_{Un} A_{Un-1} \dots A_{U2} A_{U1} U_1$$

$$A_U = \frac{U_{iz}}{U_1} = A_{U1} A_{U2} A_{U3} \dots A_{Un}$$

каде што n претставува вкупен број на засилувачки степени.

За струјното засилување на каскадата се добива:

$$A_I = A_{I1} A_{I2} A_{I3} \dots A_{In}$$

Во каскадна врска вкупното засилување се добива како производ од поединечните засилувања на степените.

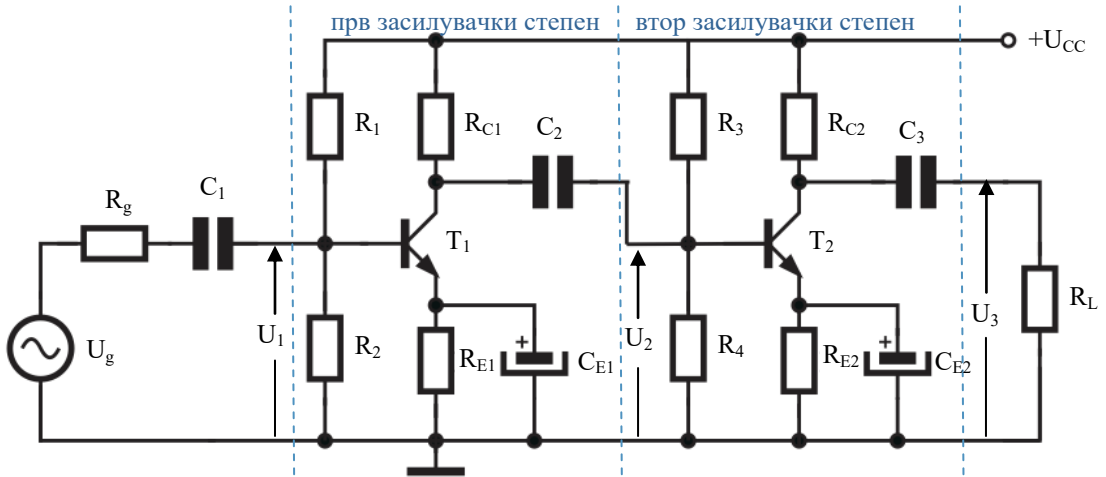
Засилувањето на засилувачите често претставува голема бројка. Во тој случај, поповолно е напонското засилување да се искажува во децибели според релацијата:

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

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

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

На слика 4.60 е прикажана електрична шема на два каскадно поврзани засилувачи со заеднички емитер и кондензатори за спрега C_1 , C_2 и C_3 .



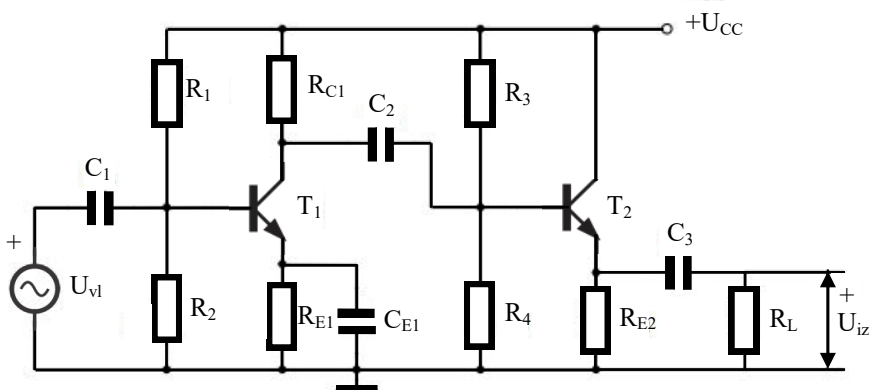
Слика 4.60: Каскадна врска на два засилувачки степена

Од претходната анализа на засилувач во спој со заеднички емитер, видовме дека напонското засилување зависи од вредноста на отпорноста на отпорникот во колекторското коло R_C и на потрошувачот R_L . На првиот степен, потрошувач претставува влезната отпорност на вториот степен. Од причина што влезната отпорност на засилувач во спој со заеднички емитер е многу мала, засилувањето на првиот степен ќе биде намалено, додека на вториот степен, на чиј излез е приклучен потрошувачот R_L , не се намалува.

И струјното засилување исто така е намалено од причина што излезната струја од првиот засилувачки степен се дели на струја низ отпорникот R_{C1} и влезната отпорност на вториот степен R_{v12} .

Излезниот сигнал останува во фаза со влезниот бидејќи и двата степена внесуваат фазно поместување од 180° .

За приспособување на излезната отпорност на вториот (последниот) степен на каскадата, со влезната отпорност на потрошувачот, истиот се заменува со засилувач во спој со заеднички колектор (слика 4.61), кој има мала влезна отпорност и напонско засилување приближно 1. На тој начин е обезбедено приспособување на отпорностите и непроменето засилување.



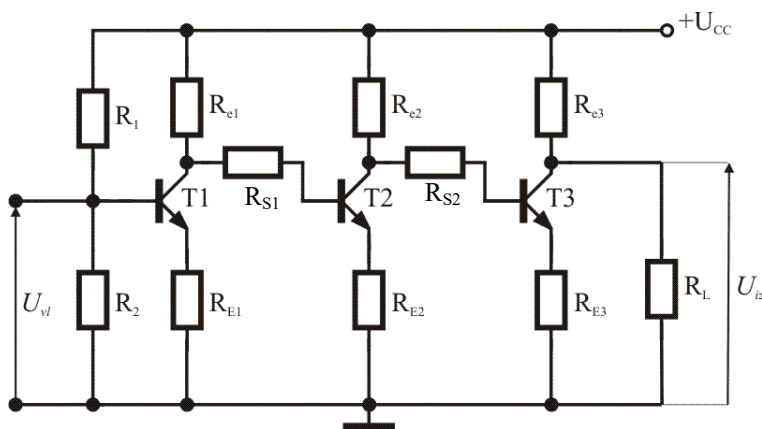
Слика 4.61: Каскадна врска на два засилувачки степена

4.22 Видови спреги кај засилувачите

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

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

Директна спрега меѓу засилувачите се обезбедува со отпорник или со Зенер диода (слика 4.62). Со оваа врска е овозможено пренесување на еднонасочната компонента, како и на сигналите со многу ниска фреквенција.

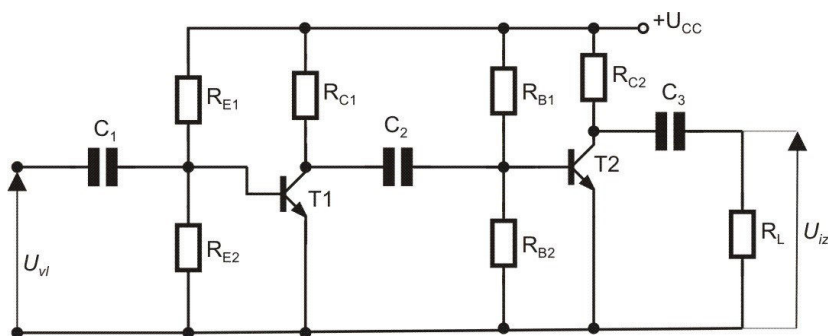


Слика 4.62: Директна спрега на засилувачи

Спрежниот отпорник внесува пад на напонот на сигналот и сигналот се ослабува пред да се пренесе на следниот степен. Освен тоа, промената на работната точка се однесува како нискофреквенциски сигнал кој се пренесува на следниот степен и претставува сигнал на пречка.

Отстапувањето на работната точка може да биде предизвикано од промена на температурата на транзисторот, кое се менува по одреден закон, или отстапувања со случаен карактер, предизвикани од промената на напонот на напојувањето, или од промената на параметрите на елементите со време (старење).

Капацитивната спрега се остварува со кондензатор приклучен меѓу излезот на претходниот и влезот на следниот степен. На слика 4.63 е прикажана капацитивна спрега со кондензаторот C_2 меѓу два засилувачки степен.



Слика 4.63: Капацитивна спрега на два засилувачи

Освен што обезбедува пренос на наизменичниот сигнал од степен со T1 на степен со T2, кондензаторот C₂ овозможува работните точки на засилувачките степени да се поставуваат независно една од друга.

Во опсегот на средните и високите фреквенции на засилувачите, кондензаторот за спрега има многу мала импеданса и ги пропушта без слабеење.

Неговата импеданса се зголемува за ниските фреквенции и тој ќе ги пропушта сигналите само до одредена граница кога засилувањето ќе опадне $\sqrt{2}$ пати.

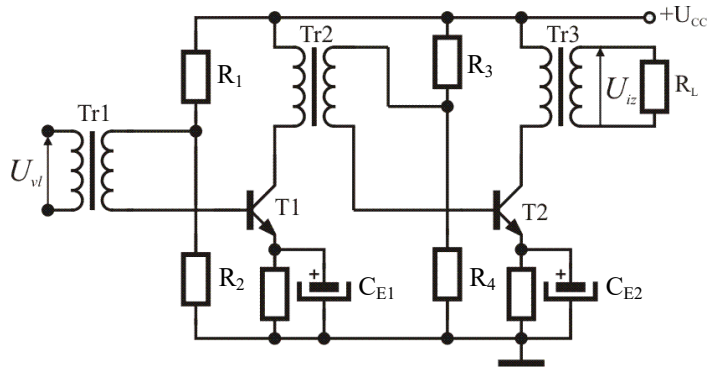
На формата на фреквенциската карактеристика најголемо влијание имаат RC-членовите присутни на влезот, на излезот и на другите места во засилувачот. Секој од овие членови дејствува како високопропусен филтер и ја ограничува карактеристиката при ниските фреквенции. Долната гранична фреквенција на таков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

$$fd = \frac{1}{2\pi R_{ekv} C_{ekv}}.$$

Кај засилувач со повеќе RC-членови, како на слика 4.63, долната гранична фреквенција е одредена од степенот што има највисока долна гранична фреквенција.

Истата анализа се применува и за засилувачите со MOSFET.

За **трансформаторската спрега** самото име кажува дека сигналот меѓу два соседни засилувачки степени се пренесува со трансформатор (слика 4.64).



Слика 4.64: Трансформаторска спрега

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.

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



Резиме - Конфигурации на засилувачки степени

- Дарлингтоновиот спој со два транзистора има голем коефициент на струјно засилување и голема влезна отпорност.
- Струјното засилување на Дарлингтоновиот спој е еднакво на производот на коефициентите на струјно засилување на двата транзистора.
- Диференцијален засилувач е засилувач со два влеза, инвертирачки кој се означува со "-", и неинвертирачки означен со "+".
- Со диференцијален засилувач се засилува разликата на влезните сигнали.
- Истофазен сигнал U_c се дефинира како средна вредност на двата влезни сигнали.
- Економичноста на засилувачите на моќност се дефинира со коефициент на корисно дејство η .
- Положбата на работната точка кај засилувачите на моќност во класа А се наоѓа на средината на работната права.
- Малиот коефициент на корисно дејство и големите изобличувања на амплитудата, се причина засилувачите на моќност во класа А да се применуваат исклучиво како напонски засилувачи на мали сигнали.
- Коефициентот на полезно дејство на засилувачите од класа А е 25%.
- Кај транзисторот во класа Б, работната точка се наоѓа во долниот дел на преносната карактеристиката, во точка во која престанува да тече колекторската струја низ него.
- Ефикасноста, односно коефициентот на полезно дејство на засилувачите од класа АБ е поголема од ефикасноста на засилувач во класа А, но е помала од засилувач во класа Б (од 25% до 70%).
- 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.
- Во каскадна врска вкупното засилување се добива како производ од поединечните засилувања на степените.
- Засилувачите во каскадата можат меѓусебно да се поврзуваат на три начини: со директна, капацитивна и со трансформаторска спрега.



I Прашања со заокружување

- Кај диференцијалните засилувачи, разликата на влезните сигнали се нарекува:
 - диференцијален сигнал
 - истофазен сигнал
 - излезен сигнал.
- Во Дарлингтонов спој се применети идентични транзистори со коефициент на струјно засилување $\beta=50$. Колкаво е струјното засилување на спојот?
 - 2500A
 - 100
 - 2500.
- Во која класа ќе работи засилувачот, ако на влезот на комплементарен пар транзистори приклучиме две диоди?
 - A
 - AB
 - B.

II Прашања со поврзување

- Поврзи ја класата на засилувач на моќност со вредноста на неговиот коефициент на корисно дејство!

1.	A	a) 25%	_____
2.	AB	б) (25-70)%	_____
3.	B	в) 75%	_____

III Прашања со дополнување

- Коефициентот η претставува _____.
- Засилувачите на моќност во класа A имаат _____ (мал/голем) коефициент на корисно дејство и _____ (мали/големи) изобличувања на амплитудата.
- Положбата на работната точка кај засилувачите на моќност во класа A е на _____ (почеток/средината) на работната права.
- Коефициентот на полезно дејство на засилувачите од класа AB е _____ (поголем/помал) од ефикасноста на засилувач во класа A, но е _____ (поголем/помал) од засилувач во класа B.
- Засилувачите во каскадата можат меѓусебно да се поврзуваат на три начини: со _____, _____ и со _____ спрега.
- Приспособување на излезната импеданса во каскадна врска на засилувачи се постигнува со примена на засилувач во спој со заеднички _____ (емитер/база/коллектор) како последен степен во каскадата.
- Кога засилувањето на степените во каскадата е изразено во децибел, вкупното засилување се добива како _____ (збир/производ) на поединечните засилувања на степените во каскадата.

Прашања за утврдување на знаењата од МЕ 4

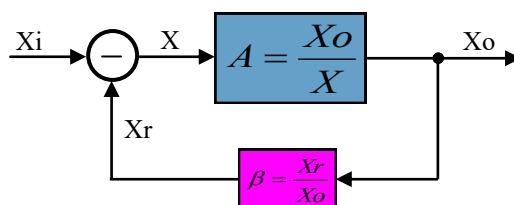
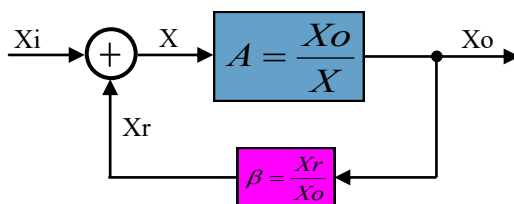
1. Дефинирај фреквенциска карактеристика на засилувачот.
2. Нацртај фазна карактеристика на засилувачот и дефинирај ги долната и горната гранична фреквенција.
3. Како се одредува пропусниот опсег на засилувачот?
4. Како се дефинира струјното засилување на засилувачот?
5. Напиши равенка со која ќе го претставиш напонското засилување на засилувачот.
6. Напиши релации со кои се дефинира влезната и излезната отпорност.
7. За какви влезни сигнали се користи графичката метода за одредување на засилувањето?
8. Како треба да бидат поларизирани PN-споевите на транзисторот за тој да работи како засилувач?
9. Со кој отпорник се одредува положбата на работната права?
10. Со кој отпорник се обезбедува температурна стабилизација на работната точка?
11. Која е улогата на кондензаторите C_1 и C_2 ?
12. Напиши ја равенката на статичката работна права.
13. Објасни ја стабилизацијата на работната точка со отпорникот R_E при температурни промени.
14. Изведи го аналитички изразот за напонското и струјното засилување на транзисторот во спој со заеднички емитер, заедничка база и заеднички колектор.
15. Изведи го аналитичкиот израз за напонското засилување на транзисторот во спој со заеднички сорс, заеднички гејт и заеднички дрејн.
16. Дефинирај го факторот на потиснувањето на истофазниот сигнал кај диференцијален засилувач?
17. Кои извори се користат за одредување на положбата на работната точка?
18. Колкаво е истофазното засилување кај идеален диференцијален засилувач?
19. Кои се основните барања пред засилувачот на моќност?
20. Кои се недостатоците на излезниот степен во класа А?
21. Која конфигурација најмногу одговара за симетричните засилувачи на моќност?
22. Од која причина засилувачите во класа В се прават само во симетрична врска?
23. Објасни го принципот на работа на симетричниот степен во класа В?
24. Како може да се направат симетрични засилувачи во класа В без влезни и излезни трансформатори?
25. Каква конфигурација се користи кога системот бара поголемо засилување од засилувањето што го дава еден засилувачки степен?
26. Што треба да обезбеди првиот степен на каскадата?
27. Каков засилувач треба да биде последниот засилувач во каскадата и што треба да обезбеди?
28. Кои се начините на меѓусебното поврзување на засилувачите во каскадата?
29. Која е улогата на кондензаторот за врска при различни фреквенции?
30. Од што зависи долната гранична фреквенција на засилувач со капацитивна врска?
31. Како се обезбедува директната врска?

Модуларна единица

5. Засилувачи со негативна повратна врска

Со изучување на содржините од оваа модуларна единица ученикот ќе стекне основни знаења за влијание на негативната повратна врска во засилувачки степен и ќе може:

- да толкува влијание на повратната врска врз параметрите на засилувач;
- да опишува структура на засилувач со повратна врска;
- да наведува разлики меѓу позитивна и негативна повратна врска;
- да препознава типови негативна повратна врска;
- да реализира практични вежби за воспоставување и испитување линеарен засилувачки степен со негативна реакција;
- да опишува постапки за испитување засилувачки степен со негативна реакција.



Регистар на ознаки и поими:

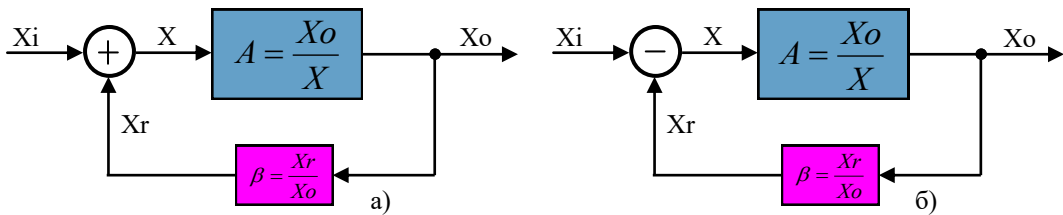
- X – побуден сигнал (напон/струја)
 - X_o – излезен сигнал (напон/струја)
 - X_r – сигнал (напон/струја) на повратната врска
 - X_i – влезен сигнал (напон/струја)
 - β – коефициент на повратна врска
 - A – засилување на засилувачот без повратна врска
 - A_r – засилување на засилувачот со повратна врска
 - βA – кружно засилување
 - F – факторот на повратната врска
 - f_g – горна гранична фреквенција без повратна врска
 - f_d – долна гранична фреквенција без повратна врска
 - B – пропусен опсег без повратна спрега
 - $B_r(+)$ – пропусен опсег на засилувач со позитивна повратна врска
 - $B_r(-)$ – пропусен опсег на засилувач со негативна повратна врска
 - f_d^+ – долна гранична фреквенција на засилувач со позитивна повратна врска
 - f_g^+ – горна гранична фреквенција на засилувач со позитивна повратна врска
 - f_d^- – долна гранична фреквенција на засилувач со негативна повратна врска
 - f_g^- – горна гранична фреквенција на засилувач со негативна повратна врска
 - Z_{ir} – влезна импеданса на засилувач со повратна врска
 - Z_{or} – излезна импеданса на засилувач со повратна врска
-
- **Повратна врска** – делумно или потполно пренесување на излезниот сигнал на засилувачот на неговиот влез
 - **Позитивна повратна врска** – фазите на влезниот и на вратениот сигнал се совпаѓаат
 - **Негативна повратна врска** – влезниот и вратениот сигнал се во противфаза
 - **Кружно засилување** на засилувачот – однос на вратениот X_r и побудниот сигнал X
 - **Фактор на повратна врска** – зависи од кружното засилување $F=1-\beta A$

5.1 Засилувач со повратна врска

Под поимот повратна врска се подразбира делумно или потполно пренесување на излезниот сигнал на засилувачот на неговиот влез. Сигналот кој се доведува од излезниот дел од колото во влезниот, преку посебно коло за повратна спрега, алгебарски се собира со сигналот на изворот со кој се побудува колото.

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 5.1.



Слика 5.1: Блок-шема на засилувач со а) позитивна б) негативна повратна врска

Колото на повратната врска е означено со β . Сигналот на повратната врска X_r го означува делот на излезниот сигнал X_o , вратен на влезот, преку колото на повратната врска. Со X е означен побудниот сигнал, добиен како резултатен сигнал на заедничкото дејство на влезниот сигнал X_i и сигналот на повратната врска X_r .

Во општ случај, засилувачот A не мора да биде едностепен засилувач. Тој може да биде составен од повеќе степени. Фазата на вратениот сигнал X_r може да се совпаѓа со фазата на влезниот сигнал X_i , или може да се разликува за 180° . 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° , повратната врска се нарекува негативна врска или **негативна повратна врска**.

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

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

$$X = X_i - X_r$$

Засилувањето со повратна врска се дефинира како:

$$A_r = \frac{X_o}{X_i}$$

додека засилувањето на засилувачот без колото за повратна врска:

$$A = \frac{X_o}{X} \text{ од каде } X \text{ се изразува како: } X = \frac{X_o}{A}$$

Колото на повратната врска се дефинира со **коэффициентот на повратна врска** β , како однос на вратениот и излезниот сигнал:

$$\beta = \frac{X_r}{X_o} \text{ од каде вратениот сигнал } X_r \text{ се изразува како: } X_r = \beta X_o$$

Коефициентот на повратна врска β е помал од 1, затоа што сигналот X_r е дел од излезниот напон. Во практиката, вредноста на коефициентот на негативната повратна врска β се движи во граници 0,05 - 0,2.

Со замена на добиениот израз за вратениот сигнал X_r во изразот за засилување на засилувачот со негативна повратна врска A_r се добива:

$$A_r = \frac{X_o}{X_i} = \frac{AX}{X + X_r} = \frac{AX}{X + \beta X_o} = \frac{AX}{X + \beta AX} = \frac{AX}{(1 + A\beta)X} = \frac{A}{(1 + \beta A)}.$$

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.

Производот βA се нарекува **кружно засилување** на засилувачот или преносна функција на отворено коло, бидејќи го дава односот на вратениот X_r и побудниот сигнал X , кога A и β се каскадно врзани:

$$\frac{X_r}{X} = \frac{X_r}{X_o} \cdot \frac{X_o}{X} = \beta A.$$

Засилувањето на засилувач со позитивна повратна врска може да се изрази на идентичен начин, ако се појде од изразот:

$$X = X_i + X_r \implies X_i = X - X_r = X - \beta X_o = X - \beta AX = (1 - \beta A)X \quad \text{каде} \quad X_o = AX$$

каде за засилување на засилувачот со позитивна повратна врска A_r се добива:

$$A_r = \frac{X_o}{X_i} = \frac{A}{(1 - \beta A)}.$$

ако се одбере факторот β така што βA да е помал од 1 и именителот ќе биде помал од 1, од каде следува дека $A_r > A$, односно засилувањето на засилувач со позитивна повратна врска е поголемо од засилувањето на истиот засилувач без повратната врска.

Именителот во изразот за напонско засилување со повратна врска се нарекува функција или фактор на повратната врска чија вредност зависи од производот βA :

$$F = 1 \pm \beta A$$

Кога факторот на повратната врска има вредност нула, засилувачот работи како осцилатор.

Често, јачината на врска се изразува во децибели како:

$$N = 20 \log \frac{A_r}{A} \text{ (dB)}.$$

За негативната повратна врска се добива изразот:

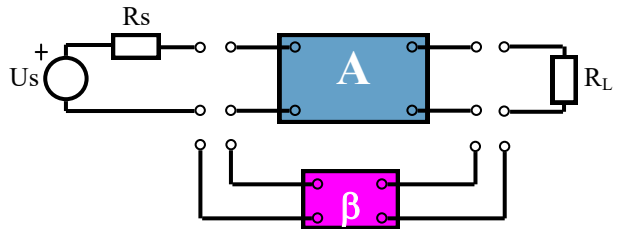
$$N = 20 \log \frac{1}{1 + A\beta} < 0,$$

додека за позитивната:

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

Така, на пример, ако јачината на повратната врска е изразена со бројот -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.

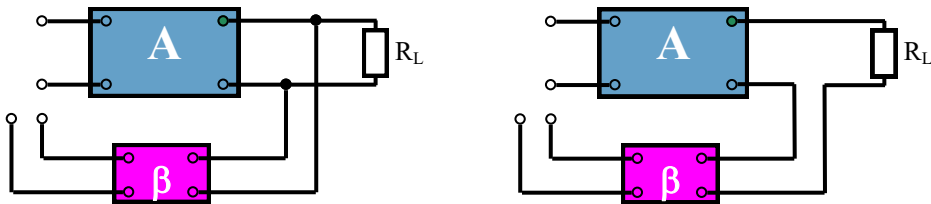
Влезните и излезните краеве на блоковите A и β меѓусебно можат да се поврзат сериски или паралелно (слика 5.2). Со нивна комбинација се добиваат четири вида повратни врски. Според начинот на приклучување на колото за повратна врска на излезот, разликуваме напонска и струјна негативна врска.



Слика 5.2: Поврзување на блоковите во блок-шема на засилувач со повратна врска

При паралелно поврзување на излезните краеве, сигналот на повратната врска е пропорционален со излезниот напон и тогаш станува збор на напонска повратна врска (слика 5.3 а). 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.

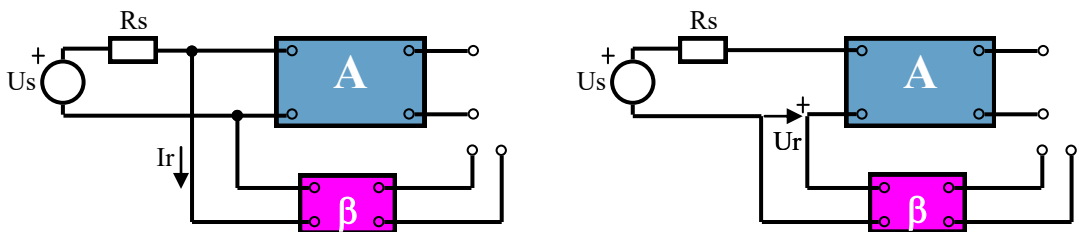
Кога излезните краеве се сериски поврзани, сигналот на повратната врска е пропорционален со излезната струја и тогаш станува збор за струјна повратна врска (слика 5.3 б). Влезната импеданса на колото за врска треба да биде помала од импедансата на потрошувачот, за да не ја намалува излезната струја.



Слика 5.3: а) Напонска повратна врска б) Струјна повратна врска

Паралелна негативна врска се добива кога излезот од колото на повратната врска (I_r) се приклучува паралелно на влезниот побуден сигнал (слика 5.4 а).

Сериска негативна повратна врска имаме кога излезниот напон од колото на повратната врска U_r се приклучува сериски со влезниот сигнал (слика 5.4 б).

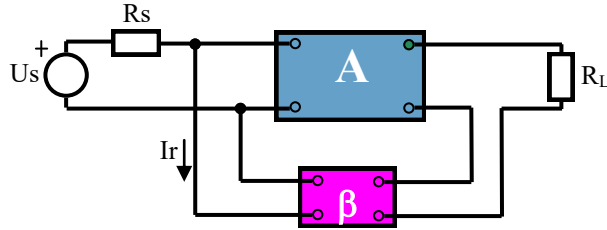


Слика 5.4: а) Паралелна негативна повратна врска б) Сериска негативна повратна врска

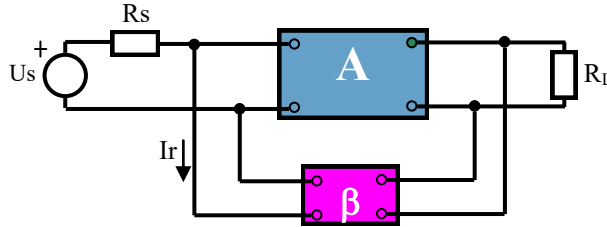
Бидејќи струјата I_r е пропорционална со излезната струја I_o при паралелна врска на влезните краеве, оваа врска се нарекува струјна, додека кај сериското поврзување напонот U_r е пропорционален со излезниот напон U_o , при што станува збор за напонска повратна врска.

Со комбинирање на начините на поврзување на влезните и излезните краеве на блоковите A и β и начинот на дејство на повратната врска на влезниот сигнал, се добиваат следните видови повратни врски:

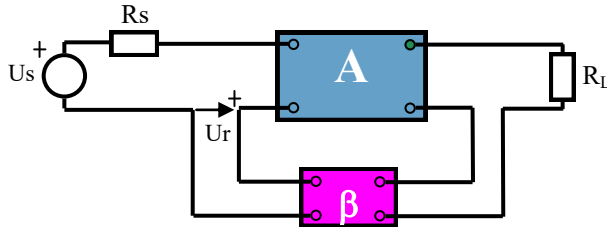
струјно паралелна повратна врска (слика 5.5), напонско паралелна повратна врска (слика 5.6), струјно сериска повратна врска (слика 5.7) и напонско сериска повратна врска (слика 5.8). Во зависност од дејството на повратниот сигнал на влезниот, повратната врска може да биде позитивна или негативна.



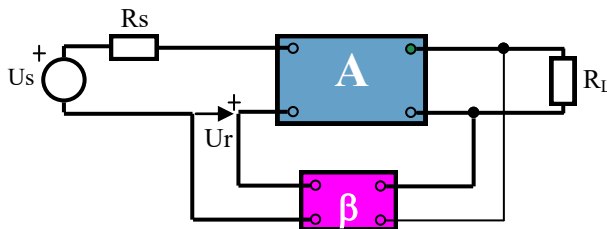
Слика 5.5: Струјно паралелна негативна повратна



Слика 5.6: Напонско паралелна негативна повратна

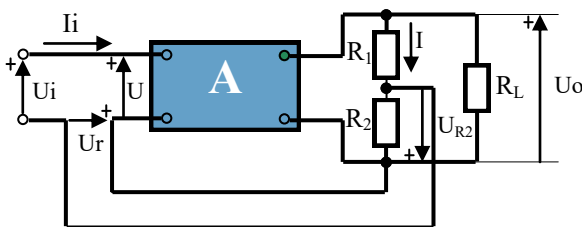


Слика 5.7: Струјно сериска негативна повратна



Слика 5.8: Напонско сериска негативна повратна

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 5.9: Реализација на напонско сериска негативна повратна

На слика 5.9 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 и R_2 , од каде коефициентот на повратна врска се изразува со релацијата:

$$\beta = \frac{U_r}{U_o} = \frac{R_2 \cdot I}{(R_1 + R_2) \cdot I} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$



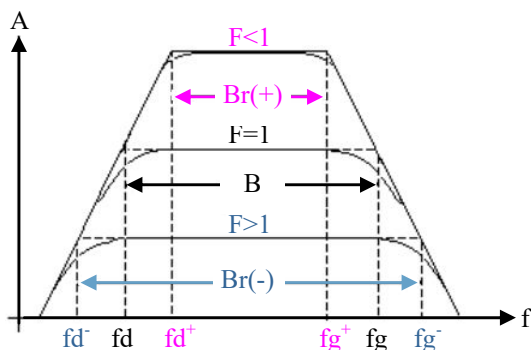
Кај негативната повратна врска кружното засилување βA е негативно, тоа значи дека функцијата на повратната врска F е поголема од 1 ($F=1-\beta A$).

Од претходната анализа за засилувањето на засилувачот со негативна повратна врска добивме:

$$A_r = \frac{X_o}{X_i} = \frac{A}{(1 - \beta A)} = \frac{A}{F}$$

Од причина што именителот на дропката (F) е поголем од 1, заклучуваме дека со воведување на негативна повратна врска, вкупното засилување A_r се намалува. Меѓутоа, намалувањето на засилувањето е проследено со подобрување на останатите параметри на засилувачот и тоа:

- зголемување на пропусниот опсег на засилувачот (слика 5.10);
- зголемување на динамичкиот опсег на засилувачот, односно зголемување на влезната големина со која се побудува засилувачот;
- намалување на осетливоста на засилувањето на промена на параметрите на колото (промена на температура, стареење, замена на еден транзистор со друг и др,) односно зголемување на стабилноста на засилувачот;
- намалување на нелинеарните изобличувања;
- намалување на шумот генериран во засилувачот.



Слика 5.10: Пропусен опсег кај засилувач со и без повратна врска

F - фактор на повратна врска
 B - пропусен опсег на засилувач без повратна врска
 f_d и f_g - долна и горна гранична фреквенција на засилувач без повратна врска
 $Br(+)$ - пропусен опсег на засилувач со позитивна повратна врска
 f_d^+ и f_g^+ - долна и горна гранична фреквенција на засилувач со позитивна повратна врска
 $Br(-)$ - пропусен опсег на засилувач со негативна повратна врска
 f_d^- и f_g^- - долна и горна гранична фреквенција на засилувач со негативна повратна врска

Ако на влезот на засилувачот дејствува сигнал со константна амплитуда, на излезот ќе се добие сигнал кој 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 сигнал, која се одзема од влезниот сигнал, се намалува за ниските и високите фреквенции, и како резултат доаѓа до поместување на долната и горната гранична фреквенција, како резултат се добива проширен пропусен опсег на засилувачот. Долната фреквенција се намалува за $(1-\beta A)$ -пати, додека горната се зголемува за истиот фактор.

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 $(1+\beta A)$ -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.

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.

За влезната импеданса на засилувач со сериска негативна повратна врска Z_{ir} (слика 5.9) се добива:

$$Z_{ir} = \frac{U_i}{I_i} = \frac{(U + U_r)}{I_i} = \frac{(U + \beta U_i z)}{I_i} = \frac{(U + A\beta U)}{I_i} = \left(\frac{U}{I_i}\right)(1 + A\beta) = Z_i \cdot F$$

каде Z_i претставува влезна импеданса на засилувачот без повратна врска.

Со примена на сериска повратна врска влезната импеданса се зголемува за вредноста на функцијата на повратната врска. За исто толкава вредност се зголемуваат или се намалуваат влезните и излезните импеданси за другите видови 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:

$$Z_{ir} = \frac{U_i}{I_i} = \frac{Z_{vl}}{(1 + A\beta)} = \frac{Z_i}{F}$$

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

$$Z_{or} = \frac{Z_o}{(1 + A\beta)} = \frac{Z_o}{F}$$

Доколку повратниот сигнал е пропорционален со струјата низ потрошувачот, неопходно е сериско поврзување на колото за повратна врска со потрошувачот. Во тој случај, од гледна точка на потрошувачот, вкупната излезна отпорност на засилувачот се зголемува во однос на излезната импеданса без повратна врска:

$$Z_{or} = Z_o(1 + A\beta) = Z_o \cdot F$$



Резиме - засилувачи со негативна повратна врска

- Под поимот повратна врска се подразбира пренесување на еден дел од излезниот сигнал на засилувачот на неговиот влез.
- Ако фазите на влезниот и на сигналот од повратната врска се совпаѓаат станува збор за позитивна повратна врска ако се разликуваат за 180° , повратната врска се нарекува негативна повратна врска.
- Напонска повратна врска се добива кога напонот на повратната врска е пропорционален на излезниот напон, а струјна кога напонот на повратната врска е пропорционален на излезната струја.
- Со примена на негативна повратна врска:
 - се намалува засилувањето на засилувачот,
 - се подобрува стабилноста,
 - се проширува пропусниот опсег,
 - се намалуваат нелинеарните изобличувања,
 - се намалува шумот кој се внесува со засилувачот.

Провери го своето знаење!



I Прашања со заокружување (заокружи ги точните одговори)

1. Кај засилувач со негативна повратна врска, побудниот сигнал X се добива како:
 - а) збир на влезниот и сигналот на повратната врска
 - б) разлика на влезниот и сигналот на повратната врска
 - в) производ на влезниот и сигналот на повратната врска.
2. Факторот на повратна врска кај засилувач со негативна повратна врска е:
 - а) $F < 1$
 - б) $F = 1$
 - в) $F > 1$.

II Прашања со дополнување

3. Ако фазите на влезниот и на сигналот од повратната врска се разликуваат за 180° , повратната врска се нарекува _____ (позитивна/негативна) повратна врска.
4. Односот на вратениот X_g и побудниот сигнал X , кај засилувач со коло на повратна врска, се нарекува _____ (кружно засилување/ коефициент на повратна спрега).



Прашања за утврдување на знаењата од МЕ 5

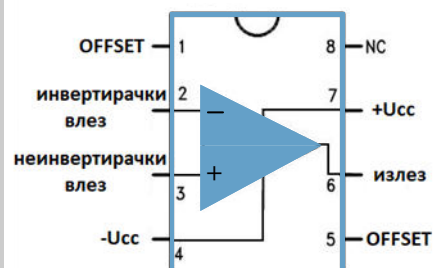
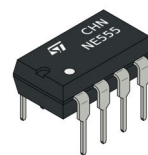
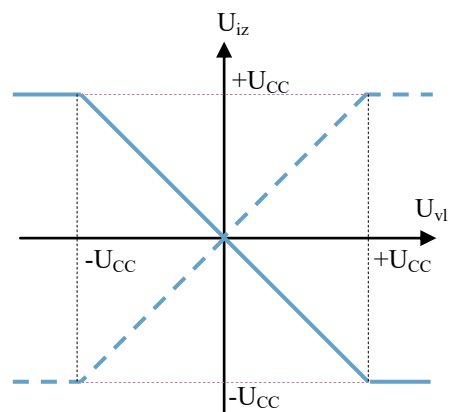
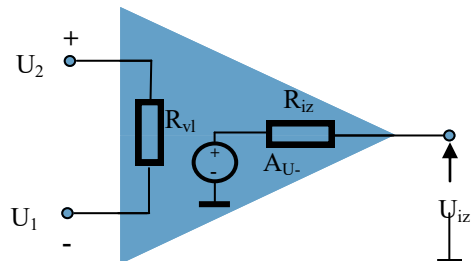
1. Дефинирај го поимот повратна врска.
2. Кога повратната врска се нарекува негативна а кога позитивна?
3. Дефинирај го поимот коефициент на врска β .
4. Какво е засилувањето на засилувач со негативна повратна врска во однос на засилувањето на истиот засилувач без применета негативна повратна врска?
5. Како се нарекува производот βA ?
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 повратна врска на излезот?
10. Какво може да биде приклучувањето на колото за повратна врска во однос на влезот?
11. Какво е влијанието на негативната повратна врска врз влезната и врз излезната импеданса?
12. Кои се придобивките од негативната повратна врска?
13. Какво е влијанието на негативната врска врз вкупното засилување?
14. Дефинирај го поимот фактор на повратна врска!
15. Каков знак има факторот на повратна врска F при негативна повратна врска?
16. Што се случува со засилувачот кога факторот на повратната спрега има вредност нула?

Модуларна единица

6. Операциски засилувач

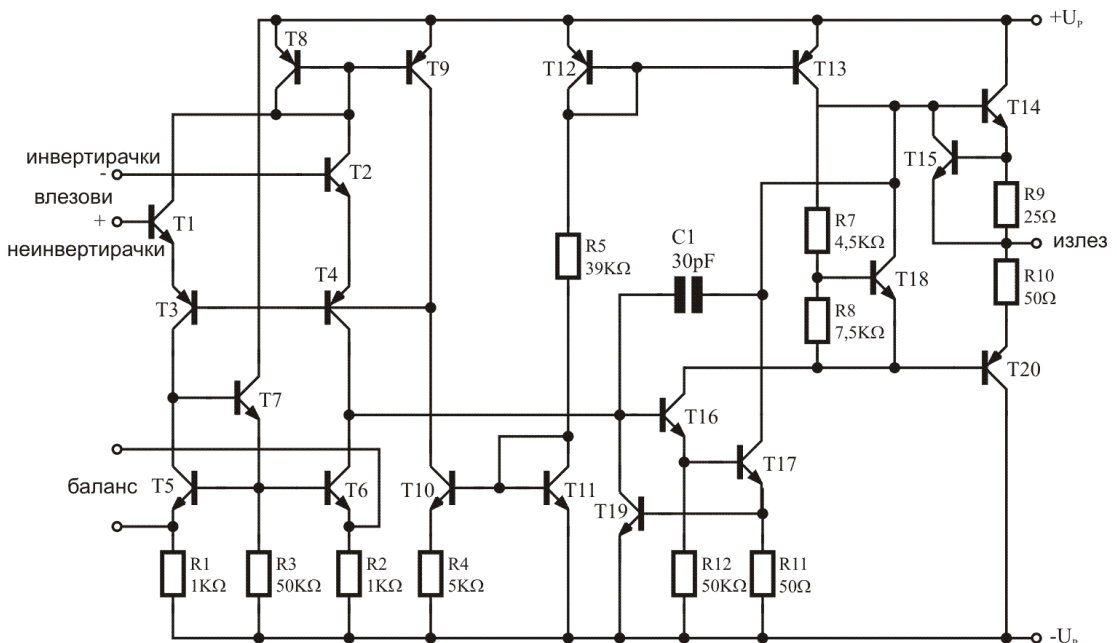
Со изучување на содржините од оваа модуларна единица ученикот ќе стекне основни знаења за видови операциски засилувачи и ќе може:

- да препознава операциски засилувач;
- да дефинира диференцијален и истофазен сигнал;
- да толкува преносна карактеристика на операциски засилувач;
- да наведува карактеристики на идеален и реален операциски засилувач;
- да пресметува параметри на линеарни кола со операциски засилувачи и да толкува резултати од пресметките;
- да реализира практични вежби за воспоставување и испитување линеарни електрични кола со операциски засилувачи;
- да опишува постапки за испитување функционалност на линеарно коло со операциски засилувач.



Регистар на ознаки и поими:

- U_+ – неинвертирачки влез на операциски засилувач
 - U_- – инвертирачки влез на операциски засилувач
 - U_d – диференцијален сигнал (разлика на влезните сигнали)
 - U_C – истофазен сигнал (средна вредност на влезните сигнали)
 - R_{v1} – влезна отпорност (многу голема вредност)
 - R_{iz} – излезна отпорност (многу мала вредност)
 - A_U/A_0 – напонско засилување на операцискиот засилувач
 - Ad – диференцијално засилување
 - U_{iz} – излезен напон
 - U_{v1} – влезен напон
 - $+U_{CC}$ – позитивен напон за напојување
 - $-U_{CC}$ – негативен напон за напојување
 - U_R – референтен напон
 - U_Z – Зенеров напон
 - U_H – напон на хистерезис (разлика меѓу двата прекинувачки прагови U_{T1} и U_{T2})
 - U_T – референтно ниво на префрлување
- **Виртуелна куса врска** – нулти диференцијален напон при нулта струја во влезовите

Комплетна шема на операцискиот засилувач $\mu A 741$ 

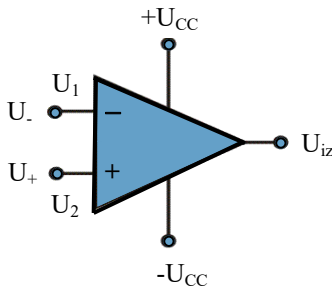
6.1 Идеален операциски засилувач



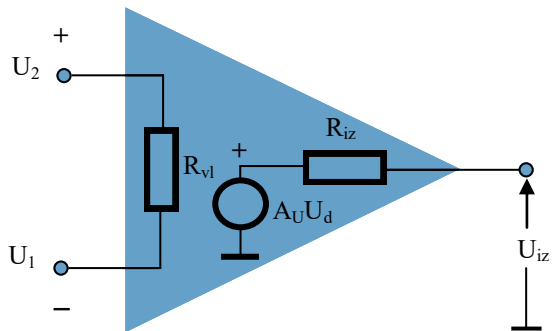
Диференцијалниот засилувач засилува диференцијален сигнал, разлика на неинвертирачкиот и инвертирачкиот влезен сигнал. Истофазен сигнал се дефинира како средна вредност на двата влезни сигнали.

Операцискиот засилувач е еден од најупотребуваните елементи 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. Се карактеризира со многу големо засилување, голема влезна импеданса (од редот на $M\Omega$) и мала излезна импеданса (типични вредности помали од 100Ω).

Шематскиот симбол на операцискиот засилувач е даден на слика 6.1, а еквивалентната шема на слика 6.2.



Слика 6.1: Симбол на операциски засилувач



Слика 6.2: Еквивалентна шема на операциски засилувач

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):

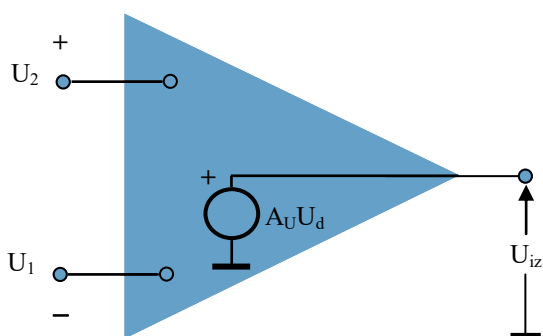
$$U_{iz} = A_U(U_2 - U_1) = A_U(U_+ - U_-) = A_U U_d$$

каде што со A_U се означува засилувањето на операцискиот засилувач со отворена јамка (без надворешни елементи, засилувањето е дефинирано исклучиво со интерната архитектура на засилувачот). Излезниот напон е фазно поместен за 180° во однос на напонот U_2 кој се приклучува на „-“ влезот и затоа тој се нарекува инвертирачки влез. Влезниот напон U_1 приклучен на влезот со ознака „+“ е во фаза со излезниот напон и поради тоа е наречен неинвертирачки влез. Разликата меѓу влезните напони U_+ и U_- се нарекува диференцијален сигнал U_d додека нивната средна вредност истофазен сигнал. Напојувањето на колото е изведено симетрично со еднонасочните извори за напојување $+U_{CC}$ и $-U_{CC}$.

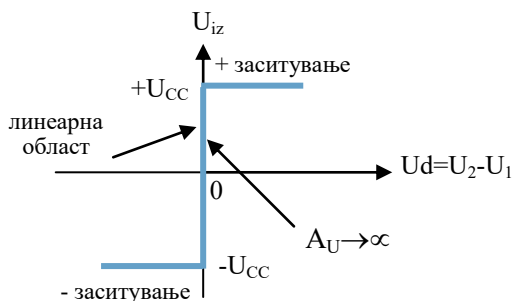
Идеалниот операциски засилувач ги има следниве карактеристики:

1. Бесконечно големо напонско засилување, $A_U \rightarrow \infty$. 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, $R_{iz} = 0$.
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° .
5. Рамна фреквенциска карактеристика и пропусен опсег бесконечно голем ($B \rightarrow \infty$).
6. Идеален баланс – нагоденост (за $U_+ = U_-$, $U_{iz} = 0$). Излезот на засилувачот да биде нула кога меѓу инвертирачкиот и неинвертирачкиот влез се приклучи нулти сигнал.
7. Засилување на истофазниот сигнал еднакво на нула.
8. Фактор на потиснување на средна вредност на сигналот бесконечно голем.
9. Независност на карактеристиките од температурата.

Еквивалентната шема на идеалниот операциски засилувач е дадена на слика 6.3 а неговата преносна карактеристика на слика 6.4.



Слика 6.3: Еквивалентна шема на идеален операциски засилувач



Слика 6.4: Преносна карактеристика на идеален операциски засилувач

Преносната карактеристика на идеален операциски засилувач содржи две области на заситување, позитивно и негативно, и линеарна област. Во линеарната област на преносната карактеристика, вертикалната линија, диференцијалниот напон $U_d = 0$ додека напонското засилување се стреми кон бесконечност $A_U \rightarrow \infty$.

Од $U_d = 0$ следува:

$$U_2 - U_1 = \frac{U_{iz}}{A_U} \Rightarrow U_1 - U_2 = 0 \Rightarrow U_1 = U_2$$

Во областа на заситување, $U_d \neq 0$, излезниот напон има вредност $\pm U_{CC}$, што значи дека е ограничен на вредноста на напојувањето.

Во случај кога преносната карактеристика на операцискиот засилувач не минува низ координатниот почеток, на влезот, покрај влезниот сигнал, е потребно да се доведе мал еднонасочен напон кој се нарекува влезен офсет U_{OS} . Вообичаени вредности на влезниот офсет се 1-2mV.

Современите операциски засилувачи имаат приближно исти карактеристики со идеалниот операциски засилувач и често при анализа на колото може да се заменат со моделот на идеален операциски засилувач.

Основни параметри кои го карактеризираат реалниот операциски засилувач:

1. Засилување на диференцијален влезен сигнал (Differential open-loop voltage gain) A. Реалниот операциски засилувач има засилување што се движи во рамките на 10^5 - 10^6 . Карактеристичното засилување за еден од најпознатите операциски засилувачи (741) изнесува $A_d \approx 200000$ (106dB), додека минималната вредност на засилувањето на диференцијалниот влезен сигнал е 5000 (74dB). Затоа најчесто може да се смета дека карактеристичното засилување $A_d \rightarrow \infty$.
2. Напонска ненагоденост на влезот (англ. Voltage Offset) U_{VL} , се дефинира како напон кој треба да се приклучи меѓу влезните приклучоци на операцискиот засилувач со влезен степен диференцијален засилувач, или меѓу влезниот приклучок и маса кај засилувачи со еден влез, така што напонот на излез од операцискиот засилувач биде 0.
3. Влезна струја на поларизација (англ. Input current bias), се дефинира како средна вредност на влезните струи во случај на диференцијален влез, или потребна струја на влез кај засилувачи со еден влез. $I_B = (I_{B1} + I_{B2})/2$
4. Струјна ненагоденост на влезот (англ. Current offset), се дефинира како разлика на влезните струи кај диференцијален влез. $I_{IZ} = I_{B1} - I_{B2}$
5. Напонски и струен дрефт $\Delta U_{iz}/\Delta T$ и $\Delta I_{iz}/\Delta T$, претставува промена на ненагоденост на напонот и струјата при температурни промени.
6. Фактор на потиснување на средни вредности (англ. Common mode rejection ratio-CMRR), се дефинира како однос на диференцијалното засилување и засилувањето на средната вредност, се изразува во dB.
7. Потиснување на промената на напонот за напојување (англ. Power supply rejection ratio-PSRR), се дефинира како на еден од изворите за напојување и соодветната напонска ненагоденост (offset) на влезот.
8. Влезна отпорност R_{VL} и излезна отпорност R_{IZ} .
9. Брзина на промена на напонот на излез (англ. Slew rate), се дефинира како максимална брзина на промена на напонот при влезен сигнал со облик на единечна функција, се изразува во $V/\mu s$.

Типични вредности на дефинираните карактеристики кај реален операциски засилувач μA 741, се дадени во табела 6.1.

Табела 6.1: Каталожки податоци за параметри на операциски засилувач μA 741

A	U_{iz} (mV)	I_B (nA)	I_{iz} (nA)	$\Delta U_{iz}/\Delta T$ ($\mu V/^\circ C$)	$\Delta I_{iz}/\Delta T$ (nA/ $^\circ C$)	CMRR (dB)	PSRR ($\mu V/V$)	R_{VL} (Ω)	R_{IZ} (Ω)	slew rate (V/ μs)
10^5	1	80	20	1	0,1	90	20	2×10^6	75	0,5

Работната температура на операцискиот засилувач μA 741 се движи во границите $(0-70)^\circ C$.

Се напојува со еднонасочен напон од $\pm 5V$ до $\pm 12V$, со кој е ограничен опсегот на излезниот напон во граници $(2-11,5)V$.

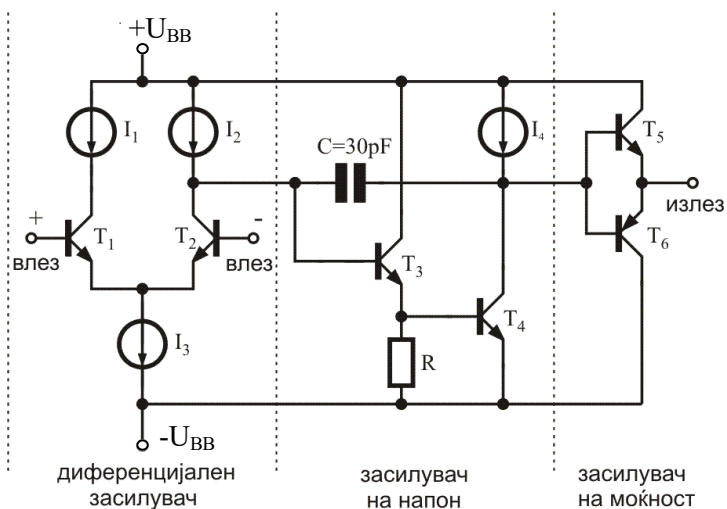
Внимание: со примена на напони за напојување поголеми од 18V доаѓа до прегоруваче на засилувачот!

Реалниот операциски засилувач е повеќестепен напонски засилувач со директна врска (слика 6.5 а). Влезниот степен е изведен како диференцијален засилувач со два симетрични влеза. Тој треба да обезбеди големо засилување на диференцијалниот сигнал, голема влезна отпорност, мала влезна струја, мала струјна ненагоденост и напонски дрифт. Меѓустепенот треба да го обезбеди потребното напонско и струјно засилување. Истовремено еднонасочното ниво на сигналот на излез од диференцијалниот засилувач го доведува на потребна вредност со која се обезбедува нулто еднонасочно ниво на излез од операцискиот засилувач кога влезниот сигнал е нула. Излезниот степен, кој претставува засилувач на моќност, е изведен со комплементарен пар транзистори и треба да обезбеди мала излезна отпорност.



Слика 6.5: а) Блок-шема на операциски засилувач 741

Упростена електрична шема на операцискиот засилувач 741 е дадена на слика 6.5 б).



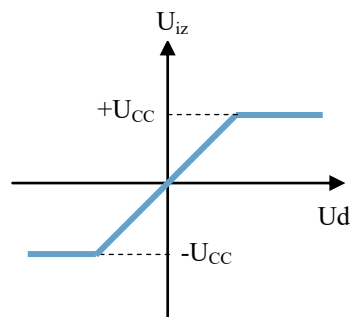
Слика 6.5: б) Упростена шема на операциски засилувач 741

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 μA до mA (кај 741 има вредност $0,5 \text{ mA}$), што обезбедува голема влезна отпорност на операцискиот засилувач. Струјните генератори обезбедуваат и голема температурна стабилност.

Засилувачот на напон е формиран со транзисторот 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 10Hz .

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.

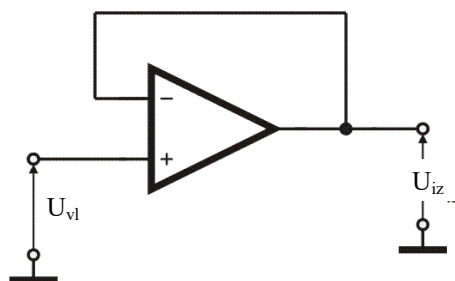
Во практиката напонското засилување на операцискиот засилувач се прави да биде многу големо. Во анализите, скоро секогаш се претпоставува бесконечно големо засилување на операцискиот засилувач, а со надворешните компоненти за негативна врска се постигнуваат бараните карактеристики. Освен засилувањето, 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 со моделот на идеален операциски засилувач. На слика 6.6 е прикажана преносна карактеристика на реален операциски засилувач.



Слика 6.6: Преносна карактеристика на реален операциски засилувач

Од причина што напонското засилување кај реалниот операциски засилувач не е бесконечно големо, преносната карактеристика нема да има идеална стрмина. Тоа значи, за доволно мали напони, карактеристиката добива линеарен облик пред засилувачот да влезе во заситување каде излезниот напон добива вредност на изворот за напојување.

Ако се поврзе излезот на операцискиот засилувач со неговиот инвертирачки влез, а на неинвертирачкиот влез се приклучи напонски сигнал (слика 6.7), излезниот напон верно ќе го следи влезниот напон.



Слика 6.7: Напонски следител - бафер

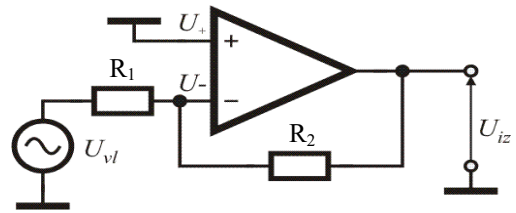
Имено, со зголемувањето на влезниот напон се зголемува и влезниот диференцијален напон, а со тоа и излезниот напон, во согласност со дефиницијата на диференцијалното засилување. Меѓутоа, во исто време се зголемува и вратениот сигнал на инвертирачкиот влез, а неговото дејство е намалување на диференцијалната разлика меѓу влезовите, со што се намалува излезниот напон.

За некоја дадена вредност на напонскиот влез U_{vl} , напонот на излезот ќе стане многу близок по вредност со U_{vl} (т.н. принцип на напонски следител), но доволно малку помал, така што ќе постои мала напонска разлика меѓу U_{vl} 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. Ова коло се нарекува бафер.

Една од најмногу користените примени на операцискиот засилувач е примената како инвертирачки засилувач. Со приклучување на два отпорника, како на слика 6.8, 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.

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

1. Влезниот отпор на операцискиот засилувач е бесконечно голем и не тече струја во неговите влезови.
2. Засилувањето на операцискиот засилувач е бесконечно големо и со повратната врска напоните U_+ и U_- стануваат еднакви.



Слика 6.8: Инвертирачки операциски засилувач

Овие претпоставки ќе се користат во решавањето на сите проблеми во кои се применува идеален операциски засилувач, притоа нултиот диференцијален напон при нулта струја во влезовите се нарекува **ВИРТУЕЛНА КУСА ВРСКА**.

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 напонското засилување 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 може да се изрази со релацијата:

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

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:

$$U_{iz} = -IR_2 = -\frac{U_{vl}}{R_1} R_2$$

За напонското засилување на инвертирачкиот операциски засилувач се добива:

$$A_{inv} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Може да се забележи дека напонското засилување на комплетното коло се регулира со односот на вредностите на двата отпорника во колото и дека не зависи од засилувањето на операцискиот засилувач A_U , под услов A_U да има многу голема вредност.

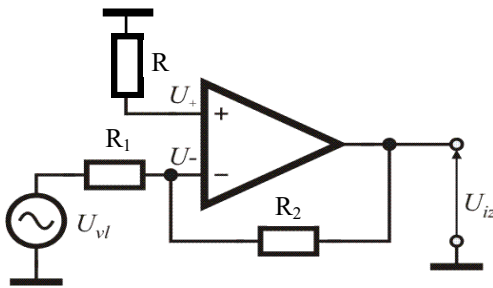
Знакот "-" покажува дека излезниот напон е фазно поместен за 180° во однос на влезниот и затоа овој засилувач се вика **инвертирачки**.

Одредувањето на засилувањето на колото се прави со односот на вредностите на 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 врквата се изведе кон неговиот неинвертирачки влез, тогаш таа ќе биде позитивна и нема услови за постоење на виртуелната нула.



За да се намали температурниот дрефт, во колото се поврзува отпорник R на неинвертирачкиот влез (слика 6.9), чија вредност не влијае врз засилувањето на инвертирачкиот операциски засилувач. Негова оптимална вредност е:

$$R = R_1 // R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

Слика 6.9: Инвертирачки операциски засилувач со коло за намалување на дрефтот

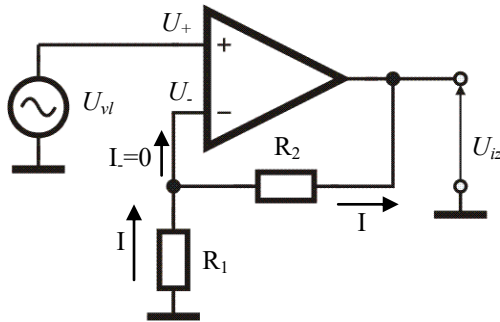


Резиме - идеален, реален и инвертирачки операциски засилувач

ЗАПОМНИ!

- Идеалниот операциски засилувач се карактеризира со многу големо засилување, голема влезна импеданса и мала излезна импеданса.
- 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 и U_- и U_+ .
- Знакот "-" во изразот за напонското засилување на инвертирачкиот операциски засилувач покажува дека излезниот напон е фазно поместен за 180° во однос на влезниот и затоа овој засилувач се вика инвертирачки.

Ако се комбинира идеален операциски засилувач со два отпорника, како на слика 6.10, 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 6.10: Неинвертирачки операциски засилувач

Под услов да не тече струја во инвертирачкиот влез и при појава на виртуелна нула поради постоење на негативна повратна врска:

$$U_d = U_+ - U_- = 0.$$

$$U_+ = U_-$$

За влезниот напон може да се запише:

$$U_{vl} = -IR_1$$

$$U_{vl} - U_{iz} = IR_2$$

додека за излезниот напон важат релациите:

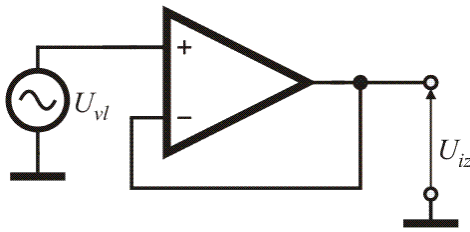
$$U_{iz} = U_{vl} - IR_2 = U_{vl} - \left(-\frac{U_{vl}}{R_1}\right)R_2 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)U_{vl}$$

напонското засилување на неинвертирачкиот операциски засилувач се изразува како:

$$A = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}.$$

И кај неинвертирачкиот операциски засилувач напонското засилување 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 вредноста на отпорникот R_2 е нула, 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 6.11.



Колото на напонски следител се добива кога во колото на неинвертирачкиот операциски засилувач се примени $R_1 \rightarrow \infty$ и $R_2 = 0$.

$$\Rightarrow A = 1$$

Слика 6.11: Операциски засилувач како напонски следител

Излезниот напон на ова коло ја следи промената на влезниот напон. 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 го потребното струјно засилување.

Провери го своето знаење!



I Прашања со заокружување (заокружи ги точните одговори)

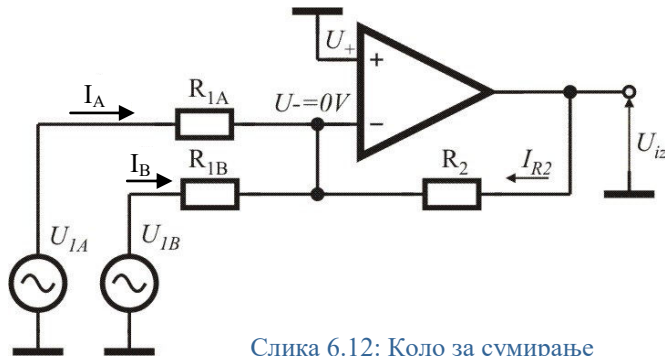
- Кај инвертирачкиот операцискиот засилувач, излезниот напон е фазно поместен за 180° во однос на напонот кој се приклучува на:
 - влезот означен со „+“
 - влезот означен со „-“
 - изворот за напојување.
- Во линеарната област на преносната карактеристика на идеалниот операциски засилувач:
 - $A_U \rightarrow \infty$ и $U_d = 0$
 - $A_U = 0$ и $U_d \rightarrow \infty$
 - $A_U \rightarrow \infty$ и $U_d \rightarrow \infty$.

II Прашања со дополнување

- Идеалниот операцискиот засилувач се карактеризира со _____ (големо/мало) засилување, _____ (голема/мала) влезна импеданса и _____ (голема/мала) излезна импеданса.
- Нулниот диференцијален сигнал на влез на операцискиот засилувач, се нарекува _____.
- Напонското засилување на колото „напонски следител“ има вредност _____ ($0/1/\infty$).
- Виртуелната нула на влезот од операцискиот засилувач постои само кога е изведена _____ (позитивна/негативна) повратна врска во колото во кое е употребен засилувачот.

6.5 Суматор

Колото прикажано на слика 6.12 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 6.12: Коло за сумирање

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:

$$I_A = \frac{U_{1A}}{R_{1A}} \quad I_B = \frac{U_{1B}}{R_{1B}} \quad I_{R_2} = \frac{U_{iz}}{R_2}$$

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

$$I_A + I_B = -I_{R_2}$$

а со замена на изразите за струите се добива:

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

односно:

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

Ако $R_{1A} = R_{1B} = R_2$, за излезниот напон 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.

Дрифтот и кај суматорот се намалува на истиот начин како кај инвертирачкиот операциски засилувач, со приклучување на отпорник на неинвертирачкиот влез како на слика 6.9.

6.6 Диференцијален засилувач

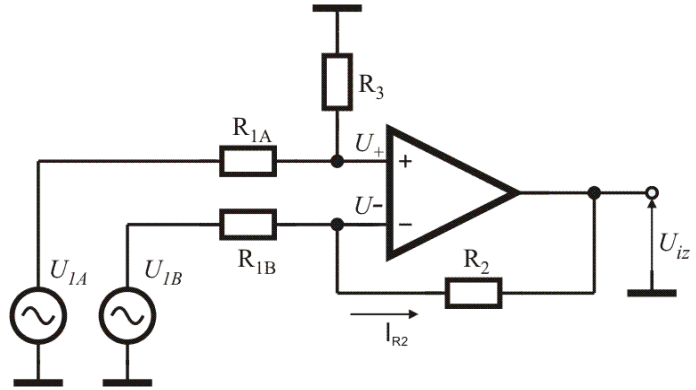
Шемата на диференцијален засилувач, со кој се засилува разлика на сигнали, е дадена на слика 6.13. Едниот влезен напон U_{1A} се приклучува преку отпорникот R_{1A} на неинвертирачкиот влез, а другиот U_{1B} преку отпорникот R_{1B} на инвертирачкиот влез на операцискиот засилувач. Идеалниот операциски засилувач има виртуелна нула меѓу влезовите ($U_- = U_+$).

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

$$U_+ = \frac{R_3}{R_{1A} + R_3} U_{1A}$$

Струјата на повратната врска тече преку отпорниците R_2 и R_{1B} и таа се изразува како:

$$I_{R2} = \frac{U_{1B} - U_-}{R_{1B}} = \frac{U_- - U_{iz}}{R_2}$$



Слика 6.13: Диференцијален засилувач

Со примена на математички операции се изразува излезниот напон како:

$$R_2(U_{1B} - U_-) = R_{1B}(U_- - U_{iz})$$

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

Од условот за виртуелна нула меѓу влезовите:

$$(U_- = U_+)$$

и замена во изразот за излезниот напон се добива:

$$U_{iz} = \frac{R_{1B} + R_2}{R_{1B}} \cdot \frac{R_3}{R_{1A} + R_3} U_{1A} - \frac{R_2}{R_{1B}} U_{1B}$$

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

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

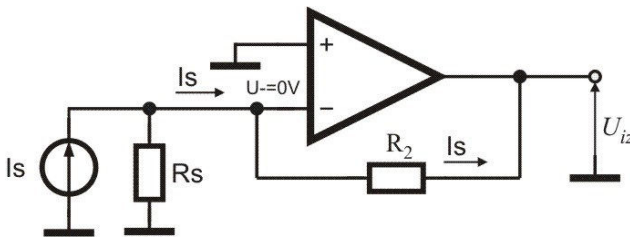
$$\frac{R_{1B}}{R_2} = \frac{R_{1A}}{R_3}$$

изразот за излезниот напон ќе биде:

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

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

6.7 Претворувач на струја во напон и на напон во струја



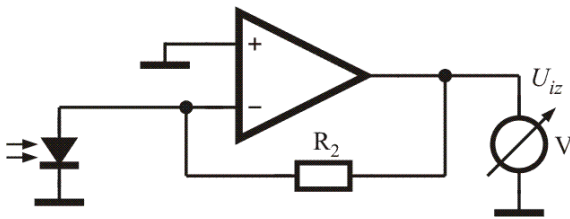
Слика 6.14: Претворувачот на струја во напон

Колото на претворувачот на струја во напон е дадено на слика 6.14. 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.

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 :

$$U_{iz} = -I_s R_2$$

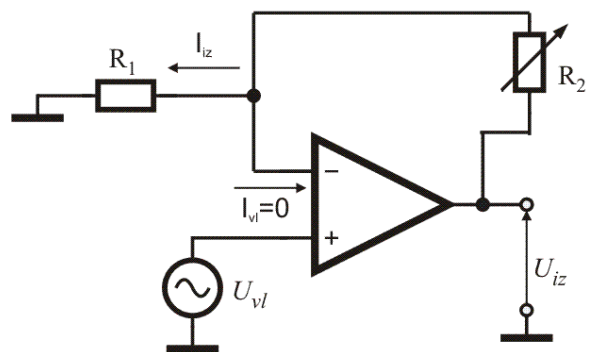
За ова коло не може да се дефинира „напонско засилување“ ни „струјно засилување“, зашто на влезот имаме струја, а на излезот напон. Параметрот со кој се опишува колку се менува излезниот напон со промена на влезната струја би можел да се дефинира како преносна отпорност, при што „преносна“ означува дека напонот и струјата се мерат на излез и влез соодветно.



Слика 6.15: Мерач на светлина со претворувачот на струја во напон

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 6.15) 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.

Претворувачот на напон во струја, 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 6.16.



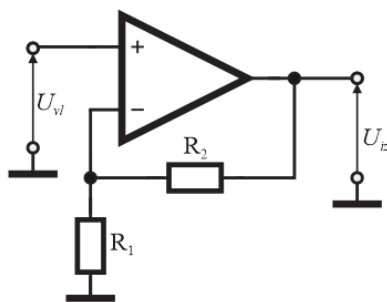
Слика 6.16: Претворувач на напон во струја

Излезната струја е пропорционална на влезниот напон и не зависи од вредноста на отпорникот R_2 , кој овде ја има улогата на потрошувач.

6.8 Ограничувач со операциски засилувач

Познатите инвертирачки и неинвертирачки конфигурации на засилувачи реализирани со операциски засилувач, многу едноставно се модифицираат во кола за ограничување и како такви наоѓаат широка практична примена. За излезниот напон кај инвертирачкиот засилувач, чија принципиелна шема е прикажана на слика 6.17 може да се напише:

$$\frac{U_{iz}}{U_{vl}} = A_u = -\frac{R_2}{R_1}$$



Слика 6.18: Неинвертирачки ограничувач

а за неинвертирачкиот засилувач, чија основна шема е дадена на слика 6.18 може да се напише:

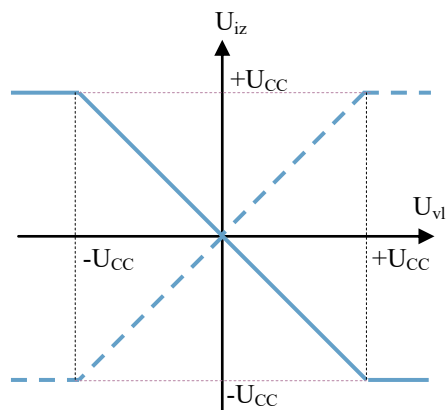
$$\frac{U_{iz}}{U_{vl}} = A_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Од овие релации може да се заклучи дека со соодветен избор на вредноста на отпорниците во негативната повратна врска во однос на влезните отпорници, лесно се добива инвертирачко, односно неинвертирачко коло за ограничување. Потребно е само да се изврши нагодување така што напонското засилување ќе добие единечна вредност, со што ќе се постигне следење помеѓу излезниот и влезниот напон.

Ако во колото за лимитирање со основна засилувачка конфигурација со операциски засилувач (слика 6.17) избереме $R_2=R_1$ следува дека $A_v = -1$ бидејќи:

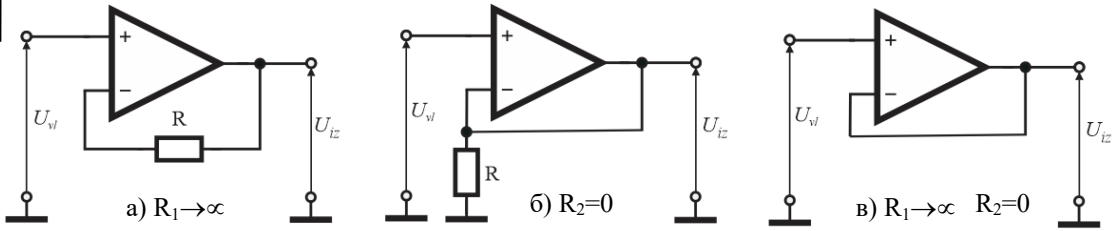
$$\frac{U_{iz}}{U_{vl}} = A_u = -\frac{R}{R} = -1 \Rightarrow U_{iz} = -U_{vl}$$

Ова значи дека излезниот напон ќе го следи влезниот со единечен негативен наклон сè додека не се достигнат нивоата на напојување кои се воедно и ограничувачки. Притоа, излезниот напон е еднаков и инвертиран во однос на влезниот: колку што влезот расте, исто толку излезот ќе опаѓа, и обратно, според преносната карактеристика на колото која е прикажана на слика 6.19 со полна линија. Јасно е дека промените на влезните амплитуди кои се помали од напојувањата целосно ќе се пренесуваат на излезот, но инвертирани. Напоните чии нивоа се поголеми од напојувањата на операцискиот засилувач ќе бидат лимитирани на $\pm U_{CC}$.



Слика 6.19: Преносна карактеристика на ограничувач со операциски засилувач

Слично, кај неинвертирачкиот засилувач во равенката за напонското засилување може да се избере една од трите варијанти дадени на слика 6.20.



Слика 6.20: Ограничувачки конфигурации со неинвертирачки операциски засилувач

Станува збор за следниве вредности на отпорниците R_1 и R_2 :

- а) $R_1 \rightarrow \infty$, т.е. прекинато коло,
- б) $R_2 = 0$, т.е. куса врска,
- в) истовремено важи $R_1 \rightarrow \infty$ и $R_2 = 0$.

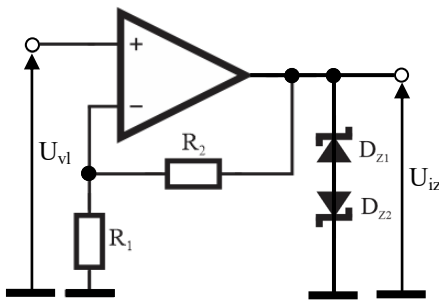
За секоја од претходните комбинации следува дека ќе добиеме $A_v = +1$ бидејќи:

$$\frac{U_{iz}}{U_{vl}} = A_u = 1 + 0 = 1 \Rightarrow U_{iz} = U_{vl}$$

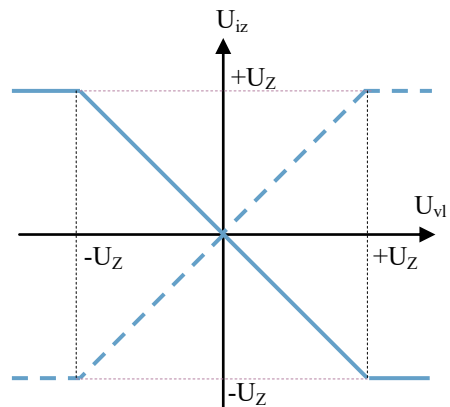
Излезниот напон ќе ја следи влезната побуда исто како претходно со единечна стрмнина, која сега ќе биде позитивна сè додека не се достигнат нивоата на напојување, што и во овој случај е ограничувачки фактор. Притоа, излезниот напон целосно го следи влезниот: ако влезниот потенцијал расте, и излезниот ќе расте исто така, а ако влезот опаѓа, и излезот ќе опаѓа.

Преносната карактеристика на неинвертирачкиот лимитер е прикажана на слика 6.19 со испрекината линија. И во овој случај излезните напони се ограничени на напојувањата на операцискиот засилувач, т.е. на нивоата $\pm U_{CC}$.

Ако има потреба од ограничување на помали нивоа или од несиметрично ограничување, на излезот од операциските засилувачи можат да се стават две Зенер диоди според слика 6.21 со еднакви Зенерови напони $U_{Z1} = U_{Z2} = U_Z$. Сега излезниот напон повторно ќе биде симетрично ограничен од горе и од долу но сега на $\pm U_Z$, а не на $\pm U_{CC}$ (слика 6.22).



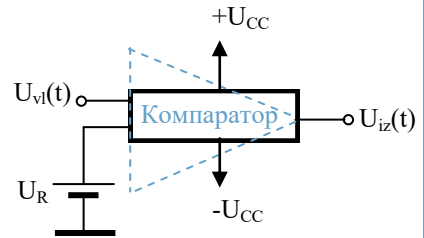
Слика 6.21: Ограничувач на помали нивоа



Слика 6.22: Преносна карактеристика на ограничувач на помали нивоа

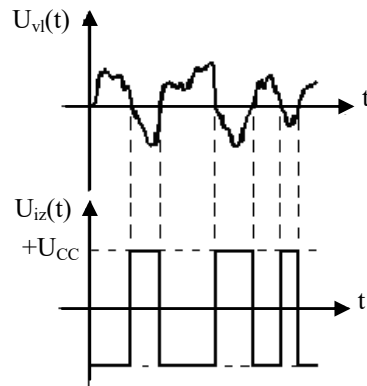
Потребата од споредување на напони се јавува многу често во практиката. Таа е посебно изразена во системите за аналого-дигитална конверзија и во колата за нелинеарно обликување на сигнали, поточно за добивање на периодични правоаголни или шилести импулси од напони со простопериодичен облик.

Компараторот е електронско коло со такво својство да може да споредува две напонски нивоа. Негова основна задача е што попрецизно да го детектира моментот на изедначување на двата напона. Напоните што се компарираат се доведуваат на двата влез од колото: на еден од влезовите се приклучува референтниот извор U_R , а на другиот влез се носи вториот напон $U_{v1}(t)$ кој има произволен облик и амплитуда, а се споредува со референтниот, според слика 6.23.



Слика 6.23: Компараторско коло

Моментот на изедначување се сигнализира преку скоковита промена на излезниот напон. Тоа може да биде нагла промена на излезното напонско ниво $U_{iz}(t)$ од ниско на високо или обратно, како што е прикажано на слика 6.24 за која е претпоставено дека $U_R=0$. Суштинската разлика меѓу компараторот и колото за обликување е во тоа што компараторот треба што е можно поточно да го регистрира само моментот на компарацијата, т.е. преминувањето на референтното ниво од страна на влезниот сигнал. Репродуцирањето на дел од обликот на влезниот сигнал до излезот не е важно.



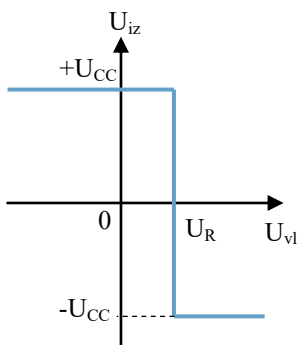
Слика 6.24: Напонски бранови облици на влезот и излезот од компараторот

Анализата на компараторските кола опфаќа одредување на нивната преносна карактеристика $U_{iz}=U_{iz}(U_{v1})$, која треба да биде со што е можно пострмен премин од едното кон другото излезно ниво. Во анализите на компараторските кола што следат во продолжение ќе претпоставуваме дека преминот е скоковит што претставува идеален случај.

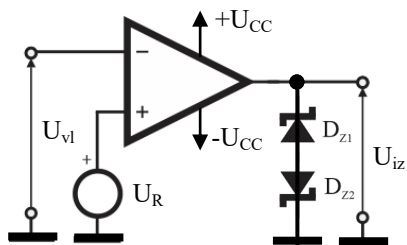
При практичната реализација, компараторите најчесто се изведуваат со примена на операциски засилувачи кои работат во нелинеарен режим според еквивалентната шема и идеализираната преносна карактеристика $U_{iz}=U_{iz}(U_d)$, прикажана на слика 6.3 и 6.4. Гледајќи го карактеристичното скоковито менување на излезниот напон дури и за најмали промени на диференцијалниот влез $U_d=U_+-U_-$ во околина на нулата, може да се констатира дека операцискиот засилувач може да се употреби како компаратор, со наједноставна замена на блокот за компарирање како што е прикажано со испрекинати линии на слика 6.23.

Еден од начините на кој може да се оствари инверторско коло со операциски засилувач е илустриран со основната шема прикажана на слика 6.25. Од сликата се гледа дека влезниот напон, кој ќе се споредува се носи на инвертирачкиот влез, а референтниот напон на неинвертирачкиот.

Преносната карактеристика $U_{iz}=U_{iz}(U_{vl})$ на инвертирачкиот компаратор е дадена на слика 6.26 при што е претпоставена позитивна вредност на референтниот напон ($U_R > 0$).



Слика 6.26: Преносна карактеристика на инвертирачко компараторско коло со операциски засилувач



Слика 6.25: Инвертирачко компараторско коло со операциски засилувач

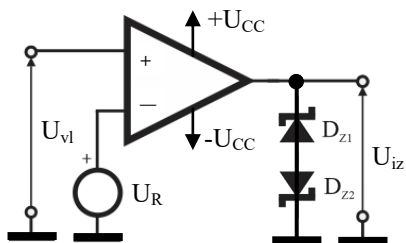
Доколку станува збор за нулто или негативно ниво на референтниот извор U_R преносната карактеристика соодветно ќе се помести во лево по U_{vl} -оската.

Добивањето на преносната карактеристика од слика 6.26 може да се објасни на едноставен начин. Имено, бидејќи операцискиот засилувач има многу големо напонско засилување $A_0 \rightarrow \infty$, за кој било влезен напон чие ниво е барем малку различно од референтното U_R , тој ќе работи во нелинеарен режим. Неговиот излез U_{iz} ќе оди во областа на заситување, при што скоковито ќе прима вредности еднакви со напоните на напојување.

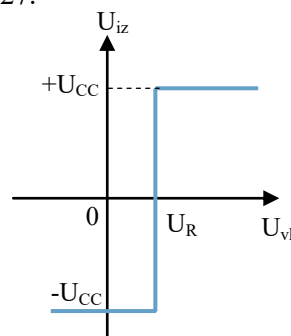
При ова, ако променливиот влезен напон е барем малку поголем од референтниот, поради тоа што потенцијалот на инвертирачкиот влез е поголем од неинвертирачкиот, на излезот се добива негативниот напон на напојување $-U_{CC}$. Ако пак влезното напонско ниво е барем малку помало од референтното, тогаш потенцијалот на инвертирачкиот влез е помал од оној на неинвертирачкиот, па на излезот се добива вредноста на позитивното напојување $+U_{CC}$.

Заклучокот за однесувањето на компараторот од слика 6.25 се наметнува од неговата преносна карактеристика прикажана на слика 6.26. За влезни напони U_{vl} поголеми од U_R ($U_{vl} > U_R$), излезот е $U_{iz} = -U_{vl}$, додека за влезни напони помали од U_R ($U_{vl} < U_R$) нивото драстично се менува и добива вредност $U_{iz} = +U_{vl}$.

Вториот начин на реализација на компаратор е претставен со неговата принципиелна електрична шема прикажана на слика 6.27.



Слика 6.27: Неинвертирачко компараторско коло со операциски засилувач

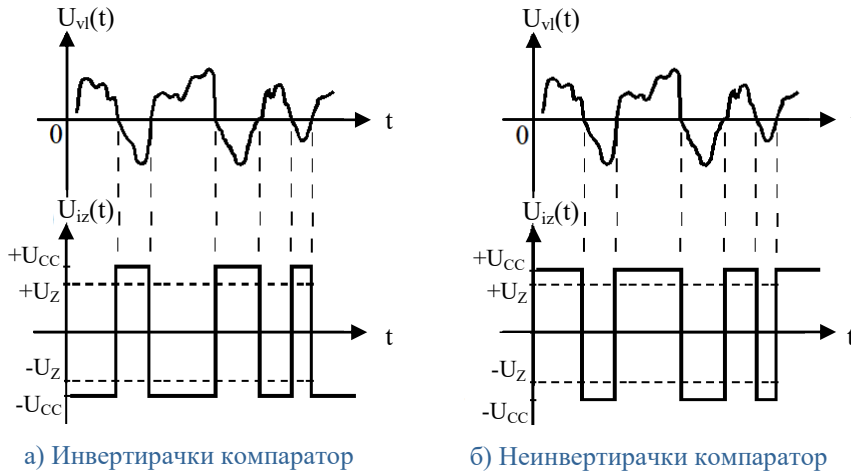


Слика 6.28: Преносна карактеристика на неинвертирачко компараторско коло со операциски засилувач

Од шемата се гледа дека во однос на претходното коло побудата е спротивна, бидејќи влезниот напон се носи на неинвертирачкиот влез. Во овој случај, преносната карактеристика на компараторот ќе го има обликот прикажан на слика 6.28.

Споредувајќи ја дадената преносна карактеристика на неинвертирачкиот компаратор од слика 6.28 со онаа на инвертирачкиот од слика 6.26 може веднаш да се заклучи дека однесувањето на неинвертирачкиот компаратор е спротивно. Влезниот променлив напон сега се носи на неинвертирачкиот влез, а референтниот напон е приклучен на инвертирачкиот. За кое било влезно напонско ниво, кое е барем малку поголемо од референтното U_R , излезот од операцискиот засилувач U_{iz} моментално ќе оди во заситување и ќе ја прими вредноста на позитивното напојување $+U_{CC}$. Меѓутоа, ако влезниот напон е барем малку помал од референтниот U_R , тогаш на излезот од компараторот скоковито ќе се добие негативниот напон на напојување $-U_{CC}$. Од преносната карактеристика на неинвертирачкото компараторско коло, прикажана на слика 6.28, може да се заклучи дека за влезни напони U_{vi} поголеми од U_R излезот е $U_{iz}=+U_{CC}$, додека за влезни напони U_{vi} помали од U_R , нивото на излезот нагло се менува на $U_{iz}=-U_{CC}$.

Заради дообјаснување на принципот на работа на претходно разгледаните компараторски кола од слика 6.25 и слика 6.27, на слика 6.29 е даден еден пример. Станува збор за ист побуден променлив влезен сигнал $U_{vi}(t)$, кој се носи на влезот на секој од двата компаратори. На сликата е претставен и одзивот $U_{iz}(t)$ кај инвертирачкиот компаратор (слика 6.29 а), додека на слика 6.29 б) е прикажан излезен бранов облик $U_{iz}(t)$ на неинвертирачкиот компаратор. За двата компаратори е претпоставено дека се детектори на нула, т.е. компаратори со нулто референтно ниво (референтен напонски праг $U_R=0$).



Слика 6.29: Пример на влезен и излезен напонски сигнал кај детектори на нула

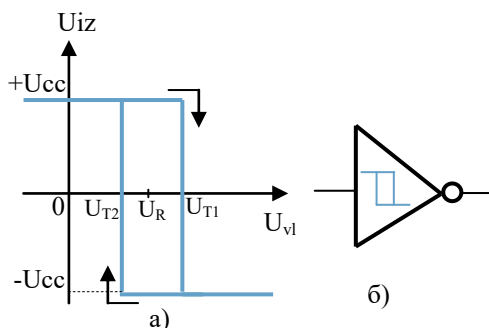
Во практиката, често пати на излезот од компараторите се приклучува сервиска врска на две идентични Зенер диоди D_{Z1} , D_{Z2} со референтни напони $U_{Z1}=U_{Z2}=U_Z$, како што е изведено на слика 6.27. Тоа се прави заради ограничување на излезното напонско ниво U_0 на вредност $\pm U_Z$, која е помала од напојувањето $\pm U_{CC}$ ($|U_Z| < |U_{CC}|$). Ако оваа комбинација се земе предвид при цртањето на слика 6.29 а) и б), тогаш ќе дојде до промена на нивото на излезните бранови облици како што е прикажано со испрекинатата линија.

6.10 Шмитово компараторско коло

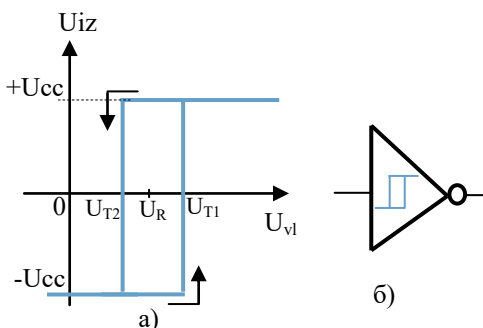
За компараторските кола кои претходно ги анализиравме претпоставуваме дека имаат идеални карактеристики. Меѓутоа ваквите компараторски кола, реализирани со реални операциски засилувачи би имале недостаток. Имено, ако влезниот напон бавно се менува, брзината на промена на излезниот напон ќе биде исто така побавна. Ова произлегува од тоа што реалниот операциски засилувач има конечно големо засилување $A_0 \gg 1$, за разлика од идеалниот за кој важеше $A_0 \rightarrow \infty$.

Ваквиот недостаток може да се отстрани ако кај обичниот компаратор се оствари позитивна повратна врска. Имено, со остварената позитивна реакција, времето потребно за да се изврши промена од едното на другото излезно ниво е многу кратко и практично независно од стрмнината на влезниот сигнал. Со ова се добива побрзо реагирање и за бавно променливи влезни напони, што не е случај кај обичниот компаратор.

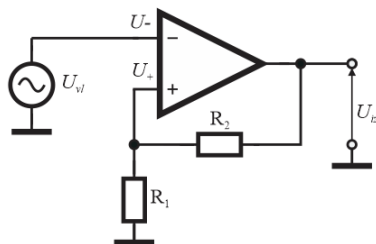
Преносната карактеристика $U_{iz}=U_{iz}(U_{vl})$ на компараторот со позитивна повратна врска, кој популарно се нарекува и Шмитов прекинувач или Шмитов тригер, е прикажана на слика 6.30. На слика 6.30 а) е претставена инвертирачка конфигурација, а на слика 6.31 а), неинвертирачка. Нивните симболички ознаки се прикажани на слика 6.30 б) и 6.31 б). Дадените преносни карактеристики на Шмитовиот компаратор се разликуваат од оние на вообичаениот по тоа што сега се јавува хистерезисен облик. Во врска со ова, се гледа дека Шмитовиот компаратор има две референтни нивоа на префрлување, односно два прекинувачки прага U_{T1} , U_{T+} или U_{THIGH} и U_{T2} , U_{T-} или U_{TLOW} . Напонот на хистерезисот U_H се дефинира како разлика меѓу двата прекинувачки прага U_{T1} и U_{T2} ($U_H=U_{T1}-U_{T2}$).



Слика 6.30: Шмитово инвертирачко компараторско коло а) преносна карактеристика и б) симболичка ознака



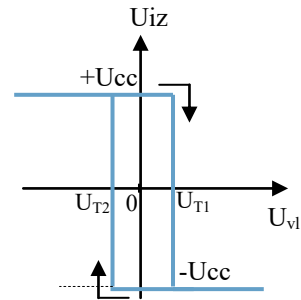
Слика 6.31: Шмитово неинвертирачко компараторско коло а) преносна карактеристика и б) симболичка ознака



Слика 6.32: Шмитов компаратор во инвертирачка конфигурација

Во продолжение ќе анализираме Шмитов инвертирачки компаратор, популарниот Шмитов тригер, чија електрична шема е прикажана на слика 6.32. Станува збор за една изведба со операциски засилувач кај кој позитивната повратна врска се изведува преку отпорникот R_2 . Преку овој отпорник е овозможено дефинирање на референтното ниво на компарација на неинвертирачкиот влез, а со тоа практично и на двата префрлувачки прага.

Влезниот променлив сигнал, всушност, е потенцијалот на инвертирачкиот влез $U_{vl}(t)=U(t)$, додека излезниот напон $U_{iz}(t)$ се зема од излезот на операцискиот засилувач. При анализата, исто како и во претходните примери, ќе земеме дека употребениот операциски засилувач е идеален. За да ги пресметаме вредностите на префрлувачките прагови треба да го одредиме потенцијалот на неинвертирачкиот влез U_+ , затоа што тоа ниво ќе одлучува кога ќе дојде до промена на излезниот напон. За таа цел, прво ќе претпоставиме дека влезниот напон расте од негативно кон позитивно ниво.



Слика 6.33: Преносна карактеристика на Шмитов компаратор во инвертирачка конфигурација

За многу негативни влезни напони околу $-U_{CC}$, кои се доведуваат на инвертирачкиот влез, сигурно ќе биде исполнет условот потенцијалот на неинвертирачкиот влез да е поголем од инвертирачкиот, заради што на излезот се добива високо ниво $+U_{CC}$.

Знаејќи дека во влезните приклучоци не тече струја, можеме да ги примениме равенките за напонски делител. Имено, потенцијалот U_+ зависи од излезниот напон U_{iz} преку напонскиот делител формиран од отпорниците R_1 и R_2 . Потенцијалот U_+ всушност е еднаков со напонот на отпорникот R_1 :

$$U_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{iz} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{CC} = \beta \cdot U_{CC} = U_{T1} \quad \text{каде што} \quad \beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Од добиената вредност е јасно дека при зголемување на влезот U_{vl} , промена на излезот од $+U_{CC}$ на $-U_{CC}$, ќе настане тогаш кога ќе се достигне референтното ниво на неинвертирачкиот влез кое изнесува $U_+ = \beta U_{CC}$, што фактички го претставува нивото на првиот прекинувачки праг U_{T1} . Објаснувањето сликовито е претставено со преносната карактеристика на колото претставена на слика 6.33.

При одредувањето на вториот дел од преносната карактеристика ќе претпоставиме дека влезниот напон U_{vl} , а со тоа и потенцијалот на инвертирачкиот влез, опаѓа. Кога влезниот напон U_{vl} опаѓа од $+U_{CC}$ до $-U_{CC}$, тој од почеток е многу позитивен (околу $+U_{CC}$), така што потенцијалот на инвертирачкиот влез е повисок од потенцијалот на неинвертирачкиот, па на излезот од операцискиот засилувач ќе се појави $-U_{CC}$, а потенцијалот на неинвертирачкиот влез ќе биде:

$$U_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{iz} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (-U_{CC}) = -\beta \cdot U_{CC} = U_{T2}$$

Ова укажува дека до промена на состојбата на излезот U_{iz} ќе дојде тогаш кога влезот U_{vl} ќе опадне до второто референтно ниво, т.е. до вториот префрлувачки праг U_{T2} , на неинвертирачкиот влез кој сега има вредност $U_+ = -\beta U_{CC}$.

Кога се познати прекинувачките прагови може да се определи напонот на хистерезисот U_H како разлика на U_{T1} и U_{T2} . Со замена на вредностите на претходно одредените прагови во равенката за U_H се добива:

$$U_H = U_{T1} - U_{T2} = \beta \cdot U_{CC} - (-\beta \cdot U_{CC}) = 2\beta \cdot U_{CC} = \beta \cdot 2U_{CC} = \beta \cdot \Delta U_{iz}$$

каде ΔU_{iz} ја означува промената на излезниот напон од $+U_{CC}$ на $-U_{CC}$, или обратно.



Резиме - операциски засилувачи

- Операциски засилувач е повеќестепен напонски засилувач со директна врска, со диференцијален влез и со големо засилување.
- Излезниот напон е фазно поместен за 180° 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.
- На излезот на колото за сумирање се добива 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° .
- Со неинвертирачки операциски засилувач, на неговиот излез се добива засилен влезен сигнал без фазно поместување.
- Засилувач на разлика ја засилува разликата на влезните сигнали.
- Преносната карактеристика на инвертирачкиот/неинвертирачкиот лимитер излезните напони се ограничени на вредноста на напојувањата на операцискиот засилувач, т.е. на нивоата $\pm U_{CC}$.
- Претворувач на напон во струја и струја во напон се операциски засилувачи со примена во мерната техника.
- Шмитовиот тригер е изведен со операциски засилувач кај кој позитивната повратна врска се изведува преку отпорник преку кој е овозможено дефинирање на референтното ниво на компарација на неинвертирачкиот влез, а со тоа практично и на двата префрлувачки прага.

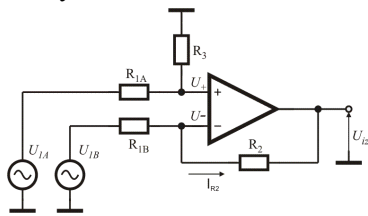


I Прашања со заокружување (заокружи го точниот одговор)

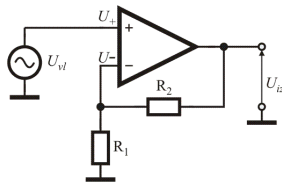
- Параметри на операциски засилувачи со бесконечна голема вредност се:
 - напонско засилување
 - излезна отпорност
 - влезна отпорност.
- За приспособување на големата излезна отпорност на претходниот степен на мала влезна отпорност на следниот степен се користи:
 - инвертирачки операциски засилувач
 - неинвертирачки операциски засилувач
 - операциски засилувач како напонски следител.
- Излезниот напон е пропорционален на разликата на влезните напони кај:
 - инвертирачки операциски засилувач
 - засилувач на разлика
 - неинвертирачки операциски засилувач.
- Во електронски мерач на осветленост се применува:
 - претворувач на напон во струја
 - претворувач на струја во напон
 - диференцијален операциски засилувач.

II Прашања со поврзување

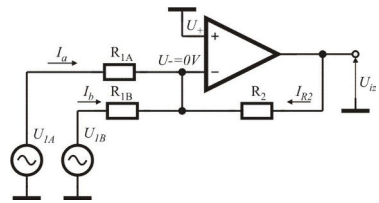
- Поврзи ги шемите на операциските засилувачи со видот на операцискиот засилувач:



а)



б)



в)

- Коло за сумирање _____
- Засилувач на разлика _____
- Неинвертирачки операциски засилувач _____.

- Поврзи го редоследот на степените во реалниот операциски засилувач:

- I степен
 - II степен
 - III степен
- Засилувач на напон _____
 - Диференцијален засилувач _____
 - Засилувач на моќност _____.

Прашања за утврдување на знаењата од МЕ 6

1. Дефинирај го поимот операциски засилувач.
2. Кој влез се нарекува инвертиврачки 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 $A_U \rightarrow \infty$.
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?
12. Која е основната улога на Шмитовото компараторско коло - Шмитовиот тригер?

Вежби за активно учење

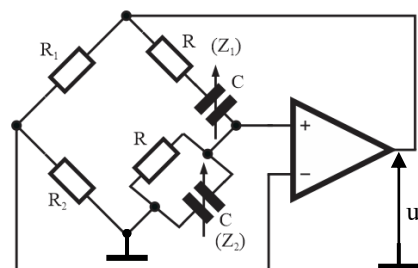
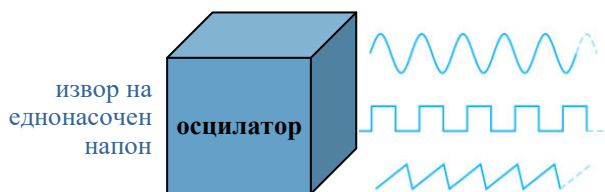
- *Состави табела во која ќе ги внесеш вредностите на параметрите на различните конфигурации на операциски засилувач и анализирајќи ја, одреди ја нивната примена.*
- *Истражувај на интернет за други видови операциски засилувачи.*
- *Изработи проект на тема засилувањето кај видови операциски засилувачи.*
- *Изработи проект за практичните примени на операциските засилувачи.*

Модуларна единица

7. Хармониски осцилатори

Со изучување на содржините од оваа модуларна единица ученикот ќе стекне основни знаења за хармониски осцилатори и ќе може:

- да анализира шеми на хармониски осцилатори;
- да разликува RC, LC и кварцен осцилатор;
- да толкува принцип на работа на хармониски осцилатор;
- да опишува својства на кварцен кристал;
- да наведува примена на видови осцилатори;
- да реализира практични вежби со хармониски осцилатор со примена на електрични шеми;
- да опишува постапки за испитување исправност и функционалност на изработената практична вежба.



Регистар на ознаки и поими:

- f_0 - фреквенција на осцилирање
 - ω_0 - кружна фреквенција на осцилирање
 - βA - кружно засилување
-
- **Хармониски осцилации** - осцилации со синусоидна бранова форма
 - **Услов на Баркхаузен** - услов за осцилирање $\beta A = 1$
 - **Кварцен кристал** - кристална структура со хемиски состав силициумов диоксид (SiO_2)

7.1 Осцилатор со позитивна повратна врска



Кај позитивната повратна врска кружното засилување βA е позитивно, тоа значи дека функцијата (факторот) на повратната врска F ќе има вредност 0 доколку кружното засилување има вредност 1 ($F=1-\beta A$).

Осцилаторите се електронски уреди кои имаат способност едностранноста 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.

Фреквенцијата на сигналот која се одржува во колото, се нарекува **фреквенција на осцилирање** и се означува со **f_0** .

Основен услов за осцилирање е кружното засилување βA да е еднакво на 1:

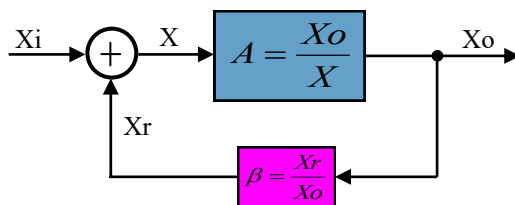
$$\beta A = 1$$

Оваа релација се нарекува **услов на Баркхаузен**.

Принципот на позитивната повратна врска, даден со блок-шемата на слика 7.1, е објаснет во модул 5. Таму е наведен и условот за добивање позитивна повратна врска, а тоа е кога фазите на влезниот сигнал X_i и на вратениот сигнал X_r се совпаѓаат, што нè интересира во специјалниот случај кога и **кружното засилување е еднакво на 1 ($\beta A=1$)**.

При анализа на добиениот израз за засилување на засилувачот со позитивна повратна врска, под услов членот $\beta A=1$, за факторот на повратната врска F се добива вредност 0 ($F=0$). Притоа се добива бесконечно големо засилување.

Од изразот $\beta A=1$, за засилувањето A се добива: $A = \frac{1}{\beta}$



7.1: Блок-шема на осцилатор со позитивна повратна врска

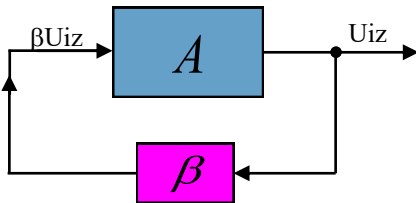
$$A_r = \frac{X_o}{X_i} = \frac{A}{(1 - \beta A)}$$

$$A_r = \frac{A}{0} = \infty$$

односно засилувањето на засилувачот A е еднакво со слабеењето на колото за повратна врска.

Доколку на влез на ова коло се доведе многу мал влезен напон, поради постоење на повратна врска, дел од излезниот сигнал се враќа на влез кој преку колото за повратна врска β се засилува со многу голем коефициент на засилување A .

На слика 7.2 е дадена блок-шема на позитивна повратна врска без влезен напон.



7.2: Блок-шема на позитивна повратна врска без влезен напон

За напоните во колото од слика 7.2 важат следните релации:

$$U_{vl} = \beta U_{iz}$$

$$U_{iz} = A \cdot U_{vl} = A \cdot \beta U_{iz}$$

при што е исполнет основниот критериум (услов) за осцилации:

$$\beta A = 1$$

Како засилувач може да се користи транзистор, FET или оператиски засилувач. Мрежата на повратната врска се нарекува селективно коло, бидејќи ја селектира фреквенцијата на излезниот синусоиден напон.

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 сè 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 карактеристиката на активниот елемент.

Од претходно изнесеното може да се заклучи:

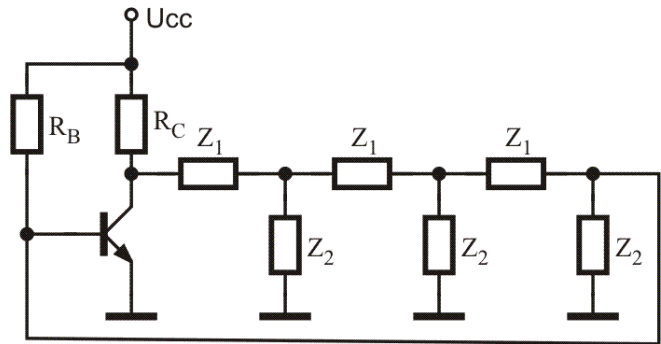
- осцилатор е транзисторски засилувач со соодветна позитивна повратна врска;
- за да започне процесот на осцилирање потребен е надворешен извор за напојување кој понатаму, по започнување на осцилациите, нема да биде потребен;
- потребно е да биде исполнет основниот услов за осцилирање ($\beta A = 1$), а фазата $0^\circ, 360^\circ, 720^\circ$ итн.

При реализација на реален осцилатор, поради постоење на одредени губитоци, производот βA се димензионира на вредност малку поголема од 1, со што се надополнуваат губитоците. Од друга страна, кај осцилатор со кружно засилување поголемо од 1, амплитудата на осцилирање се зголемува сè додека засилувачот не влезе во заситување, што доведува до изобличување на сигналот. За стабилизација на амплитудата на осцилирање, се воведува негативна повратна врска, како на пример со приклучување на отпорник R_E во колото на емитерот без паралелно приклучен кондензатор C_E . Производот βA не се димензионира на вредност помала од 1 од причина што во колото се јавуваат пригушени осцилации кои постепено ќе престанат.

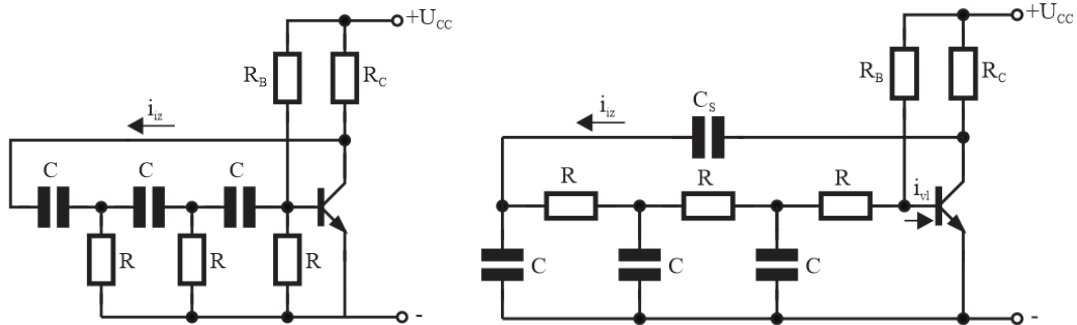
7.2 RC-осцилатор со Винов мост

Кај RC-осцилаторите, фазното поместување за добивање позитивна повратна врска се прави со RC-атенуаторски секции. Основна шема на RC-осцилатор е дадена на слика 7.3.

Колото на повратната врска 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 7.4).



7.3: Основна шема на RC-осцилатор



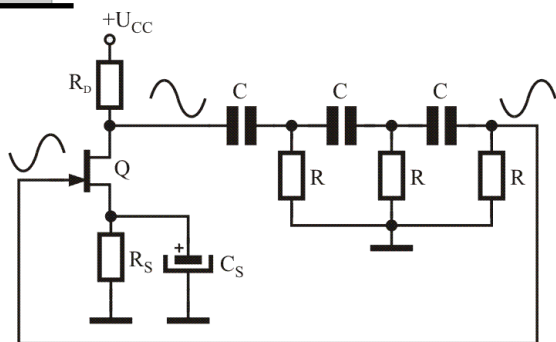
7.4: RC-осцилатор со фазно поместување од I и II вид

Еден RC-член може максимално да ја помести фазата за помалку од 90° . За поместување од 180° се потребни најмалку три RC-члена, при што секој член треба да ја помести фазата за 60° . Ако постои фазно поместување од 180° меѓу влезната и излезната струја, може да се напише:

- за осцилаторот од прв вид $f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot RC} \cdot \sqrt{6}$ и $\frac{1}{A} = \frac{i_{v1}}{i_{iz}} = \frac{1}{29} = \beta$
- за осцилаторот од втор вид $f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot RC \sqrt{6}}$

Колото за повратна врска, составено од RC-членови, и кај двете изведби, создава слабење и одредува колкаво треба да биде засилувањето (поголемо од 29). Поради намалување на изобличувањата, засилувачот се става да работи во класа A. Покрај позитивната врска која обезбедува осцилации на колото, осцилаторот користи и негативна повратна врска за оdezбедување на потребната стабилност на работа.

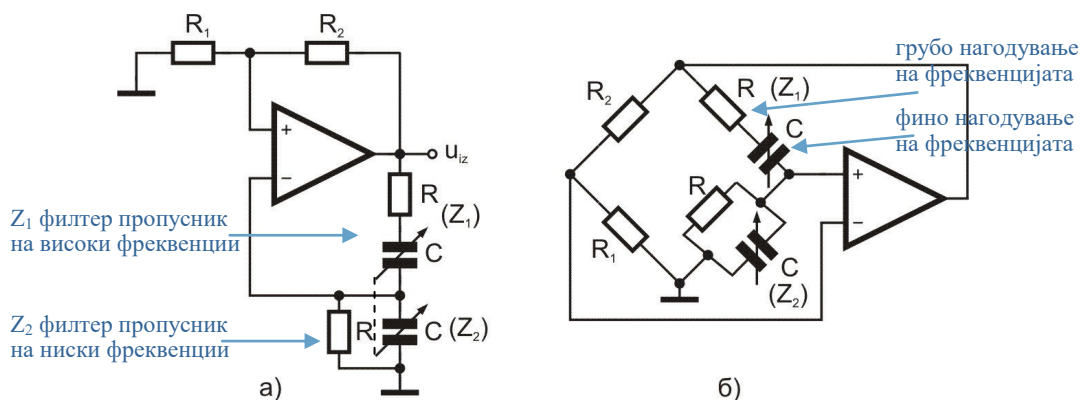
Осцилаторите од прв вид се подобри за пониски фреквенции од 1kHz. За фреквенции повисоки од 1kHz се препорачуваат осцилаторите од вториот вид. Ако осцилаторот треба да покрива одреден опсег на фреквенции, промената на фреквенцијата се прави со едновремена промена на трите отпорности, односно капацитетот на сите три кондензатори во колото за повратната врска што е непрактично. Поради тоа се изработуваат осцилатори за една фиксна фреквенција.



7.5: RC-осцилатор со FET како засилувач

На слика 7.5 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 фазно поместен за 180° . Овој напон ја има истата фаза како и претходно и со тоа се остварува позитивна повратна врска.

Осцилаторот со Винов мост 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 7.6 а), а истата шема е нацртана и на слика 7.6 б), од која се гледа препознатливиот Винов мост од мерната техника.



7.6: Електрична шема на осцилатор со Винов мост

Операцискиот засилувач е изведен како неинвертирачки засилувач со засилување:

$$A = \frac{u_{iz}}{u_p} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

На излезот се приклучени две импеданси: Z_1 , како сервиска 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.

Импедансите Z_1 и Z_2 се изразуваат како:

$$\underline{Z}_1 = R + Z_C = R + \frac{1}{j\omega C} = \frac{1 + j\omega RC}{j\omega C} \quad \underline{Z}_2 = \frac{R \cdot \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R}{1 + j\omega CR}$$

Факторот на повратната врска се пресметува според:

$$\underline{\beta} = \frac{u_p}{u_{iz}} = \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$$

Со замена на изразите за импедансите Z_1 и Z_2 во факторот на повратна врска β се добива:

$$\underline{\beta} = \frac{\frac{R}{1+j\omega RC}}{\frac{1+j\omega RC}{j\omega C} + \frac{R}{1+j\omega RC}} = \frac{\frac{R}{1+j\omega RC}}{\frac{(1+j\omega RC)^2 + j\omega RC}{j\omega C(1+j\omega RC)}} = \frac{j\omega RC}{1+3j\omega RC - \omega^2 R^2 C^2}$$

$$\underline{\beta} = \frac{1}{\frac{1+3j\omega RC - \omega^2 R^2 C^2}{j\omega RC}} = \frac{1}{3-j\frac{1-\omega^2 R^2 C^2}{\omega RC}}$$

Вкупното фазно поместување на засилувачот и колото за повратна врска треба да биде еднакво на нула. Тоа е исполнето кога е коефициентот на повратната врска реален, односно имагинарниот член во последниот израз се изедначи со 0, од каде се добива:

$$\frac{1 - \omega^2 R^2 C^2}{\omega RC} = 0 \quad \text{односно,} \quad \omega^2 R^2 C^2 = 1 \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{RC}$$

Со замена на $\omega = 2\pi f$ за резонантната фреквенција f_0 на осцилаторот се добива:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot CR}$$

При оваа фреквенција имагинарните членови во коефициентот за повратна спрега ќе бидат еднакви на нула и притоа за β се добива:

$$\beta = \frac{1}{3}$$

Со примена на Баркхаузеновиот услов $\beta A = 1$, за засилувањето на операцискиот засилувач се добива:

$$A = \frac{1}{\beta} = 3$$

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 3$$

од каде се добива зависноста на отпорностите: $R_2 = 2R_1$

Вредноста на отпорниците во Виновиот мост е од редот на $M\Omega$, додека на капацитивноста од редот на pF .

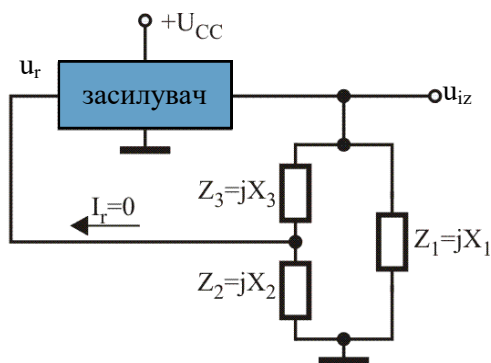
Промената на фреквенцијата на осцилаторот се прави со едновремена промена на капацитивноста на кондензаторите C во импедансите Z_1 и Z_2 .

Врз стабилноста на фреквенцијата на осцилирање влијаат повеќе фактори: промена на напонот за напојување, промена на температурата на составните делови на осцилаторот, промена на потрошувачот, механички влијанија (вибрации...) и промена на климатските услови (притисок, влажност...).

За таа цел е потребно RC-осцилаторите да бидат добро оклопени со метален заамјен оклоп со што би се спречиле влијанијата на пречките врз засилувачот.

За да се намали дисипацијата на отпорниците, односно да се постигне температурна стабилност, потребно е отпорникот R_1 да има негативен, а отпорникот R_2 позитивен температурен коефициент.

Блок-шема на осцилатор во три точки е дадена на слика 7.7.



Слика 7.7: Блок-шема на осцилатор во три точки

Селективното осцилаторно коло е составено од три импеданси Z_1 , Z_2 и Z_3 со чисто реактивен карактер, означени како на сликата. За факторот на повратната врска β може да се напише:

$$\beta = \frac{u_r}{u_{iz}} = \frac{X_2}{X_2 + X_3}.$$

Ако се исполнети условите за осцилирање, напоните u_r и u_{iz} се фазно поместени за 180° .

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 :

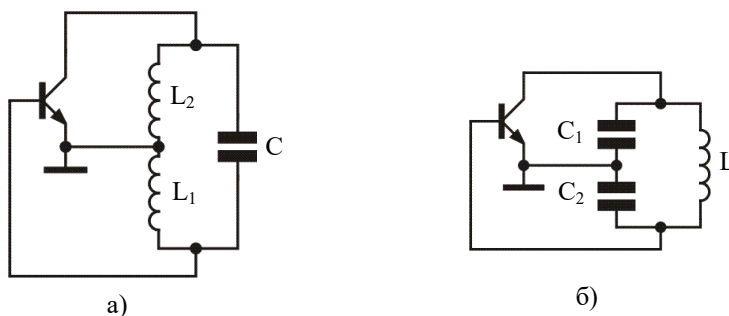
$$|X_3| > |X_2|.$$

За резонантната фреквенција на осцилаторното коло имаме услов, збирот на реактансите во колото да биде нула, па следува:

$$X_1 + X_2 + X_3 = 0.$$

Овој услов ќе биде задоволен ако реактансите се X_1 и X_2 со ист знак. Врз 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 (L_1 и L_2), а X_1 како капацитивност C (слика 7.8 а) и
- **Колпицов** – кој има X_2 и X_3 како капацитивности (C_1 и C_2), а X_1 како индуктивност L (слика 7.8 б).



Слика 7.8: Принципиелна шема на а) Хартлиев б) Колпицов осцилатор

Селективното осцилаторно коло кај Колпицовиот осцилатор, составено од две капацитивности и една индуктивност, треба да внесе фазно поместување од 180° бидејќи и засилувачот внесува фазно поместување од 180° .

Притоа за вкупното фазно поместување на колото со позитивната повратна врска се добива вредност 360° .

За импедансите во колото за повратна врска важат изразите:

$$\underline{Z}_{C1} = \frac{1}{j\omega C_1} = -jX_{C1} \quad \underline{Z}_{C2} = \frac{1}{j\omega C_2} = -jX_{C2} \quad \underline{Z}_L = j\omega L = jX_L$$

Од напонскиот делител C_2 - L преку кој се остварува позитивната повратна врска, за коефициентот β се добива:

$$\beta = \frac{\underline{Z}_{C2}}{\underline{Z}_{C2} + \underline{Z}_L} = \frac{-jX_{C2}}{-jX_{C2} + jX_L} = \frac{X_{C2}}{X_{C2} - X_L}$$

Кога осцилаторното коло е во резонанса, збирот на реактансите на колото е 0:

$$\underline{Z}_{C1} + \underline{Z}_{C2} + \underline{Z}_L = -jX_{C1} - jX_{C2} + jX_L = 0 \Rightarrow X_{C1} + X_{C2} = X_L$$

Со замена на изразот за X_L во β се добива:

$$\beta = \frac{X_{C2}}{-X_{C1}} = -\frac{\frac{1}{\omega C_2}}{\frac{1}{\omega C_1}} = -\frac{C_1}{C_2}$$

Знакот „-“ во последниот израз покажува дека повратната врска внесува фазно поместување од 180° . Ако капацитивностите C_1 и C_2 се еднакви, во колото нема слабеење $\beta=1$.

Фреквенцијата на осцилирањето се одредува со следната постапка:

$$X_{C1} + X_{C2} = X_L \Rightarrow \frac{1}{\omega C_1} + \frac{1}{\omega C_2} = \omega L$$

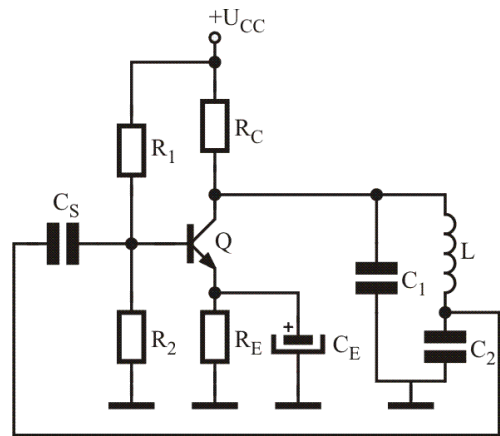
$$\frac{1}{\omega} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) = \omega L \quad \text{со замена } \omega = 2\pi f$$

за резонантната фреквенција се добива:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{LC_1 C_2}} \quad \text{или} \quad f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_{12}}}$$

каде со C_{12} е означена еквивалентната редна врска на двата кондензатора.

Реална шема на Колпицов осцилатор е дадена на слика 7.9.



Слика 7.9: Електрична шема на Колпицов осцилатор

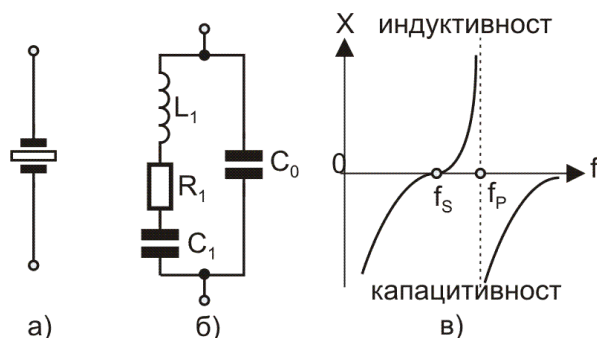
Осцилаторите во електротехниката се користат во многу области, пред сè во комуникациските системи. Постојат различни видови осцилатори, а Колпицовиот осцилатор е еден од осцилаторите кои често се применуваат во пракса поради едноставната конструкција и многу добри работни карактеристики. Наменет е за создавање на синусоидални сигнали во широк опсег на фреквенции.

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 диоксид (SiO_2), ставен меѓу две метални плочки, на кои се приклучени електрични изводи. Сè 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.



7.10: Кварцен кристал а) графички симбол, б) еквивалентна електрична шема и в) зависност на реактансата од фреквенцијата

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 7.10. 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.

На графикот од слика 7.10 б) со f_s е означена резонантната фреквенција на сериската гранка (L_1 - C_1), додека со f_p резонантната фреквенција на паралелната гранка. Резонантните фреквенции се одредуваат според релациите:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 \frac{C_1 C_0}{C_1 + C_0}}} = f_s \sqrt{1 + \frac{C_1}{C_0}}$$

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.

Типични вредности на елементите на кварцниот сигнал за одредени фреквенции се дадени во табела 7.1

Табела 7.1: Вредности на параметрите на кварцот за одредени фреквенции

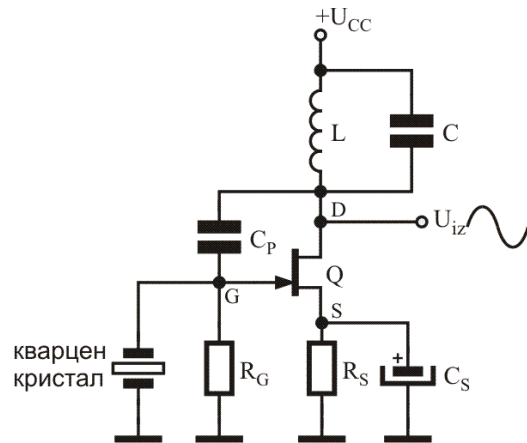
Фреквенција	32 kHz	200 kHz	2 MHz	30 MHz	150 MHz
R_1	200 k Ω	2 k Ω	100 Ω	20 Ω	5 Ω
L_1	7000H	27H	529mH	11mH	2mH
C_1	0,003pF	0,024pF	0,012pF	0,0026pF	0,0001pF
C_0	1,7pF	9pF	4pF	6pF	2pF

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 (доброта) на кварцот е:

$$Q = \omega_s \frac{L_1}{R_1}$$

и тој изнесува неколку десетини илјади, што е многу повеќе од она што може да се добие со обични осцилаторни кола.

На слика 7.11 е дадена шема на осцилатор со кварц, кој е приклучен на гејтот од FET-от Q. Во колото на дрејнот 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.



7.11: Осцилатор со кварцен кристал

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.



Резиме - хармониски осцилации

- 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 (βA).
- 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.
- 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.



I Прашања со заокружување (заокружи ги точните одговори)

- Баркхаузенов услов за осцилирање кој треба да биде исполнет за да колото работи како осцилатор гласи:
 - $\beta A=0$
 - $\beta A<1$
 - $\beta A=1$.
- Факторот на повратна врска кај осцилаторите е:
 - $F<1$
 - $F=0$
 - $F>1$.
- Осцилаторното коло на Колпицовиот осцилатор е составено од:
 - еден кондензатор и два калема
 - еден калем и два кондензатора.
- Кај RC-осцилаторите засилувањето треба да биде:
 - <29
 - $= 29$
 - >29 .
- Кристалот на кварцот се однесува како:
 - осцилаторно коло
 - засилувачко коло.

II Прашања со дополнување

- Услов за добивање позитивна повратна врска е фазите на влезниот и на вратениот сигнал да _____ (се совпаѓаат/се разликуваат за 180°).
- Уредите кои, со примена на позитивна повратна врска, еднонасочната струја од изворот за напојување ја претвораат во наизменична се нарекуваат _____.
- Осцилаторот со Винов мост користи _____ (позитивна/негативна) повратна врска.
- Колпицов осцилатор користи _____ (позитивна/негативна) повратна врска.
- Осцилаторите со кварцен кристал имаат голема стабилност на _____ (излезен напон/фреквенција на осцилирање).
- Осцилатор со засилување на повратната врска $\beta=0,02$ има основно засилување со вредност $A=$ _____.

Прашања за утврдување на знаењата од МЕ 7

1. Како се обезбедува позитивна повратна врска кај осцилаторот со резонантно коло и индуктивна врска?
2. Објасни го составот на селективното осцилаторно коло на осцилаторот во три точки и кој услов треба да го исполни.
3. Какви треба да бидат реактансите на селективното осцилаторно коло на Хартлевиот осцилатор?
4. Какви треба да бидат реактансите на селективното осцилаторно коло на Колпицовиот осцилатор?
5. Од што е составено колото на повратната врска на RC-осцилаторот?
6. Зошто е потребно засилувачот да работи во класа А?
7. Колкаво е фазното поместување на повратната врска кај RC-осцилаторите?
8. Кои се составните елементи на осцилаторот со Винов мост?
9. Кој услов треба да биде исполнет за добивање осцилации кај осцилаторот со Винов мост?
10. Како се врши промената на фреквенцијата на осцилаторот со Винов мост?
11. Со кое коло се постигнува стабилизација на амплитудата на осцилациите?
12. Што се случува кога ќе се зголеми амплитудата на осцилациите?
13. Објасни го принципот на работа на осцилатор со Винов мост.
14. Нацртај ја еквивалентна електрична шема на кварцниот кристал.
15. Како се однесува кварцот во опсегот меѓу двете резонантни фреквенции, а како надвор од тој опсег?
16. Кои се предностите на осцилаторите со кварц?

Вежби за активно учење

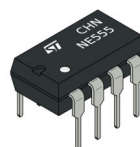
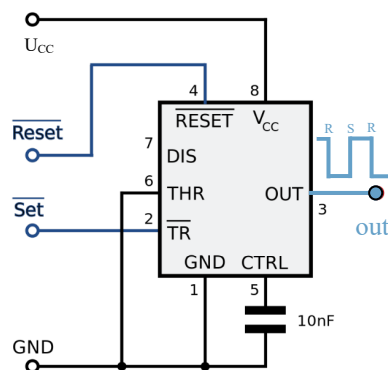
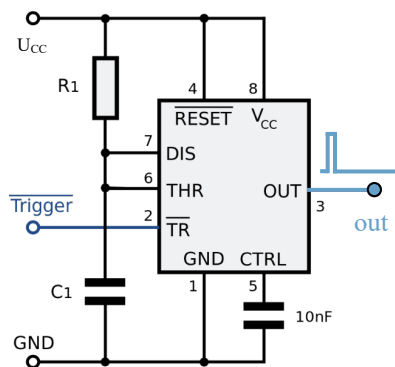
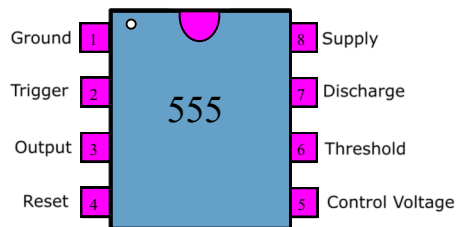
- *Изработи ги проучените видови осцилатори во програмскиот пакет за симулација *electronic workbench* или друга програма за компјутерска симулација и на осцилоскопот анализирај ги осцилациите кои ги дава осцилаторот.*
- *Истражувај на интернет за други видови осцилатори и врз основа на истражувањето изработи проект.*

Модуларна единица

8. Мултивибратори

Со изучување на содржините од оваа модуларна единица ученикот ќе стекне основни знаења за мултивибратори и ќе може:

- да го дефинира поимот мултивибратор;
- да разликува состојби кај мултивибратори;
- да одредува излезен сигнал од моностабилни и астабилни кола реализирани со операциски засилувачи и со временско ИК 555;
- да толкува принципиелна електрична шема на моностабилно и астабилно коло со операциски засилувач и со временско ИК 555;
- да објаснува временски дијаграми во карактеристични точки на моностабилно и астабилно коло со операциски засилувач и со временско ИК 555;
- да објаснува влијание на елементите во колото врз обликот на излезниот сигнал;
- да реализира моностабилни и астабилни кола со операциски засилувач и со временско ИК 555.



Регистар на ознаки и поими:

- Δt - временска разлика меѓу две нивоа
 - τ - временска константа на полнење и празнење на кондензатор
 - T_{P1} - времетраење на импулсот
 - T_{P2} - времетраење на паузата
 - $u_C(\infty)$ - крајно ниво кон кое тежнее
 - f - фреквенција на сигналот
 - T_{PM} - времетраење на пилест импулс
-
- Регенеративно коло - состојбата на колото е функција од моменталното ниво на влезните сигнали, но и од претходната состојба на излезниот сигнал
 - Стабилна состојба - теоретски може да трае неограничено долго време, а практично сè додека некој надворешен побуден импулс не предизвика нејзино прекинување
 - Квазистабилната состојба - стационарна состојба со конечно времетраење
 - Преоден режим (нестабилна состојба) - префрлување од едната во другата стационарна состојба
 - Регенеративен (кумулятивен) процес - прекинувачки елементи работат како засилувачи, на чии влезови доаѓа сигнал со постојан пораст поради изведената позитивна реакција
 - Мултивибратори - регенеративни кола
 - Бистабилни мултивибратори - можат да се најдат во една од две стабилни состојби
 - Моностабилни мултивибратори - се карактеризираат со една стабилна и една квазистабилна состојба
 - Астабилни мултивибратори - се карактеризираат со две квазистабилни состојби.

Главна карактеристика на *регенеративните кола*, во однос на нерегенеративните, е фактот што состојбата на колото е функција од моменталното ниво на влезните сигнали, но и од претходната состојба на излезниот сигнал. Поради ова, кај регенеративните кола мора да постои повратна врска меѓу излезот и влезот на колото. Бидејќи излезната променлива ја претставува претходната состојба на колото, оваа состојба ќе биде поддржувана само ако во колото е изведена позитивна повратна врска. Во оваа тема ќе бидат презентирани ваквите импулсни кола, нивните општи карактеристики и класификација, како и конфигурацијата и принципот на работа на повеќе карактеристични примери.

Во дискретната техника регенеративните прекинувачки кола најчесто се изведуваат со два активни прекинувачки елементи (на пр. транзистори). Изведбата со само еден активен елемент и надворешно пасивно коло за изведување на позитивната повратна врска покажува недостатоци во поглед на брзината на работа. Кога се користат два транзистори повратната реакција се изведува од излезот на едниот елемент кон влезот на другиот, и обратно. Во интегрираната техника постојат реализации и со една, но и со две интегрирани компоненти.

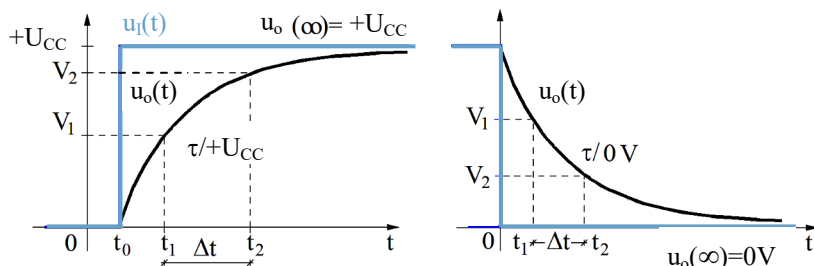
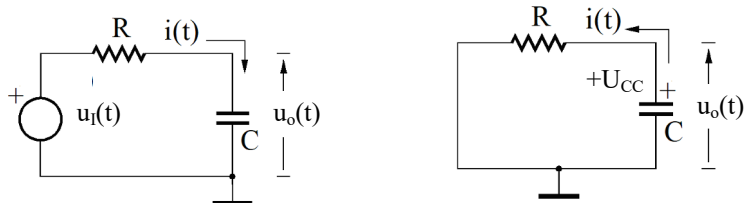
Регенеративните кола може да се наоѓаат во една од две стационарни состојби, кои можат да бидат стабилни или квазистабилни, кога на излезот од колото се добива ниско или високо ниво. Стабилната состојба теоретски може да трае неограничено долго време, а практично сè додека некој надворешен побуден импулс не предизвика нејзино прекинување. Квазистабилната состојба всушност е стационарна состојба со конечно времетраење.

За точно одредување на должината на временските циклуси, како и за разбирање на равенките според кои тие ќе се пресметуваат и кои ќе ги сретнуваме во овој модул, ќе ја користиме равенката:

$$\Delta t = \tau \cdot \ln \left| \frac{u(\infty) - V_1}{u(\infty) - V_2} \right| \quad \text{каде со } \tau \text{ е означена временската константа: } \tau = R \cdot C$$

Имено, со нејзина примена се одредува временската разлика Δt меѓу две нивоа V_1 и V_2 кај експоненцијалната функција на напонот на кондензаторот кога тој се полни, односно кога се празни. Во првиот случај тој е приклучен на побуда од Хевисајдов облик $u_i(t)$ која претставува еднонасочен скоковит напон со ниво $+U_{CC}$, додека во вториот случај е земено дека тој е веќе наполнет на ниво $+U_{CC}$ и се празни сè додека не го изгуби целиот полнеж. Напонот на краевите од кондензаторот $u_0(t)$ при полнењето се стреми кон крајното ниво $u_0(\infty) = +U_{CC}$, односно при празнењето кон $u_0(\infty) = 0V$, со временска константа t која што претставува производ од отпорноста и капацитивноста на елементите во колото низ кои протекува струјата на полнење, односно на празнење, прикажано на слика 8.

Временскиот дијаграм на напонот на кондензаторот на слика 8.1 а) претставува растечка функција што одговара на процес на полнење на вредност $V_1 = +U_{CC}$. Спротивно, временскиот облик на излезниот напон на слика 8.1 б) е опаѓачка функција заради процес на целосно празнење на веќе наполнет кондензатор од $+U_{CC}$ до ниво кога напонот на неговите краеве ќе падне на $0V$.

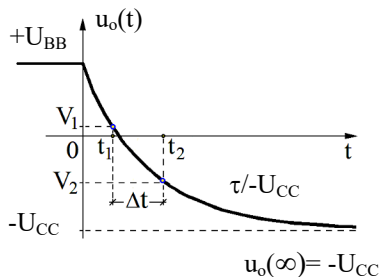


а) полнење на кондензаторот б) празнење на кондензаторот

Слика 8.1: Временски дијаграм на напонот кај RC-коло

Равенката со која се одредува периодот Δt е исклучително важна и може да се применува во општ случај кое било RC-коло. Имено, таа важи како за позитивни, така и за негативни вредности на нивоата V_1 и V_2 . Попрецизно кажано, при замената на нивните конкретни вредности тие треба да се внесат во заграда имајќи го предвид и знакот на соодветното напонско ниво.

При префрлувањето од едната во другата стационарна состојба, на колото му е потребен одреден временски период во кој се одвива *преоден режим на колото*. Во овој режим колото се наоѓа во *нестабилна (динамичка, преодна) состојба*. Во оваа состојба, во регенеративното коло се случува *регенеративен (кумулативен) процес*, во кој употребените прекинувачки елементи работат како засилувачи, на чии влезови доаѓа сигнал со постојан пораст поради изведената позитивна реакција. Од овие причини прекинувачкиот елемент многу брзо ќе оди во заситување, така што оваа состојба е нестабилна и со многу кусо времетраење. Ова е разбирливо кога се знае дека дејството на побудниот влезен сигнал е потпомогнато со дејствувањето на позитивната повратна врска, така што како побудни сигнали за менување на состојбата на регенеративните кола обично се користат краткотрајни прекинувачки (анг. triggering, срп. окидни) импулси.



Слика 8.2: Полнење и празнење на кондензатор на инверзен напон

Временскиот дијаграм прикажан на слика 8.2 го преставува брановиот облик на напонот на кондензаторот којшто бил наполнет на позитивно напонско ниво од $U_{BB} = +9\text{ V}$ и во моментот $t=0$ на неговите краеви е приклучен инверзен напон од $U_{CC} = -12\text{ V}$. За пресметување на времето Δt за кое напонот на краевите на кондензаторот го променил своето ниво од $V_1 = +1\text{ V}$ на $V_2 = -6\text{ V}$ се користи равенката:

$$\Delta t = \tau \cdot \ln \frac{|u_o(\infty) - V_1|}{|u_o(\infty) - V_2|} = \tau \cdot \ln \frac{|-12\text{ V} - 1\text{ V}|}{|-12\text{ V} - (-6)\text{ V}|} = \tau \cdot \ln \frac{|-13\text{ V}|}{|-6\text{ V}|} \approx \tau \cdot \ln 2 = 0.7 \cdot \tau = 0.7 \cdot 10\text{ ms} = 7\text{ ms}$$

Најголем број регенеративни кола припаѓаат во групата на мултивибраторите: тоа се електронски кола кај кои е изведена позитивна реакција со употреба на два активни прекинувачки елементи. Таквите кола во дискретната техника најчесто се изведуваат со примена на биполарни или униполарни MOSFET транзистори. Истите можат да се реализираат и со примена на интегрирани компоненти, како на пример со линеарни (аналогни) интегрирани кола – операциски засилувачи, дигитални интегрирани кола или со специјализирани временски (тајмерски) интегрирани кола.

Според состојбите низ кои поминуваат во текот на својата работа, мултивибраторите се делат на три големи групи:

- *бистабилни мултивибратори*, кои популарно се викаат и *флип-флопови*,
- *моностабилни мултивибратори*, за кои се користат и термините *моностабилни кола*, *моновибратори*, *моностабили* или *тајмери*, и
- *астабилни мултивибратори*, познати и како *астабилни*, *астабилни кола* или *такт-генератори*, *генератори на правоаголен периодичен напон*.

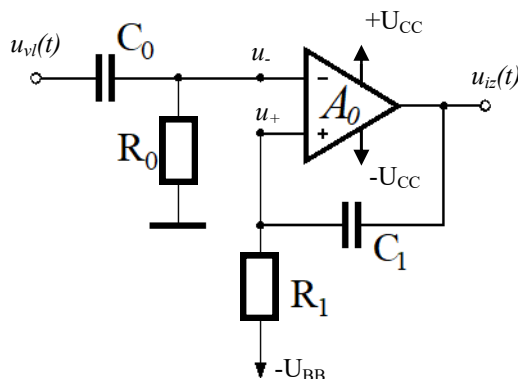
Бистабилните мултивибратори можат да се најдат во една од две стабилни состојби. Секоја од овие состојби може да трае бесконечно долго време, а за префрлување од една во друга состојба врз колото треба да дејствува некој побуден импулс. Класичен пример на електромеханички бистабилен прекинувач е обичниот прекинувач за вклучување или исклучување на електричното осветлување во станбените простории. Исто така, пример е и флип-флопот кој е основен градбен елемент на секоја полупроводничка мемориска ќелија. Кај него излезното ниво може да биде високо или ниско со што тој памти еден бит, 1 или 0.

Моностабилните мултивибратори се карактеризираат со една стабилна и една квазистабилна состојба. Овие кола секогаш се наоѓаат во стабилната состојба, која теоретски може да трае бесконечно долго. Во моментот кога на влезот од колото се донесе надворешен побуден импулс со кусо времетраење, моностабилното коло преминува во квазистабилната состојба, во која останува конечен временски период, за потоа само од себе повторно да се врати во стабилната состојба. Поради ваквиот начин на работа моностабилните кола најчесто се користат за иницирање на одреден временски процес и негово задржување одредено време. Еден пример на електромеханички прекинувач од моностабилен тип е автоматскиот прекинувач за осветлување на скалите кај повеќекатните станбени згради.

Астабилните мултивибратори се карактеризираат со две квазистабилни состојби. Овие кола се самоосцилирачки, бидејќи по истекување на определен временски период, сами од себе се префрлуваат од една во друга квазистабилна состојба. При тоа, тие на својот излез генерираат низа правоаголни импулси и паузи кои наизменично се менуваат. Секоја квазистабилна состојба има одредено времетраење, поради што астабилното коло уште се нарекува и *генератор* или *осцилатор на правоаголни импулси*, односно *такт-генератор*. Како пример за астабилна работа ќе ги наведеме трепкачите на автомобилите, или жолтото трепкаво светло на семафорите.

Моностабилните мултивибратори се електронски склопови, кои се користат за генерирање на правоаголен импулс со одредено времетраење. За нив во практиката се користи и поимот *тајмер* кој доаѓа од истоимениот англиски збор *timer*. Веќе спомнавме дека моностабилното коло вообичаено се наоѓа во стабилна состојба, под дејство на надворешен импулс преминува во квазистабилна состојба, која трае конечен временски период и потоа само од себе повторно се враќа во стабилна состојба. Излезните напонски нивоа за двете состојби меѓусебно драстично се разликуваат: ако во едната излезот е висок, во другата е низок, или обратно, при што за време на квазистабилната состојба на излезот од мултивибраторот се јавува напонски правоаголен импулс. Во принцип, ова време не треба да зависи од обликот и времетраењето на побудниот импулс, со кој моностабилниот мултивибратор се побудува за да се префрли од стабилната во квазистабилната состојба, туку е определено само од конфигурацијата на колото и од вредностите на употребените елементи.

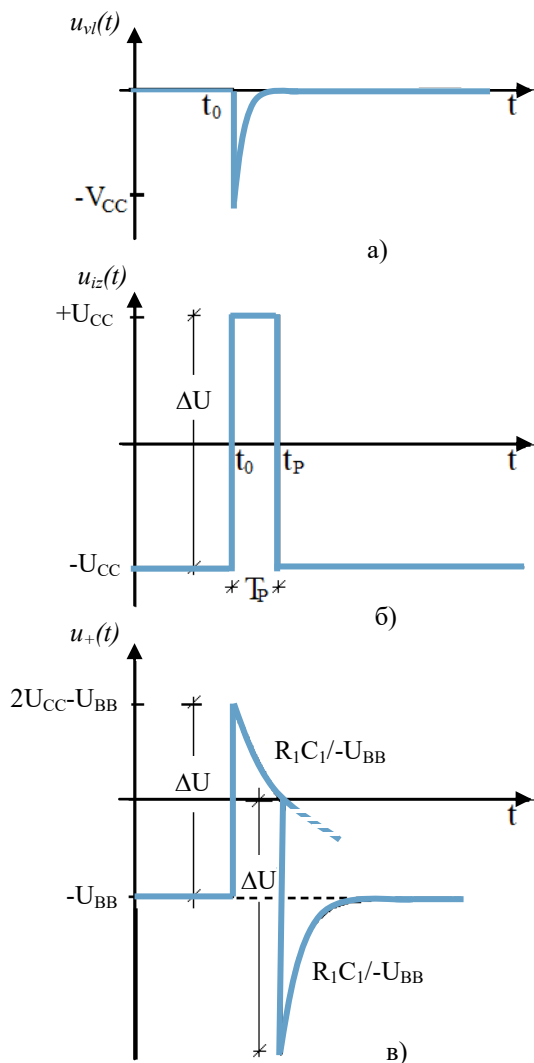
На слика 8.3 е прикажана принципелна шема на моностабилен мултивибратор, реализиран со интегрирано коло, кое претставува операциски засилувач (ОПЗ), како што е на пр. линейното интегрирано коло $\mu A741$. Позитивната повратна врска се остварува на неинвертирачкиот влез од операцискиот засилувач и тоа преку кондензаторот C_1 и отпорникот R_1 . Побудниот импулс се носи на инвертирачкиот влез преку CR -колото составено од елементите C_0 и R_0 .



Слика 8.3: Електрична шема на моностабилен мултивибратор со ОПЗ

Овие два елементи обезбедуваат диференцирање на побудниот импулс и го сведуваат неговото времетраење на време кое е покусо од траењето на квазистабилната состојба на мултивибраторот.

Заради поедноставување на анализата, ќе претпоставиме дека употребениот операциски засилувач е идеален така што неговите параметри ги имаат следниве вредности: основно засилување $A_0 \rightarrow \infty$, влезна отпорност $R_1 \rightarrow \infty$, и излезна отпорност $R_{iz} \rightarrow 0$. Со оваа претпоставка, како и поради присуството на позитивната реакција, може да се смета дека операцискиот засилувач ќе работи во режим на заситување. Ова значи дека излезниот напон $u_{iz}(t)$ прима вредности приближно еднакви со вредностите на напојувањата: излезот од операцискиот засилувач ќе биде приближно $+U_{CC}$ тогаш кога потенцијалот на неинвертирачкиот влез $u_+(t)$ е барем малку повисок од потенцијалот на инвертирачкиот влез $u_-(t)$. Обратно пак, ако потенцијалот на инвертирачкиот влез $u_-(t)$ е барем малку повисок од потенцијалот на неинвертирачкиот влез $u_+(t)$, излезот од операцискиот засилувач ќе биде приближно еднаков на $-U_{CC}$.



Слика 8.4. Временски дијаграми на моностабилен мултивибратор со ОПЗ

Во моментот $t=t_0$ на инвертирачкиот влез се носи шилест импулс со кусо времетраење и амплитуда која е понегативна од потенцијалот на неинвертирачкиот влез $-U_{BB}$, заради што $u_+(t) > u_-(t)$. Во овој момент излезот веднаш ја менува состојбата од $-U_{CC}$ на $+U_{CC}$. Промената на излезната амплитуда е позитивна и изнесува $\Delta U = 2U_{CC}$. Бидејќи напонот на кондензаторот C_1 не може веднаш да се промени, овој скок целосно се пренесува на неговиот друг крај, односно до неинвертирачкиот влез на операцискиот засилувач кој сега станува доста позитивен. Од друга страна, потенцијалот на инвертирачкиот влез од операцискиот засилувач е нула затоа што престанало дејството на побудата, па излезот останува на високо ниво $u_{iz}(t) = +U_{CC}$. Значи, непосредно по моментот $t=t_0$ напоните во карактеристичните точки ќе изнесуваат: $u_{vl}(t) = 0$, $u_-(t) = 0$, $u_+(t) = (2U_{CC} - U_{BB}) > 0$ и $u_{iz}(t) = +U_{CC}$. Оваа состојба е квазистабилна и има конечно времетраење што се објаснува со следнава анализа: по наглата промена на потенцијалот на неинвертирачкиот влез во $t=t_0$, доаѓа до празнење на кондензаторот C_1 , бидејќи струјата тече преку отпорникот R_1 кон напојувањето $-U_{BB}$, па потенцијалот на неинвертирачкиот влез опаѓа со временска константа $\tau = R_1 C_1$.

Принципот на работа на овој мултивибратор е илустриран со брановите облици на напоните во карактеристичните точки од колото, кои се прикажани на слика 8.4 а), б), и в). Ќе претпоставиме дека колото е оставено „само на себе“, така што негова почетна состојба е стабилната состојба. Имено, сè до моментот $t=t_0$, на влезот не е присутен никаков побуден импулс $u_{vl}(t < t_0) = 0$. Оваа состојба траела доволно долго време така што може да се смета дека низ кондензаторите C_0 и C_1 не тече никаква струја и тие може да се еквивалентираат со прекинато коло. Значи, напонот на инвертирачкиот влез за $t < t_0$ изнесува $u_-(t) = 0$.

Бидејќи влезната отпорност R_i на операцискиот засилувач е бесконечно голема, а и кондензаторот C_1 е прекин во колото, низ отпорникот R_1 нема да тече струја. Напонот на неговите краеве ќе биде нула, па потенцијалот на неинвертирачкиот влез за $t < t_0$ ќе изнесува: $u_+(t) = -U_{BB}$.

Бидејќи потенцијалот на инвертирачкиот влез е поголем од потенцијалот на неинвертирачкиот влез [$u_-(t) = 0 > -U_{BB} = u_+(t)$], излезот $u_{iz}(t)$ ќе биде на негативен напон $-U_{CC}$. Имајќи предвид дека потенцијалот на неинвертирачкиот влез $-U_{BB}$ е помалку негативен од излезот $-U_{CC}$, кондензаторот C_1 ќе биде наполнет на ниво $u_C(t) = -U_{BB} + U_{CC}$, со плусот на неинвертирачкиот влез.

Крајната вредност на потенцијалот на неинвертирачкиот влез би изнесувала $-U_{BB}$, бидејќи по бесконечно долго време кондензаторот C_1 ќе претставува прекинато коло, а напонот на отпорникот R_1 ќе биде нула (низ него нема да тече никаква струја). Меѓутоа овој потенцијал нема никогаш да опадне до $-U_{BB}$ затоа што во моментот $t=t_p$ тој го достигнува нултото ниво и се изедначува со потенцијалот на инвертирачкиот влез, а има тенденција на понатамошно опаѓање. Во овој момент доминантен ќе стане инвертирачкиот влез, така што состојбата на излезот $u_{iz}(t)$ веднаш ќе се промени од $+U_{CC}$ на својата почетна вредност $-U_{CC}$.

Времетраењето на генерираниот правоаголен импулс изнесува $T_p=(t_p-t_0)$. Овој период се одредува од експоненцијалниот облик на потенцијалот на неинвертирачкиот влез. Неговата вредност во $t = t_0$ изнесува $u_+(t) = -U_{BB} + 2U_{CC}$, а во $t=T_p$ нивото му е $u_+(t)=0$, при што крајната вредност за $t \rightarrow \infty$ би била $U_+ = -U_{BB}$ со временска константа $\tau = R_1 C_1$. Применувајќи ги овие податоци во равенката за временска разлика Δt меѓу две нивоа кај експоненцијална функција, за времетраењето на импулсот се добива:

$$T_p = R_1 C_1 \ln \frac{|-U_{BB} - (-U_{BB} + 2U_{CC})|}{|-U_{BB} - 0|} = R_1 C_1 \ln \frac{2U_{CC}}{U_{BB}}$$

Претходно наведовме дека во моментот $t_p=(t_0+T_p)$ повторно доаѓа до скок од $\Delta U=2U_{CC}$, но сега во негативна насока. Оваа нагла промена се пренесува преку кондензаторот C_1 до неинвертирачкиот влез, така што веднаш по моментот $t=t_p$ потенцијалот на неинвертирачкиот влез е $-2U_{CC}$. Оваа вредност е понегативна во однос на потенцијалот на инвертирачкиот влез кој се наоѓа на потенцијал на маса, и излезот останува на $-U_{CC}$. Уште повеќе, потенцијалот на неинвертирачкиот влез $-2U_{CC}$ е понегативен од напојувањето $-U_{BB}$, заради што е потребен одреден временски период за да заврши процесот на полнење на кондензаторот C_1 . Струјата тече од изворот за напојување $-U_{BB}$ кон кондензаторот C_1 . Временската константа ќе изнесува $\tau = R_1 C_1$, а крајната вредност на потенцијалот на неинвертирачкиот влез пак изнесува $-U_{BB}$. Колото ќе се смири по време 5τ ($\tau = R_1 C_1$), во однос на моментот t_p , бидејќи тоа време практично е доволно да заврши преодниот процес на полнење на кондензаторот C_1 .

На излезот од овој мултивибратор може да се добие инвертиран бранов облик, ако еднонасочниот извор за напојување U_{BB} се поврзе обратно со што нивото на неинвертирачкиот влез ќе биде $+U_{BB}$, а на влезот се донесе краткотраен прекинувачки импулс со позитивна амплитуда поголема од $+U_{BB}$.



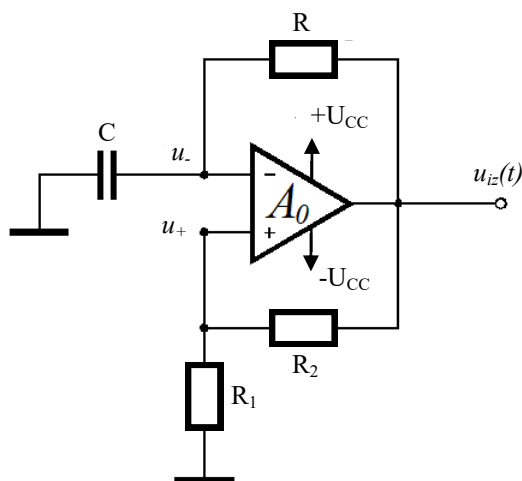
Резиме - Мултивибратори

ЗАПОМНИ!

- **Мултивибраторите се регенеративни кола кај кои е изведена позитивна реакција со употреба на два активни прекинувачки елементи.**
- **Бистабилните мултивибратори можат да се најдат во една од две стабилни состојби.**
- **Моностабилните мултивибратори се карактеризираат со една стабилна и една квазистабилна состојба.**
- **Астабилните мултивибратори се наоѓаат во две квазистабилни состојби.**

За астабилните кола претходно веќе наведовме дека тие постојано и наизменично се префрлуваат од една во друга квазистабилна состојба, секоја со свое конечно времетраење. Излезните нивоа на едната и другата квазистабилна состојба меѓусебно драстично се разликуваат: еднаш излезот е висок, а еднаш низок, и обратно. Според ова, **астабилните мултивибратори се временски електронски кола кои на својот излез даваат правоаголен периодичен напонски сигнал, така што тие во основа претставуваат осцилатори на правоаголни импулси.** Излезната низа на правоаголни импулси има своја периода која е одредена од вкупното времетраење на квазистабилните состојби на колото, т.е. од траењето на импулсот и паузата, кои во општ случај се различни меѓу себе.

На слика 8.5 е прикажан еден пример на астабилен мултивибратор изведен со операциски засилувач, како што е на пр. линеарното интегрирано коло $\mu A741$.



Слика 8.5. Електрична шема на астабилен мултивибратор со ОПЗ

Од шемата се гледа дека позитивната реакција се остварува на неинвертирачкиот влез и тоа преку отпорниците R_1 и R_2 . Од друга страна, преку отпорникот R на инвертирачкиот влез се остварува негативна повратна врска, а како што ќе видиме понатаму, од вредноста на овој отпорник и од капацитетот на кондензаторот C ќе зависи и периодот на правоаголниот излезен напон.

Исто така, при оваа анализа е претпоставено дека употребениот операциски засилувач е идеален, т.е. дека ги има следниве параметри:

$$A_0 \rightarrow \infty, R_{v1} \rightarrow \infty, R_{iz} \rightarrow 0.$$

Во тој случај неговиот излез ќе биде $u_{iz}(t) \approx +U_{CC}$ ако $u_+(t) > u_-(t)$, односно $u_{iz}(t) \approx -U_{CC}$ тогаш кога $u_-(t) > u_+(t)$.

Принципот на работа на колото е илустриран со временските дијаграми прикажани на слика 8.6 а), б), в). Со приклучување на напојувањето излезниот напон може да се најде на вредност $u_{iz}(t) = +U_{CC}$ или $u_{iz}(t) = -U_{CC}$, односно астабилниот мултивибратор може случајно да се наоѓа во едната од двете квазистабилни состојби.

Да претпоставиме дека излезното ниво е $+U_{CC}$. Ова значи дека потенцијалот на неинвертирачкиот влез $u_+(t)$ ќе биде:

$$u_+(t) = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_{iz}(t) = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{CC}$$

Ако односот: $\frac{R_1}{R_1 + R_2}$ го означиме со β , тогаш $u_+(t) = \beta U_{CC}$.

Сега кондензаторот C ќе се полни преку отпорникот R кон крајната вредност $+U_{CC}$ со временска константа $\tau = RC$. Напонот на кондензаторот $u_C(t)$ е ист со потенцијалот на инвертирачкиот влез $u_-(t)$. Овој напон не може да ја достигне својата крајна вредност затоа што кога ќе порасне до вредноста βU_{CC} доаѓа до изедначување со напонот на неинвертирачкиот влез $u_+(t)$. Од друга страна, бидејќи постои тенденција на негово зголемување, ќе дојде до нагла негативна промена на излезот $u_{iz}(t)$ од вредност $+U_{CC}$ на $-U_{CC}$. Овој скок се редуцира преку отпорничкиот делител на напон R_1, R_2 и веднаш предизвикува иста нагла промена на напонот на неинвертирачкиот влез $u_+(t)$ кој сега станува негативен затоа што добива вредност:

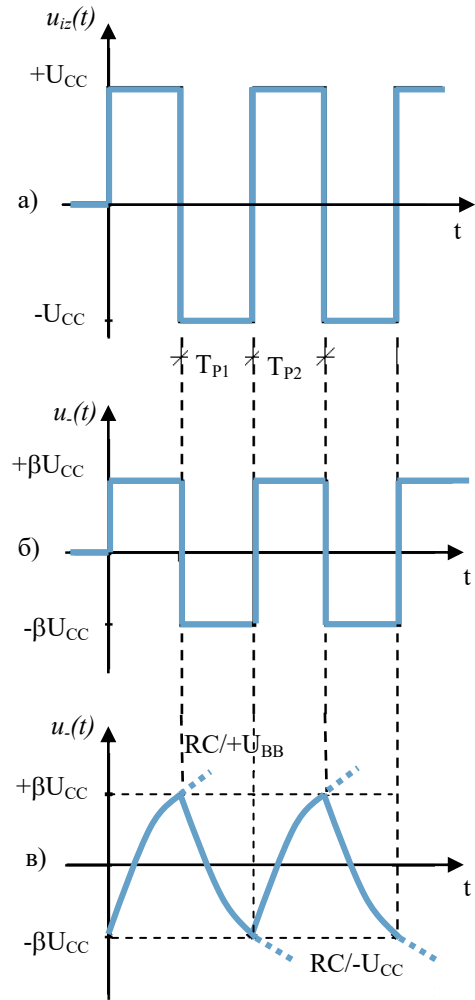
$$u_+(t) = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_{iz}(t) = -\beta U_{CC}$$

Со промената на потенцијалот на излезот, кондензаторот C почнува да се празни преку отпорникот R кон вредноста $-U_{CC}$ со истата временска константа $\tau = RC$. Оваа состојба ќе трае сè до оној момент кога потенцијалот на инвертирачкиот влез $u_-(t)$ не се изедначи со потенцијалот на неинвертирачкиот влез $u_+(t)$, и има тенденција на опаѓање, кога ќе дојде до нагла позитивна промена на излезниот напон од вредност $-U_{CC}$ на $+U_{CC}$.

Од изложеното може да се заклучи дека времетраењата T_{P1} и T_{P2} на двете квазистабилни состојби кога наизменично се генерираат позитивни и негативни излезни импулси меѓусебно се еднакви, $T_{P1}=T_{P2}=T_P$, така што периодот T ќе биде $T=2T_P$. Одредувањето на изразите за времетраењето на импулсите $T_{P1}=T_{P2}=T_P$ и периодот на правоаголниот излезен напон T произлегува од временскиот облик на сигналот на инвертирачкиот влез $u_-(t)$. Овој сигнал има експоненцијален облик, а времетраењето на импулсите се одредува според познатиот израз за временска разлика Δt меѓу две нивоа кај ваква функција, така што се добива:

$$T_{P1} = T_{P2} = T_P = \tau \cdot \ln \frac{1+\beta}{1-\beta} = RC \ln \frac{1+\beta}{1-\beta}$$

$$T = 2T_P = 2\tau \cdot \ln \frac{1+\beta}{1-\beta} = 2RC \ln \frac{1+\beta}{1-\beta}$$

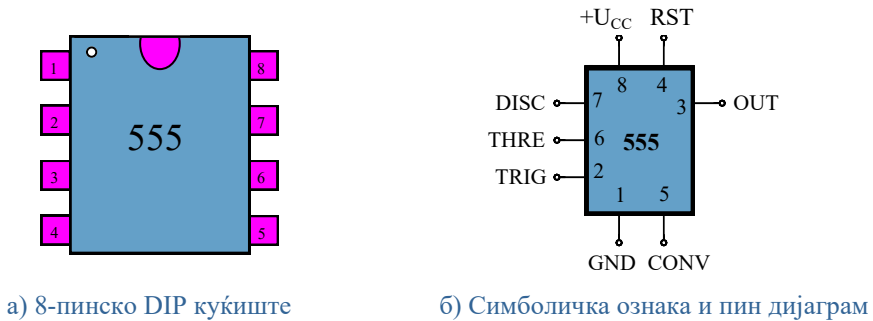


Слика 8.6. Времени дијаграми на астабилен мултивибратор со ОПЗ

8.5 Интегрирано временско коло 555

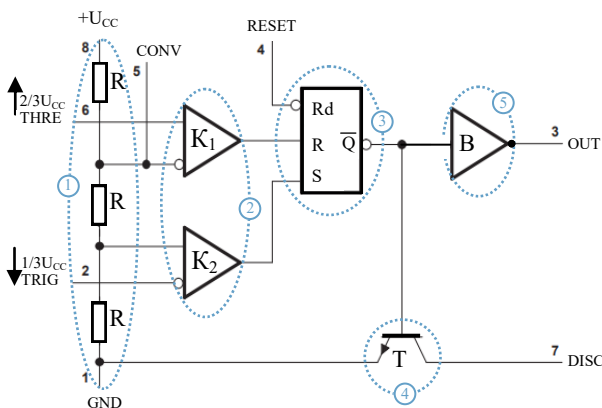
Интегрираното коло (ИК) 555, или т.н. „тајмер 555“ се произведува повеќе од триесет години и најчесто се користи за генерирање на правоаголни напонски импулси со различно времетраење. Ова временско ИК се уште наоѓа голема примена во практиката, а најчесто се користи во две основни конфигурации и тоа за реализација на моностабилни и астабилни мултивибратори. Во двата случаја, тајмерот 555 овозможува едноставно отпочнување или прекинување на одреден временски циклус на полнење или празнење на надворешно приклучен кондензатор преку еден или два надворешни отпорници. Наведените елементи се поврзуваат на одредени влезови на колото и со пуштање во работа доаѓа до промена на напоните во тие точки, што понатаму влијае врз однесувањето на колото, што конечно доведува до генерирање на импулс или пауза на неговиот излез. Времетраењето на импулсот, односно паузата зависат само од вредностите на надворешно приклучените елементи.

Ова ИК се пакува во 8-пинско DIP куќиште кое е прикажано на слика 8.7 а) од каде може да се види распоредот на неговите пинови. Симболичката ознака на колото којашто најчесто се користи во електричните шеми, е претставена на слика 8.7 б).



Слика 8.7: Интегрирано временско коло 555

Колото има четири влез на пиновите [6] (Threshold, THRE), [2] (Trigger, TRIG), [4] (Reset, RST) и [5] (Control Voltage, CONV) и два излеза на пиновите [7] (Discharge, DISC) и [3] (Output, OUT) на кој се поврзува потрошувачот. Напојувањето ($+U_{CC}$) се приклучува на пинот [8], додека пинот [1] (Ground, GND) е маса и тој треба да се заземји на референтно ниво 0V.

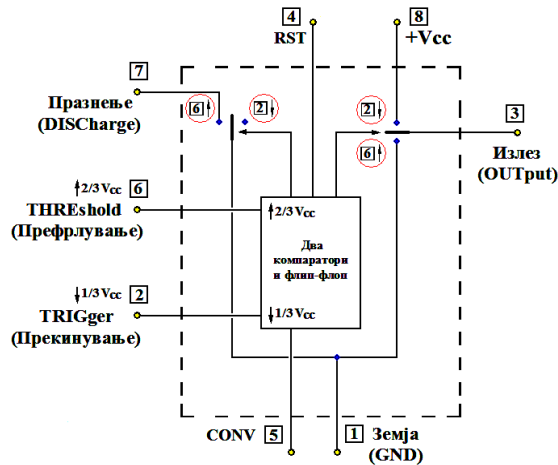


Слика 8.8: Блок-шема на ИК 555

За да може полесно да се разбере принципот на работа на импулсните кола реализирани со ИК 555, накратко ќе го презентираме функционирањето на ова временско интегрирано коло. За таа цел ќе ги разгледаме блок-шемата (слика 8.8), поедноставената функционална шема (слика 8.9) и таблица на функционирање (табела 8.1) на ИК 555 со кои прегледно и во најкуси црти се опишува однесувањето на именуваното ИК.

Имајќи ја предвид конфигурацијата на шемата од слика 8.8, се забележува дека ИК 555 ги содржи следниве пет функционално различни целини кои се внатрешно меѓусебно поврзани:

- 1) Отпорнички напонски делител кој е составен од три еднакви отпорници R.
- 2) Два напонски компаратори од кои првиот е неинвертирачки (K_1), додека вториот е инвертирачки (K_2). И двата компаратори имаат бесконечно голема влезна отпорност, така што може да се смета дека низ нивните влезни приклучоци не тече струја;
- 3) Бистабилно коло, односно SR флип-флоп со дополнителен влез за директно ресетирање R_d ;
- 4) Транзистор за празнење (T) од NPN тип;
- 5) Инвертирачки степен за приспособување (B) (бафер, англ. buffer inverter) кој на излезот од колото обезбедува ниско референтно ниво ($0V$) или високо напонско ниво на напојување ($+U_{CC}$) со максимална излезна струја од $80mA$ или од $200mA$, што зависи од технологијата на производство: CMOS или TTL.



Слика 8.9. Поедноставена функционална шема

Табела 8.1: Поедноставена функционална табела на ИК 555

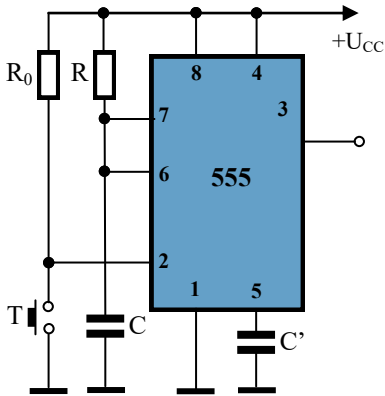
Влезови		Излези	
TRIG пин [2]	THRE пин [6]	DISC пин [7]	OUT пин [3]
$\downarrow \frac{1}{3} U_{CC}$	X	Во прекин (откачен)	Високо ниво $+U_{CC}$
X	$\uparrow \frac{2}{3} U_{CC}$	Кусо врзан на маса	Ниско ниво $0V$.
$> \frac{1}{3} U_{CC}$	$< \frac{2}{3} U_{CC}$	Нема промена на состојбата	

Од сликите и таблицата може да се заклучи дека:

- Ако напонот на пинот [2] падне под нивото од една третина од приклученото напојување, пинот [7] не влече струја, додека пинот [3] оди на високо ниво на напојувањето;
- Ако напонот на пинот [6] добие вредност поголема од две третини од напојувањето, пинот [7] внатрешно кусо се спојува на заземјување $0V$, а тоа истото се случува и со пинот [3] на кој исто така се добива ниско ниво од $0V$.

Кај ИК 555 преку пинот [4] е предвиден дополнителен влез за ресетирање (RST) кој има доминантна улога врз излезниот напон на пин [3]. Имено, ако потенцијалот на пинот [4] падне под $0,4 V$, на излезот од колото (пин [3]) веднаш се добива ниско ниво без оглед на состојбата на влезовите на пиновите [6] и [2]. Бидејќи при нормална работа во пракса однесувањето на колото се контролира токму преку овие два влеза (пин [6] и пин [2]), за да се елиминира влијанието на пинот [4] тој се поврзува на високо ниво, и тоа најчесто на напојувањето $+U_{CC}$ со пинот [8]. На влезниот пин [5] за контролен напон CONV (Control Voltage - пин [5]) производителот препорачува приклучување на кондензатор со капацитет од $10nF$ кон заземјувањето (пин [1]) со што се добива постабилна работа на ИК 555.

Поврзувањето на ИК 555 како моностабилно коло е наједноставната и многу често користена конфигурација. За нејзино формирање, покрај самото интегрирано коло, потребни се само уште два надворешни елементи. Станува збор за кондензаторот C и отпорникот R кои се поврзуваат според принципиелната електрична шема прикажана на слика 8.10.



Слика 8.10: Пин дијаграм на моностабилен мултивибратор со ИК 555

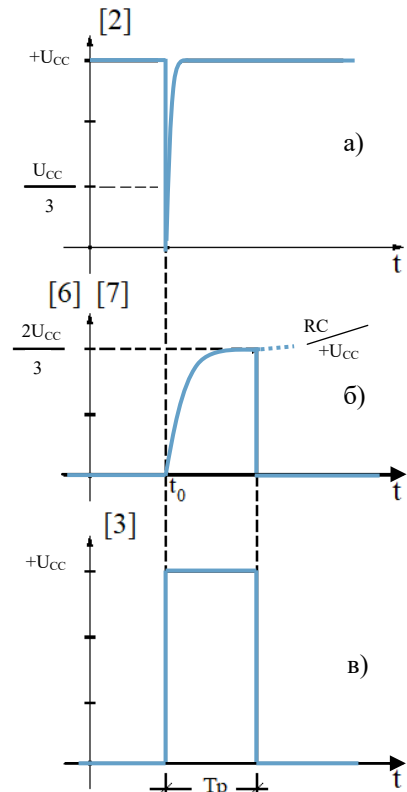
За таа цел меѓу пинот [2] и напојувањето е поврзан отпорникот R_0 од $10\text{k}\Omega$ и тастерот T кон заземјувањето.

Заради дополнително појаснување на работата на моностабилното коло ќе ги користиме и брановите облици на напоните во карактеристичните точки кои се прикажани на слика 8.9 и тоа на пинот [2] каде се носи побудниот импулс (слика 8.11 а), на кондензаторот кај кусата врска меѓу пиновите [6] и [7] (слика 8.11 б) и на излезот од колото на пинот [3] (слика 8.11 в).

Колото се наоѓа во стабилна состојба долго време, сè до моментот t_0 . Во овој период тастерот T е слободен поради што пинот [2] (прекинувачкиот влез на компараторот K_2) преку отпорникот R_0 се наоѓа на високо ниво $+U_{CC}$ колку што е напојувањето.

Бидејќи временскиот интервал до моментот t_0 е многу долг, може да се смета дека низ кондензаторот C не тече струја ($i_C=0$) и дека тој е празен, па затоа потенцијалот на пинот [6] е низок ($V_{[6]}=0\text{V}$).

За полесно разбирање на работата на моностабилниот мултивибратор ќе биде анализиран пин дијаграмот прикажан на слика 8.10. Од сликата се забележува дека кога кондензаторот C ќе се полни, напонот на неговите краеве ќе расте и преку пинот [6] тој ќе управува со однесувањето на првиот компаратор K_1 , кој ќе реагира кога ќе биде достигнато нивото $2/3 \times U_{CC}$. Од друга страна, вториот компаратор K_2 се контролира со надворешен опаѓачки импулс под нивото $1/3 \times U_{CC}$, доведен на пинот [2].



Слика 8.11: Временски дијаграми на напони во карактеристични точки

Истовремено и излезното напонско ниво на пинот [3] е исто така ниско ($V_{[3]}=0V$).

Во моментот t_0 тастерот се притиска многу кус временски период што предизвикува моментално опаѓање на напонското ниво на пинот [2] до нула, т.е. појава на прекинувачки импулс под $1/3 \times U_{CC}$ на влезот од вториот компаратор K_2 .

За нејзиното времетраење, кондензаторот C ќе се полни од напојувањето $+U_{CC}$ преку отпорникот R и неговиот напон присутен на пиновите [6] и [7] експоненцијално расте. Од друга страна, ниското напонско ниво на комплементарниот излез преку инвертирачкиот степен предизвикува на излезот OUT (пин [3]) веднаш да се добие високо ниво $+U_{CC}$, со што почнува да се генерира позитивен правоаголен импулс.

Полнењето на кондензаторот C предизвикува пораст на напонот на неговите краеве, а со тоа и на потенцијалот на пинот [6], кој се носи на прекинувачкиот влез од првиот компаратор K_1 . Кога овој напон ќе го достигне нивото $2/3 \times U_{CC}$, компараторот K_1 реагира и го ресетира флип-флопот, со што на неговиот комплементарен излез предизвикува појава на високо ниво. Ова високо ниво го проведува и заситува транзисторот T' , кој со голема струја речиси моментално го празни кондензаторот C бидејќи е директно приклучен помеѓу колекторот на транзисторот и маса. Имено, на заземјувањето е приклучен и емитерот на транзисторот, па во колото за празнење нема отпорник. Поради ова, напонот на краевите на кондензаторот веднаш паѓа на $U_{ces}=0,2V \gg 0V$, додека преку бафер – инверторот на излезот од ИК 555 (пин [3]) се добива ниско ниво. Со ова завршува квазистабилната состојба на моностабилното коло и тоа се враќа во својата почетна стабилна состојба кога излезот на пинот [3] беше низок, а кондензаторот C празен.

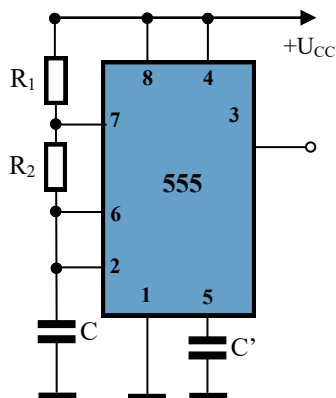
Интервалот T_p е потребното време за полнење на кондензаторот C од почетното ниво $0V$ до нивото $2/3 \times U_{CC}$ преку отпорникот R , со тенденција да го достигне крајното ниво на напонот на напојување од $+U_{CC}$. Во овој период се генерира излезниот правоаголен импулс. Наведените податоци можат да се внесат во познатата равенка за одредување на временски период Δt меѓу две нивоа на зададена експоненцијална функција. Во неа ќе треба Δt да се замени со T_p , крајното ниво $u_C(\infty)$ ќе изнесува $+U_{CC}$, почетното ниво $U_1=0V$, достигнатото ниво $U_2=2/3 \times U_{CC}$, а временската константа $\tau_p=RC$ бидејќи кондензаторот C се полни со струја која протекува низ отпорникот R . Според ова, за одредување на времетраењето на импулсот се добива:

$$T_p = \tau \cdot \ln \frac{|U_{CC} - 0|}{|U_{CC} - \frac{2U_{CC}}{3}|} = RC \cdot \ln \frac{U_{CC}}{\frac{U_{CC}}{3}} = RC \cdot \ln 3 \approx 1.1RC$$

Од претходната анализа произлегува дека во моностабилен режим на работа, времетраењето T_p на генерираниот излезен импулс е определено само од вредностите на надворешните елементи, отпорникот R и временскиот кондензатор C и не зависи од напојувањето $+U_{CC}$. Евентуалната промена на напонот на напојување НЕ влијае врз времетраењата на квазистабилните состојби, поточно временската должина/ширина на излезните импулси.

8.7 Астабилен мултивибратор со ИК 555

Интегрираното коло 555 функционира како астабилно коло ако на него се поврзат два отпорници и еден кондензатор според принципиелната шема дадена на слика. 8.12.

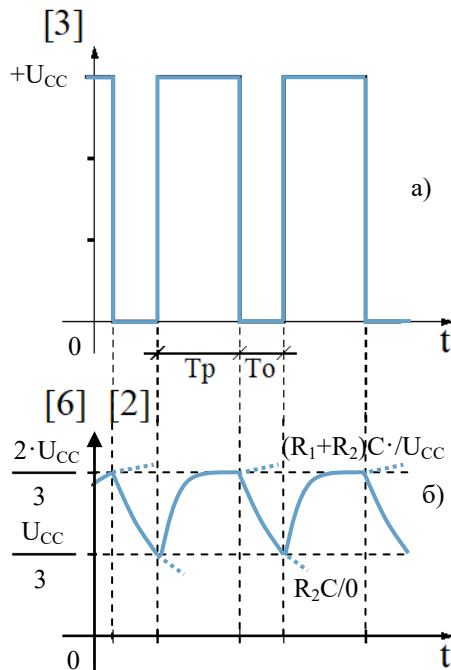


Слика 8.12: Пин дијаграм на астабилен мултивибратор со ИК 555

Покрај оваа шема, за анализата на принципот на работа на колото ќе помогнат и временските дијаграми на напоните во карактеристичните точки, презентирани на слика 8.13 и тоа на излезот од колото на пинот [3] (слика 8.13 а) и на кондензаторот С на кусата врска меѓу пиновите [6] и [2] (слика 8.13 б).

Прикажаното поврзување овозможува со напонот на кондензаторот да се детерминира однесувањето и на првиот и на вториот компаратор. Имено, кога кондензаторот С ќе се полни од напојувањето $+U_{CC}$ (пин [8]), неговиот напон присутен на пинот [6] ќе влијае врз работата на првиот компаратор K_1 , кој ќе реагира на нивото од $2/3 \times U_{CC}$. Бидејќи пиновите [6] и [2] се кусо споени, напонот на кондензаторот С е присутен и на пинот [2].

Тој напон ќе дејствува и врз однесувањето на вториот компаратор така што кога неговата вредност ќе падне под нивото $1/3 \times U_{CC}$, ќе се активира K_2 .



Слика 8.13: Временски дијаграми на напони во карактеристични точки на астабилен мултивибратор со ИК 555

Опаѓањето на напонот се случува кога кондензаторот C се празни со помош на транзисторот T' преку изводот (DISC) на пин [7].

Состојбата на флип-флопот во моментот на вклучување на напојувањето ќе биде случајна. Ако претпоставиме дека флип-флопот е сетиран, тогаш неговиот комплементарен излез \bar{Q} се наоѓа на ниско ниво, па на излезот (пин [3]) кој се инвертира преку излезниот бафер ќе се добие високо ниво ($+U_{CC}$), со што се генерира правоаголен позитивен импулс. Ниското ниво на комплементарниот излез Q истовремено е присутно и на базата на транзисторот T' и го држи закочен. Поради тоа кондензаторот C се полни одреден временски интервал T_P од напојувањето $+U_{CC}$ преку отпорниците R_1 и R_2 .

Напонот $u_c(t)$ има растечки експоненцијален бранов облик кој се стреми кон вредноста $+U_{CC}$. Меѓутоа, крајната вредност $+U_{CC}$ нема да биде достигната бидејќи во моментот кога ќе биде преминато нивото $2/3 \times U_{CC}$ преку пинот [6] ќе биде побуден првиот компаратор K_1 и процесот на полнење ќе биде прекинат. Имено, флип-флопот ќе се ресетира, неговиот комплементарен излез ќе се префрли на високо ниво, со што, од една страна се вклучува и се заситува транзисторот за празнење T' , а од друга, преку бафер-инверторот на излезот од ИК 555 на пинот [3] се добива ниско ниво ($0V$). Заситениот транзистор T' преку отпорникот R_2 го празни кондензаторот C , чиј напон почнува да се намалува, тргнувајќи од нивото $2/3 \times U_{CC}$ до кое само што се наполнил. Сега напонот на кондензаторот ќе има опаѓачки експоненцијален облик, што значи дека ќе се празни одредено време (T_0) за кое на излезот се генерира пауза. Процесот на празнење трае сè до оној момент кога напонот на кондензаторот C не падне под нивото $1/3 \times U_{CC}$.

Во тој момент преку пинот [2] се активира вториот компаратор K_2 кој го сетира флип-флопот и го враќа колото во претходната квазистабилна состојба во која излезното ниво на ИК 555 е високо, а кондензаторот се полни.

Од изложеното станува јасно дека реагирањето на едниот, па на другиот компаратор постојано ќе се повторува, а со тоа на излезот наизменично ќе се појавува високо и ниско ниво што соодветствува на периодична низа на правоаголни импулси. Кога се работи за одредување на траењето на импулсот T_P и паузата T_0 , треба да се примени познатата равенка за одредување временска разлика Δt .

T_P е времето за кое кондензаторот C се полни од нивото $1/3 \times U_{CC}$ ($V_1 = 1/3 \times U_{CC}$) до нивото $2/3 \times U_{CC}$ ($V_2 = 2/3 \times U_{CC}$), стремијќи се кон напојувањето $+U_{CC}$ која е крајната вредност $u_c(\infty)$ на експоненцијалната функција. Временската константа изнесува $\tau_P = (R_1 + R_2)C$ бидејќи кондензаторот C се полни со струја која тече низ сериската врска на отпорниците R_1 и R_2 . Заменувајќи ги наведените вредности во равенката за интервалот на импулсот $\Delta t = T_P$ се добива:

$$T_P = \tau \cdot \ln \frac{\left| U_{CC} - \frac{U_{CC}}{3} \right|}{\left| U_{CC} - \frac{2U_{CC}}{3} \right|} = (R_1 + R_2)C \cdot \ln \frac{\left| \frac{2U_{CC}}{3} \right|}{\left| \frac{U_{CC}}{3} \right|}$$

односно,

$$T_P = (R_1 + R_2) \cdot C \cdot \ln 2 \approx 0.7(R_1 + R_2) \cdot C$$

Времетраењето на паузата T_0 ќе биде пресметано со примена на истата равенка за Δt , но во овој случај кондензаторот C ќе се празни. Напонот на неговите краеве ќе опаѓа од $2/3 \times U_{CC}$ ($V_1 = 2/3 \times U_{CC}$), до $1/3 \times U_{CC}$ ($V_2 = 1/3 \times U_{CC}$), стремејќи се кон крајното ниво од $0V$ ($u_0(\infty) = 0$). Овој кондензатор, преку отпорникот R_2 и кусата врска помеѓу пин [7] и пин [1], која ја формира спојот колектор-емитер на заситениот транзистор за празнење T' , е споен на маса и има тенденција целосно да се испразни. Во овој случај, временската константа ќе биде $\tau_0 = R_2 C$. Со замена на претходните вредности во равенката каде што $\Delta t = T_0$ е времетраењето на паузата, се добива:

$$T_0 = \tau \cdot \ln \left| \frac{0 - \frac{2U_{CC}}{3}}{0 - \frac{U_{CC}}{3}} \right| = R_2 C \cdot \ln 2 \approx 0,7 R_2 C$$

Добиените формули покажуваат дека временските циклуси на полнење и празнење на кондензаторот имаат меѓусебно различно времетраење. Како резултат на тоа, на излезот се генерира низа на правоаголни импулси, чие високо ниво трае подолг временски период од траењето на ниското ниво, т.е. важи $T_p > T_0$.

Периодата (T) на правоаголниот периодичен напон ќе биде збир на времетраењата на импулсот и паузата (T_p и T_0):

$$T = T_p + T_0 = \ln 2(R_1 + 2R_2)C \approx 0,7(R_1 + 2R_2)C$$

Равенките покажуваат дека времетраењето на импулсот и паузата, а со тоа и на периодата на генерираниот правоаголен напон зависи само од вредностите на надворешно приклучените елементи на ИК 555 и тоа од двата отпорници R_1 , R_2 и од кондензаторот C , а не зависи од вредноста на напојувањето.

Знаејќи ја периодата лесно може да се определи и фреквенцијата f на излезниот правоаголен периодичен напон според познатата формула:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\ln 2(R_1 + 2R_2)C} \approx \frac{1,44}{(R_1 + 2R_2)C}$$



Резиме - мултивибратори

ЗАПОМНИ!

- Моностабилните мултивибратори се електронски склопови, кои се користат за генерирање на правоаголен импулс со одредено времетраење.
- Астабилните мултивибратори се временски електронски кола кои на својот излез даваат правоаголен периодичен напонски сигнал, така што тие во основа претставуваат осцилатори на правоаголни импулси.
- Интегрираното временско коло 555 се користи за реализација на моностабилни и астабилни мултивибратори.
- Времетраењето на генерираниот излезен импулс кај моностабилниот мултивибратор е определено само од вредностите на надворешните елементи.

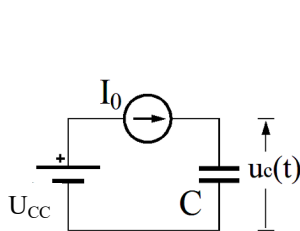
8.8 Генератор на пилест напон со ИК 555

Универзалното временско интегрирано коло 555 може да се користи и за добивање на напон со линеарна форма. За таа цел се користи кондензатор C кој, наместо преку отпорник R , се полни преку идеален извор на константна струја I_0 .

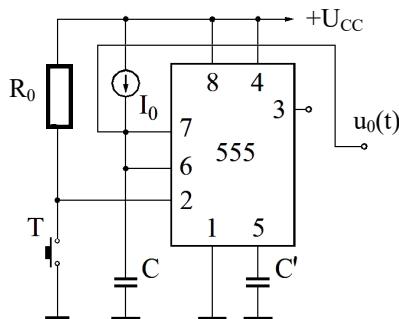
Во овој случај, напонот на кондензаторот U_C ќе биде растечки со тек на времето t и тоа со линеарен (пилест) облик според следнава равенка:

$$u_c(t) = \frac{I_0}{C} \cdot t = K \cdot t \quad \text{каде} \quad K = \frac{I_0}{C}$$

На слика 8.14 е прикажана шемата за идеален струен генератор без ИК 555, додека на слика 8.15 е прикажан исто така случај со идеален струен генератор, но со примена на ИК 555.



Слика 8.14: Идеален струен генератор



Слика 8.15: Генератор на пилест напон со ИК 555

Во принцип, од слика 8.15, се гледа дека за ваквата намена се користи веќе познатата конфигурација на ИК 555 поврзано како моностабилно коло, само што сега отпорникот R , поврзан од напојувањето $+U_{CC}$ на пиновите [6] и [7] кои се заемно споени во иста точка, се заменува со извор на константна струја I_0 .

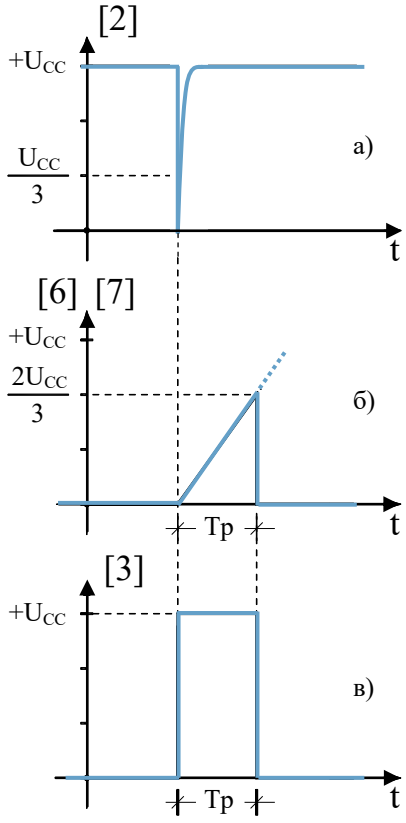
Изворот I_0 го полни кондензаторот C којшто е поврзан на истите тие пинови и на „маса“ според електричната шема дадена на слика 8.14.

На слика 8.16 последователно се прикажани временските дијаграми на напоните во карактеристичните точки на оваа идеална конфигурација на пилест генератор. Побудниот напонски импулс кој се доведува на пинот [2] е даден на слика 8.16 а), додека брановиот облик на пилестиот импулс генериран на пиновите [6] со [7] е прикажан на слика 8.16 б).

Од сликите се забележува начинот според кој се генерира пилестиот напон на кондензаторот C . Имено, кога тастерот НЕ е притиснат, пинот [2] се наоѓа на високо ниво на напојување, додека пинот [7] е внатрешно кусо споен на „маса“, па така кондензаторот C е празен и напонот на неговите краеве е $0V$.

Со притискање на тастерот на пинот [2] тој напон моментално паѓа на $0V$, а со тоа јасно и под $1/3xU_{CC}$, со што се исклучува пинот [7] и поради тоа не влече струја.

Како последица на тоа константната струја на изворот I_0 почнува да тече и да го полни кондензаторот C што предизвикува линеарно менување на напонот на неговите краеве $u_c(t)$ според дадената равенка.



Слика 8.16: Временски дијаграми во карактеристични точки на генераторот на пилест напон со ИК 555

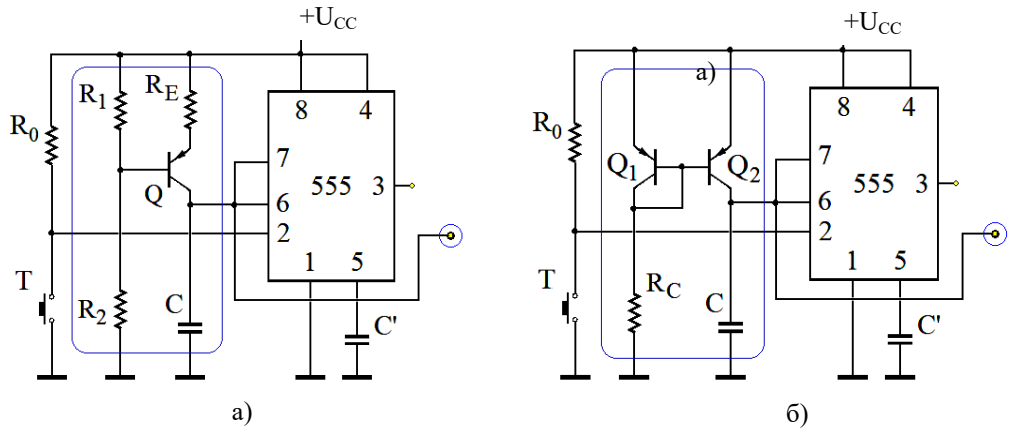
Бидејќи влезниот пин [6] реагира на вредност од $\frac{2}{3} \cdot U_{CC}$ кога неговиот напон расте, тоа е всушност максимална амплитуда која може да ја достигне пилестиот импулс.

Во врска со кажаното, максималното време на траење на пилестиот импулс T_{PM} се пресметува според истата равенка, кога за вредноста на напонот на кондензаторот се постави ниво од $\frac{2}{3} \cdot U_{CC}$. Со оваа замена во равенката и со нејзино решавање по T_{PM} како непозната се добива дека:

$$T_{PM} = \frac{2}{3} \frac{C \cdot U_{CC}}{I_0}$$

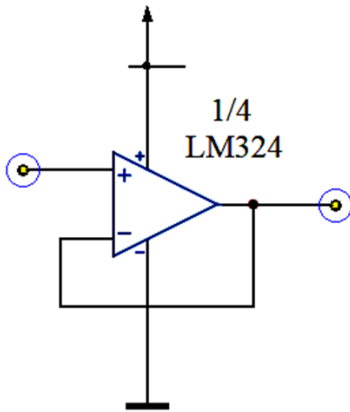
Имајќи го предвид овој временски период, не треба да се дозволи да биде надминат бидејќи тогаш би дошло до ограничување на пилестиот сигнал на $\frac{2}{3} \cdot U_{CC}$ и со тоа генерирање на трапезоиден, наместо пилест импулс. Поконкретно, напонот на пинот [2] ќе треба повторно да падне на нула пред истекот на периодот T_{PM} . На слика 8.16 в) е прикажан и единечниот напонски импулс на излезниот пин [3] кој има исто времетраење како и пилестиот кој се добива на пиновите [6] со [7], но во оваа примена на 555-ката, овој правоаголен импулс е неважен.

Идеалниот струен генератор означен со I_0 на слика 8.15 во практика се реализира со транзисторско коло според слика 8.17-а) и слика 8.17-б), чија што колекторска струја I_C има константна јачина и го полни кондензаторот C .



Слика 8.17: Реализација на струен генератор со транзисторско коло

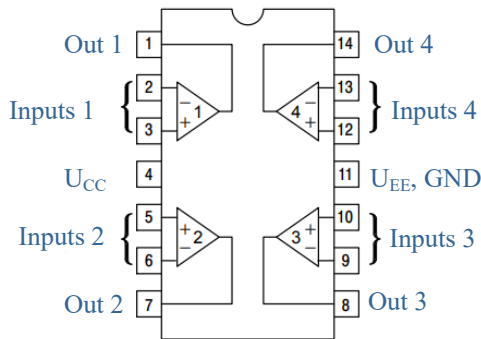
И во двете слики може да се земе дека напонот U_{BE} е константен ($U_{BE} \approx 0,7V$) и воедно да се занемари базната струја $I_B \approx 0$ така што колекторската струја е приближно иста со емитерската $I_C \approx I_E$ и двете струи се со константна вредност. Сепак, струјното огледало од слика 8.17 б) дава подобри резултати бидејќи, се компензираат промените на напонот база-емитер заради температурните промени, а со тоа и дополнително се стабилизира колекторската струја ако дојде до нив, што не може да се каже за решението од слика 8.17 а).



Слика 8.18: Напонски следител - бафер реализиран со LM324

Вообичаено напонот на кондензаторот не оди директно на потрошувачот, туку преку напонски следител, познат како бафер, со единечно напонско засилување изведен со операциски засилувач (слика 8.18). Овој баферски степен го раздвојува потрошувачот од транзисторското коло и кондензаторот C и со својата беконечно голема влезна отпорност не ги оптеретува, а од друга страна, заради својата мала излезна отпорност може да обезбеди поголема излезна струја за потрошувачот.

На слика 8.19 е даден пин дијаграмот на колото LM 324.



Слика 8.19: Пин дијаграм на LM324

Пин бр.	Функција на пинот
1	Излез од првиот компаратор
2	Инвертирачки влез на првиот компаратор
3	Неинвертирачки влез на првиот компаратор
4	Напон за напојување 5V
5	Неинвертирачки влез на вториот компаратор
6	Инвертирачки влез на вториот компаратор
7	Излез од вториот компаратор
8	Излез од третиот компаратор
9	Инвертирачки влез на третиот компаратор
10	Неинвертирачки влез на третиот компаратор
11	Заземјување
12	Неинвертирачки влез на четвртиот компаратор
13	Инвертирачки влез на четвртиот компаратор
14	Излез од четвртиот компаратор



I Прашања со заокружување (заокружи го точниот одговор)

1. Кај кои кола излезниот сигнал е функција од моменталното ниво на влезните сигнали и од претходната состојба на излезниот сигнал?
 - а) Комбинациски кола
 - б) Насочувачки кола
 - в) Регенеративни кола.
2. Која состојба на мултивибраторите е нестабилна и со многу кусо времетраење?
 - а) Стабилна
 - б) Квазистабилна
 - в) Нестабилна.
3. Астабилните мултивибратори се карактеризираат со:
 - а) две квазистабилни состојби
 - б) две стабилни состојби
 - в) една квазистабилна и една стабилна состојба.
4. Каква повратна врска се користи кај мултивибраторите?
 - а) Позитивна
 - б) Негативна
 - в) Не се користи повратна врска.
5. Моностабилните мултивибратори се користат за генерирање на правоаголен импулс со:
 - а) бесконечно времетраење
 - б) одредено времетраење
 - в) не генерираат правоаголни импулси.
6. Од вредноста на кои елементи зависи времетраењето на импулсот, односно паузата кај ИК 555?
 - а) Надворешно приклучените елементи
 - б) Внатрешната структура
 - в) Има константна вредност независно од приклучените елементи.

II Прашања со дополнување

7. Квазистабилната состојба кај мултивибраторите всушност е стационарна состојба со _____ (неограничено долго/конечно) времетраење.
8. Временските електронски кола, кои на својот излез даваат правоаголен периодичен напонски сигнал, така што тие во основа претставуваат осцилатори на правоаголни импулси, се нарекуваат _____.
9. Интегрираното коло _____ се користи за генерирање на правоаголни напонски импулси со различно времетраење.

Прашања за утврдување на знаењата од МЕ 8

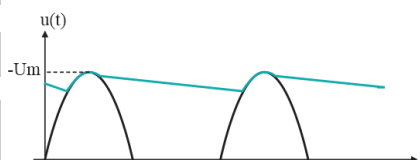
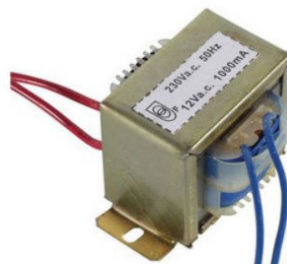
1. Што е карактеристично за регенеративните кола - мултивибраторите? Дали кај нив постои повратна врска и, ако ја има, од каков тип е? Образложи!
2. Од што зависи состојбата на колото, т.е. нивото на излезниот напон кај мултивибраторите?
3. Во кои состојби може да се најде регенеративното коло?
4. Каква може да биде стационарната состојба.
5. Колкаво е времетраењето на стабилната состојба?
6. Колкаво е времетраењето на квазистабилната состојба?
7. Во каква состојба се наоѓа мултивибраторот кога тој преминува од една во друга стационарна состојба? Колкаво е нејзиното времетраење?
8. Што се случува во динамичката состојба кај мултивибраторите? Како во неа се однесуваат прекинувачките елементи?
9. Што е најкарактеристично за бистабилните мултивибратори?
10. Што е најкарактеристично за моностабилните мултивибратори?
11. Што е најкарактеристично за астабилните мултивибратори?
12. Со кои елементи се реализираат регенеративните импулсни кола?
13. Каков напон се генерира на излезот од моностабилниот мултивибратор?
14. Каде може да се употребува моностабилниот мултивибратор?
15. Објасни го однесувањето на моностабилниот мултивибратор изведен со идеален ОПЗ според слика 8.1 претпоставувајќи дека тој се наоѓа во стабилна состојба и дека на него дејствува импулс кој предизвикува активирање на регенеративниот процес.
16. Нацртај ги временските дијаграми во карактеристичните точки на моностабилниот и астабилниот мултивибратор реализиран со идеален ОПЗ.
17. Каде може да најде примена астабилниот мултивибратор?
18. Објасни ја промената на квазистабилните состојби кај астабилно коло изведено со идеален ОПЗ претпоставувајќи дека во почетниот момент неговиот излез се наоѓа на (а) високо (б) ниско ниво.
19. За астабилниот мултивибратор реализиран со идеален ОПЗ изведи го времетраењето на импулсите T_{P1} , T_{P2} , а потоа и на периодот $T=T_{P1}+T_{P2}$ и фреквенцијата $f=1/T$ на генерираниот правоаголен периодичен напон.
20. Нацртај го пин дијаграмот на временското ИК 555.
23. Објасни го однесувањето на генераторот на пилест импулс со ИК 555, претпоставувајќи дека потенцијалот на пинот [2] е еднаков со напојувањето $+U_{cc}$ сè до моментот кога тој потенцијал, за бесконечно краток временски период, моментално паѓа од $+U_{cc}$ на $0 V$.
24. Нацртај ги временските дијаграми во карактеристичните точки на пилестиот генератор реализиран со ИК 555, поточно на пиновите [2] и [6] со [7].

Модуларна единица

9. Извори за напојување

Со изучување на содржините од оваа модуларна единица ученикот ќе стекне основни знаења за извори за напојување и ќе може:

- да објаснува принцип на работа на извор за напојување;
- да наведува карактеристики на мрежен напон;
- да образложува потреба од филтер и стабилизатор;
- да разликува видови филтри и стабилизатори;
- да дискутира принцип на работа на полубранов насочувач и целобранов насочувач;
- да дискутира принцип на работа на стабилизатор со Зенер диода, транзистор и интегрирани стабилизатори;
- да реализира практични вежби за воспоставување и испитување извор за напојување;
- да опишува постапки за испитување функционалност на извор за напојување.



Регистар на ознаки и поими:

- $u(t)$ - моменталната вредност на наизменичниот напон
- U_m - максималната вредност на наизменичниот напон
- U_{eff} - ефективната вредност на наизменичниот напон
- ω - кружната фреквенција на наизменичниот напон
- f - фреквенцијата на наизменичниот напон
- U_P - напон на примарната страна на трансформаторот (примарен напон)
- U_S - напон на секундарната страна на трансформаторот (секундарен напон)
- U_r - фактор на брановитост
- U_{NS} - нестабилизиран напон
- U_S - стабилизиран напон
- U_Z - Зенеров напон

Серија на интегриран стабилизатор **78XX** Излезен еднонасочен напон

- | | |
|--------|--------|
| • 7805 | • 5V |
| • 7806 | • 6V |
| • 7808 | • 8V |
| • 7885 | • 8,5V |
| • 7809 | • 9V |
| • 7810 | • 10V |
| • 7812 | • 12V |
| • 7815 | • 15V |
| • 7818 | • 18V |
| • 7824 | • 24V |

Серија на интегриран стабилизатор **79XX** Излезен еднонасочен напон

- | | |
|--------|---------|
| • 7905 | • -5V |
| • 7906 | • -6V |
| • 7908 | • -8V |
| • 7985 | • -8,5V |
| • 7909 | • -9V |
| • 7910 | • -10V |
| • 7912 | • -12V |
| • 7915 | • -15V |
| • 7918 | • -18V |
| • 7924 | • -24V |

Ознаки за излезна струја кај интегрираните стабилизатори на напон:

- L за $I < 0,1A$
- без ознака за $I < 1A$
- S за $I < 5A$

9.1 Блок-шема на извор за напојување



Насочувачи се преобразувачи на напон кои служат за добивање еднонасочен напон од наизменичен. Насочувачите може да бидат полубранови и целобранови. Полубрановиот насочувач се изведува со една полупроводничка диода.

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:

- батерии и акумулатори;
- преобразувачи на напон.

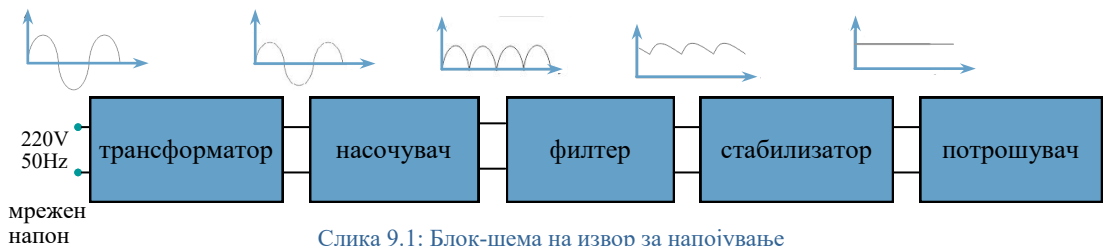
Напојување од батерии или акумулатори се користи најмногу за преносни уреди и за уреди за кои не се дозволува никаков прекин на напојувањето.

Преобразувачите на напон пред сè служат за добивање еднонасочни напони од наизменичниот напон на електричната мрежа (т.н. насочувачи). Во поново време сè повеќе се користат преобразувачи со прекинувачки режим на работа (SMPS – Switch Mode Power Supply) бидејќи имаат мали димензии, мала тежина и висок степен на полезно дејство.

Во овој модул ќе се задржиме на изворите за напојување базирани врз насочувачи.

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 изнесува 220V - 240V.

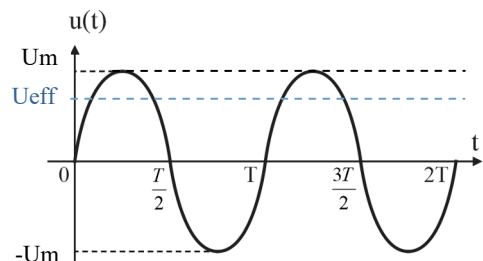
На слика 9.1 е дадена блок-шема на еден комплексен уред за напојување од мрежа со наизменичен напон со примена на мрежен трансформатор. Со овој уред се извршуваат следните основни функции: промена на мрежниот напон со трансформатор, насочување, филтрирање и стабилизација на напонот со кој се напојува потрошувачот.



Слика 9.1: Блок-шема на извор за напојување

Мрежниот напон е наизменичен напон со синусен бранов облик (слика 9.2):

$$u(t) = U_m \sin(\omega t) = \sqrt{2}U_{eff} \sin(\omega t)$$



Слика 9.2: Бранов облик на мрежен напон

каде:

- $u(t)$ е моменталната вредност на наизменичниот напон,
- U_m е максималната вредност, односно амплитуда на наизменичниот напон,
- U_{eff} е ефективната вредност на наизменичниот напон,
- ω е означена кружната фреквенција (аголна брзина) на наизменичниот напон ($\omega=2\pi f$) (rad/s),
- f е фреквенцијата на наизменичниот напон (Hz).

На сликата 9.2, на брановиот облик на мрежниот напон, со T е обележана периодата, која се дефинира како временски интервал за кој наизменичниот напон прави една полна промена и се мери во секунди ($T=1/f$).

Ефективната вредност на мрежниот наизменичен напон се дефинира како вредност на еднонасочниот напон која во електрично коло, на исто место и за исто време, развива топлотна енергија - Цулови загуби како и наизменичниот напон.

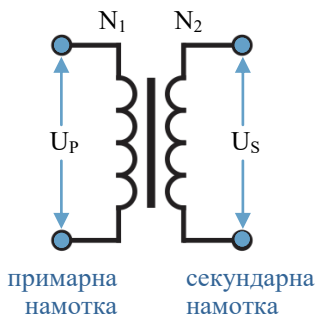
Во пракса, најчесто под наизменична вредност се подразбира ефективната вредност.

$$U_{eff} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707U_m$$

Инструментите за мерење на наизменични напони ја мерат неговата ефективната вредност!

Ефективната вредност на наизменичниот напон на градска мрежа во Европа, се движи во граници 220-240V, со фреквенцијата од 50Hz, додека максималната вредност во граници 311-339V. Номиналната вредност на напонот изнесува 230V со дозволено отстапување од +10% (23V) и -15% (-35V).

Електричните уреди користат помали напони од вредноста на мрежниот напон. За таа цел се користи трансформатор кој го трансформира мрежниот напон во друга сакана вредност, притоа не менувајќи ја фреквенцијата на сигналот. Трансформатор е електричен уред кој се состои од две (или повеќе) намотки, една примарна и една секундарна намотка која може да биде со повеќе изводи (слика 9.3). Мрежниот трансформатор, покрај приспособување на мрежниот напон на еднонасочна вредност потребна на потрошувачот, галвански го одвојува еднонасочниот излезен напон од мрежниот, односно галванско одвојување меѓу уредот кој се напојува и мрежата. Влезниот напон U_P се доведува на примарната намотка (со N_1 навивки) на трансформаторот додека излезниот напон U_S се добива на секундарната намотка (со N_2 навивки).



Слика 9.3: Графички симбол на трансформатор

Излезниот (секундарниот) напон U_S на трансформаторот може да се претстави со релацијата:

$$U_S = \frac{N_2}{N_1} U_P \quad \text{каде односот: } n = \frac{N_2}{N_1} \text{ се нарекува}$$

преносен однос на трансформаторот n .

За односот на струите на секундарната и примарната намотка на трансформаторот важи релацијата:

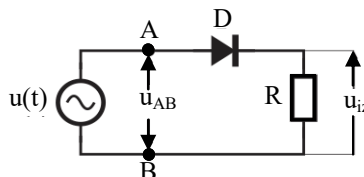
$$\frac{I_P}{I_S} = \frac{N_1}{N_2}$$

9.2 Полубранов насочувач



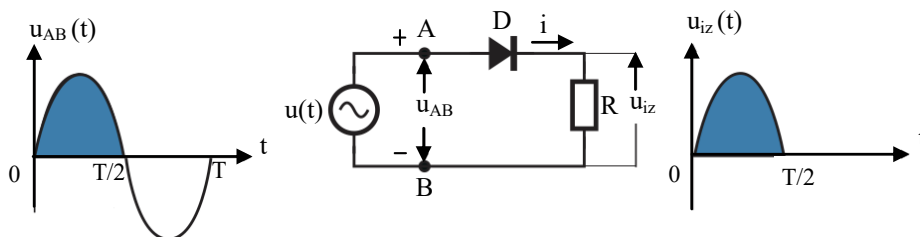
Основна карактеристика на диодата е да ја пропушта електричната струја само во една насока од анодата кон катодата. Во спротивна насока низ диодата тече инверзна струја многукратно помала од струјата во спроводна насока.

Наједноставно насочувачко коло е полубрановиот насочувач. Тој е составен од една диода приклучена во серија со потрошувачот во колото претставен со отпорност R (слика 9.4). Напон во точките A и B (u_{AB}) е напонот добиен од наизменичниот извор на напон $u(t)$. Колото ќе се анализира за време на позитивна и негативна полупериода на наизменичниот напон u_{AB} .



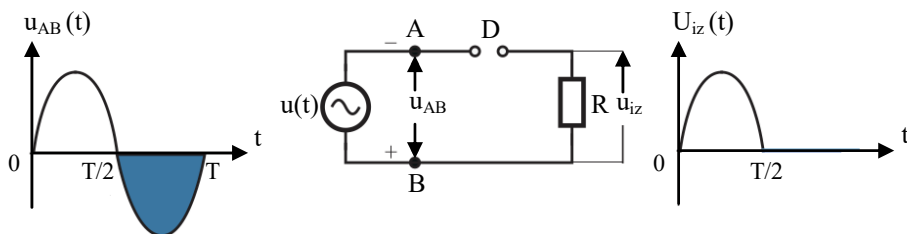
Слика 9.4: Полубранов насочувач со диода

За време на позитивната полупериода на влезниот напон $u(t)$, точката A ќе биде на повисок потенцијал од точката B . Диодата ќе биде директно поларизирана. Тргувајќи од претпоставка дека диодата е идеална, што значи дека при директна поларизација нејзината отпорност е нула (затворен прекинувач) и нема пад на напон на нејзините краеве, ќе тече струја низ неа во насока од точката A кон точката B . Таа е истовремено и струја низ потрошувачот со насока означена на слика 9.5. Како резултат се добива излезен напон кој има ист облик со влезниот напон.



Слика 9.5: Полубранов насочувач со диода за време на позитивна полупериода

За време на негативната полупериода на влезниот напон $u(t)$, точката B ќе биде на повисок потенцијал од точката A . Диодата ќе биде инверзно поларизирана. При инверзна поларизација на диодата нејзината отпорност е бесконечно голема и не тече струја низ неа (отворен прекинувач). Со тоа не тече и струја низ потрошувачот (слика 9.6).



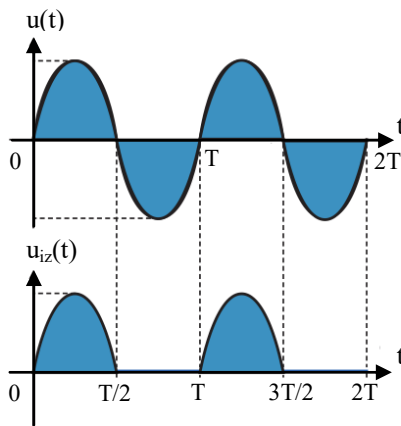
Слика 9.6: Полубранов насочувач со диода за време на негативна полупериода



Спроведи ја истата анализа на колото во случај кога диодата е спротивно приклучена!

Бидејќи струјата низ потрошувачот тече само за време од една полупериода, овој насочувач е наречен полубранов насочувач. Напонот на потрошувачот е еднонасочен но со големи промени од една до друга полупериода. Ваков променлив еднонасочен напон во пракса не е применлив. Оваа промена може да се намали со поврзување на кондензатор паралелно на потрошувачот, односно филтер за кој ќе стане збор во понатамошниот текст.

На слика 9.7 се прикажани брановите облици на влезниот напон $u(t)$ и излезниот напон $u_{iz}(t)$ на полубранов насочувач за време од две периоди.



Слика 9.7: Бранови облици на напоните кај полубранов насочувач

Струјата i има иста бранова форма со излезниот напон u_{iz} . За времето на негативната полупериода, точката А е на понизок потенцијал од точката В (слика 9.6), 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:

$$I_{SR} = \frac{I_m}{\pi} = 0,32 \cdot I_m$$

каде I_m е амплитуда на струјата, а еднонасочниот напон според:

$$U_{IZ} = \frac{U_m}{\pi}$$

а U_m е амплитуда на наизменичниот секундарен напон.

Максималниот инверзен напон на диодите е двојно поголем од амплитудата на секундарниот напон на трансформаторот, што го прави неповолен за примена.

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 U_r** (*ripple factor*) (во литературата се среќава и ознаката γ) што претставува мерка за квалитетот на уредот за напојување. За добар насочувач, факторот на брановитост треба да биде што е можно помал.

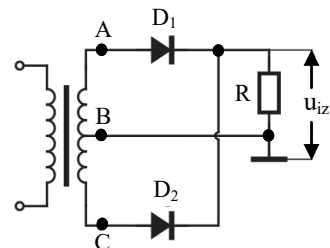
Полубрановиот насочувач има **фактор на брановитост 1,21** и мала средна струја што го прави насочувач од пониска класа. Средната струја, како еднонасочна компонента, го магнетизира јадрото на трансформаторот и го носи во заситување со што се зголемуваат загубите во железото.

9.3 Целобранов насочувач

Целобрановиот насочувач има подобри карактеристики од полубрановиот насочувач. Може да се изведе во две варијанти: со 2 насочувачки диоди и со 4 насочувачки диоди меѓусебно поврзани во конфигурација на мост, познат како Грецов спој.

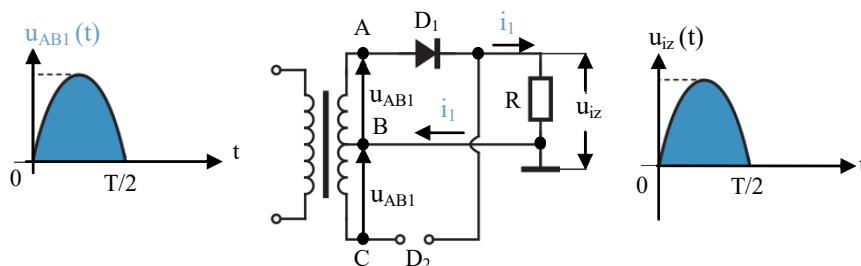
На слика 9.8 е дадена шема на целобранов насочувач со две диоди, кој работи како два полубранови насочувачи во противфаза и напојуваат ист потрошувач.

Насочувачот е составен од трансформаторот со среден извод на секундарната навивка, односно со два секундари и две диоди D_1 и D_2 . Напоните на секундарите на трансформаторот u_{AB} и u_{BC} имаат иста амплитуда но спротивна фаза. Анодите на диодите се приклучени на краевите на секундарната навивка на трансформаторот. Катодите на диодите се поврзани на едниот крај на потрошувачот R , а другиот крај на потрошувачот е приклучен на средниот извод на секундарната навивка.



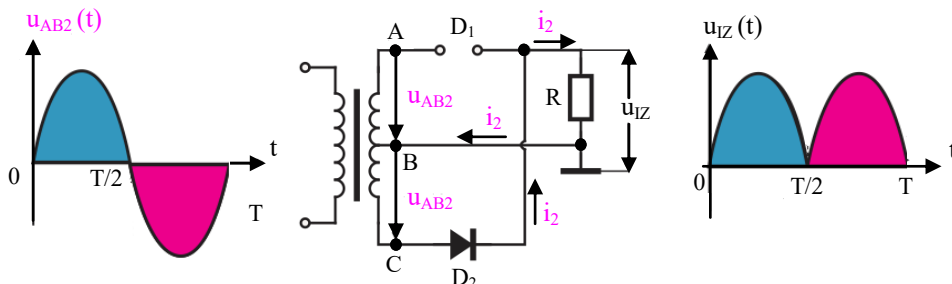
Слика 9.8: Целобранов насочувач со две диоди

За време на позитивната полупериода на напонот u_{AB1} , диодата D_1 е директно поларизирана и тече струја i_1 низ потрошувачот R во насока од точката A кон точката B (слика 9.9). Во исто време, напонот u_{BC} е негативен, диодата D_2 е инверзно поларизирана и не тече струја низ неа (на сликата е претставена како отворено коло).



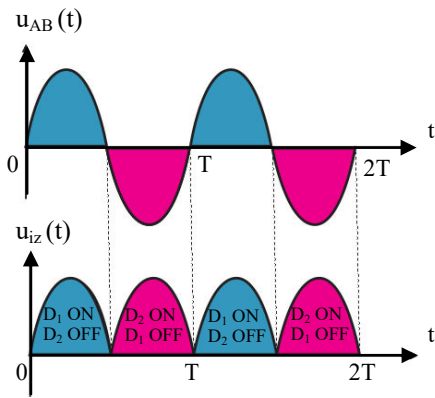
Слика 9.9: Целобранов насочувач со две диоди за време на позитивната полупериода

За време на негативната полупериода на напонот u_{AB2} , диодата D_2 е директно поларизирана и тече струја i_2 низ потрошувачот R во насока од точката C кон точката B (слика 9.10). Во исто време, напонот u_{AB2} инверзно ја поларизира диодата D_2 и не тече струја низ неа (на сликата е претставена како отворено коло).



Слика 9.10: Целобранов насочувач со две диоди за време на негативната полупериода

Струјата низ потрошувачот ќе тече во иста насока за време на двете полупериоди на влезниот напон. Затоа овој насочувач се нарекува целобранов насочувач.



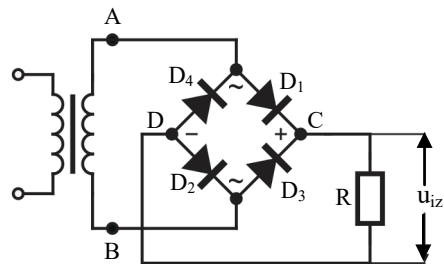
Слика 9.11: Бранови облици на напоните кај целобранов насочувач со две диоди

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.

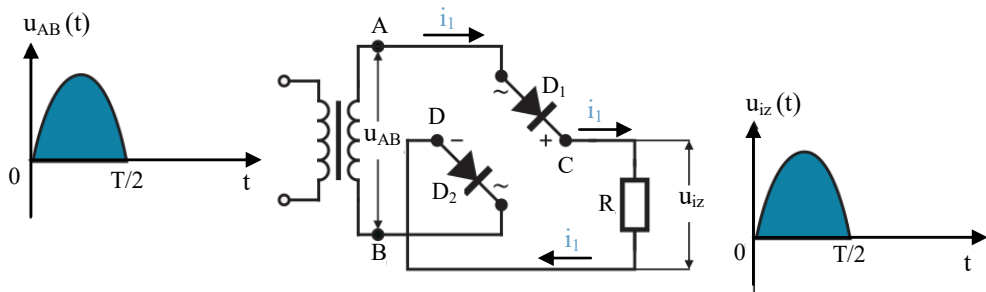
Недостаток на оваа шема е употребата на трансформатор со среден извод кој е поскап од трансформаторот со еден секундар. Изведбата на целобранов насочувач во мостна конфигурација го надминува овој недостаток. Шемата на целобранов насочувач во мостна конфигурација е составена од трансформатор со еден секундар и четири диоди врзани во мост - **Грецов спој** (слика 9.12).

За правилна работа на насочувачот мора да се внимава на начинот на поврзување на диодите. На едната дијагонала на мостот е приклучен наизменичниот напон u_{AB} од секундарот на трансформаторот, а во другата дијагонала потрошувачот R .

За време на позитивната полупериода на напонот u_{AB} , точката A е на повисок потенцијал од точката C , па диодите D_1 и D_2 се директно поларизирани и протекува струја низ потрошувачот R во насока од точката A , низ C , низ точката D кон точката B (слика 9.13). Во исто време, диодите D_3 и D_4 се инверзно поларизирани и не тече струја низ нив (на сликата се претставени како отворено коло).

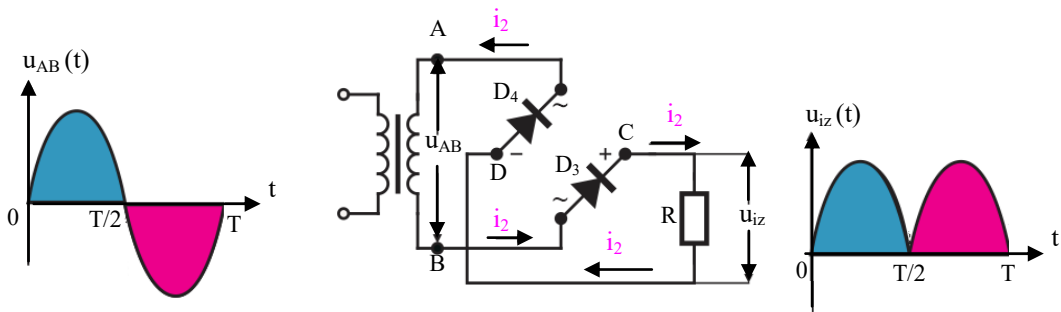


Слика 9.12: Целобранов насочувач со четири диоди



Слика 9.13: Целобранов насочувач со четири диоди за време на позитивната полупериода

За време на негативната полупериода на напонот u_{AB} , точката C е на повисок потенцијал од точката A, па диодите D_1 и D_2 се инверзно поларизирани и низ нив нема да тече струја. Во овој случај, диодите D_3 и D_4 се директно поларизирани и низ потрошувачот R тече струја i_2 во насока од точката B, низ C, низ точката D кон точката A (слика 9.14).



Слика 9.14: Целобранов насочувач со четири диоди за време на негативната полупериода

Брановите облици на напонот u_{AB} и излезниот напон u_{iz} за време од две периоди на целобрановиот насочувач со четири диоди се исти со брановите облици на напоните кај насочувач со две диоди кои се прикажани на слика 9.11.

Вкупната струја, во времетраење на една периода на наизменичниот напон, претставува збир на струите кои протекуваат низ потрошувачот за време на позитивната i_1 и негативната полупериода i_2 :

$$i = i_1 + i_2$$

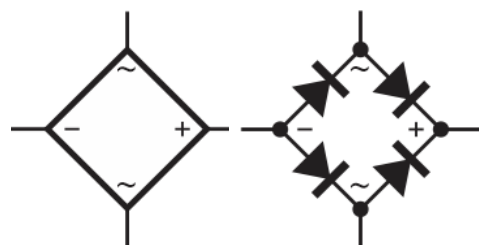
а за нејзината средна вредност се добива:

$$I_{SR} = \frac{2I_m}{\pi} = 0,64I_m$$

Добиената струја е два пати поголема од средната струја на полубрановиот насочувач, што значи и подобар фактор на брановитост, кој изнесува 0,48.

Друга предност на Грецовиот спој во однос на целобрановиот насочувач со две диоди, е двојно намалување на максималниот инверзен напон на диодите кој е еднаков на максималната вредност на напонот на секундарот на трансформаторот и е со ист бранов облик со примарниот напон на трансформаторот.

Мостната конфигурација на диодите, позната како Грецов спој, 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 (слика 9.15). Се означуваат на два начина:



Слика 9.15: Симбол на Грецов спој

$VXCY$ И $VXCY/Y_1$, каде X е број кој ја означува ефективната вредност која може да се приклучи на "~" изводите, Y број кој ја означува максималната еднонасочна струја низ Грецовиот спој без ладилник изразена во mA а Y_1 со ладилник.

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.



Резиме - Полубранов и целобранов насочувач

- 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 фактор 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.
- 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.

Провери го своето знаење!



I Прашања со заокружување (заокружи ги точните одговори)

1. Кој од наведените насочувачи има најширока примена поради најдобри карактеристики?
- а) Полубранов насочувач
 - б) Целобранов насочувач со две диоди
 - в) Грецов спој.

II Прашања со поврзување

2. Поврзи ги редоследно степените од блок-шемата на извор за напојување:

- | | | | |
|----|------------|-------|------------------|
| 1. | I-степен | _____ | а) стабилизатор |
| 2. | II-степен | _____ | б) трансформатор |
| 3. | III-степен | _____ | в) насочувач |
| 4. | IV-степен | _____ | г) филтер |

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 | _____ | |



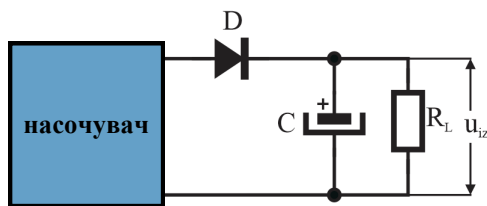
Со приклучување на напон на краевите на кондензатор, тој почнува да се полни до вредноста на напонот на кој е приклучен, со временска константа која се добива како производ на капацитивноста на кондензаторот и отпорноста во колото ($\tau=RC$).

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.

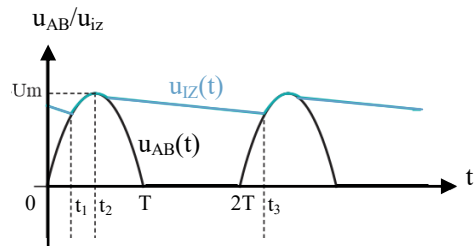
Филтрите за насочувачи се изведуваат со реактивни компоненти: кондензатори и индуктивни калеми. Овие елементи имаат својство да акумулираат енергија, а потоа да ја вратат во колото во соодветен момент.

Најчесто употребуван капацитивен филтер е RC-филтер, претставен со еден кондензатор со голема капацитивност (електролитски кондензатор), приклучен паралелно на отпорот на потрошувачот R_L . Електрична шема на полубранов насочувач со капацитивен филтер е прикажана на слика 9.16.



Слика 9.16: 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 t_1 - t_2 означен на графикот на слика 9.17). Од моментот кога кондензаторот C е наполнет до вредноста на напонот U_m , тој го држи напонот на излезот висок сè 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.



Слика 9.17: Бранови форми на напони кај полубранов насочувач со капацитивен филтер

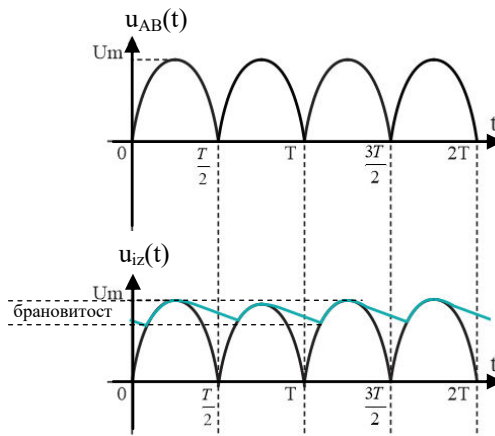
Во тој период, струјата низ оптоварувањето ја дава кондензаторот и тој, поради конечната вредност на отпорноста на R_L , полака се празни. Напонот на кондензаторот полака опаѓа меѓу двата циклуса на полнење (интервал t_2-t_3 означен на графикот). Празнењето оди практично по права линија, а брзината на празнењето е одредена со временската константа τ (која во праксата се избира пет пати поголема од периодата на наизменичниот напон, $R_L C > 5T$, за која напонот опаѓа за 20%):

$$\tau = R_L C$$

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 t_2-t_3 (слика 9.17) е пократок два пати (услов $R_L C > 2,5T$) 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.

На слика 9.18 се прикажани бранови облици на напони кај целобранов насочувач со капацитивен филтер.



Слика 9.18: Бранови форми на напони кај целобранов насочувач со капацитивен филтер

„Проширени знаења“

Еднонасочниот напон на излезот кај полубрановиот насочувач 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:

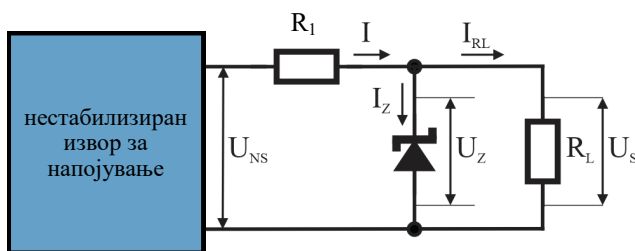
$$U_{iz} = U_m - \frac{1}{4fC} I_L$$

9.5 Стабилизатор со Зенер диода



Зенер диода, како елемент кој во карактеристиката во подрачјето на пробив има особина, има стабилизирачко дејство, на краевите да држи константен напон кој практично не зависи од струјата, се применува во уреди наречени стабилизатори на напон.

Стабилизаторот со Зенер диода е наједноставен стабилизатор на еднонасочен напон. На влез на коло се доведува променлив напон од нестабилизирани извор за напојување U_{NS} додека на неговиот излез се добива стабилизирани напон U_S (слика 9.19).



Слика 9.19: Стабилизатор на напон со Зенер диода

Стабилизаторот на напон, изведен со отпорникот R_1 и Зенер диода, обезбедува стабилизирани напон U_S на потрошувачот кој е претставен со отпорноста R_L . Нестабилниот напон U_{NS} треба да биде поголем од напонот на стабилизација на Зенер диодата U_Z , најповолно е двојно поголема вредност со што би се обезбедила инверзна поларизација на Зенер диодата. Отпорникот R_1 служи за ограничување на максималната струја која може да протече низ Зенер диодата. Потрошувачот е паралелно поврзан со Зенер диодата, па напонот на неговите краеве е еднаков со напонот на Зенер диодата.

Напонот се стабилизира на следниот начин: со зголемување на влезната струја I за ΔI :

$$I_1 = I + \Delta I$$

бидејќи напонот на потрошувачот е еднаков со напонот на Зенер диодата, кој скоро и не се менува, нема да дојде до промена на струјата низ потрошувачот I_{RL} притоа целата промена на струјата ΔI ќе протече низ Зенер диодата:

$$I_{Z1} = I_1 - I_{RL} = I + \Delta I - I_{RL} = (I - I_{RL}) + \Delta I = I_Z + \Delta I$$

Бидејќи Зенер диодата е инверзно поларизирана во подрачјето на пробив, промените на струјата не предизвикуваат промена на напонот U_Z , кој е еднаков со напонот на потрошувачот.

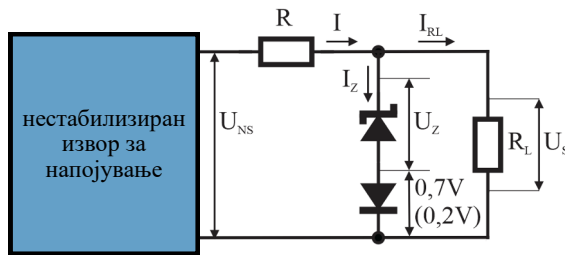
Функцијата на стабилизаторот е да го одржува излезниот напон стабилен, односно што помалку зависен од промените на работните услови како што се промена на влезниот напон или отпорноста на потрошувачот. При промена на влезниот напон, се менува падот на напонот на отпорникот R , а со тоа и струјата низ него, па анализата се сведува на претходно опишаната постапка, промените ги следи струјата I_Z а струјата низ потрошувачот останува константна. Напонот на потрошувачот е диктиран од напонот на Зенер диодата.

При проектирањето на стабилизаторот треба да се обезбеди струјата низ Зенер диодата да се движи во граници $I_{Zmin}-I_{Zmax}$, каде I_{Zmin} е минимална струја одредена со коленото на карактеристиката на диодата, а I_{Zmax} е максималната струја одредена со максималната дозволена дисипација на моќност. Обезбедување на границите на струјата низ Зенер диодата се постигнува со отпорникот R_1 . Зенеровиот напон U_Z се одржува на краевите на Зенер диодата кога струјата се наоѓа во овие граници.

Големината на отпорноста на отпорникот R_1 се пресметува според изразот:

$$R_1 = \frac{U_{NS} - U_Z}{I_Z + I_{RL}}$$

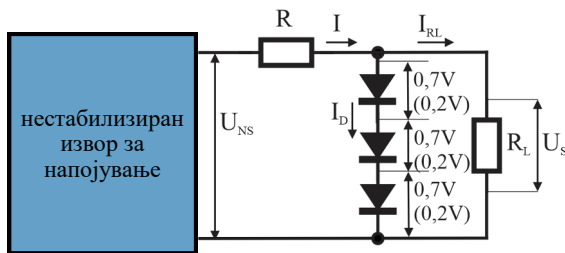
Ако е потребен стабилизирани напон поголем од вредноста на зенеровиот напон, сервиски со Зенер диодата се поврзува обична насочувачка диода (слика 9.20). Ако диодата е силициумска, излезниот напон ќе биде поголем за $0,7V$ од зенеровиот напон, а во случај на германиумска диода, за $0,2V$. До додавање на повеќе диоди може да се постигне саканата вредност на стабилизирани напон.



Слика 9.20: Стабилизатор на напон со Зенер диода и насочувачка диода

За добивање многу мали стабилизирани напони, може да се користат насочувачки диоди наместо соодветната Зенер диода (слика 9.21).

Треба да се воочи дека поврзувањето на насочувачките диоди е спротивно од поврзувањето на Зенер диодата.

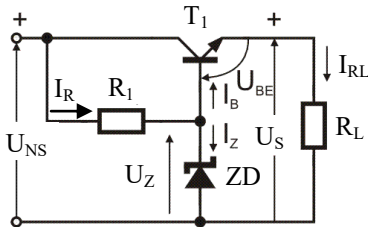


Слика 9.21: Стабилизатор на напон со насочувачки диоди

Зенер диодите сè помалку се користат за стабилизација на напон од причина што имаат големи загуби, останува само примената во стабилизатори кај кои струјата на потрошувачот е мала (до $10mA$). Потиснати се од интегрираните стабилизатори кои се поквалитетни и се со пониска цена.

9.6 Стабилизатор со транзистор

Ограничувањето на струјата кај стабилизаторот со Зенер диода може да се избегне со примена на активен елемент – транзистор, во серија со потрошувачот. Колото на еден таков стабилизатор е дадено на слика 9.21.



Слика 9.21: Сериски стабилизатор на напон со транзистор

Со Зенер диодата се обезбедува стабилизирани напон на базата на транзисторот T_1 . Услов Зенер диодата да работи во подрачје на пробив и кај овој стабилизатор, е нестабилизираниот напон U_{NS} да биде поголем од зенеровиот напон U_Z ($U_{NS} > U_Z$).

Разликата на нестабилизираниот напон и напонот на Зенер диодата претставува пад на напон на отпорникот R_1 , низ кој тече струја:

$$I_R = \frac{U_{NS} - U_Z}{R_1}$$

Падот на напонот на отпорникот R_1 инверзно го поларизира спојот база-колектор, со што обезбедува транзисторот да работи во нормално активно подрачје.

Според Првиот Кирхофов закон, за струите важи релацијата:

$$I_R = I_B + I_Z$$

За емитерската струја, која всушност е и струја низ потрошувачот, кога транзисторот се наоѓа во нормално активно подрачје важи релацијата:

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

За излезниот стабилизирани напон се добива:

$$U_S = R_L I_{RL} = (1 + \beta)I_B R_L$$

Работата на серискиот стабилизатор со транзистор во голема мерка е сличен со работата на стабилизаторот со Зенер диода. Добра стабилност се постигнува доколку напоните U_Z и U_{BE} не се менуваат со промени на струите I_Z и I_B .

Од колото за излезниот напон U_S може да се напише:

$$U_S = U_Z - U_{BE}$$

Бидејќи напоните U_Z и U_{BE} се константни, од последниот израз, и за излезниот стабилизирани напон U_S се добива константна вредност.

При промена на нестабилизираниот напон U_{NS} се менува и струјата I_R . Ако не се менува отпорноста на потрошувачот R_L , поради константната вредност на излезниот напон U_S , не се менува и струјата низ потрошувачот I_{RL} , односно емитерската струја, а со неа и базната струја на транзисторот I_B , па промените на струјата I_R ги презема струјата низ Зенер диодата I_Z . Таа промена не предизвикува промена на излезниот стабилизирани напон U_S .

Дејството на стабилизацијата може да се анализира и за промена на отпорот на потрошувачот R_L и за промена на нестабилизираниот напон U_{NS} .

Ако се намали отпорот на потрошувачот R_L , ќе се намали и излезниот напон U_S :

$$U_S = R_L I_{RL}$$

кој ќе предизвика зголемување на напонот U_{BE} , бидејќи напонот на Зенер диодата U_Z е константен.

$$U_{BE} = U_Z - U_S$$

Зголемувањето на напонот U_{BE} ќе предизвика зголемување на базната струја I_B , која ќе предизвика пораст на емитерската струја која всушност е и струја низ потрошувачот.

$$I_E = I_B + I_C = I_{RL}$$

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 емитерската струја и се добива истиот стабилизирани напон како и пред промената.

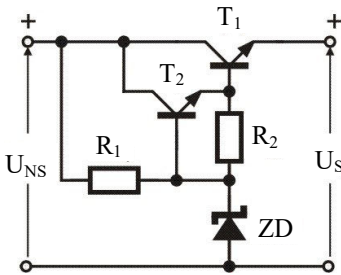
Промените на нестабилизираниот напон U_{NS} , се компензираат со промена на напонот меѓу колекторот и емитерот U_{CE} на транзисторот. Бидејќи:

$$U_S = U_{RL} = U_{NS} - U_{CE}$$

излезниот напон U_{RL} останува непроменет.

Серискиот транзистор T_1 во овој стабилизатор има најтешки работни услови, кога е изложен на максимален напон и при голема струја на потрошувачот, кога има голема дисипација на моќност. Во тој случај се применуваат мерки за дополнително ладење со вградување ладилници на куќиштето на транзисторот.

За стабилизатори со поголема струја на серискиот транзистор се користи еден меѓустепен, со два транзистора во Дарлингтонов спој, како што е прикажано на слика 9.22. Без приклучен потрошувач, тече само струја низ Зенер диодата.



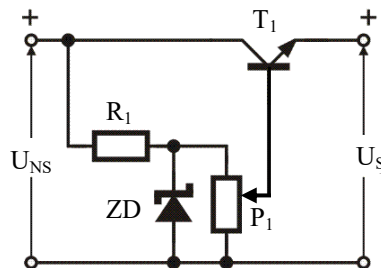
Слика 9.22: Стабилизатор на напон со меѓустепен

Се избира Зенер диода со Зенеров напон поголем за $1,4V$ од потребниот стабилизирани напон U_S .

$$U_S = U_Z - 2 \cdot 0,7 = U_Z - 1,4$$

Се користи за струи поголеми од $100mA$.

Со приклучување потенциометар паралелно на Зенер диодата, како на слика 9.23, може да се добие стабилизирани напон со регулација.



Слика 9.23: Стабилизатор со регулација на излезниот напон

9.7 Интегрирани стабилизатори

Интегрираните стабилизатори може да се класифицираат во четири групи:

- стабилизатори за општа намена;
- напонски стабилизатори со три изводи;
- стабилизатори со регулација на излезниот напон со три и четири изводи и
- импулсни стабилизатори.

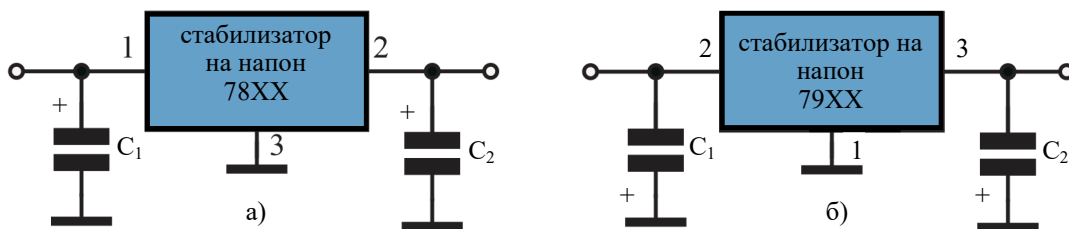
Стабилизаторите за општа намена се составен дел на голем број различни изведби на стабилизатори на напон за напојување. Влезниот напон може да се движи во широк опсег, а со додавање надворешни елементи може да се добие и широк опсег на излезни напони.

Напонските стабилизатори со три изводи генерираат одредена стабилна вредност на напон. Се произведуваат во серија со различни вредности кои најчесто се применуваат.

Кај стабилизатори со регулација на излезниот напон со три и четири изводи излезниот напон се одредува со вредностите на отпорнички делител кој надворешно се додава. Кај серискиот стабилизатор на напон, серискиот елемент (транзисторот) се однесува како променлив отпорник кој ги презема промените на влезниот напон. Зависно од разликата на влезниот и излезниот напон и струјата низ потрошувачот, на серискиот транзистор може да има голема дисипација на моќност. Поради тоа, степенот на искористеност кај сериските стабилизатори е многу мал, најчесто помал од 20%.

Кај импулсните стабилизатори на напон намалена е моќноста на дисипација кај серискиот транзистор, скоро и независен од разликата на влезниот и излезниот напон, притоа се добива степен на искористеност поголем од 75%.

Типичен претставник на интегрираните напонски стабилизатори со три изводи е серијата **78XX** за позитивни, односно **79XX** за негативни вредности на напон кои можат да се оптоварат со струја до 1A. Се пакуваат во куќиште со три изводи, а начинот на нивното поврзување е даден на слика 9.24.



Слика 9.24: Основен спој на стабилизатор на напон а)78XX и б)79XX

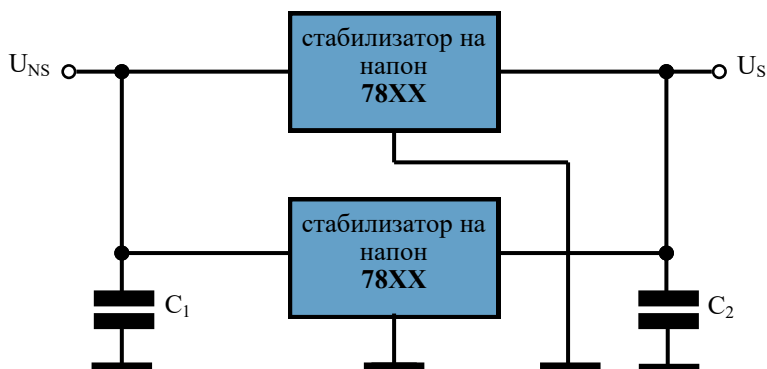
Стабилизаторите имаат вградена заштита од преоптоварување и ограничен максимален дозволен влезен напон до 35V. Потребна е минимална разлика меѓу влезниот нестабилизиран напон и излезниот стабилизирани напон од 1V до 5V. Со замена со бројки на ознаките XX, производителите ја даваат вредноста на стабилизираниот напон.

На слика 9.25 е прикажан интегриран стабилизатор на напон 7805.

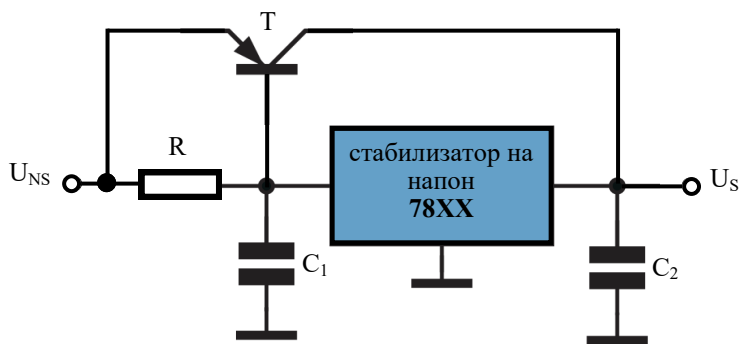


Слика 9.25: Приклучување на интегриран стабилизатор на напон

Се применуваат во еднонасочни извори за напојување. На слика 9.26 е прикажан паралелен спој на два стабилизатора кој обезбедува поголема струја од 1A низ потрошувачот. Ако паралелно се поврзат N стабилизатори, излезната струја ќе биде зголемена N пати.



Слика 9.26: Паралелен спој на два стабилизатора



Слика 9.27: Стабилизатор за поголеми струи

На слика 9.27 е прикажана изведба на интегриран стабилизатор со кој е овозможена поголема струја низ потрошувачот.

Максималната вредност на излезната струја, односно струјата низ потрошувачот, се одредува според релацијата:

$$I_{\max} = h_{fe} \left(I_{reg} - \frac{U_{be}}{R} \right)$$

каде:

I_{reg} е саканата струја на излезот;

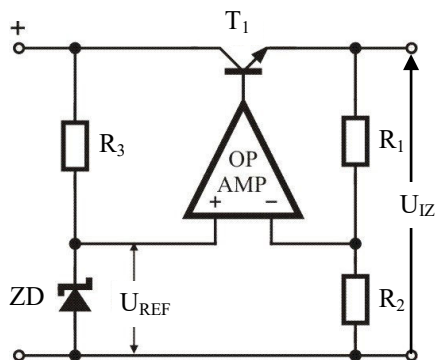
h_{fe} е факторот на струјно засилување на транзисторот;

U_{be} е напонот база-емитер (0,7V).

Регулирањето на излезната струја се врши со отпорникот R.

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 одржува излезниот напон на бараната вредност.

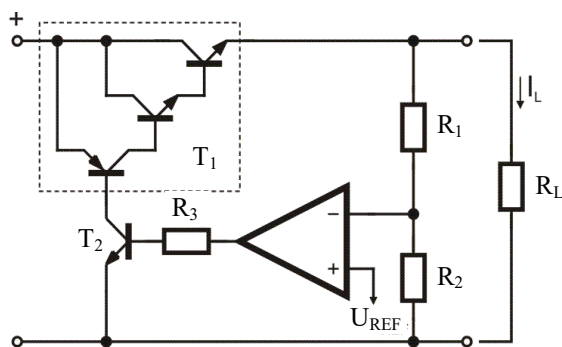
Принципот на примена на операциски засилувачи за стабилизација на напон е прикажан на слика 9.28. Кругот на повратната врска, преку кој се управува со излезниот напон, започнува со напонскиот делител R_1 – R_2 , преку кој дел од излезниот напон се носи на инвертирачкиот влез на напонскиот засилувач на грешка.



Слика 9.28: Стабилизатор на напон со операциски засилувач

Неинвертирачкиот влез е врзан на референтен напон, што значи дека напонскиот засилувач на грешка постојано го нагудува својот излез (струјата низ транзисторот 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 разлика на промените на струјата на оптоварувањето.

Упростена шема на еден интегриран стабилизатор на напон е дадена на слика 9.29.



Слика 9.29: Упростена шема на интегриран стабилизатор на напон

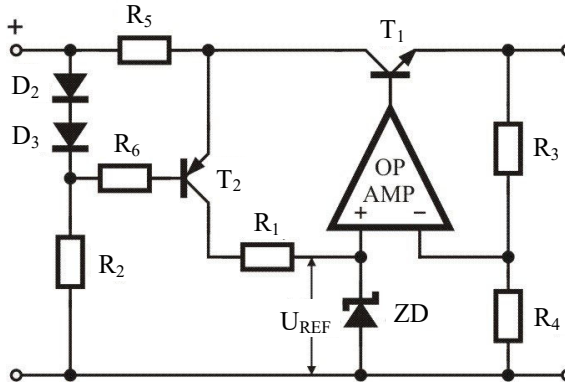
Излезниот напон се контролира со јамка на повратна спрега со одреден степен на компензација, за да се обезбеди стабилност на јамката (да не се јавуваат самоосцилации). Најголем број линеарни стабилизатори имаат вградена електронска компензација и целосно се стабилни без примена на надворешни компоненти. Надворешната компензацијата најчесто се изведува со капацитивност врзана на излезниот крај кон маса.

Со блокот T_1 , е означен серискиот регулатор, составен од еден NPN Дарлингтонов транзистор, побудуван со PNP-транзистор. Струјата на серискиот регулатор, која се добива од емитерот на Дарлингтоновиот транзисторот, се управува со транзисторот T_2 и со напонскиот засилувач на грешка.

Струјата на напонскиот делител R_1 - R_2 е многу помала од струјата на потрошувачот I_{RL} .

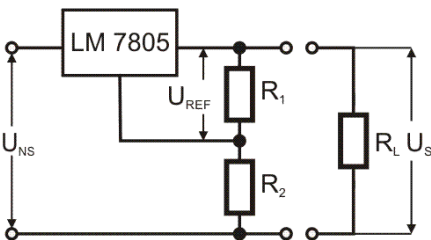
Ако се донесе, од која и да е причина, излезот на стабилизаторот на напон во краток спој, низ серискиот транзистор ќе протече голема струја која може да го оштети транзисторот. Во таков случај, потребно е да се ограничи струјата низ потрошувачот на претходно одредена вредност, која серискиот транзистор ќе може да ја издржи без да се оштети.

На слика 9.30 е прикажана примена на операциски засилувач како стабилизатор на напон, заедно со коло за ограничување на струјата.



Слика 9.30: Интегриран стабилизатор на напон

Со диодите D_2 , D_3 и отпорникот R_2 , се добива константен напон од $1,4V$ за директно поларизирање на базата на транзисторот T_2 . Бидејќи отпорникот R_5 има мала вредност (на пр. $0,7\Omega$ за ограничување од $1A$), а отпорникот R_6 вообичаено има иста вредност со отпорникот R_1 , при мали струи низ R_5 (кои преку транзисторот T_1 течат низ потрошувачот), транзисторот T_2 ќе биде во заситување и ќе го поврзе отпорникот R_1 на приклучокот $+$. Доколку се зголеми струјата низ транзисторот T_1 , таа ќе направи пад на напон на отпорникот R_5 , ќе го намали потенцијалот на емитерот од транзисторот 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 $0,7V$. Притоа транзисторот T_2 не обезбедува струја на Зенер диодата, референтниот напон ќе се намали, а операцискиот засилувач соодветно ќе го намали и излезниот напон. Вредноста на која ќе се задржи излезниот напон ќе биде токму онаа при која струјата низ потрошувачот изнесува $1A$.



Слика 9.31: Стабилизатор на напон со напонски делител

На слика 9.31 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 според:

$$U_S = \frac{U_{REF}(R_1 + R_2)}{R_1}$$

На самиот стабилизатор (на неговиот сериски регулатор) постои одреден пад на напон, одреден како разлика меѓу влезниот нестабилизирани и излезниот стабилизирани напон. Постои минимална вредност на тој пад на напонот, под која регулаторот не може да ја врши функцијата на стабилизација и регулација. Вредноста на минималниот пад на напонот зависи од конфигурацијата на серискиот регулатор во стабилизаторот, па според тоа разликуваме:

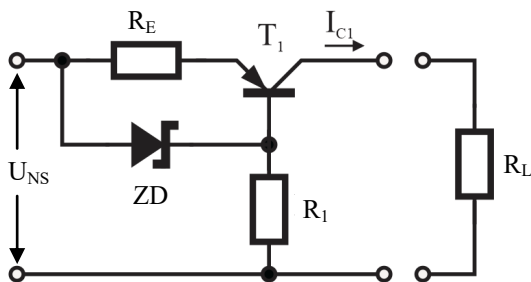
- стандарден стабилизатор (со Дарлингтон транзистор како сериски регулатор)
- стабилизатор со мал пад на напон (со еден PNP-транзистор како сериски регулатор).

За стандардниот стабилизатор, минималниот пад на напонот се движи во граници (2,5- 3)V, што значи дека за стабилизатор за +5V, влезниот напон треба да биде поголем од +7V. 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 потрошувачот. За мали вредности на струјата може да постигне и вредност и до 50mV. Најчесто се користи за батериско напојување.

Струјниот стабилизатор претставува извор на константна струја низ оптоварувањето независно од промената на неговата отпорност. Регулацијата е можна за промена на отпорот на потрошувачот во одредени граници (од 0 до одредена вредност R_{max}).

Едноставно коло на струен стабилизатор е дадено на слика 9.32.



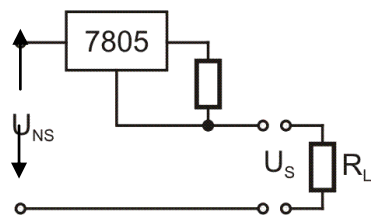
Слика 9.32: Извор на константна струја – коло на струен стабилизатор

Со помош на Зенер диодата и отпорникот во колото на емитерот се одржува струјата константна 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 неговите краеве може да се менува во широк опсег (сè додека транзисторот работи во нормално активно подрачје). Инаку, емитерската струја (и приближно – колекторската) изнесува:

$$I_E = \frac{U_Z - U_{EB}}{R_E} \text{ и не зависи од напонот т.е. отпорот на потрошувачот.}$$

Струјниот генератор функционира коректно сè додека напонот на потрошувачот е помал од разликата $U_{NS} - U_Z$. Овој принцип на стабилизација на струјата широко се користи во интегрираните кола, каде што е потребен струен извор со висока импеданса.

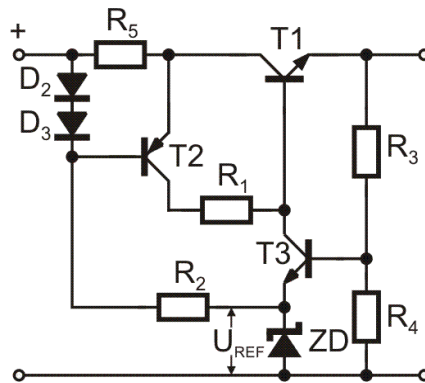
Струен регулатор со примена на интегрирано коло на стабилизатор на напонот е прикажан на слика 9.33. Кај овие регулатори е искористена особината на напонскиот стабилизатор низ заедничкиот приклучок да тече релативно мала и константна струја на поларизација, независно од струјата низ потрошувачот.



Слика 9.33: Струен регулатор со интегриран стабилизатор на напон

“Проширено знаење”

На слика 9.34 е прикажана 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_2 , за овој степен да работи како струен ограничувач. Ако струјата на потрошувачот се зголеми толку за падот на напонот на R_5 да стане поголем од $0,7V$, стартува колото за ограничување. Вредноста на отпорот 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 9.30, со тоа што наместо операциски засилувач се користи транзисторот T_3 .



Слика 9.34: Стабилизатор на напон со ограничување на струјата



Резиме - Капацитивен филтер и стабилизатори

- Со примена на капацитивни филтри се подобрува факторот на брановитост.
- Наједноставен стабилизатор на напон користи Зенер диода, како елемент кој во карактеристиката во подрачјето на пробив има особина на краевите да одржува 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.
- Струен стабилизатор е извор на константна струја која не се менува со промена на потрошувачот.
- 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 да се ограничи струјата на оптоварувањето.



I Прашања со заокружување (заокружи го точниот одговор)

1. На излезот од интегрираниот стабилизатор на напон со ознака 7905 се добива стабилизирани напон со вредност:
 - а) 79V
 - б) 5V
 - в) 7905V.
2. Каков напон се добива на излез од интегрираниот стабилизатор на напон со ознака 78xx?
 - а) Позитивен напон
 - б) Негативен напон
 - в) Наизменичен напон.
3. Како се приклучува електролитскиот кондензатор во однос на потрошувачот во капацитивниот филтер?
 - а) Сериски
 - б) Паралелно
 - в) Не се приклучува електролитски кондензатор.
4. На кој начин се намалува големата дисипација на моќност на серискиот транзистор?
 - а) Со куса врска меѓу емитерот и колекторот
 - б) Со исклучување на транзисторот
 - в) Се вградуваат ладилници на куќиштето на транзисторот.
5. Надворешна компензација за стабилност на стабилизаторот се реализира со:
 - а) кондензатор на излез од колото
 - б) сериска отпорност
 - в) паралелна отпорност.

II Прашања со дополнување

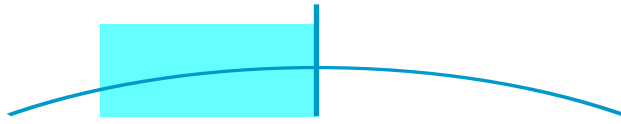
6. За стабилизација на напон се користи инверзно поларизирана Зенер диода во подрачје на _____ (спроведување/пробив).
7. Мрежниот трансформатор во изворите за напојување покрај трансформацијата на напон има и улога на _____ одвојување меѓу уредот кој се напојува и мрежата.
8. Уред за напојување, составен од трансформатор, насочувач и филтер претставува _____.

Прашања за утврдување на знаењата од МЕ 9

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?
10. Кои се составните елементи на нестабилизираниот извор за напојување?
11. Што се случува со излезниот напон и излезната струја кај реалниот извор за напојување?
12. Зошто се користи Зенер диодата во стабилизаторите на напон?
13. Која е предноста на стабилизаторот на напон со транзистор во однос на стабилизаторот на напон со Зенер диода?
14. Кој е недостатокот на стабилизаторот на напон со транзистор кој е надминат со серискиот стабилизатор на напон со повратна врска?
15. Кој стабилизатор се нарекува компензационен стабилизатор на еднонасочен напон?
16. Како се означува фамилијата интегрирани стабилизатори на напон за позитивен, а како за негативен напон?
17. Што означуваат последните две цифри во ознаката?
18. Кој стабилизатор користи Дарлингтонов транзистор како сериски регулатор?
19. Кој стабилизатор користи еден PNP-транзистор за сериски регулатор?
20. Објасни го процесот на стабилизација на струјниот стабилизатор.
21. Каде се користи струјниот стабилизатор?
22. Што се случува ако излезот на стабилизаторот на напон е во краток спој и што треба да се ограничи?
23. Нацртај стабилизатор на напон со коло за ограничување на струјата кој содржи операциски засилувач.
24. 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 примена на насочувачи и врз основа на истражувањето изработи проект.*

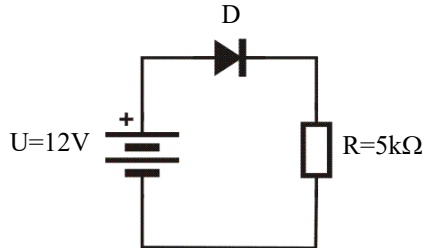


Нумерички задачи



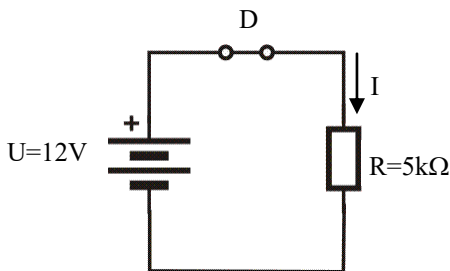
Диодни кола

1. Пресметај ја струјата во диодното коло дадено на сликата, како и падот на напон на диодата и отпорникот земајќи ја диодата како идеална (да се примени модел на диодата како прекинувач).



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:



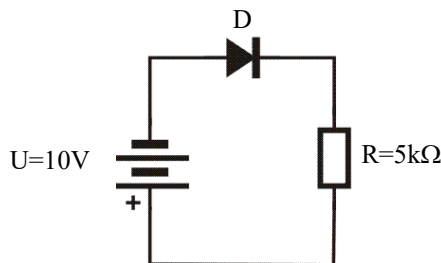
Струјата низ отпорникот, според Омовиот закон, се пресметува со релацијата:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12V}{5k\Omega} = \frac{12}{5 \cdot 10^3} = 2,4mA$$

Поради кусата врска на диодата $U_D=0$, додека напонот на отпорникот се пресметува според:

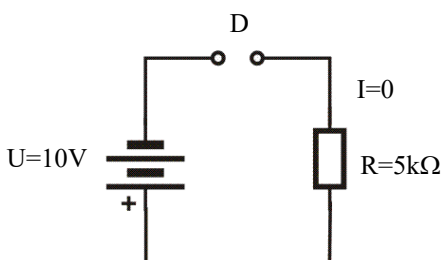
$$U_R = R \cdot I = 5 \cdot 10^3 \cdot 2,4 \cdot 10^{-3} = 12V$$

2. Пресметај ја струјата во диодното коло дадено на сликата, како и падот на напон на диодата и отпорникот земајќи ја диодата како идеална (да се примени модел на диодата како прекинувач).



Решение:

Диодата е инверзно поларизирана, таа се заменува со отворен прекинувач.



Во колото не протекнува струја, $I=0$.

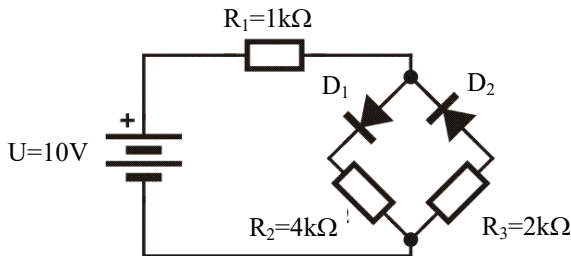
Падот на напонот на отпорникот R е:

$$U_R = R \cdot I = 5 \cdot 10^3 \cdot 0 = 0V$$

За напонот на краевите на диодата се добива:

$$U_D = -U = -10V$$

3. На даденото коло од сликата да се пресметаат струите низ диодите D_1 и D_2 (да се примени модел на диодата како прекинувач).

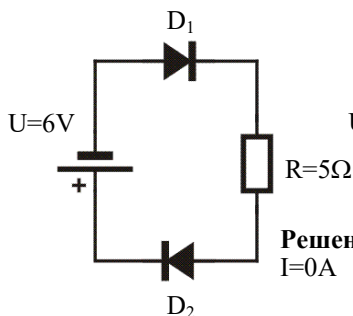


Решение:

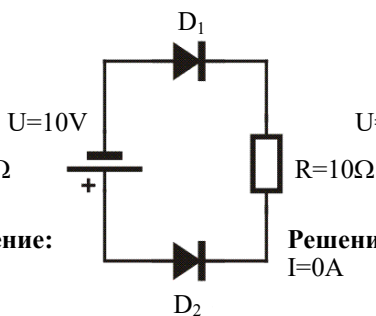
Диодата D_1 -директно поларизирана $I_{D1}=2\text{mA}$.

Диодата D_2 -инверзно поларизирана, $I_{D2}=0\text{A}$.

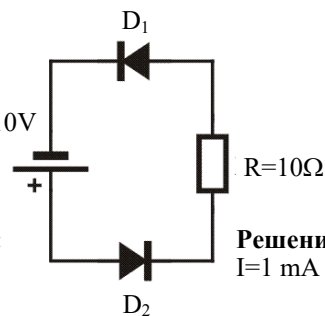
4. Да се пресмета струјата која тече во отпорникот R за секое коло прикажано на сликата, под претпоставка дека диодите D_1 и D_2 се идеални диоди.



Решение:
 $I=0\text{A}$

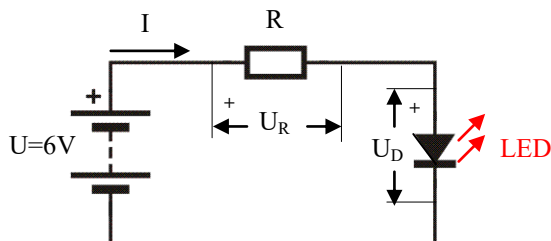


Решение:
 $I=0\text{A}$



Решение:
 $I=1\text{mA}$

5. Да се пресмета вредноста на отпорникот R и моќноста која се развива на него, приклучен сервиски со црвена LED диода на еднонасочен извор на напон од 6V.



Решение:

Според начинот на поврзување на диодата со изворот се заклучува дека таа е директно поларизирана. Каталожки податоци за црвена LED диода се добиваат од табела 2.1: Карактеристики на LED диоди, од каде, при струја од 20mA напонот на спроведување на црвена LED диода изнесува 1,8V.

Падот на напонот на отпорникот се пресметува со следната релација:

$$U - U_D - U_R = 0 \Rightarrow U_R = U - U_D = 6V - 1,8V = 4,2V$$

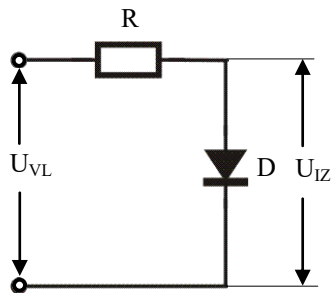
а вредноста на неговиот отпор според изразот:

$$R = \frac{U_R}{I} = \frac{4,2V}{20\text{mA}} = \frac{4,2}{20 \cdot 10^{-3}} = 210\Omega$$

За моќноста на отпорникот се добива:

$$P_R = U_R \cdot I = 4,2V \cdot 20\text{mA} = 84\text{mW}$$

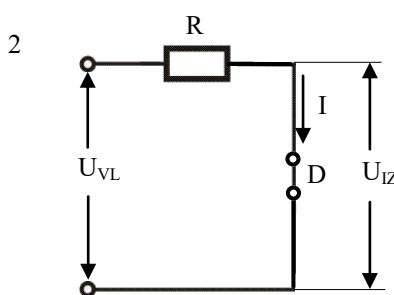
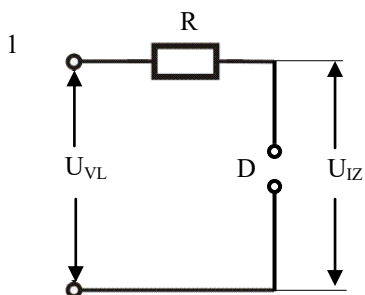
6. За колото од сликата да се нацрта преносната карактеристика.



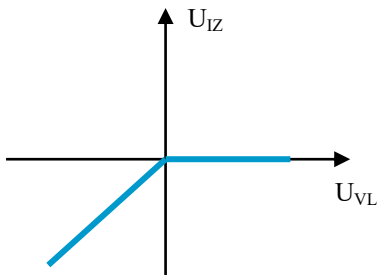
Решение:

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 во колото не протекува струја. ($U_{IZ} = U_{VL}$)

Потоа се анализира колото кога на неговиот влез ќе се доведат позитивни напони ($U_{VL} > 0$). Во тој случај диодата е директно поларизирана, се еквивалентира со затворен прекинувач, при што во колото протекува струја I . ($U_{IZ} = 0$)

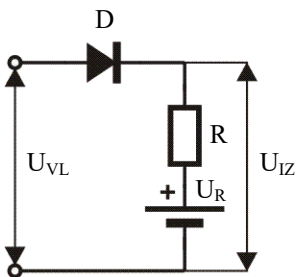


Преносната карактеристика на колото ќе го има следниот облик:

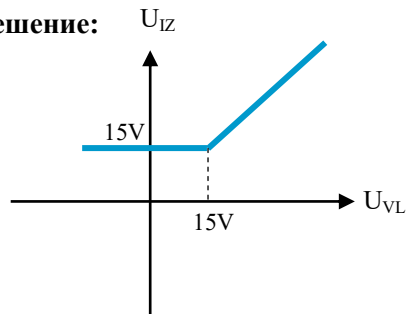


Анализираното коло претставува ограничувач на напон од горе.

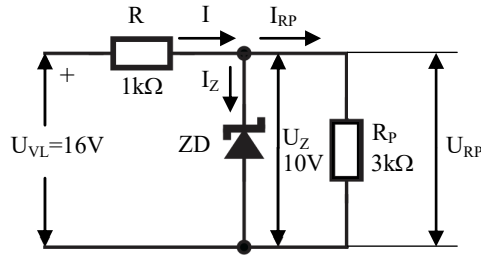
7. За колото од сликата да се нацрта преносната карактеристика ($U_R = 15V$).



Решение:



8. Во колото за стабилизација на напон пресметај го напонот на отпорникот R и потрошувачот R_p, како и струјата I_Z и моќноста P_Z на Зенер диодата.



Решение:

Зенер диодата е инверзно поларизирана и се наоѓа во една од состојбите пробив или неспроводна состојба. Според условите зададени во колото, се пресметува напонот на краевите на диодата.

$$U_{ZD} = U_{VL} \cdot \frac{R_p}{R + R_p} = 16 \cdot \frac{3 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3 + 3 \cdot 10^3} = \frac{16 \cdot 3}{4} = 12V$$

Бидејќи напонот $U_{ZD} > U_Z$ диодата се наоѓа во подрачје на пробив и се апроксимира со извор на напон од 12V. За напонот на потрошувачот се добива:

$$U_{RP} = U_Z = 10V$$

Напонот и струјата низ отпорникот R се пресметуваат според:

$$U_R = U_{VL} - U_{RP} = 16V - 10V = 6V \quad I_R = \frac{U_R}{R} = \frac{6}{1 \cdot 10^3} = 6mA$$

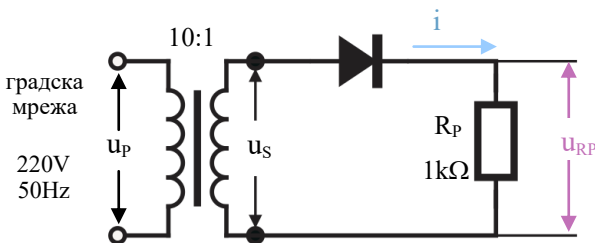
додека струјата низ потрошувачот и Зенер диодата имаат вредност:

$$I_{RP} = \frac{U_{RP}}{R_p} = \frac{10}{3 \cdot 10^3} = 3,33mA \quad I_Z = I_R - I_{RP} = 6mA - 3,33mA = 2,67mA$$

За моќноста на Зенер диодата се добива:

$$P_Z = U_Z \cdot I_Z = 10 \cdot 2,67 \cdot 10^{-3} = 26,7mW$$

9. Да се нацрта струен и напонски дијаграм на потрошувачот R_p во полубрановиот насочувач приклучен на мрежен напон преку трансформатор (диодата е идеална U_p=0V)!

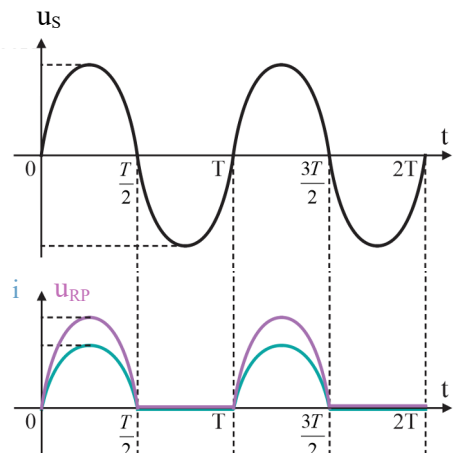


Со преносниот однос на трансформаторот, примарниот напон од 220V се трансформира во секундарен напон од 22V.

Максималната вредност на потрошувачот изнесува $u_{RP} = 22V$.

Максималната вредност на струјата низ потрошувачот изнесува $i = 22mA$.

Решение:



Транзистори

1. Транзисторот во колото на сликата има $\beta=100$. Емитерскиот спој е директно поларизиран со изворот $U_{BB}=2V$ и има напон $U_{BE}=0,7V$. 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:

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_1} = \frac{2 - 0,7}{20 \cdot 10^3} = 65 \mu A$$

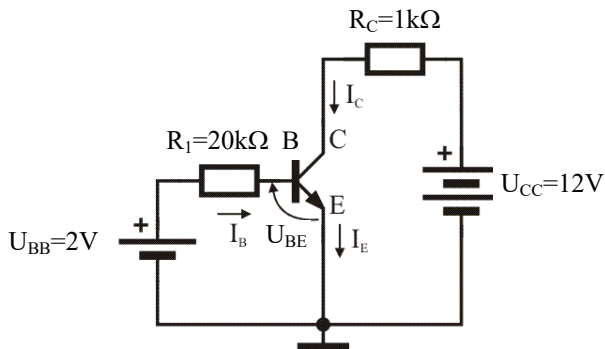
б) Колекторската струја се пресметува според:

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

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

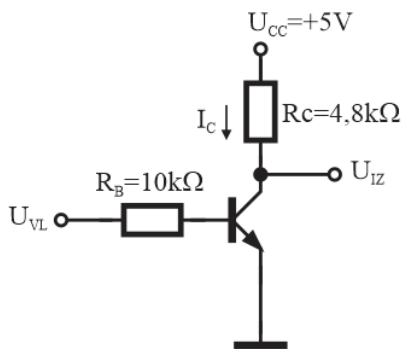
$$U_{CC} - R_C I_C - U_{CE} = 0$$

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



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:

$$\beta \cdot I_B = I_{CS} \quad \text{од каде:}$$

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

Минималната вредност на влезниот напон ќе ја одредиме преку:

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

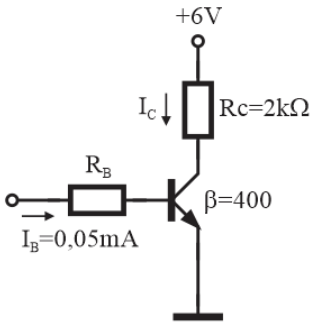
За секоја вредност на влезниот напон и базната струја поголеми од пресметаните, транзисторот ќе биде во длабоко заситување. Со исполнување на овој услов се обезбедува примена на секој транзистор од одобрениот тип со широки толеранции на факторот β . Нивото на излезниот напон од $0,2V$ се смета за ниско напонско ниво, а транзисторот како затворен прекинувач.

б) Транзисторот ќе биде на граница на неспроведување кога базната струја е нула, напонот база-колектор помал од $0,7V$. Следува:

влезниот напон е помал од $0,6V$, 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:

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

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.

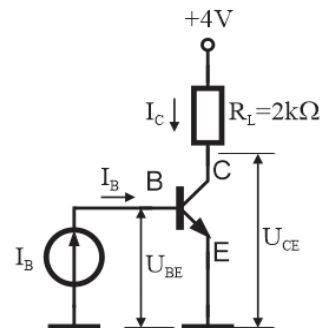
Затоа во подрачје на заситување, колекторската струја мора да ја пресметаме од колекторското коло.

4. 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.

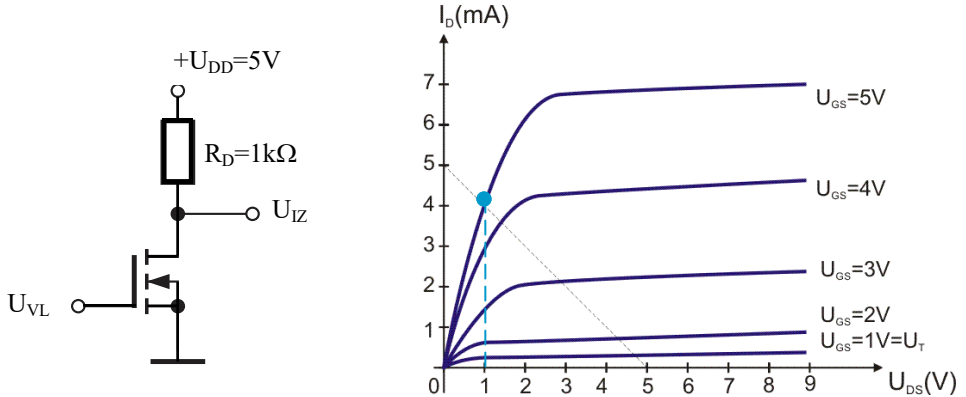
- $I_B = 0$,
- $I_B = 20\mu A$,
- $I_B = 60\mu A$,
- $I_B = 100\mu A$

(Решение:

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



5. 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 напонско 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 $U_{DS}=1V$, а бидејќи е (исто од графикот) $U_T=1V$, транзисторот се наоѓа во омското подрачје ($U_{DS} < U_{GS} - U_T$), струјата низ дрејнот ќе биде максимална, што значи дека и напонот на отпорникот R_D ќе биде максимален.

За излезниот напон се добива позитивна, но минимална струја приближно еднаква на нула.

Решението можеме да го прикажеме со следната табела:

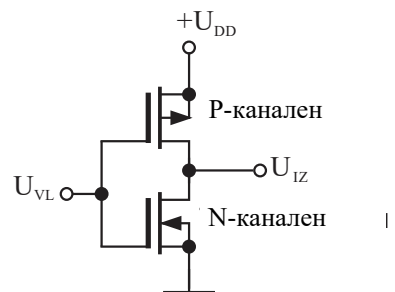
U_{VL}	U_{IZ}
0V	5V
5V	1V

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

6. За дадениот CMOS (Complementary MOS) инвертор составен од сервиска врска на N-канален и P-канален MOSFET приклучени помеѓу напојувањето U_{DD} и заземјување, да се одреди зависноста на излезниот напон од влезниот.

Решение:

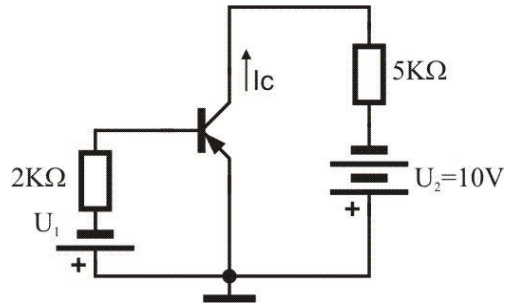
Ова коло работи како инвертор бидејќи на неговиот излез се добива ниско напонско ниво ако влезното е високо и обратно.



U_{VL}	U_{IZ}
0V	5V
5V	0V

7. PNP-транзисторот во колото на сликата ги има следниве карактеристики $\beta = 75$ и 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 на напонот U_1 е потребна за транзисторот да влезе во заситување?



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

8. На сликата во колото со транзистор 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 $I_C = 0$, не тече струја низ отпорникот R_L , напонот $U_{CE} = 5V$ и $U_{RL} = 0$, транзисторот не спроведува. За $I_B = 40\mu A$,

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

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

$$\text{Напонот } U_{RL} = +5V - U_{CE} = 5 - 3 = 2V.$$

Колекторскиот спој сè уште е инверзно поларизиран:

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

За $I_B = 100\mu A$,

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

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

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

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

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

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

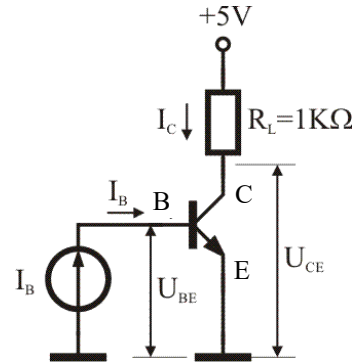
Таа е вредноста на I_B која е потребна да го донесе колото на граница на заситување.

За $I_B = 200\mu A$,

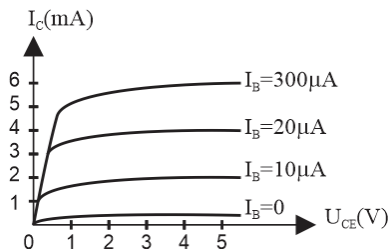
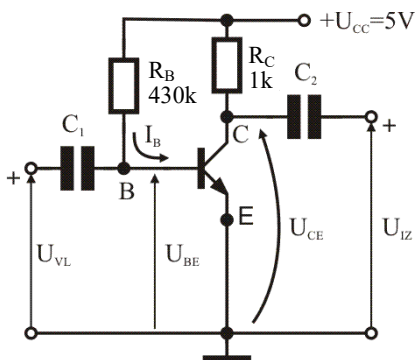
базната струја го носи транзисторот во длабоко заситување, I_C не може да се зголемува над $5mA$, транзисторот работи како затворен прекинувач.

$$I_C = 5mA, I_B = 200\mu A,$$

$$\beta_{sat} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{200 \cdot 10^{-6}} = 25$$



9. Излезните карактеристики на NPN-транзистор, во спој со заеднички емитер. Да се одреди најповолното место на работната точка на работната права. Транзисторот е во активен ражим на работа и има напон $U_{BE}=0,7V$.

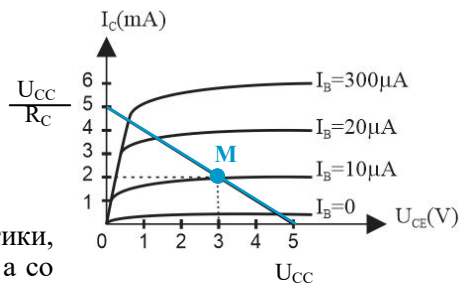


Решение:

Во излезниот дел од колото, според Вториот Кирхофов закон, ја запишуваме равенката на работната права:

$$U_{CC} = U_{CE} + R_C \cdot I_C$$

Работната права се црта во излезните карактеристики, точката на пресекот со U_{CE} оската е на $U_{CC}=5V$, а со струјната оска на $U_{CC} / R_C = 5mA$.



Во излезниот дел од колото, според Вториот Кирхофов закон, ја запишуваме равенката:

$$U_{CC} = U_{BE} + R_B \cdot I_B$$

од каде за базната струја I_B се добива:

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B} = \frac{5 - 0,7}{430k} = 10\mu A.$$

Работната точка М лежи во пресекот на работната линија и карактеристиката за $I_B=10mA$. За работната точка се добива $U_{CE}=3V$ и $I_C=2mA$.

Бидејќи кондензаторот не спроведува еднонасочни струи, го еквивалентираме со прекин во колото.

10. За транзисторот од претходната задача, да се пресмета параметарот $h_{fe} (\beta)$ за добиената положба на работната точка!

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad \beta = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-6}} = 200.$$

Коментар: Биполарни транзистори произведени во еден циклус имаат различни вредности на β , кои можат да достигнат разлики од 50 до 100%. Ако β се менува од 100 до 400, во овој пример, при базна струја од $10mA$, се добива:

ако $\beta = 100$,

$$I_C = 100 \cdot 10\mu A = 1mA,$$

ако $\beta = 400$,

$$I_C = 400 \cdot 10\mu A = 4mA.$$

3. За колото на засилувач со заедничка база дадено на сликата, вредностите на елементите се: $R_1=6k\Omega$, $R_2=1k\Omega$, $R_C=4,5k\Omega$, $R_E=1,5k\Omega$. Факторот на струјното засилување на транзисторот β има голема вредност. Да се одредат напоните на приклучоците на транзисторот, U_B , U_C и U_E .

Решение:

Колото за поларизација има иста форма како кај засилувачот во спој со заеднички емитер од задача 1, од каде за U_B се добива:

$$U_B = \frac{1k}{6k + 1k} \cdot 20 = 2,86V$$

Од $U_B = U_{BE} + R_E \cdot I_E$ за емитерската струја се добива вредност: $I_E = \frac{2,86 - 0,7}{1,5 \cdot 10^3} = 1,44mA$

За потенцијалот на колекторот се добива вредност:

$$U_C = U_{CC} - R_C \cdot I_C = 20 - 4,5 \cdot 10^3 \cdot 1,44 \cdot 10^{-3} = 13,5V.$$

$I_C \approx I_E$ кога β има големи вредности.

Од $U_{BE} = U_B - U_E$ за напонот на емитерот се добива: $U_E = U_B - U_{BE} = 2,86 - 0,7 = 2,16V$

4. За дадениот засилувач во спој со заеднички колектор, да се пресмета вредноста на напонското засилување. Дадено е: $R_1=4k\Omega$, $R_2=2k\Omega$, $R_E=1k\Omega$, $h_{fe}=100$, $h_{ie}=2k\Omega$, $U_{BE}=0,7V$.

Решение:

Претпоставуваме дека транзисторот работи во НАП, $U_{BE} > 0$, $U_{BC} < 0$!

$$U_B = U_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 10 \cdot \frac{2k}{4k + 2k} = 3,33V.$$

$$U_E = U_B - U_{BE} = 3,33 - 0,7 = 2,63V$$

$$I_E = \frac{U_E}{R_E} = \frac{2,63}{1 \cdot 10^3} = 2,63mA$$

$$I_C \approx I_E = 2,63mA \text{ бидејќи } I_C \gg I_B$$

$$U_C = U_{CC} = 10V$$

$$U_{BC} = U_B - U_C = 3,33 - 10 = -6,67V < 0$$

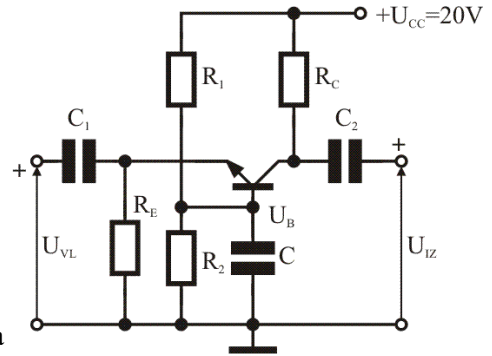
Претпоставката е точна, транзисторот работи како засилувач!

Напонското засилување го одредуваме во динамички режим на работа од еквивалентното коло на транзисторот со h -параметри:

$$I_E = I_B + h_{fe} I_B = (1 + h_{fe}) I_B \approx h_{fe} I_B \quad U_{VL} = h_{ie} I_B + R_E I_E = h_{ie} I_B + R_E (1 + h_{fe}) I_B$$

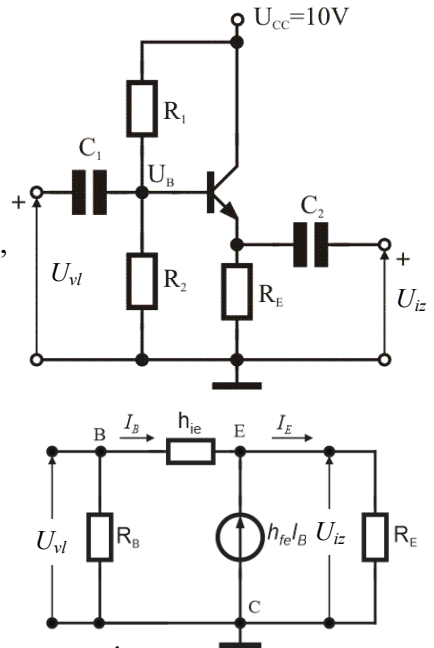
$$U_{IZ} = R_E I_E = R_E (1 + h_{fe}) I_B \quad A_U = \frac{U_{IZ}}{U_{VL}} = \frac{R_E (1 + h_{fe}) I_B}{[h_{ie} + R_E (1 + h_{fe})] I_B} \approx \frac{R_E h_{fe}}{h_{ie} + R_E h_{fe}} = 0,98 < 1$$

Коментар: Овој засилувач е познат како емитерско следило, кој има напонско засилување приближно 1. Обично се употребува за трансформација на импедансата.

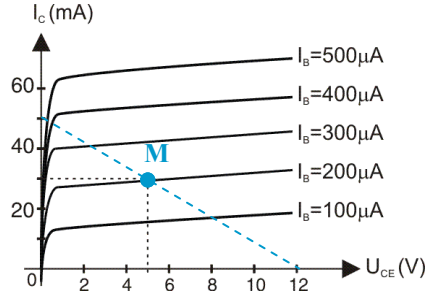
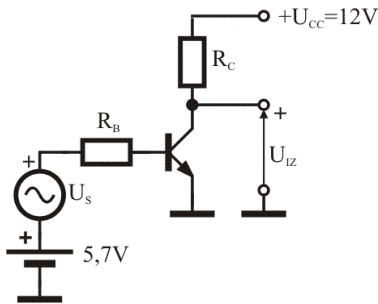


Претпоставуваме дека транзисторот работи во НАП, каде $U_{BE} > 0$, $U_{BC} < 0$

Провери дали е точна претпоставката!



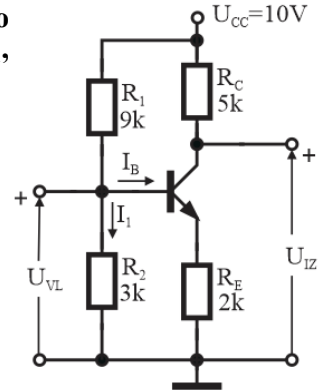
5. На сликата е дадено коло со заеднички емитер и положбата на работната точка M на неговите карактеристики. За напонот U_{BE} се смета дека е $0,7V$.
- да се одредат вредностите на $I_{C(M)}$ и $U_{CE(M)}$ во работната точка;
 - да се нацрта статичката работна линија;
 - да се пресмета вредноста на R_C ;
 - да се пресмета вредноста на R_B ;
 - да се пресмета β на транзисторот.



(Решение:

- $I_{C(M)}=50mA$ и $U_{CE(M)}=5V$ (во точката M),
- за $I_c=0A$, $U_{CE}=12V$, за $U_{CE}=0V$, $I_c=50mA$ (нацртана со испрекината линија),
- со пресметка од графикот $R_C=240\Omega$,
- од графикот $I_B=200\mu A$, $R_B=25k\Omega$,
- $\beta=150$).

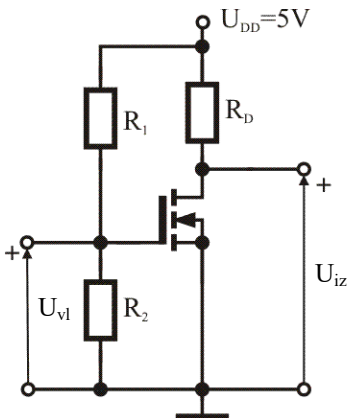
6. На сликата е прикажано засилувачко коло со заеднички емитер. Со претпоставени вредности $I_B \ll I_1$, $\beta=250$ и $U_{BE}=0,7V$.
- пресметај ја вредноста на струите I_E , I_C и I_B ;
 - пресметај ја вредноста за U_{CE} .



(Решение:

- $I_c=0,9mA$, $I_B=3,58\mu A$, $I_E \approx I_C$;
- $U_{CE}=5,5V$).

7. 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:

$$U_{GS} = \frac{U_{DD}}{R_1 + R_2} R_2$$

$$\text{или } \frac{R_1}{R_2} = \frac{3}{2}, R_2 = 100k\Omega.$$

$$U_{GS}(R_1 + R_2) = U_{DD}R_2$$

$$U_{DD}R_2 - U_{GS}R_2 = U_{GS}R_1$$

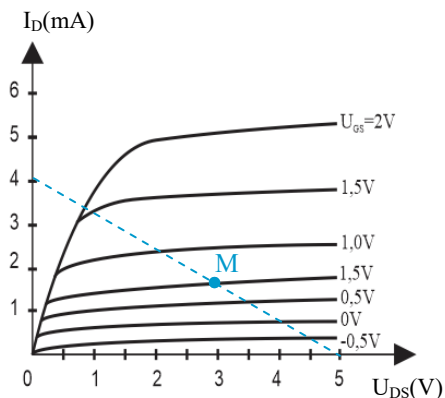
$$U_{DD}R_2 - U_{GS}R_2 = U_{GS}R_1$$

$$R_2 = \frac{U_{GS}}{U_{DD} - U_{GS}} R_1 = 100k\Omega$$

8. На графикот се прикажани излезните карактеристики на N-канален MOSFET со индуциран канал. Транзисторот е ставен во засилувач со заеднички сорс, даден во претходната задача, 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.



(Решение:

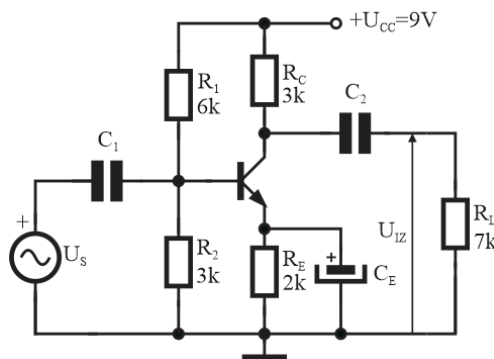
а) за $I_D=0$, $U_{DS}=5$ V, за $U_{DS}=0$, $I_D=4$ mA (означена со испрекината линија),

б) работната точка ќе лежи на $U_{GS}=1,5$ V (обележана со буквата M).)

9. Во засилувачкото коло со заеднички емитер е употребен транзистор со $h_{fe}=50$ и $h_{ie}=2k\Omega$. Колкаво е биде напонското засилување за мали сигнали?

Решение:

Транзисторот го заменуваме со упростена еквивалентна шема за мали сигнали, во која кондензаторите за спрега се кратко споени а едностраночниот извор е поврзан на маса.



Со R_L' ја означуваме паралелната врска на отпорите R_C и R_L :

$$R_L' = \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L} = \frac{21 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^3} = 2,1k\Omega$$

Излезниот напон се изразува со:

$$U_{iz} = -h_{fe} I_b \cdot R_L'$$

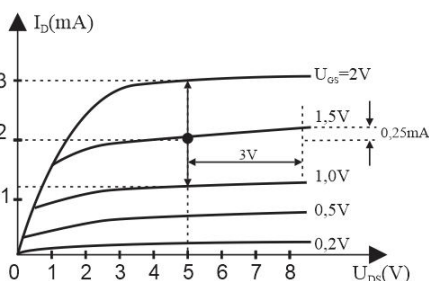
а за влезниот се добива изразот:

$$U_{vl} = h_{ie} I_b$$

Напонското засилување се дефинира како количник на излезниот и влезниот напон:

$$A_u = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = \frac{-h_{fe} I_b R_L'}{h_{ie} I_b} = -h_{fe} \frac{R_L'}{h_{ie}} = -50 \frac{2,1 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^3} = -52,5.$$

10*). 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 $8k\Omega$.



Решение:

Од графикот се гледа дека за промена на U_{GS} за $\pm 0,5V$ ($\Delta U_{GS}=1V$), промената на струјата I_D изнесува $1,75mA$, од каде за g_m и g_0 добиваме:

$$g_m \approx \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} = \frac{1,75 \cdot 10^{-3}}{1} = 1,75 mS$$

$$g_0 \approx \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{DS}} = \frac{0,25 \cdot 10^{-3}}{3} = 83,3 \mu S.$$

За пресметка на напонското засилување треба да се најде еквивалентниот отпор R_{Leq} , како паралелна комбинација на g_0 и надворешното оптоварување од $8k\Omega$:

$$R_{Leq} = \frac{\frac{1}{g_0} \cdot R_L}{\frac{1}{g_0} + R_L} = \frac{\frac{1}{83,3 \cdot 10^{-6}} \cdot 8 \cdot 10^3}{\frac{1}{83,3 \cdot 10^{-6}} + 8 \cdot 10^3} = 4,8 k\Omega$$

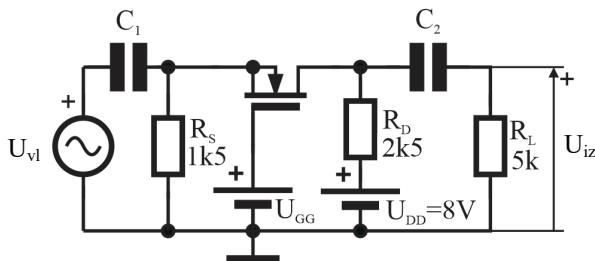
$$A_U = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = -\frac{U_{GS} \cdot g_m \cdot R_{Leq}}{U_{GS}} = -\frac{1 \cdot 1,75 \cdot 10^{-3} \cdot 4,8 \cdot 10^3}{1} = -8,4.$$

11*). На сликата е дадено коло на MOSFET во спој со заеднички гејт, за кое е измерена струја на дрејн од $1mA$.

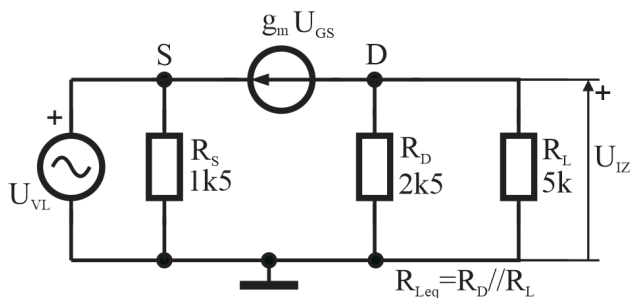
а) Да се одреди вредноста на напонот U_{GG} со која се добива $U_{GS}=+1V$.

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:



а) Патеката на еднонасочната компонента на струјата на дрејнот поминува преку U_{DD} , R_D , MOSFET (дрејн – сорс) и R_S , од каде за U_S се добива:

$$U_S = I_D \cdot R_S = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^3 = 1,5V$$

а бидејќи U_{GS} треба да биде $1V$, за U_{GG} 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:

$$U_{vl} = -U_{GS}$$

$$U_{iz} = -g_m \cdot U_{GS} \cdot R_{Leq}$$

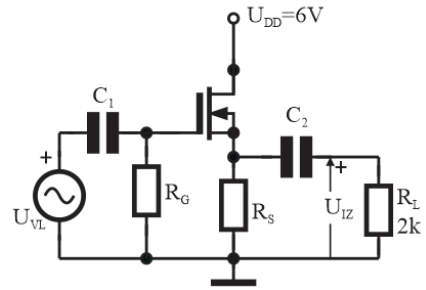
$$\text{Со односот на } U_{vl} \text{ и } U_{iz} \text{ се добива: } A_U = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = g_m \cdot R_{Leq} = 8,33$$

12*). Во колото на засилувач со заеднички дрејн, дадено на сликата, MOSFET-от 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 замени MOSFET со $g_m=30\text{mS}$.

(Решение: а) $A_U=0,86$, б) $A_U=0,98$.)



13. 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 пресмета вкупното засилување.

Решение:

$$A_{U1} = 100 \quad 20 \log(100) = 20 \cdot 2 = 40\text{dB}$$

$$A_{U2} = 1000 \quad 20 \log(1000) = 20 \cdot 3 = 60\text{dB}$$

$$A_{TOT} = 40 + 60 = 100\text{dB} \quad \text{или}$$

$$A_{TOT} = 100 \cdot 1000 = 100000 \quad 20 \log(100000) = 20 \cdot 5 = 100\text{dB}.$$

14. Во коло на засилувач на мали сигнали со заеднички емитер, ставен е транзистор. Да се пресмета струјното, напонското и засилувањето на моќност.

Дадени се вредности на: $R_C=2\text{k}\Omega$, $h_{ie}=2\text{k}\Omega$, $h_{fe}=50$.

Решение:

Транзисторот е заменет со еквивалентна шема со h параметри, од каде за колекторската струја се добива:

$$I_C = h_{fe} I_B$$

Струјното засилување се пресметува според изразот:

$$A_I = \frac{I_C}{I_B} = \frac{h_{fe} I_B}{I_B} = h_{fe} = 50$$

Според II Кирхофов закон за влезната контура се добива релацијата:

$$U_{BE} - h_{ie} I_B = 0$$

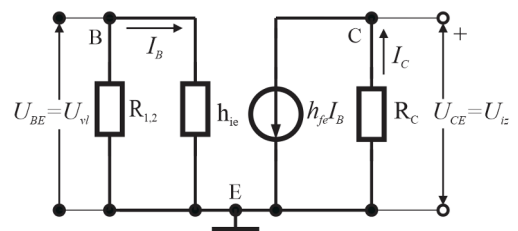
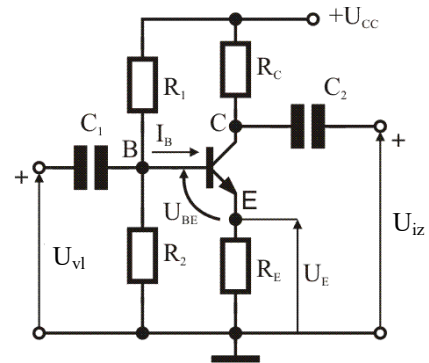
од каде за влезниот напон се добива:

$$U_{vl} = U_{BE} = h_{ie} I_B$$

Со односот на излезниот и влезниот напон се добива напонското засилување:

$$A_U = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = \frac{U_{CE}}{U_{BE}} = \frac{-h_{fe} I_B R_C}{h_{ie} I_B} = \frac{-h_{fe} R_C}{h_{ie}} = \frac{-50 \cdot 2000}{2000} = -50$$

За засилувањето на моќноста се добива: $A_P = A_U A_I = -50 \cdot 50 = -2500$

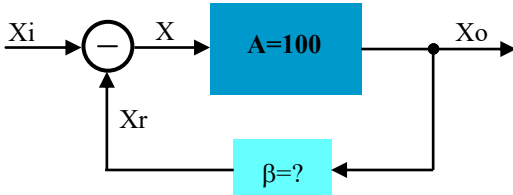


Падот на напонот на отпорникот R_C е:

$$U_{CE} = U_{iz} = -h_{fe} I_B R_C$$

Засилувачи со негативна повратна врска

1. Засилувач без повратна врска има засилување 100. Колкава е вредноста на факторот на повратната врска β , ако со применета негативна повратна врска, засилувањето двојно се намалило.



Решение:

Побудниот сигнал X претставува разлика меѓу влезниот X_i и сигналот на повратната врска X_r :

$$X = X_i - X_r$$

Засилувањето на засилувачот без повратна врска е дефинирано со односот:

$$A = \frac{X_o}{X} = 100$$

додека засилувањето на повратна врска е дефинирано со односот:

$$\beta = \frac{X_r}{X_o}$$

Со замена на претходните изрази за засилувањето со повратна врска, се добива:

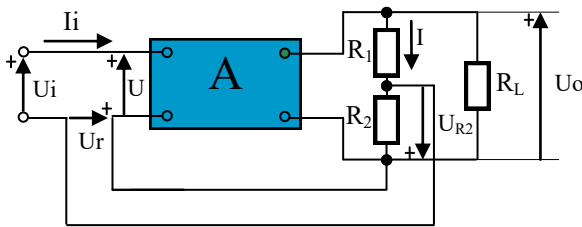
$$A_r = \frac{X_o}{X_i} = \frac{AX}{X + X_r} = \frac{AX}{X + \beta X_o} = \frac{AX}{X + \beta AX} = \frac{AX}{(1 + \beta)X} = \frac{A}{(1 + \beta A)}$$

од каде за β се добива:

$$(1 + \beta A) A_r = A \Rightarrow A_r + \beta A \cdot A_r = A \Rightarrow \beta A \cdot A_r = A - A_r$$

$$\beta = \frac{A - A_r}{A \cdot A_r} = \frac{100 - 50}{100 \cdot 50} = 0,01$$

2. На сликата е даден засилувач со повратна врска. Каква повратна врска е реализирана? Колку изнесува коефициентот на повратната врска ако напонскиот делител е составен од отпорностите $R_1=10k\Omega$ и $R_2=2k\Omega$.



Одговор:

Реализирана е напонско сериска негативна повратна врска бидејќи дел од излезниот напон (U_{R2}) се враќа сериски со влезниот сигнал во против фаза.

За коефициентот на повратната врска се добива:

$$\beta = \frac{U_r}{U_o} = \frac{U_{R2}}{U_o} = \frac{R_2 \cdot I}{(R_1 + R_2) \cdot I} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{2k}{10k + 2k} = 0,166.$$

3. Колкаво е засилувањето со повратна врска со коефициент 0,05, ако засилувач без повратна врска има засилување 1000. Да се спореди резултатот ако се земе дека $\beta A \gg 1$.

Решение:
$$A_r = \frac{A}{(1 + \beta A)} = \frac{1000}{1 + 1000 \cdot 0,05} = \frac{1000}{51} = 19,6. \approx A_{r(\beta A \gg 1)} = \frac{A}{\beta A} = \frac{1}{\beta} = \frac{1}{0,05} = 20.$$

4. Во засилувачот со заеднички емитер отпорникот R_E служи за стабилизација преку кој е остварена негативна повратна врска. Да се пресмета вредноста на коефициентот на повратната врска. Дадено е $R_C=2k\Omega$, $R_E=100\Omega$.

Решение:

Од еквивалентната шема за напонот на отпорникот R_E се добива:

$$U_{RE} = U_E = (I_B + h_{fe}I_B)R_E = (1 + h_{fe})I_B R_E$$

Бидејќи $h_{fe} \gg 1$, за повратниот напон U_E се добива:

$$U_E \approx h_{fe} \cdot I_B \cdot R_E$$

и ако за колекторската струја се замени:

$$I_C = h_{fe}I_B$$

$$U_E \approx R_E I_C$$

Бидејќи напонот U_E се одзема од влезниот напон, остварена е негативна повратна врска:

$$U_{vl} - U_E = U_{BE}$$

Излезниот напон се добива како пад на напон на отпорникот R_C :

$$U_{iz} = U_C = -R_C I_C$$

за коефициентот на повратната врска се добива:

$$\beta = \frac{-U_E}{U_C} = \frac{-R_E I_C}{-R_C I_C} = \frac{R_E}{R_C} = \frac{100}{2000} = 0.05$$

5. Во засилувачот со заеднички емитер отпорникот R_1 служи за стабилизација на работната точка преку кој е остварена негативна повратна врска. Да се пресмета вредноста на отпорникот. Дадено е $U_{CC}=10V$, $R_C=2k\Omega$, коефициентот на струјното засилување $\beta=200$.

Решение:

Еднонасочниот напон на работната точка U_{CE} треба да е еднаков на половина од напојувањето U_{CC} .

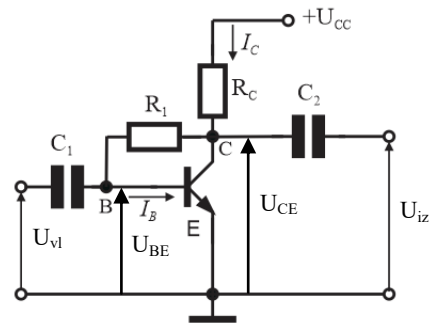
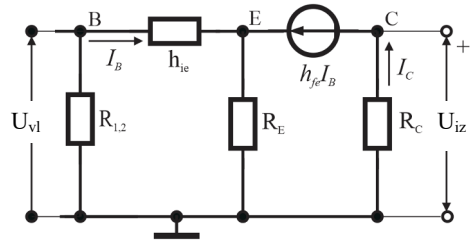
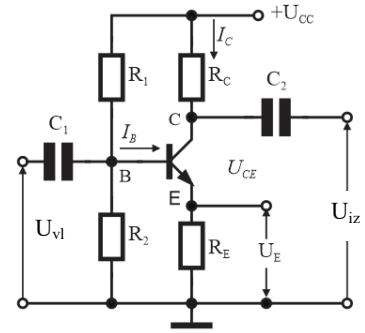
$$U_{CE} = R_C I_C = \frac{U_{CC}}{2} = \frac{10}{2} = 5V \Rightarrow I_C = \frac{U_{CE}}{R_C} = \frac{5}{2 \cdot 2000} = 2,5mA$$

Базната струја се одредува од колекторската:

$$I_C = \beta \cdot I_B \Rightarrow I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{200} = 12,5\mu A$$

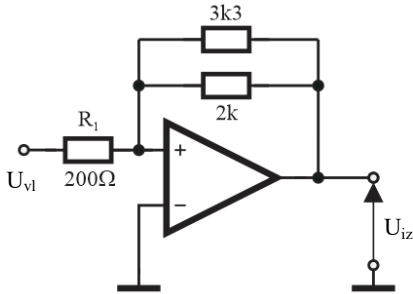
Отпорноста на отпорникот R_1 се пресметува според:

$$R_1 = \frac{U_{CE} - U_{BE}}{I_B} = \frac{5 - 0,7}{12,5 \cdot 10^{-6}} = 344k\Omega \text{ (Се заокружува на стандардна вредност } 330k\Omega.)$$



Операциски засилувачи

1. За колото со идеален операциски засилувач на сликата да се пресмета напонското засилување.



Решение:

Во гранката на негативната повратна врска се еквивалентираат двата паралелни отпорници:

$$R_2 = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot 3,3 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^3 + 3,3 \cdot 10^3} = \frac{6,6 \cdot 10^6}{5,3 \cdot 10^3} = 1,245 \cdot 10^3 = 1,245 k\Omega$$

Поради постоење на виртуелна куса врска на влезот од операцискиот засилувач ($U_+ = U_-$ и $I_{v1} = 0$), инвертирачкиот влез е на потенцијал 0V.

Струјата I_1 ќе протекува низ контурата: $U_{vl} - R_1 - R_2 - U_{iz}$.

$$I_1 = \frac{U_{vl} - U_{iz}}{R_1 + R_2}$$

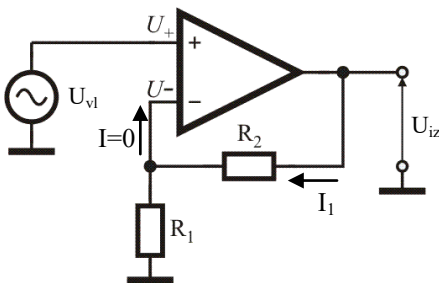
За влезниот напон важи:

$$U_{vl} = R_1 \cdot I_1 \Rightarrow I_1 = \frac{U_{vl}}{R_1}$$

$$\frac{U_{vl} - U_{iz}}{R_1 + R_2} = \frac{U_{vl}}{R_1} \Rightarrow (U_{vl} - U_{iz})R_1 = U_{vl}(R_1 + R_2)$$

$$Au = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{1245}{200} = -6,2$$

2. Во колото на неинвертирачкиот операциски засилувач, да се пресмета вредноста на отпорникот R_2 за да се добие напонското засилување 41, ако $R_1 = 200\Omega$.



Решение:

Поради постоење на виртуелна куса врска на влезот од операцискиот засилувач $U_- = U_+ = U_{vl}$. За струјата низ отпорниците R_1 и R_2 важи:

$$I_1 = \frac{U_{iz} - U_{vl}}{R_2} = \frac{U_{vl}}{R_1}$$

Со трансформација на изразот: $(U_{iz} - U_{vl})R_1 = U_{vl} \cdot R_2 \Rightarrow U_{iz} \cdot R_1 = (R_1 + R_2)U_{vl}$

за напонското засилување се добива:

$$Au = \frac{U_{iz}}{U_{vl}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Од последниот израз за R_2 се добива: $R_2 = (Au - 1)R_1 = 40 \cdot 200 = 8000 = 8k\Omega$.

3. За колото со идеален операциски засилувач од сликата да се пресмета напонското засилување.

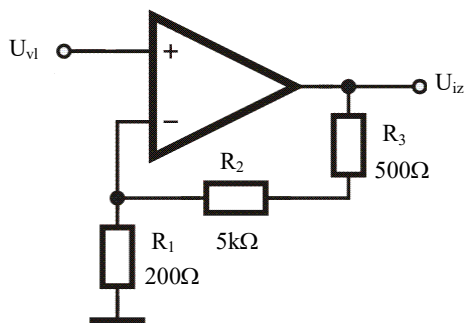
Решение:

Во гранката на повратната врска, со R_{23} ќе ја означиме сервиската врска на отпорниците R_2 и R_3 :

$$R_{23} = R_2 + R_3 = 5000 + 500 = 5,5k\Omega$$

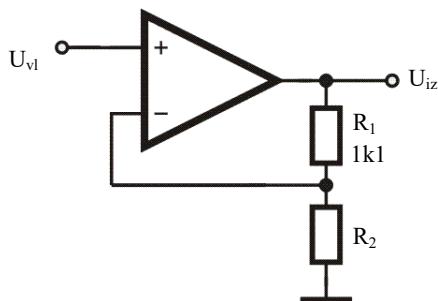
Со замена во изразот за напонското засилување на неинвертирачкиот засилувач, се добива:

$$Au = 1 + \frac{R_{23}}{R_1} = 1 + \frac{5500}{200} = 28,5.$$



4. За колото со идеален операциски засилувач од сликата да се пресмета вредноста на отпорноста на отпорникот R_2 со која колото дава напонско засилување 30.

(Решение: 38kΩ)



5. За колото на сликата да се одреди вредноста на излезната струја.

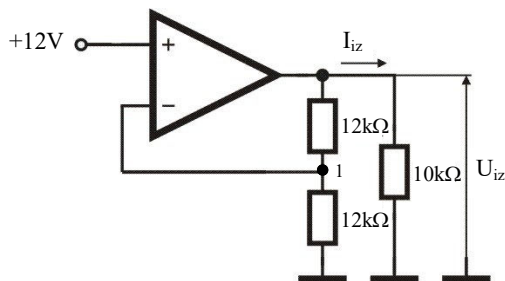
Решение:

Потенцијалот во точката 1 е 12V.

$$V_1 = \frac{U_{iz}}{2} = 12V \Rightarrow U_{iz} = 24V$$

За излезната струја се добива:

$$I_{iz} = \frac{U_{iz}}{10 \cdot 10^3} = \frac{24}{10 \cdot 10^3} = 2,4mA$$



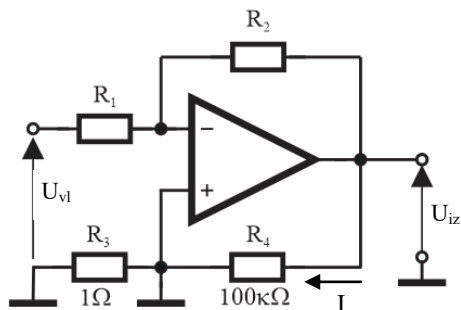
6. За зголемување на засилувањето на операцискиот засилувач при еднонасочни сигнали, применета е позитивна повратна врска. Пресметај го коефициентот на повратната спрега.

Решение:

$$U_{iz} = (R_3 + R_4)I$$

$$U_+ = R_3I$$

$$\beta = \frac{U_{iz}}{U_+} = \frac{(R_3 + R_4)I}{R_3 \cdot I} = \frac{R_3 + R_4}{R_3} \approx 100000$$

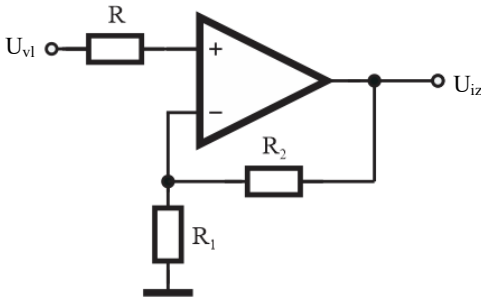


7. На сликата е дадено засилувачко коло со операциски засилувач со негативна повратна врска. Да се одреди:

а) односот R_1/R_2 во колото на операцискиот засилувач, со кој би се добило засилување $Ar=50$

б) β во dB

в) U_{iz} и U_- доколку $U_s=0,1V$.



Решение:

а) Засилувањето со негативна повратна врска се одредува според релацијата:

$$Ar = \frac{A}{1 + \beta A} = 50$$

за $\beta A \gg 1$ се добива: $Ar = \frac{A}{\beta A} = \frac{1}{\beta} = 50$

Коефициентот на повратната врска се изразува како:

$$\beta = \frac{U_-}{U_{iz}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \Rightarrow \frac{1}{\beta} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 50$$

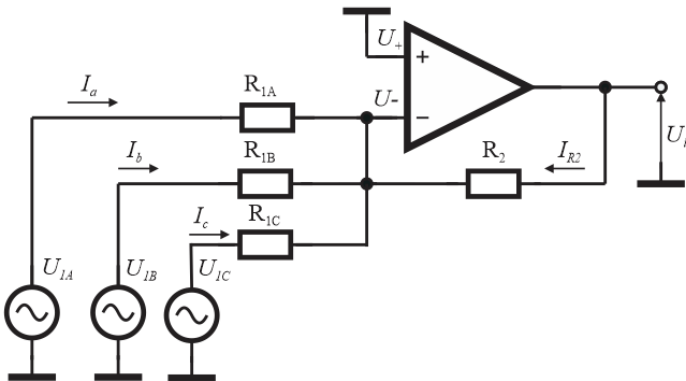
од каде за бараниот однос R_1/R_2 се добива: $\frac{R_2}{R_1} = 49$

б) Кружното засилување во децибели: $\beta = 20 \log \beta = 20 \log \left(\frac{1}{50} \right) = -33,8dB$

в) За $U_s=0,1V$, за U_{iz} и U_- се добива:

$$U_{iz} = \frac{A}{1 - \beta A} \cdot U_s = 50 \cdot 0,1 = 5V \quad \text{и} \quad U_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_{iz} = \frac{5}{50} = 0,1V$$

8. За суматорот прикажан на сликата, да се изведе зависноста на излезниот напон од влезните напони!



Решение:

Изразите за влезните струи во колото се:

$$I_A = \frac{U_{1A}}{R_{1A}} \quad I_B = \frac{U_{1B}}{R_{1B}} \quad I_C = \frac{U_{1C}}{R_{1C}}$$

додека струјата во повратната гранка се изразува како: $I_{R_2} = \frac{U_{iz}}{R_2}$

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

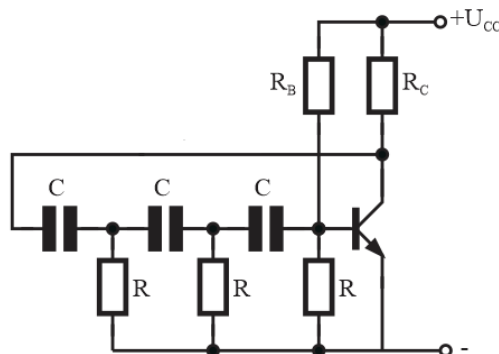
$$I_A + I_B + I_C = -I_{R_2} \Rightarrow \frac{U_{1A}}{R_{1A}} + \frac{U_{1B}}{R_{1B}} + \frac{U_{1C}}{R_{1C}} = -\frac{U_{iz}}{R_2} \Rightarrow U_{iz} = -\left(\frac{R_2}{R_{1A}} U_{1A} + \frac{R_2}{R_{1B}} U_{1B} + \frac{R_2}{R_{1C}} U_{1C} \right)$$

Хармониски осцилатори

1. Повратната R-C мрежа на осцилаторот прикажан на сликата, се состои од три сериски споени C-R степени.

а) Да се изведе изразот за коефициентот на повратната врска β и да се одреди фреквенцијата која се добива со осцилаторот.

б) Да се одреди минималната вредност на засилувањето A на засилувачот изведен со биполарен транзистор, при кое уредот работи како осцилатор.



Решение:

Факторот β се одредува според изразот:

$$\beta(\omega) = \frac{u_2}{u_1} = \frac{Ri_2}{u_1}$$

Од изразите:

$$u_1 = Xci_1 + R(i_1 - i_2)$$

$$R(i_1 - i_2) = Xci_2 + R(i_2 - i_3)$$

$$R(i_2 - i_3) = Xci_3 + Ri_3$$

со елиминирање на струите i_1 и i_2 за β се добива:

$$\beta(\omega) = \frac{1}{\frac{j}{(\omega CR)^3} - \frac{5}{(\omega CR)^2} - \frac{6j}{(\omega CR)} + 1}$$

Фреквенцијата на осцилирање ја добиваме со издначување на имагинарниот дел на β со нула:

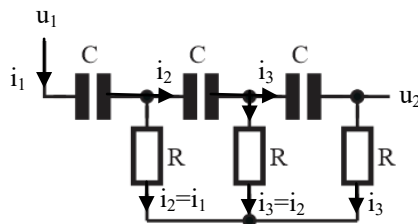
$$\frac{j}{(\omega CR)^3} - \frac{6j}{(\omega CR)} = 0 \Rightarrow (\omega CR)^2 = \frac{1}{6} \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{RC\sqrt{6}}$$

Со замена на ω_0 во изразот за β се добива:

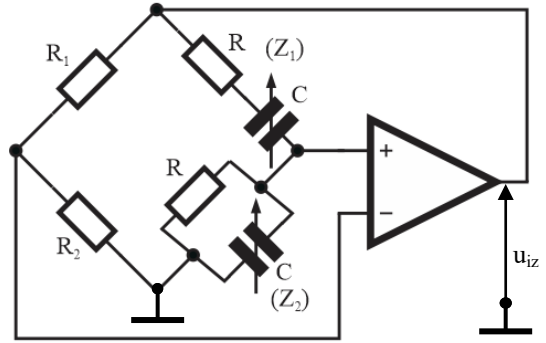
$$\beta(\omega = \omega_0) = -\frac{1}{29}$$

Од условот за осцилирање, за засилувањето A се добива:

$$\beta(\omega_0)A(\omega_0) = 1 \Rightarrow A(\omega_0) = -29$$



2. Осцилаторот со Винов мост спаѓа во групата RC-осцилатори со позитивна повратна врска Z_1 и Z_2 и отпорниците R_1 и R_2 . Се изведува со операциски засилувач како активен елемент. Изведи го изразот за фреквенцијата со која ќе осцилира колото.



Решение:

За напоните на неинвертирачкиот и инвертирачкиот влез од напонските делители Z_1 - Z_2 и R_1 - R_2 се добива:

$$u_+ = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} u_{iz} = \frac{1}{1 + \frac{Z_1}{Z_2}} u_{iz} \quad u_- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_{iz} = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2}} u_{iz}$$

За диференцијалниот напон на влезот на операцискиот засилувач, со замена на изразите u_+ и u_- , се добива:

$$u_d = u_+ - u_- = \left(\frac{1}{1 + \frac{Z_1}{Z_2}} + \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2}} \right) u_{iz}$$

со замена на изразот за засилувањето A на операцискиот засилувач се добива:

$$A = \frac{u_{iz}}{u_d} \Rightarrow Au_d = u_{iz} \Rightarrow A \left(\frac{1}{1 + \frac{Z_1}{Z_2}} + \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2}} \right) u_{iz} = u_{iz} \Rightarrow A \left(\frac{1}{1 + \frac{Z_1}{Z_2}} + \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2}} \right) = 1$$

Бидејќи операцискиот засилувач има многу големо напонско засилување $A \rightarrow \infty$, за последниот израз се добива:

$$\frac{1}{1 + \frac{Z_1}{Z_2}} + \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2}} \approx 0$$

Односот Z_1/Z_2 треба да е реален:

$$Z_1 = R + \frac{1}{j\omega C} \quad \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{R} + j\omega C$$

$$\frac{Z_1}{Z_2} = Z_1 \cdot \frac{1}{Z_2} = \left(R + \frac{1}{j\omega C} \right) \left(\frac{1}{R} + j\omega C \right) = 2 + j(\omega RC - \frac{1}{\omega RC})$$

Со изедначување на имагинарниот дел со 0 се добива фреквенцијата на осцилирање:

$$\omega RC - \frac{1}{\omega RC} = 0 \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{RC}$$

3. За Колпицов осцилатор со кондензатори $C_1=C_2=330\text{pF}$ и фреквенција $f=0,5\text{MHz}$, да се одреди вредноста на калемот L во колото на повратната врска?

Одговор:

Од изразот за фреквенцијата на осцилирање:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{LC_1C_2}}$$

за калемот L се добива:

$$L = \frac{C_1 + C_2}{(2\pi f)^2 C_1 C_2} = \frac{660 \cdot 10^{-12}}{9,86 \cdot 10^{12} \cdot 108900 \cdot 10^{-24}} = 614,66 \mu\text{H}$$

4. Во коло на Колпицов осцилаторот од слика ставен е калем со индуктивност од $0,1\text{mH}$. Да се пресмета вредноста на капацитивноста C_1 со која осцилаторот ќе осцилира на фреквенција од 1MHz ако $C_2=560\text{pF}$.

Одговор:

Од изразот за фреквенцијата на осцилирање:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{LC_1C_2}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LCe}}$$

за кондензаторот C_1 се добива:

$$Ce = \frac{1}{L(2\pi f)^2} = \frac{1}{0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 39,44 \cdot 10^{12}} = 253,55 \mu\text{F}$$

5. Кварцот прикажан со еквивалентно коло е одреден со следните голедини: капацитивности $C_0=5\text{pF}$, $C_1=0,001\text{pF}$, факторот на добротата $Q=5 \times 10^4$ и резонантна фреквенција на сериската гранка од 5MHz . Да се пресметаат вредностите на L_1 , R_1 и резонантна фреквенција на паралелната гранка.

Решение:

Од изразот за резонантна фреквенција на сериската гранка се добива вредноста на калемот L_1 :

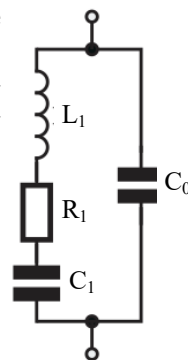
$$f_s = 1/2\pi \sqrt{L_1 C_1} \Rightarrow L_1 = 1/(2\pi f_s)^2 C_1 = 1/985,96 \cdot 10^{12} \cdot 0,001 \cdot 10^{-12} = 1\text{H}$$

Вредноста на отпорникот R_1 се одредува од факторот за добротата:

$$Q = \omega_s \frac{L_1}{R_1} \Rightarrow R_1 = \omega_s \frac{L_1}{Q} = 2\pi f_s \frac{L_1}{Q} = 628 \Omega$$

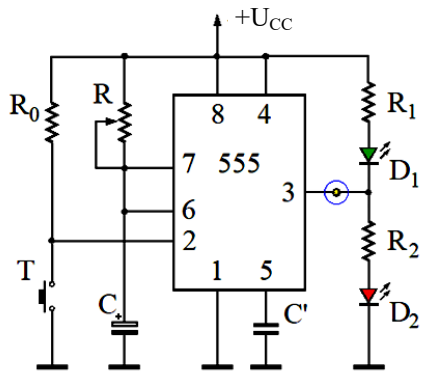
За резонантната фреквенција во паралелната гранка се добива:

$$f_p = 1/2\pi \sqrt{L_1 \frac{C_1 C_0}{C_1 + C_0}} = 1/6,28 \sqrt{\frac{0,001 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot 10^{-12}}{5,001 \cdot 10^{-12}}} = 1/198,5 \cdot 10^{-9} = 5,037\text{MHz}$$



Мултивибратори

1. На излезот од моностабилното коло со ИК 555, на пинот [3], преку два отпорници, се приклучени светлечки LED диоди: зелена (D_1) и црвена (D_2). Вредностите на употребените елементите се: $U_{CC}=12V$, $R_0=10\text{ k}\Omega$, $C'=10nF$; $R_{POT}=500k\Omega$, $C=10\text{ }\mu F$, $R_1=R_2=560\Omega$. Претпостави дека колото долг временски



период се наоѓа во својата стабилна состојба, во која тастерот Т е отпуштен. Во $t_0=0$ тастерот моментално се притиска и се отпушта за да се иницира квазистабилната состојба.

Претпостави дека потенциометарот е поставен на отпорност од (1) $180\text{ k}\Omega$, (2) $270\text{ k}\Omega$, (3) $360\text{ k}\Omega$. а) За секоја од овие вредности пресметај го времетраењето T_p на правоаголниот импулс на излезот; б) Од добиените резултати донеси заклучок како влијае зголемувањето на отпорноста на потенциометарот врз времетраењето на излезниот импулс?

Решение:

а) Се користи равенката:

$$T_p = 1,1 \cdot R \cdot C$$

За оваа задача важи: $T_p = 1,1 \cdot R_{POT} \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 11 \cdot 10^{-6} \cdot R_{POT}$

$$(a1) T_p = 11 \cdot 10^{-6} \cdot R_{POT} = 11 \cdot 10^{-6} \cdot 180 \cdot 10^3 = 1980\text{ msec} \approx 2\text{ sec.}$$

$$(a2) T_p = 11 \cdot 10^{-6} \cdot R_{POT} = 11 \cdot 10^{-6} \cdot 270 \cdot 10^3 = 2970\text{ msec} \approx 3\text{ sec.}$$

$$(a3) T_p = 11 \cdot 10^{-6} \cdot R_{POT} = 11 \cdot 10^{-6} \cdot 360 \cdot 10^3 = 3960\text{ msec} \approx 4\text{ sec.}$$

б) Со зголемување на отпорноста на потенциометарот времетраењето на излезниот импулс исто така пропорционално се зголемува, што е видливо од самата равенка во која периодот на излезниот импулс T_p се добива како производ од вредностите на потенциометарот и кондензаторот, дополнително помножени со константата 1.1.

в) Во однос на светлечките диоди најнапред да утврдиме и да потенцираме дека зелената диода D_1 со анодата е поврзана на напојувањето $+U_{CC}=12V$, додека со катодата е споена на излезниот пин [3] од ик 555. Спротивно на тоа, анодата на црвената диода D_2 е поврзана на излезниот пин [3], а катодата и е споена на „маса“, т.е. на референтно ниво $0V$.

За да заклучиме како се однесуваат диодите ќе разгледаме две состојби:

(1) тастерот Т не е притиснат и колото се наоѓа во стабилната состојба, и

(2) со моменталното притискање и отпуштање на тастерот Т колото влегува во квазистабилната состојба временски период T_p , за потоа повторно само по себе да се врати во стабилната состојба.

(в1) Кога тастерот Т НЕ е притиснат излезниот напон на пинот [3] се наоѓа на ниско ниво од 0 V . Заради начинот на којшто се поврзани светлечките диоди, горната зелена диода D_1 ќе биде директно поларизирана, таа ќе спроведе и ќе свети. Обратно, долната црвена диода D_2 ќе биде инверзно поларизирана и заради тоа нема да спроведува, ќе биде закочена, и нема да свети.

(в2) Веднаш по моменталното притискање и отпуштање на тастерот Т, излезниот напон на пинот [3] се наоѓа на високо ниво еднакво со напонот на напојување од 12V. Сега состојбата со однесувањето на диодите се менува. Имено, горната зелена диода D₁ ќе биде инверзно поларизирана и таа нема да спроведува, ќе биде закочена, и нема да свети, додека долната црвена диода D₂ ќе биде директно поларизирана и заради тоа ќе спроведува и ќе свети.

г) Со замена на кондензаторот С од 10μF на поголема вредност од 15μF значително ќе се промени времетраењето T_p на излезниот импулс што лесно се гледа од равенката. Имено, заради тоа што во таа равенка се множат отпорноста R и капацитивноста С, јасно е дека зголемувањето на капацитивноста, слично како и на отпорноста (од потточката а), ќе доведе до правопрпорционално зголемување на периодот на времетраењето на импулсот T_p.

Поконкретно, повторно со примена на равенката: $T_p = 1,1 \cdot R \cdot C$

$$T_p = 1,1 \cdot R_{POT} \cdot 15 \cdot 10^{-6} = 16,5 \cdot 10^{-6} \cdot R_{POT}$$

$$(a1) T_p = 16,5 \cdot 10^{-6} \cdot R_{POT} = 16,5 \cdot 10^{-6} \cdot 180 \cdot 10^3 = 2970msec \approx 3sec.$$

$$(a2) T_p = 16,5 \cdot 10^{-6} \cdot R_{POT} = 16,5 \cdot 10^{-6} \cdot 270 \cdot 10^3 = 4455msec \approx 4,5sec.$$

$$(a3) T_p = 16,5 \cdot 10^{-6} \cdot R_{POT} = 16,5 \cdot 10^{-6} \cdot 360 \cdot 10^3 = 5940msec \approx 6sec.$$

д) Евентуалното намалување на напонот на напојување +U_{cc} од 12V на 9V нема да влијае врз времетраењето T_p на излезниот импулс. И овој заклучок произлегува од равенката со која се определува неговиот период T_p. Од неа јасно се гледа дека во таа равенка никаде НЕ фигурира вредноста на напојувањето +U_{cc}.

2. Имајќи ја во вид принципиелната електрична шема на моностабилниот мултивибратор со операциски засилувач претпостави дека во неа се внесени следните елементи: симетрично напојување ±U_{cc}=9V, R₁=47kΩ, а) C₁=0.1μF, б) C₁=0.01μF како и три различни вредности на потенцијалот на инвертирачкиот влез -U_{BB} 1) -U_{BB}= -U_{cc}/3; 2) -U_{BB}= -U_{cc}/2; 3) -U_{BB}= -2U_{cc}/3. За секое ниво од вториот негативен напонски извор -U_{BB} пресметај го времетраењето на импулсот T_p, но при тоа земајќи ги и двете вредности на кондензаторот.

Решение:

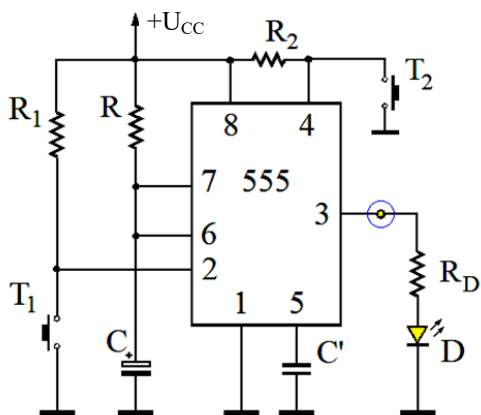
Со примена на равенката: $T_p = R_1 C_1 \ln \frac{|-U_{BB} - (-U_{BB} + 2U_{CC})|}{|-U_{BB} - 0|} = R_1 C_1 \ln \frac{2U_{CC}}{U_{BB}}$

се добива следнава табела за сите барани вредности:

	-U _{BB} = -U _{CC} /3	-U _{BB} = -U _{CC} /2	-U _{BB} = -2U _{CC} /3
2U _{cc} ; U _{BB}	6; ln6=1,79	4; ln4=1,38	3; ln3=1,10
C ₁ =0,1μF	T _p =8,413ms	T _p =6,486ms	T _p =5,150ms
C ₁ =0,01μF	T _p =0,413ms	T _p =0,6486ms	T _p =0,5150ms

3. На излезот од моностабилното коло, е приклучена една жолта светлечка LED диода D. Колото долго време се наоѓа во својата стабилна состојба во која и двата тастери се отпуштени. Вредностите на употребените елементи се: +U_{CC}=9V, R₁=R₂=10kΩ, C'=10nF, C=4,7μF, R=1MΩ, R_D=390Ω. Во моментот t₀=0 се притиска и веднаш се отпушта само тригер-тастерот T₁. Одговори и објасни (а) кога, зошто и колку долго LED-диодата D ќе свети, односно нема да свети; (б) нацртај го временскиот дијаграм на излезниот напон на пинот [3] ако ресет-тастерот T₂ (1) НЕ се притиснува воопшто, (2) ако се притисне во три различни моменти: (1) во t₁=3 sec, односно (2) во t₂=6 sec и (3) во t₃=9 sec. Колкав е напонот на кондензаторот во тие моменти? Која е улогата на тастерот T₂?

(*) Да се реши задачата претпоставувајќи дека на располагање имаме уште еден отпорник $R=1M\Omega$ кој ќе го поврземе а) паралелно б) сериски со отпорникот $R=1M\Omega$, кој има иста вредност.



Решение:

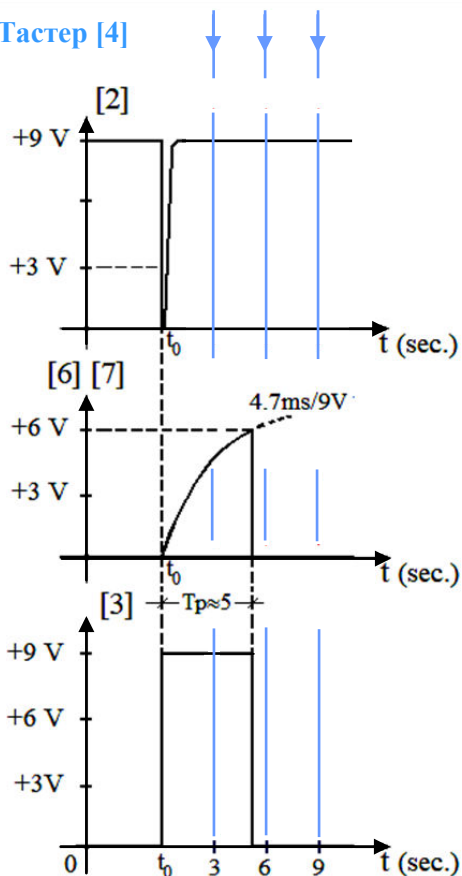
Најнапред ќе го одредиме времетраењето на генерираниот правоаголен импулс на излезниот пин [3] од ИК 555. За таа цел ќе ја искористиме равенката:

$$T_p = 1,1 \cdot R \cdot C$$

За дадените вредности добиваме дека:

$$T_p = 5170 \text{ ms} \approx 5 \text{ sec}$$

Тастер [4]



(а) LED диодата D ќе свети само за време додека трае квазистабилната состојба и тоа за период $T_p \approx 5 \text{ sec}$. Ова е последица од начинот на поврзување на диодата. Имено, анодата на диодата D е поврзана на излезниот пин [3], додека нејзината катода е споена на земја, т.е. на референтно ниво 0V. Ова значи дека диодата ќе биде директно поларизирана, ќе спроведува, а со тоа и ќе свети само ако на излезниот пин [3] се појави високо ниво на напојување што се случува токму само за време на квазистабилната состојба.

(б) На сликата се прикажани временските дијаграми на напоните во карактеристичните точки на даденото коло.

(в) Тастерот T_2 ја ресетира работата на ИК 555 така што на излезот на пинот [3] директно предизвикува појава на ниско ниво од 0V.

Имајќи ги во вид временските облици на напоните може да заклучиме дека:

1) Ако ресет-тастерот T_2 НЕ се притисне воопшто, мултивибраторот најнормално се однесува според дадените графици.

2) Исто така, мултивибраторот најнормално работи и во случаите кога $t_2=6 \text{ sec}$ и $t_3=9 \text{ sec}$ бидејќи квазистабилниот процес завршува за 5 sec и со тоа излезот веќе паднал на 0V;

3) Разликата во функционирањето ќе дојде до израз ако тастерот T_2 се притисне за период $t_1=3 \text{ sec}$ по отпочнување на квазистабилната состојба. Во овој момент таа НЕ е завршена, па излезниот импулс ќе трае само 3 sec, а не 5 sec. Поинаку кажано, со ресет-тастерот T_2 „насилно“ и предвреме се прекинува квазисостојбата и колото „е принудено“ на својот излез на пинот [3] да даде ниско ниво од 0V.

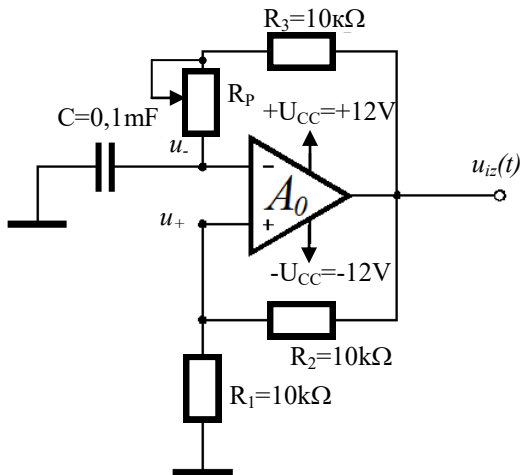
4. На сликата е дадена изведба на астабилно коло со операциски засилувач со симетрично напојување.

а) Да се одреди времетраењето на позитивните и негативните излезни импулси T_{P1} и T_{P2} кои наизменично се генерираат на излезот.

б) Да се пресмета периодата T и фреквенцијата f на правоаголниот биполарен пулсирачки напон $u_{iz}(t)$.

в) Да се нацртаат временските дијаграми на излезниот напон за двете различни вредности на отпорникот во негативната повратна врска R ($R=R_P+R_3$):

1) $R=100k\Omega$, 2) $R=4,7k\Omega$



Решение:

а) Кога излезот се наоѓа на ниво на позитивното напојување, кондензаторот се полни кон $+12V$ додека не го достигне нивото на инвертирачкиот влез од $6V$:

$$u_+(t) = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_{iz}(t) = \frac{10 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3} \cdot 12 = \frac{1}{2} \cdot 12 = 6V$$

потоа на излезот ќе се појави негативното ниво на напојување $-12V$, кондензаторот ќе се празни и полнежот ќе се прераспредели кон ова негативно ниво, потоа се полни во обратна насока, и тоа сè додека не го достигне нивото на инвертирачкиот влез од $-6V$:

$$u_+(t) = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_{iz}(t) = \frac{10 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3} \cdot (-12) = -\frac{1}{2} \cdot 12 = -6V$$

Применувајќи ги равенките за T_{P1} и T_{P2} го пресметуваме времетраењето на излезните импулси:

1) $R=100k\Omega$

2) $R=4,7k\Omega$

$$\tau_1 = R \cdot C = 100 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} = 10ms$$

$$\tau_2 = R \cdot C = 4,7 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} = 0,47ms$$

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{10 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3} = \frac{1}{2} = 0,5$$

$$1) T_{P1} = T_{P2} = T_P = 10 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \frac{1+0,5}{1-0,5} = 10 \cdot 10^{-3} \ln 3 \approx 10 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 10ms$$

$$2) T_{P1} = T_{P2} = T_P = 0,47 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \frac{1+0,5}{1-0,5} = 0,47 \cdot 10^{-3} \ln 3 \approx 0,47 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 0,47ms$$

б) Според равенката за периодата T и фреквенцијата f се добива:

$$1) T = 2 \cdot T_p = 2 \cdot 10 \text{ ms} = 20 \text{ ms}$$

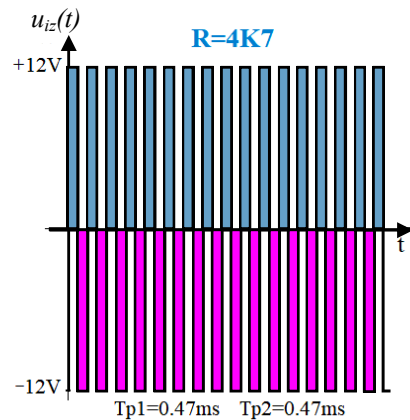
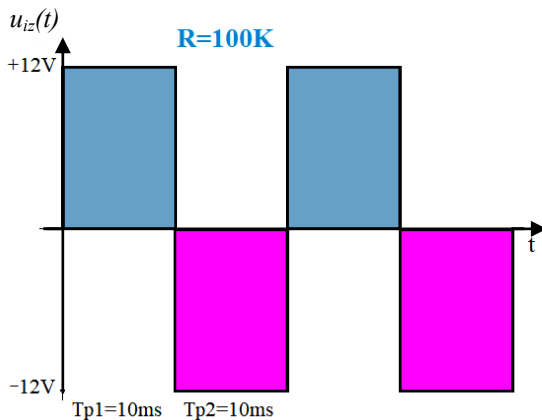
$$2) T = 2 \cdot T_p = 2 \cdot 0,47 \text{ ms} = 0,96 \text{ ms}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{20 \text{ ms}} = 0,05 \text{ kHz} = 50 \text{ Hz}$$

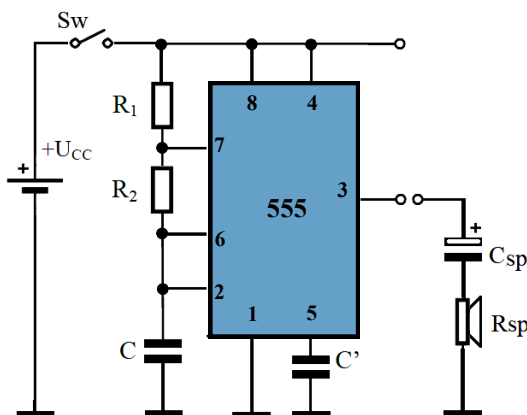
$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,96 \text{ ms}} \approx 1,042 \text{ kHz} = 1,042 \text{ Hz}$$

в) На следните слики се дадени временските дијаграми на излезните напони од астабилното коло со операциски засилувач за различните вредности на отпорникот R : (1) $R=100\text{k}\Omega$, (2) $R=4,7\text{k}\Omega$.

$$\tau_1 \approx 20\tau_2 \Rightarrow T_1 \approx 20 \cdot T_2 \Rightarrow f_2 \approx 20 \cdot f_1$$



Со промена на отпорноста на полнење и празнење на кондензаторот се менува фреквенцијата на осцилирање на астабилното коло.



5. На астабилното коло реализирано со операциски засилувач со симетрично напојување $\pm U_{CC}=12\text{V}$ му се приклучени надворешни елементи со следните вредности: $R_{SP}=8\Omega$ и $C_{SP}=+22\mu\text{F}$. При тоа се добива практична модификација која претставува тон генератор. Да се пресметаат времетраењата на импулсот T_p , паузата T_0 , периодата T , како и вредноста на фреквенцијата f .

$$R_1=R_2=10\text{k}\Omega, C=0,1\mu\text{F}, C'=10\text{nF}.$$

Решение:

Бараните параметри се пресметуваат според изразите:

$$T_p = (R_1 + R_2)C \cdot \ln 2 \approx 0,7(R_1 + R_2)C$$

$$T_0 = R_2C \cdot \ln 2 \approx 0,7R_2C$$

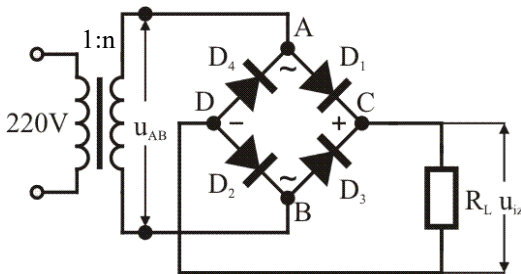
$$T = T_p + T_0$$

$$f = \frac{1}{T}$$

$$T_p=1,40\text{ms} \quad T_0=0,70\text{ms} \quad T=2,10\text{ms} \quad f=475\text{Hz}$$

Извори за напојување

1. На сликата е даден стабилизирани напон со насочувач изведен со Грецов спој. Колку изнесува средната вредност на излезниот напон ако преносниот однос на трансформаторот е 10?



Решение:

За ефективната вредност на напонот U_{AB} се добива:

$$U_{AB} : 220 = 1 : n \Rightarrow U_{AB} = \frac{220}{n} = 22V$$

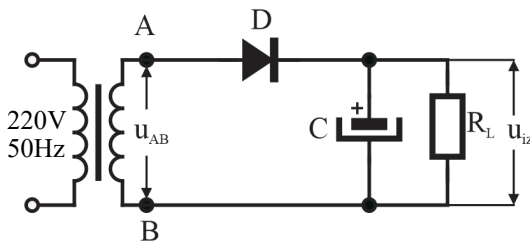
а за неговата максимална вредност:

$$U_{AB_{\max}} = \sqrt{2} \cdot U_{AB} = 1,41 \cdot 22 = 31V.$$

Средната вредност на излезниот напон се добива според изразот:

$$U_{SR} = \frac{2U_m}{\pi} = 0,64U_m = 19,8V.$$

2. Колкава е вредноста на минималната капацитивност на кондензаторот приклучен во колото на полубранов насочувач на еднонасочен напон од 10V и струја низ потрошувачот од 0,1A?



Решение:

За отпорноста на потрошувачот се добива:

$$R_L = \frac{U_{iz}}{I_{RL}} = \frac{10}{0,1} = 100\Omega.$$

Периодата на мрежниот напон изнесува:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 20ms$$

За добивање на полинеарен излезен напон, потребно е да биде задоволен условот:

$$R \cdot C > 5 \cdot T$$

$$C > \frac{5 \cdot T}{R} \Rightarrow C > \frac{5 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{100} = 1000\mu F \quad C_{\min} = 1000\mu F$$

од каде за капацитивноста се добива:

3. Колкава е вредноста на капацитивниот филтер приклучен во колото на целобранов насочувач за да добиеме еднонасочен напон од 10V и струја низ потрошувачот од 0,1A?

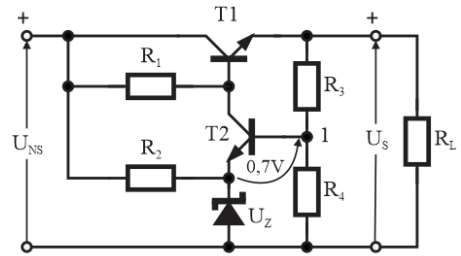
Решение:

Од условот: $C > \frac{2,5 \cdot T}{R} \Rightarrow C_{\min} = 500\mu F$

4. На сликата е даден сериски стабилизатор на еднонасочен напон, применета е Зенер диода со зенеров напон $U_Z=5,3V$. Колкава е вредноста на стабилизираниот напон U_S ?

Одговор:

$$U_Z + U_{BE} = U_S, \quad U_S = 12V.$$



5. За колото од претходната задача, дадени се $R_3=R_4=2K\Omega$, и $U_S=15V$. Колку изнесува напонот на Зенер диодата? (Одговор: 6,8V).

Одговор:

За стабилизираниот напон можеме да запишеме:

$$U_S = 2 \cdot U_1 \Rightarrow U_1 = \frac{U_S}{2} = 7,5V$$

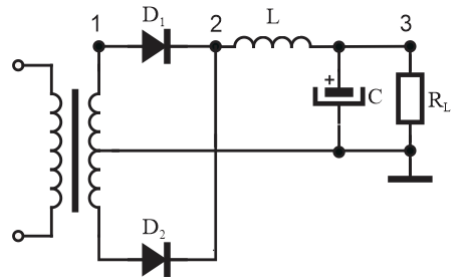
Од друга страна:

$$U_1 = U_Z + U_{BE} \Rightarrow U_Z = U_1 - U_{BE} = 7,5 - 0,7 = 6,8V$$

6. На сликата е прикажан целобранов насочувач со две диоди. Применетите реактивни елементи, калемот и кондензаторот, се со многу големи вредности. Ако амплитудата на влезниот сигнал изнесува $U_{1m}=12V$, да се пресмета вредноста на еднонасочниот напон U_3 . Познато: $R_L=100\Omega$, напон на спроведување на диодата $U_P=0,7V$.

Решение:

Бидејќи калемот има бесконечно голема индуктивност, низ него тече константна (еднонасочна) струја, додека кондензаторот поради бесконечно големата капацитивност, се однесува како отворена гранка. За време на позитивната полупериода спроведува диодата D_1 , а диодата D_2 спроведува за време на негативната полупериода.



Напонот во точката 2 е целобранова насочена синусоида со амплитуда намалена за $U_P=0,7V$. Бидејќи нема пад на напонот на калемот, напонот U_3 е еднаков на еднонасочната вредност на напонот U_2 :

$$U_3 = \frac{2U_{2m}}{\pi} = \frac{2U_{1m}}{\pi} - 0,7 = 6,94V$$

Да се нацртаат брановите форми на напоните во точките А, В и С.

Практични вежби

ЦьвкТлннн вежон

Во кабинетот по електроника ќе се користи соодветна опрема за изведување практичните вежби.



1. Извор за напојување – се користи за напојување на електричните кола, кои се предмет на испитување во вежбите, со еднонасочен напон. Нагониот излезен напон, како и излезната струја, можат да се видат на дисплејот на изворот.



2. Сигнал генератор – генерира различни бранови форми, со нагонување на нивната амплитуда, фреквенција и средна вредност.



3. Осцилоскоп – се користи за визуелно следење на сигналот во временски домен, како и за визуелно следење на функционални зависимости на два сигнала.



4. Универзален инструмент – инструмент со напојување од батерија, кој со конфигурација на приклучоците и соодветна положба на преклопката за мерно подрачје, има функција на волтметар, амперметар и омметар. Треба да се внимава при примена на инструментот како амперметар, во колото да не се поврзува како волтметар.



5. РС-сметач – се користи при компјутерска симулација на работа на електрични кола притоа користејќи соодветен софтвер и компјутерска обработка на добиените резултати.

Потребен алат за реализација на вежбите:



Ученикот треба да го применува стекнатото теоретско знаење во праксата, да стекне одредени вештини и притоа да применува соодветни техники и методи за да дојде до целта – исправна работа на склопот или уредот. Тој треба да користи и одредени математички пресметки за да може, кога за тоа ќе има потреба, да ги одреди вредностите на неисправните елементи и компоненти и да одбере нови за нивна замена. Притоа, секој од нив ќе треба да биде нагоден на таква вредност, која на уредот кој се испитува ќе му обезбеди оптимална функција. За да се постигне тоа и да се стане вешт техничар кој може релативно лесно да ги решава идните реални проблеми со кои ќе се сретне во праксата, ќе треба доста да се ангажира на часовите по практични вежби и успешно да ги изработува поставените вежби, користејќи различни ресурси и средства.

На часовите по практични вежби ученикот ќе користи палета на инструменти и алати како што се на пр. дигиталниот мултиметр, леткум, клешта и сл.

На часовите по практични вежби учениците ќе стекнуваат вистинско „практично“ искуство со примена на вистински електрични и електронски елементи и компоненти, кои ќе ги поставуваат на експериментални прото-плочки (анг. breadboard) или ќе ги лемат на печатени плочки (анг. printed circuit board, PCB). Потоа ќе ги поврзуваат елементите и компонентите со спроводници, или бакарни водови, и притоа по потреба ќе употребуваат реални – вистински инструменти како што се на пр. универзални мултиметри, осцилоскоп, функциски генератор, како и извори за напојување со вредности кои можат да се нагодуваат, соодветни за ваквата намена.

Додека се изработуваат вежбите, треба да се посвети сериозно внимание на упатството и на насоките кои ќе бидат посочени од страна на наставникот. Задолжително да се запишат најважните од нив. По извршените работни задачи, индивидуални набљудувања и мерења исто така ќе треба да се запишат и од нив ќе треба да се извлечат значајни заклучоци.

Што се однесува до вежбите, тие се систематизирани и зададени во практичните вежби, како посебно одвоено множество во рамките на секоја тематска целина.

По завршувањето на секоја вежба потребно е да се предаде извештај кај наставникот, што се состои од опис на активностите кои ги превземал ученикот за време на нејзината изведба. Претставувањето на резултатите треба да биде добро организирано и целосно финализирано.

На крајот од секој извештај, ученикот изготвува краток заклучен дел, во кој се сумираат резултатите и се дискутираат проблемите и решенијата. Целта е да се стигне до фазата на синтеза и да се даде шанса ученикот да разбере кои краткорочни цели се остварени со вежбата на патот до совладување на наставната програма.

ВАЖНО!!!

ЗА ВРЕМЕ НА РЕАЛИЗАЦИЈА НА ПРАКТИЧНИТЕ ВЕЖБИ УЧЕНИЦИТЕ ДА ПОСТАПУВААТ СОГЛАСНО БАРАЊАТА ЗА ПРИМЕНА НА ПРОПИСИТЕ И МКС-СТАНДАРДИТЕ ЗА ЗАШТИТА НА ОКОЛИНАТА И ЗАШТИТАТА ПРИ РАБОТА:

- применува правила за соодветно однесување;
- практикува здрави навики;
- почитува прописи за заштита при работа;
- користи заштитни мерки при работа.

Правила за безбедност на учениците и опремата

Струен удар најчесто настапува при допир на спроводни предмети поврзани на напон на градска мрежа, кој се јавува како последица на случаен дефект на инструмент, невнимателно ракување со опремата и инструментите и непридружување на правилата за безбедност.

- Шуко приклучницата на разводната табла и инструментите се места каде треба максимално да се внимава при вклучување и исклучување на мрежно напојување.

- Неизолирани спроводници да **НЕ** се допираат со рака.

- Инструментите кои се користат за реализирање вежби во електрониката, како осцилоскоп, сигнал генератор и извор за напојување се приклучуваат на мрежен напон. Во случај на дефект, металните неизолирани делови на инструментот можат да бидат под напон од 220 V. Поради тоа, треба да се избегнува допир на неизолираните делови од задната страна на инструментите со голи раце.

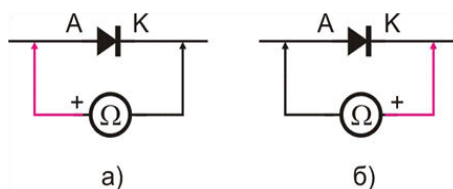
Механички повреди

Повреди со алат или лабораториски прибор – доколку се користи алат (пинцета, одвртувач, клешта) потребно е да се користи внимателно да не дојде до исеченици, гребаници, оштетување на инструментите, лабораторискиот материјал или гардеробата. Истото важи и за сондите на осцилоскопите и инструментите, шестар, линијар и технички молив.

Повреди при пад или удар – се јавуваат како последица на движење низ кабинет за време на вежбите и постоење механички препреки (ранци, јакни, столови) или невнимателно седење. За да се избегнат овие повреди потребно е јакните и ранците да се сместат на однапред одредено место, столовите да се подредат по завршувањето на вежбите, а за време на вежбите учениците да се однесуваат сконцентрирано и професионално.

ПРАКТИЧНА ВЕЖБА БРОЈ 1 ИСПИТУВАЊЕ НА ДИОДИ И ТРАНЗИСТОРИ

1⁰ Исправноста на диодите се испитува со универзален инструмент поставен во омско мерно подрачје. Батеријата во инструментот врши директна или инверзна поларизација на диодата во зависност од поврзаноста на испитните сонди. При испитување на исправна диода со аналоген инструмент, поради нејзиното насочувачко дејство, во една насока омметарот треба да покаже мала отпорност, а во другата многу голема отпорност. Исправната диода има мала отпорност при директна поларизација (слика 1 а)), а многу голема при инверзна поларизација (слика 1 б)) каде мерната сонда приклучена на позитивниот пол на инструментот ја покажува катодата, а сондата на негативниот пол ја покажува анодата.



Слика 1: Испитување исправност на диода

Диодата е пробиена ако при мерењето во двете насоки омметарот покаже мала отпорност, односно диодата е во краток спој. Доколку, пак, и во двете насоки отпорноста е многу голема, тогаш таа е во прекин, односно не е исправна.

Табела 1: Состојба на диодата во зависност од отпорноста и поларизацијата

Состојба на диодата	Отпорност при директна поларизација	Отпорност при инверзна поларизација
Исправна	мала	многу голема
Пробиена	мала	мала
Во прекин	многу голема	многу голема

2⁰ При одредување на изводите на диодата со дигитален универзален инструмент, при директна поларизација, анодата е оној извод кој е приклучен на позитивниот пол на омметарот (црвената сонда), а катодата е приклучена на негативниот пол на омметарот (црната сонда). При инверзната поларизација изводите се приклучени спротивно.

3⁰ Покрај испитувањето на исправноста на диодата и одредувањето на нејзините полови, со помош на дигитален инструмент може да се испита дали диодата е германиумска или силициумска. Преклопникот на инструментот се поставува на посебно подрачје за испитување на полупроводници – dioda test, каде што инструментот го мери падот на напонот на диодата при константна тест струја од околу 1mA. Исправна германиумската диода, при директна поларизација има напон меѓу анодата и катодата U_{AK} од 200 до 400 mV, а силициумската диода од 500 до 700 mV, додека при инверзна поларизација напонот има многу голема вредност, при што инструментот покажува 1 или OL (пречекорување на мерниот опсег).

Изводите на диодата можат да се одредат и преку кружниот прстен на катодата (слика 2).



Слика 2: Означување на катодата

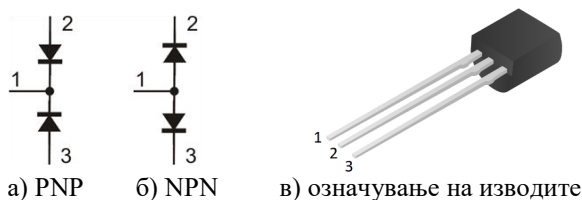
Испитај исправност на пет диоди со универзален инструмент и пополни ја табелата:

Тип на диодата	Отпорност при директна поларизација	Отпорност при инверзна поларизација	Состојба на диодата

- Запиши ги измерените вредности:
- Коментирај ја состојбата на диодата.

Заклучок:

4⁰ Исправноста на биполарниот транзисторот се испитува со помош на еквивалентна шема на транзистор како две диоди со заедничка катода за PNP, или со заедничка анода за NPN видот транзистори (слика 3).



Слика 3: Означување на изводите на транзисторот

Испитувањето се врши со мерење со дигитален мултиметар на мерното подрачје *dioda test*. Се мерат напоните и со споредување на местоположбата на мерните сонди и на добиените вредности се определува видот на транзисторот, како што е објаснето во натамошниот текст.

Изводите на транзисторот не се наредени на стандарден начин за секое куќиште. Затоа е потребно да се одреди распоредот на изводите. Изводите на непознатиот транзистор се обележуваат со 1,2 и 3 (слика 3 в)) и се вршат мерења помеѓу секои два извода во двете насоки. Резултатите се внесуваат во табела како што е табела 2.

Табела 2: Испитување на изводите на транзисторот

+ Мерна сонда (црвена)	- Мерна сонда (црна)	Резултат добиен на инструментот
на извод 2	на извод 3	OL или 1 - (многу голема вредност)
на извод 3	на извод 2	OL или 1 - (многу голема вредност)
на извод 1	на извод 2	660 mV
на извод 2	на извод 1	OL или 1 - (многу голема вредност)
на извод 3	на извод 1	OL или 1 - (многу голема вредност)
на извод 1	на извод 3	665 mV

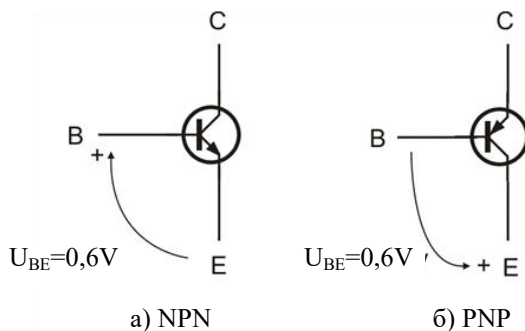
Овие резултати се само еден пример од кој може да се заклучи дека единствените комбинации кои даваат бројни вредности се меѓу изводите 1 и 2 и меѓу изводите 1 и 3. Заедничкиот извод за двете комбинации е изводот 1 и тоа е базата. Помалата бројка меѓу изводот 1 и 2 претставува напон на спроведување на спојот колектор-база, што кажува дека изводот 2 е колектор.

Поголемата бројка меѓу изводот 1 и 3 го претставува напонот на спроведување на спојот емитер-база, што значи дека изводот 3 е емитер.

Црвената мерна сонда (плусот) на инструментот за двете комбинации со измерени вредности е на базата, транзисторот во овој случај е NPN-тип. За PNP-транзистор поларитетот на сондите ќе биде спротивен од овој што е прикажан во табела 2.

Ако при мерењето не се добијат резултати слични на овие, тоа значи дека транзисторот е неисправен.

Испитувањето на типот на транзисторот може да се врши и со мерење на напонот помеѓу базата и емитерот U_{BE} , кога транзисторот е во електрично коло со напојување (слика 4). Ако напонот U_{BE} е позитивен (црвената сонда се приклучува на базата), станува збор за транзистор од NPN-тип, ако, пак, е негативен, транзисторот е од PNP-тип. Инструментот да се постави на напонско подрачје.



Слика 4: Напоните база-емитер за NPN и PNP-транзистори



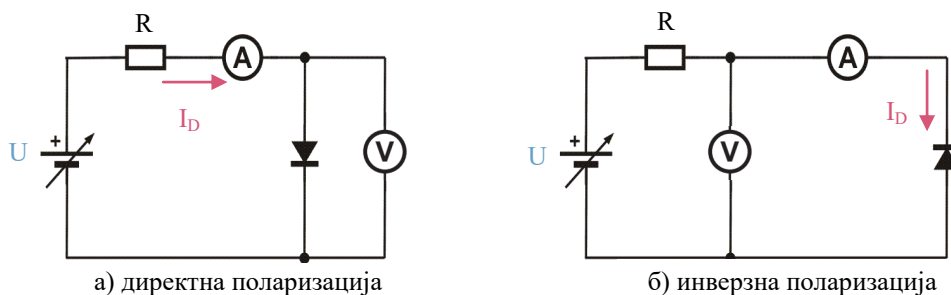
Испитај исправност на два транзистора со универзален инструмент и пополни ги табелите:

+ Мерна сонда (црвена)	- Мерна сонда (црна)	Според резултатите добиени на инструментот за транзистор _____, тој е _____
на извод 2	на извод 3	
на извод 3	на извод 2	
на извод 1	на извод 2	
на извод 2	на извод 1	
на извод 3	на извод 1	
на извод 1	на извод 3	

+ Мерна сонда (црвена)	- Мерна сонда (црна)	Според резултатите добиени на инструментот за транзистор _____, тој е _____
на извод 2	на извод 3	
на извод 3	на извод 2	
на извод 1	на извод 2	
на извод 2	на извод 1	
на извод 3	на извод 1	
на извод 1	на извод 3	

ПРАКТИЧНА ВЕЖБА БРОЈ 2 СНИМАЊЕ СТАТИЧКИ КАРАКТЕРИСТИКИ НА ДИОДИ

За испитување на струјно-напонската карактеристика на диодата, потребно е да се изврши испитување при директна поларизација и при инверзна поларизација на диодата. Колото за испитување содржи еден волтметар за мерење на напонот, еден амперметар за мерење на струјата, еден извор на променлив еднонасочен напон и еден отпорник за ограничување на струјата во колото. Елементите се монтираат на прото-плочка според шемата прикажана на слика 5 а).



Слика 5: Поврзување на полупроводничка диода во кола за снимање на струјно-напонска карактеристика

1⁰ Амперметарот ја мери струјата низ диодата која може да има вредности од редот на mA и A. Со волтметарот го мериме напонот на краевите на диодата кој треба да биде многу мал, најмногу до 2V. Отпорникот R служи за ограничување на струјата низ диодата. Неговата вредност и моќност се пресметуваат според следните равенки:

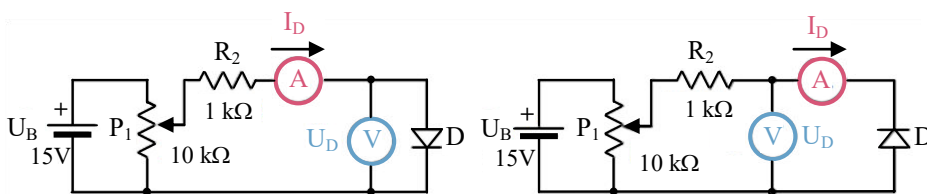
$$R = \frac{U_{max} - U_{Dmax}}{I_{Dmax}} \approx \frac{U_{max}}{I_{Dmax}} \quad \text{и} \quad P_R > R \cdot I_{Dmax}^2$$

2⁰ Со помош на променливиот извор на напон се менува напонот на диодата U_D во мали чекори и за секоја негова вредност на амперметарот ја отчитуваме вредноста на струјата низ диодата I_D . Мерењето се повторува повеќе пати и резултатите се запишуваат во табела. Од пополнетите вредности од табелата за добиените вредности на напоните и струите се црта график во X-Y координатен систем. На X-оската се нанесуваат вредностите на напонот U_D а на Y-оската вредностите на струјата I_D во соодветен размер.

3⁰ Колото за испитување на карактеристиките на диодата при инверзна поларизација е претставено на слика 5 б). Бидејќи повеќето диоди издржуваат голем инверзен напон, а инверзната струја е многу мала, не е потребен отпорник за заштита. Постапката за испитување на карактеристиката на диодата при инверзна поларизација е иста како и при директна. Со променливиот извор го менуваме напонот на диодата кој го отчитуваме на волтметарот, а со амперметарот ја мериме струјата низ диодата која е од редот на μA . Промените на напонот во почетниот момент може да се големи, но кога струјата ќе почне нагло да расте тоа значи дека е достигната вредноста на пробивниот напон. Сега промените на влезниот напон треба да се мали за да не дојде до пробив на диодата, а, сепак, да се одредат уште неколку точки од графикот.

Сите добиени вредности се внесуваат во табела и се црта графикот во инверзниот дел (-X и -Y). Од добиениот график можат да се определат карактеристиките на диодата.

4⁰ За снимање на статичка карактеристика на силициумска диода, користи ги шемите прикажани на слика 6, под а) за директна поларизација на диодата, под б) за инверзна поларизација на диодата.

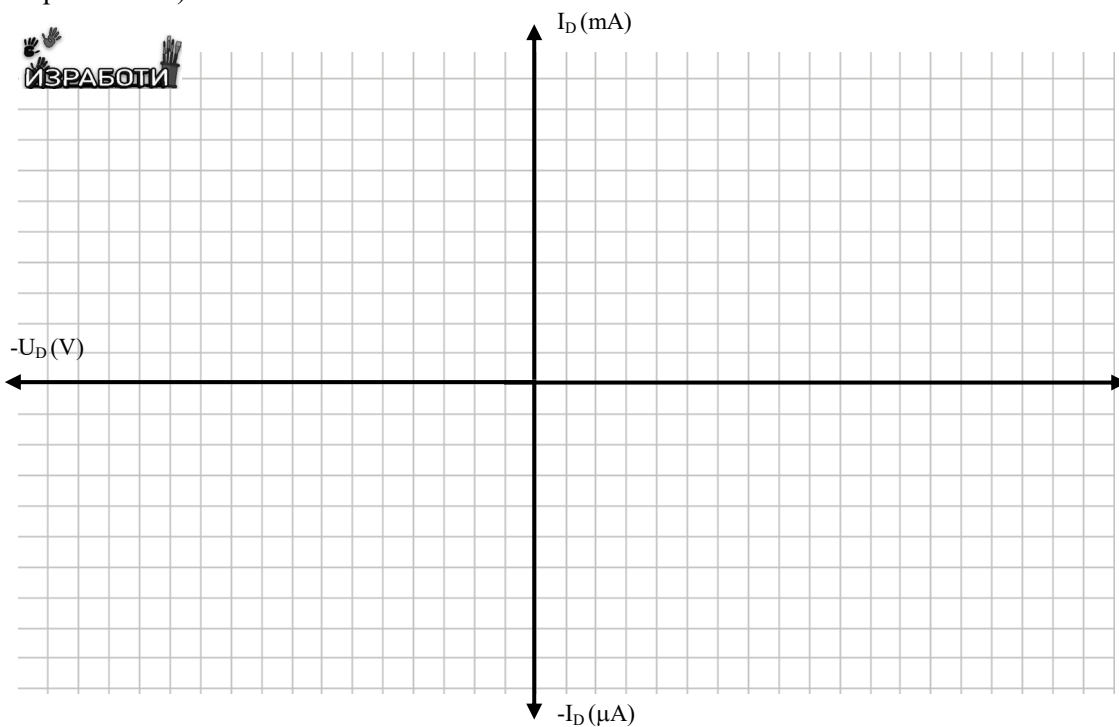


Слика 6: Коло за снимање на статичка карактеристика на диода $I_D=f(U_D)$
 а) во првиот квадрант (директна поларизација) б) во третиот квадрант (инверзна поларизација)

Со промена на положбата на потенциометарот P_1 го нагудуваш напонот на диодата U_D на зададени вредности од табелата и во истата ги запишуваш соодветните вредности на струјата низ диодата измерени со амперметарот (при директна поларизација во mA, додека при инверзна, во μA).

U_D (mV)-директна	0	100	200	300	400	450	500	550	600	650	700
I_D (mA)-директна											
U_D (V)-инверзна	0	1	3	5	7	9	10	11	12	14	15
I_D (μA)-инверзна											

Добиените резултати внеси ги во координатен систем, на x-оската нанеси ги вредностите на еднонасочниот напон U_D кои сами си ги задаваме (независна променлива), додека вредноста на струјата низ диодата на y-оската (зависно променлива).

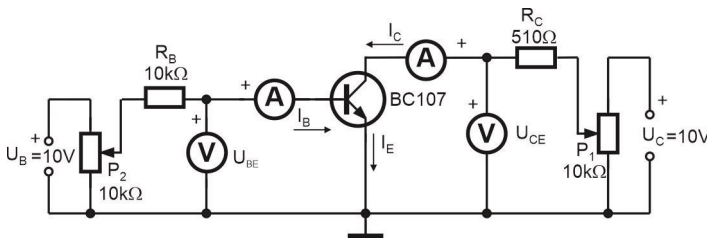


ПРАКТИЧНА ВЕЖБА БРОЈ 3 СНИМАЊЕ СТАТИЧКИ КАРАКТЕРИСТИКИ НА БИПОЛАРНИ ТРАНЗИСТОРИ

Кај транзисторот во спој со заеднички емитер, 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. Се испитуваат:

- излезната карактеристика $I_C = f(U_{CE})$ за $I_B = \text{const.}$;
- преносната карактеристика $I_C = f(I_B)$ за $U_{CE} = \text{const.}$;
- влезната карактеристика $I_B = f(U_{BE})$ за $I_B = \text{const.}$

На слика 7 е прикажано колото за испитување на карактеристиките на транзисторот. Постапката за испитување на статичките карактеристики на транзистор е иста како и испитувањето на карактеристиките на полупроводнички диоди.



Напомена:
Вежбата може да се реализира со друг NF-транзистор со мала моќност!

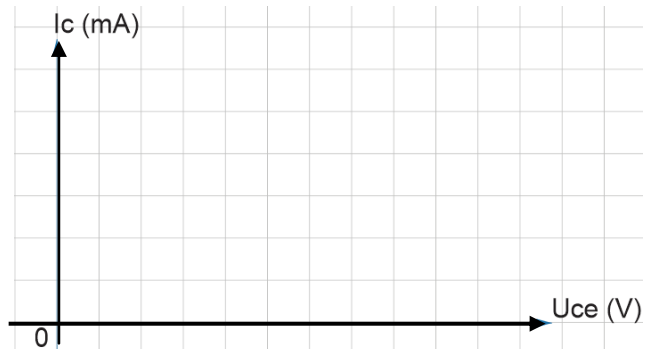
Слика 7: Коло за снимање на статичките карактеристики на NPN-транзистор

1⁰ Првата од карактеристиките се мери така што со потенциометарот P_2 се регулира струјата I_B да биде 0, а со потенциометарот 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. Потоа следува снимање на следната крива, така што со потенциометарот P_2 се регулира да се добие струја I_B од 10 μ A, а целата постапка се повторува како и претходно. Со натамошна промена на струјата I_B на вредности 20 μ A, 30 μ A се добиваат сите останати криви на дијаграмот.

	U_{CE} (V)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_B = 0$	I_C (mA)											
$I_B = 10\mu A$	I_C (mA)											
$I_B = 20\mu A$	I_C (mA)											
$I_B = 30\mu A$	I_C (mA)											



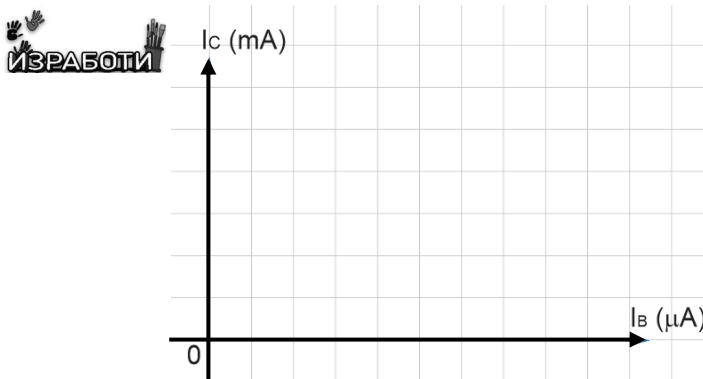
2⁰ Добиените резултати внеси ги во координатниот систем I_C-U_{CE} и со поврзување на точките ќе ја добиеш кривата $I_C = f(U_{CE})$ за $I_B = 0/10/20/30\mu A$.



3⁰ Снимањето на преносните карактеристики може да се прави со истото мерно коло. Напонот U_{CE} се нагодува со потенциометарот P_1 на една вредност, на пример, 2V, потоа со P_2 се менува базната струја во чекори од по 5 μ A и на мили-амперметарот се отчитуваат вредностите на колекторската струја. При тоа, да се води сметка вредноста на напонот U_{CE} да не се промени. Ако се промени, се прави прво корекција на тој напон со P_1 , па потоа се чита вредноста на струјата I_C . Следното мерење е со поголема вредност на U_{CE} , како, на пример, 10V, следното на 15V итн.

	$I_B (\mu A)$	0	5	10	15	20	25	30	35	40
$U_{CE}=2V$	$I_C (mA)$									
$U_{CE}=10V$	$I_C (mA)$									
$U_{CE}=15V$	$I_C (mA)$									

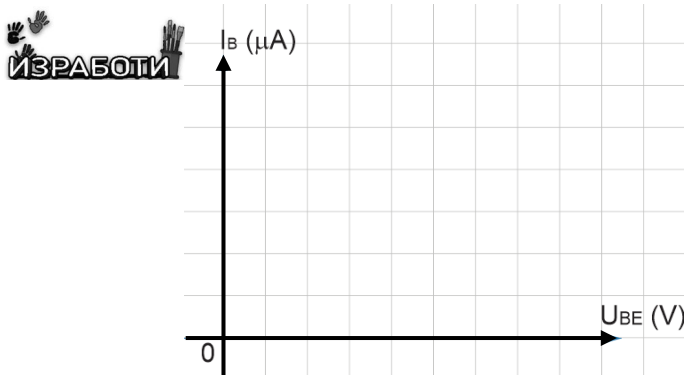
4⁰ Добиените резултати внеси ги во координатниот систем I_C-I_B



5⁰ И влезните карактеристики се снимаат со истото коло така што со потенциометарот P_2 се регулира вредноста на напонот U_{CE} на 2V, а со P_1 се менува напонот U_{BE} , почнувајќи од нула па до 0,7 V и за секој чекор се забележува вредноста на струјата I_B , при што се води сметка напонот U_{CE} да не се промени. Потоа следува снимање на следната крива, така што со потенциометарот P_2 се регулира да се добие напонот U_{CE} од 10V, а целата постапка се повторува како и претходно. Добиените резултати се внесуваат во координатниот систем I_B-U_{BE} и со поврзување на точките се добива кривата $I_B = f(U_{BE})$ за $U_{CE} = \text{const}$.

	$U_{BE} (V)$	0	0,2	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,62	0,65	0,7
$U_{CE}=2V$	$I_B (\mu A)$										
$U_{CE}=10V$	$I_B (\mu A)$										

Добиените резултати внеси ги во координатниот систем I_B-U_{BE}

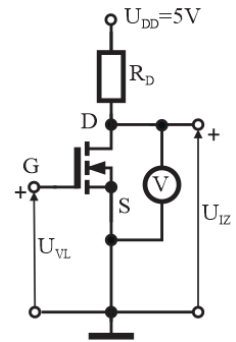


ПРАКТИЧНА ВЕЖБА БРОЈ 4 СНИМАЊЕ ПРЕНОСНА КАРАКТЕРИСТИКА НА УНИПОЛАРНИ MOSFET ТРАНЗИСТОРИ

1⁰ На слика 8 е прикажано коло на инвертор со N-канален MOSFET BS170. Влезниот напон U_{VL} се нагодува на вредности зададени во табелата, додека вредноста на излезниот напон U_{IZ} се отчитува на волметар.

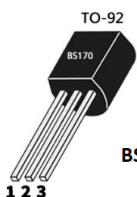
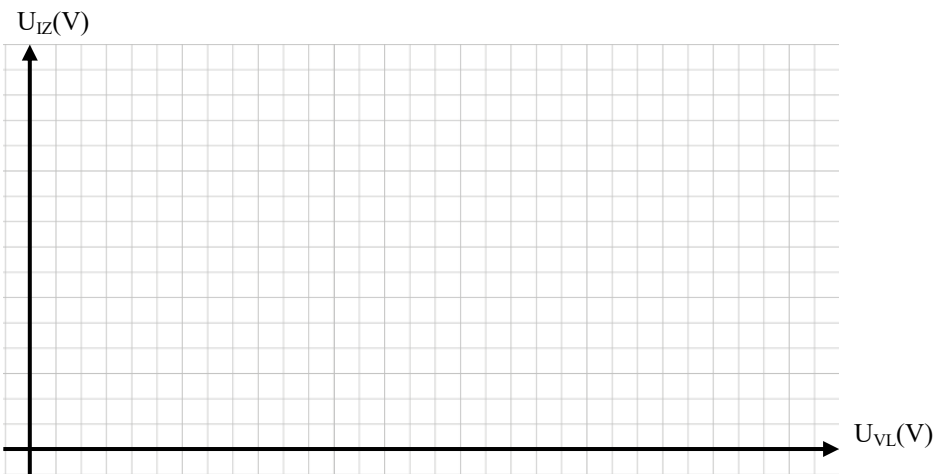
2⁰ Измерените вредности да се запишат во табелата за различни вредности на отпорникот R_D : 100 Ω , 500 Ω , 1k Ω , 10k Ω .

3⁰ На ист график скицирај ги добиените зависимости на излезниот напон од влезниот за секоја вредност на отпорноста на R_D .
Што претставува добиениот график?

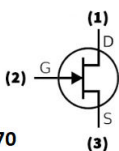


Слика 8: Инвертор со N-канален MOSFET

U_{IN} (V)	0	0,5	1	1,5	2	2,1	2,2	2,3	2,5	2,6	2,9	3	3,5	4	4,5	5
U_{IZ} (V)/ $R_D=100\Omega$																
U_{IZ} (V)/ $R_D=500\Omega$																
U_{IZ} (V)/ $R_D=1k\Omega$																
U_{IZ} (V)/ $R_D=10k\Omega$																



BS 170



4⁰ Од графикот одреди ја вредноста на напонот на спроведување U_T . $U_T = \underline{\hspace{2cm}}$ (V)

Каталожки податоци за N-канален MOSFET со индуциран канал BS 170: $U_{DS(SAT)}=60V$, $I_D=500mA$, $P_{DMAX}=830mW$.

ПРАКТИЧНА ВЕЖБА БРОЈ 5 „И“ и „ИЛИ“ ЛОГИЧКИ КОЛА СО ДВА ВЛЕЗА

Диодното „ИЛИ“ логичко коло ја реализира операцијата логичко собирање. Составено е од две диоди D_1 и D_2 , кои преку прекинувачите А и В се поврзани со извор на напојување U_{cc} и потрошувач претставен со отпорник R. Во зависност од комбинациите на прекинувачите се добиваат четири состојби на поларизација на диодите D_1 и D_2 (слика 9).

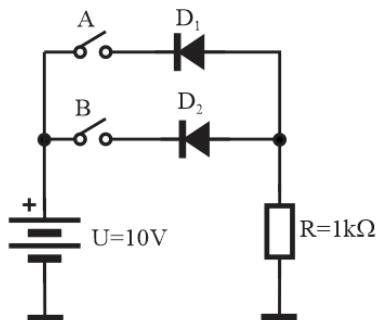
Диодното „И“ логичко коло ја реализира операцијата логичко множење. За разлика од „ИЛИ“ логичкото коло, прекинувачите се поврзани со маса (слика 10).

Потребни елементи:

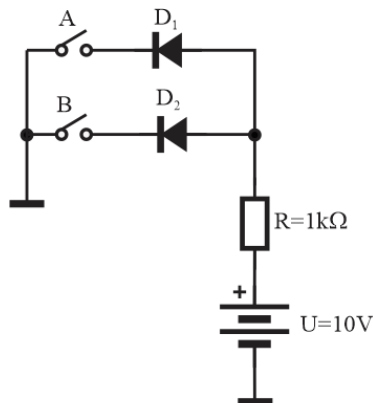
D_1 и D_2 – 2x1N4001 диоди

R $1k\Omega$ – отпорник

$U=10V$ - еднонасочен извор на напон



Слика 9: Електрична шема на ИЛИ логичко коло



Слика 10: Електрична шема на И логичко коло

1⁰ Да се поврзат колата според дадените шеми. (Да се внимава на поларитетот на диодите, катодата е означена со сребрен прстен)

2⁰ Да се измери напонот на краевите на отпорникот R и да се запишат добиените резултати во табела за сите комбинации на прекинувачите А и В.

Табела за слика 9

Влезни состојби		Напон на отпорникот R
A	B	
отворен	отворен	
отворен	затворен	
затворен	отворен	
затворен	затворен	

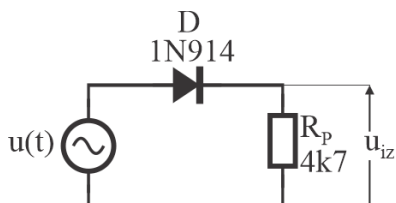
Табела за слика 10

Влезни состојби		Напон на отпорникот R
A	B	
отворен	отворен	
отворен	затворен	
затворен	отворен	
затворен	затворен	

Ако отворен прекинувач го еквивалентираме со логичко „0“ а затворен со логичко „1“, ниско излезно ниво со логичко „0“ а високо со логичко „1“, провери ги резултатите според дефинираните логички операции.

ПРАКТИЧНА ВЕЖБА БРОЈ 6 НАСОЧУВАЧ СО ЕДНА ДИОДА

1⁰ За реализација на насочувач со една диода-полубранов насочувач потребно е да се поврзат елементите според дадената шема на слика 11 независно дали се поставуваат на прото-плочка без лемење или се лемат на печатена плочка.



Слика 11: Коло на полубранов насочувач

Каталошки податоци за 1N914:
 $I_F=300\text{mA}$, $U_{BR}=75\text{V}$, $P_{DMAX}=500\text{mW}$

2⁰ За следење и споредба на напонските облици на влезниот и излезниот напон се користи двоканален осцилоскоп. Влезниот напон се приклучува на едниот канал, додека излезниот на вториот канал. За двата канала да се постави преклопникот V/div на подрачје 500mV по поделок. Добиените осцилограми за влезниот и излезниот напон да се нацртаат во ист координатен систем и да се означат соодветните големини.

3⁰ Влезниот синусен напон се добива од функциски генератор. Да се нагоди функцискиот генератор на фреквенција 100Hz и напон 6V (од врв до врв).

ИЗРАБОТИ

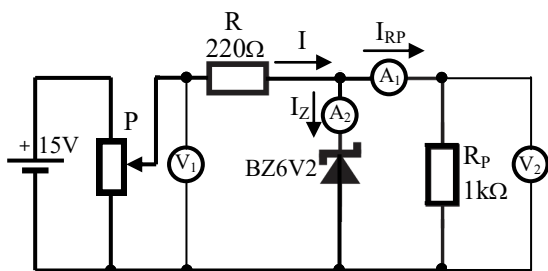


Осцилоскоп претставува електронски инструмент кој овозможува визуелна претстава на периодични, непериодични и случајни бранови форми на електричните сигнали во графичка форма, најчесто како аналитичка функција во зависност од времето. На неговиот екран, во основниот режим на работа се добива осцилограм, тоа е слика на брановата форма на влезната електрична големина. Покрај визуелното следење на бранови форми на електричниот сигнал, со осцилоскоп можат да се мерат: амплитудата, периодата, фреквенцијата, фазната разлика на сигналот; нелинеарните изобличувања; времето на воспоставување на импулсни сигнали и напонски скокови; на индиректен начин може да се мери и еднонасочна и наизменична струја.

Осцилоскопите можат да бидат со еден или со два електронски млаза. Со двомлазен-двоканален осцилоскоп може да се одредува релативен однос меѓу два сигнали кои имаат врска еден со друг.

ПРАКТИЧНА ВЕЖБА БРОЈ 7 СТАБИЛИЗАТОР НА НАПОН СО ЗЕНЕР ДИОДА

1⁰ За реализација на стабилизатор на напон со Зенер диода потребно е да се поврзат елементите според дадената шема на слика 12 независно дали се поставуваат на прото-плочка без лемење или се лемат на печатена плочка.



Слика 12: Коло на стабилизатор на напон со Зенер диода

2⁰ На влез на колото се приклучува извор на еднонасочен напон од 15V, со потенциометарот P се менува вредноста на напонот U_1 од 0V до 15V со чекор од 1V, додека на излез е приклучен потрошувач R_P чиј напон се мери со волтметарот V_2 . Со мили-амперметарот A_1 се мери струјата низ потрошувачот а со A_2 струјата низ Зенер диодата. Да се запишат измерените вредности на инструментите во дадената табела.

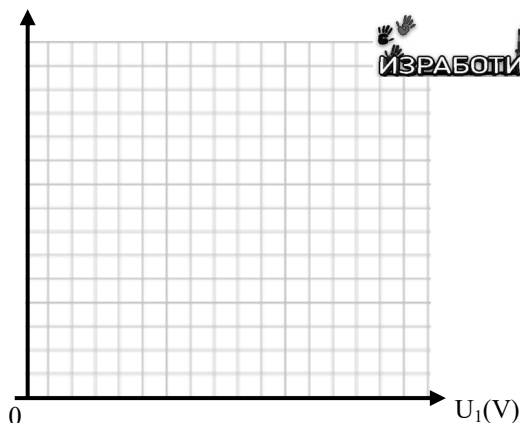
U_1 (V)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
U_{RP} (V)															
I_{RP} (mA)															
I_Z (mA)															

3⁰ Нацртај ја зависноста на излезниот напон, излезната струја и струјата низ Зенер диодата од влезниот напон според добиените резултати од мерењата!

4⁰ Одреди ја минималната вредност на влезниот напон за која ова коло работи како стабилизатор на напон!

Каталожски податоци за DZ6V2: во подрачје на пробив $U_{MIN}=5,89V$, $U_{MAX}=6,6V$, $P_{DMAX}=225mW$.

Ако максималната моќност на дисипација на оваа диода изнесува $P_{DMAX}=225mW$ колкав е максималниот влезниот напон за кој Зенер диодата нема да прегори?



5⁰ При фиксиран влезен напон на 15V, да се менува отпорноста на потрошувачот со вредности зададени во табелата а со волтметарот да се мерат вредностите на излезниот напон.

R (kΩ)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	3	5
U_{RP} (V)												

6⁰ Одреди ја минималната вредност на отпорноста на потрошувачот за која ова коло работи како стабилизатор на напон!

ПРАКТИЧНА ВЕЖБА БРОЈ 8 ПРОЕКТИРАЊЕ ЗАСИЛУВАЧ СО ЗАЕДНИЧКИ ЕМИТЕР

Чекори на реализација:

1⁰ Првиот чекор е избор на транзистор, нашиот избор е NPN-транзистор BC107. За избраниот транзистор да се одредат карактеристиките користејќи онлајн каталог (datasheet – на пример: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/21963/STMICROELECTRONICS/BC107.html>). Еднонасочниот напон за напојување на колекторот се избира помал од максимално дозволеният напон U_{CEmax} (каталожка вредност 45V). Избираме напојување од 12V ($U_{CC}=12V$). Потоа го одредуваме напонот на отпорникот за стабилизација U_{RE} . За овој напон да нема влијание на засилувањето, неговата вредност се избира од 10 до 30% од напонот U_{CC} , избираме $U_{RE}=2V$. Бидејќи најповолна положба на работната точка е на средина на работната права, за напонот колектор-емитер во работната точка U_{CEM} би се добила вредност $U_{CEM} = U_{CC}/2=6V$. Поради присуството на отпорникот R_E , напонот U_{CEM} се одредува од:

$$U_{CEM} = \frac{U_{CC} - U_{RE}}{2} = \frac{12 - 2}{2} = 5V$$

Според големината на падот на напонот на отпорникот R_C :

$$U_{RC} = U_{CC} - U_{CE} - U_{RE} = 12 - 5 - 2 = 5V$$

вредноста на отпорникот R_C се движи во граници од 0,5 до 5k Ω , така што за отпорникот R_C ја избираме вредноста 2k Ω .

За одредување на вредноста на колекторската струја во работната точка ќе ја користиме релацијата:

$$I_{CEM} = \frac{U_{CEM}}{R_C} = \frac{5}{2 \cdot 10^3} = 2,5mA$$

Вредноста на отпорникот R_E ја одредуваме на тој начин што земаме дека

$$I_E \approx I_C = 2,5mA:$$

$$R_E = \frac{U_{RE}}{I_E} = \frac{2}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 0,8k\Omega \quad \text{Избираме каталожка вредност } R_E = 820\Omega.$$

Од каталогот ја читаме вредноста на $h_{fe}=110$, со која ја пресметуваме големината на базната струја:

$$I_B = \frac{I_C}{h_{fe}} = \frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{110} = 22,7\mu A$$

За напонот на базата ја добиваме вредноста: $U_B = U_{RE} + 0,7 = 2,7V$

Вредноста на отпорниците за поларизација на базата R_1 и R_2 , се одредуваат по претпоставка дека низ нив тече многу поголема струја од базната, така што може да се смета дека $I_1 \gg I_B$, за промената на базната струја да не влијае на поларизацијата на базата. Ќе претпоставиме дека:

$$I_1 = 5 \cdot I_B = 5 \cdot 22,7 \cdot 10^{-6} = 113,5\mu A$$

Од изразот: $U_{CC} = (R_1 + R_2)I_1 \Rightarrow R_1 + R_2 = \frac{U_{CC}}{I_1} = \frac{12}{113,5 \cdot 10^{-6}} = 105,7k\Omega$

Вредноста на отпорникот R_2 ја одредуваме од напонот на базата:

$$R_2 = \frac{U_B}{I_1} = \frac{2,7}{113,5 \cdot 10^{-6}} = 23,7k\Omega$$

Од каталожките вредности за отпорници ја одбираме вредноста $24k\Omega$.
Отпорникот R_1 го одредуваме од разликата:

$$R_1 = 105,7 \cdot 10^3 - 24 \cdot 10^3 = 81,7k\Omega \quad \text{Избираме каталожка вредност } R_1=82k\Omega.$$

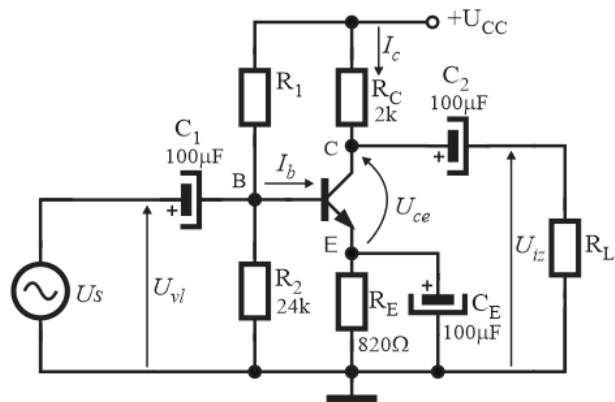
Електролитските кондензаторите за спрега C_1 и C_2 се избираат така што нивната реактанса X_C е доволно помала од влезната отпороност на засилувачот или која било отпороност на потрошувачот. Затоа се избираат кондензатори со поголема капацитивност, од редот на десетици μF .

Електролитскиот кондензаторот C_E исто така треба да има мала реактанса X_{CE} , за наизменичниот сигнал да не поминува низ отпорникот R_E . Ова практично би се постигнало ако е исполнет условот:

$$X_{CE} = \frac{1}{\omega C_E} \leq \frac{1}{10} R_E = \frac{1}{10} 0,82 \cdot 10^3 = 82\Omega$$

Во нашиот случај ќе ги земеме сите кондензатори со вредност од $100\mu F$.

Електрична шема за реализација

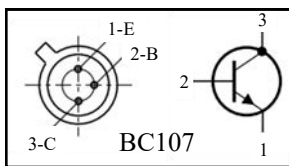


Слика 13: Електрична шема на засилувач во спој со заеднички емитер

2⁰ Добиените елементи да се монтираат на прото-плочка според дадената шема на засилувачот (слика 13)!

Да се внимава на редоследот на изводите на транзисторот при монтирање на прото-плочката и печатената плочка (слика 14)!

Да се внимава на поларитетот на електролитскиот кондензатор, на куќиштето на негативниот приклучок е означен со вертикална сива лента на која е запишан знакот „-“ (слика 15).



Слика 14: Распоред на изводите на транзисторот



Слика 15: Означување на електролитскиот кондензатор

3⁰ Со универзален инструмент да се измери еднонасочниот напон U_{CE} и колекторската и базната струја.

$$U_{CE} = \text{_____}, I_C = \text{_____}, I_B = \text{_____}.$$

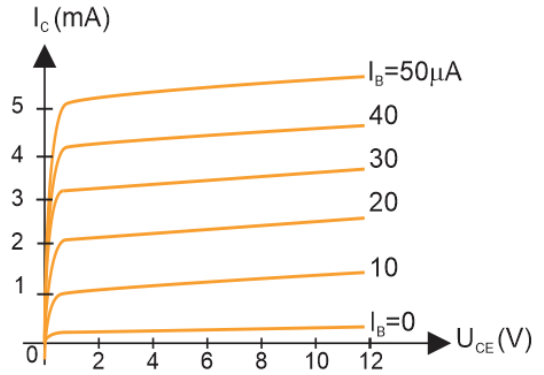
4⁰ На излезните катактеристики да се нацрта работната права!
 Крајните точки на работната права се одредуваат од нејзината равенка:

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

За $I_C=0$ за U_{CE} се добива: _____

За $U_{CE}=0$ за I_C се добива: _____

5⁰ Да се одреди положбата на работната точка M!



6⁰ Да се изработи монтажна шема потребна за изработка на печатена плочка.

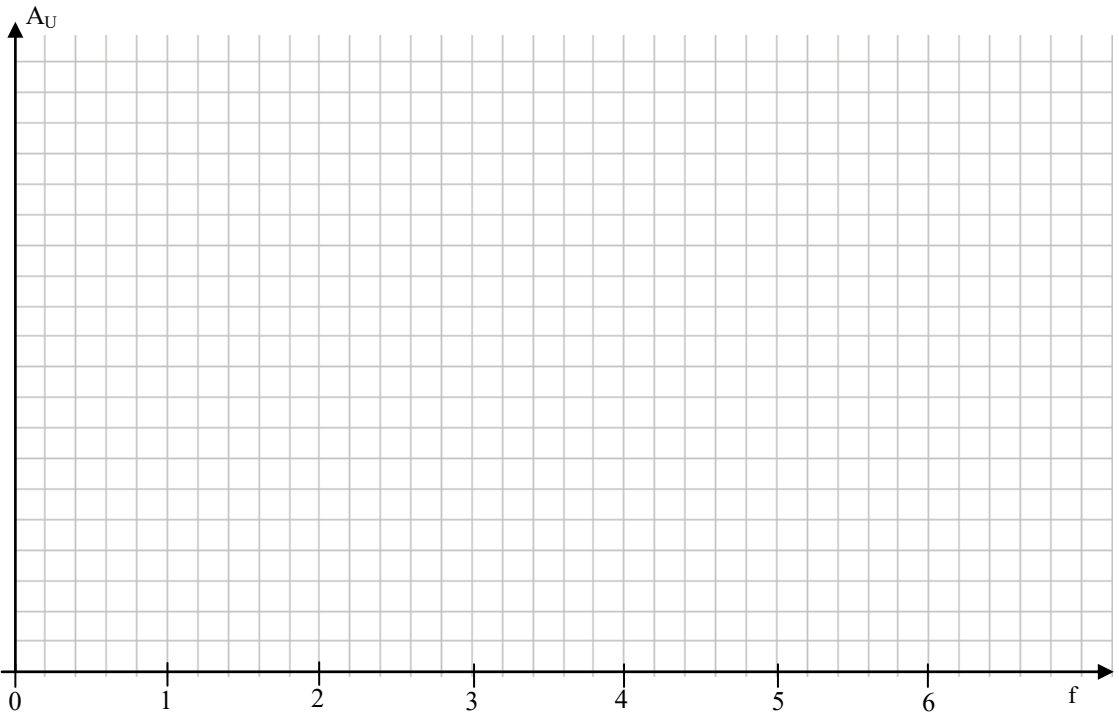
7⁰ Да се изработи печатена плочка, да се монтираат и да се залемат елементите според дадената шема.

8⁰ Да се приклучи тон генератор на влез на засилувачот. Да се нагоди вредноста на влезниот напон на 10mV. Да се менува фреквенцијата според зададените вредности во табелата и да се измери соодветната вредност на излезниот напон. Резултатите да се запишат во табелата. Да се пресмета напонското засилување.

f (kHz)	0,02	0,05	0,1	0,3	0,5	1	10	50	100	150	200
log (f)	1,3	1,7	2	2,5	2,7	3	4	4,7	5	5,2	5,3
U_{iz} (V)											
$A_U = U_{iz}/U_{v1}$											

9⁰ Да се нацрта зависноста на засилувањето од фреквенцијата.

ИЗРАБОТИ



ПРАКТИЧНА ВЕЖБА БРОЈ 9 ЗАСИЛУВАЧ СО НЕГАТИВНА ПОВРАТНА ВРСКА

Доколку во колото на емитерот во шемата на засилувачот во спој со заеднички емитер од слика 13 (практична вежба број 8), не се поврзе кондензаторот C_E паралелно со отпорникот R_E , се остварува негативна повратна врска. Низ отпорникот R_E ќе протече наизменичната компонента на емитерската струја, притоа постои пад на напон на неговите краеве U_{RE} :

$$U_{RE} = R_E I_E \approx R_E I_C$$

Влезниот напон U_{vl} во колото од слика 11 беше еднаков на напонот база-емитер U_{BE} , но сега тој е намален за напонот на отпорникот R_E :

$$U_{vl} = U_{BE} + R_E I_E$$

Коефициентот на повратната спрега β покажува колкав дел од излезниот сигнал се враќа на влез. Бидејќи колекторската струја е излезна струја, за излезниот напон се добива:

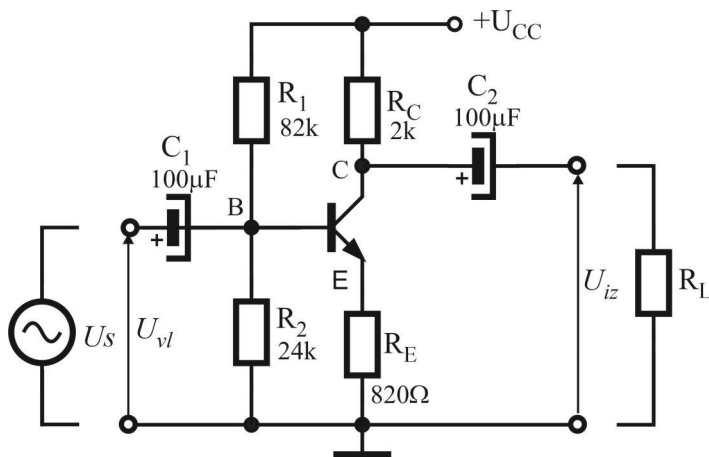
$$U_{iz} = -R_C I_C$$

а повратниот сигнал е напонот на отпорникот R_E , за коефициентот на повратна спрега се добива:

$$\beta = \frac{U_{RE}}{U_{iz}} = \frac{R_E \cdot I_C}{-R_C \cdot I_C} = -\frac{R_E}{R_C}$$

Од последниот израз е евидентно дека коефициентот на повратна спрега β зависи само од вредностите на отпорностите R_E и R_C .

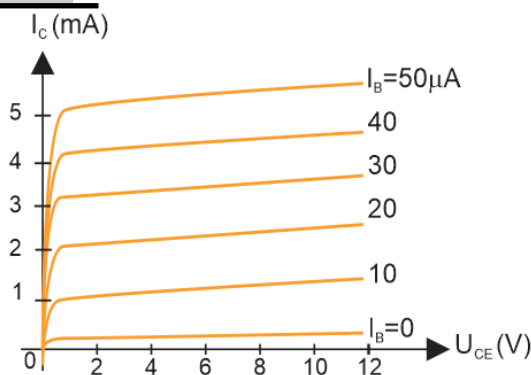
Електрична шема за реализација



Слика 16: Електрична шема на засилувач со негативна повратна врска

¹⁰ Елементите да се монтираат на прото-плочка според дадената шема на слика 16. Да се внимава на редоследот на изводите на транзисторот при монтирање на прото-плочката и печатената плочка (слика 14)!

Да се внимава на поларитетот на електролитските кондензатори, на куќиштето на негативниот приклучок е означен со вертикална сива лента на која е запишан знакот „-“ (слика 15).



Слика 17: Излезни карактеристики

2⁰ На излезните катактеристики да се нацрта работната права (слика 17)! Крајните точки на работната права се одредуваат од нејзината равенка:

$$U_{CC} = \underline{\hspace{2cm}}$$

За $I_C=0$ за U_{CE} се добива: $\underline{\hspace{2cm}}$

За $U_{CE}=0$ за I_C се добива: $\underline{\hspace{2cm}}$

3⁰ Да се одреди положбата на работната точка M!

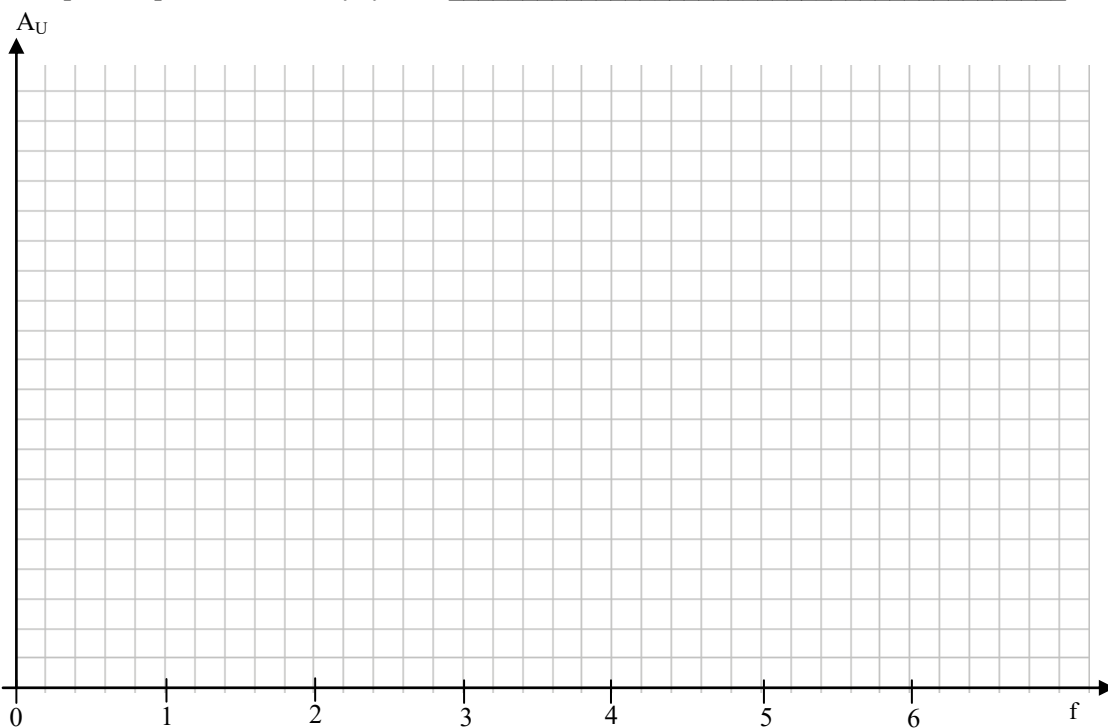
4⁰ Да се изработи монтажа шема потребна за изработка на печатена плочка.

5⁰ Да се изработи печатена плочка, да се монтираат и да се залемат елементите според дадената шема.

6⁰ Да се приклучи тон генератор на влез на засилувачот. Да се нагоди вредноста на влезниот напон на 10mV. Да се менува фреквенцијата според зададените вредности во табелата и да се измери соодветната вредност на излезниот напон. Резултатите да се запишат во табелата. Да се пресмета напонското засилување.

f (kHz)	0,02	0,05	0,1	0,3	0,5	1	10	50	100	150	200
log (f)	1,3	1,7	2	2,5	2,7	3	4	4,7	5	5,2	5,3
U_{iz} (V)											
$A_U = U_{iz}/U_{v1}$											

7⁰ Да се нацрта зависноста на засилувањето од фреквенцијата и да се спореди со графикот на фреквенциската карактеристика на истиот засилувач без негативна повратна врска. Што заклучуваш? $\underline{\hspace{2cm}}$.



ПРАКТИЧНА ВЕЖБА БРОЈ 10 ЛИНЕАРНО КОЛО СО ОПЕРАЦИСКИ ЗАСИЛУВАЧ

Краток опис на колото:

Колото претставува инвертирачки засилувач со засилување кое зависи само од односот на вредностите на двата отпорника:

$$A = -\frac{R_2}{R_1}$$

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. Засилениот излезен сигнал е во против фаза со влезниот.

Потребни елементи:

ОЗ $\mu A741$ – операциски засилувач

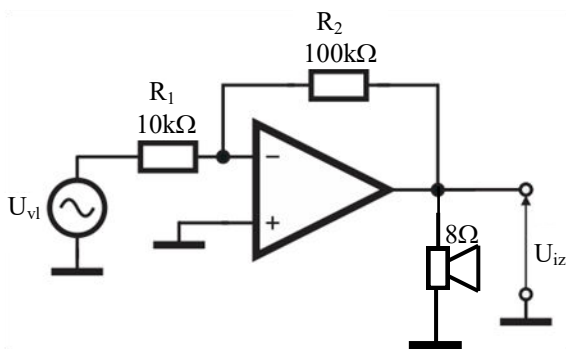
R_1 $10k\Omega$ – отпорник

R_2 $100k\Omega$ – отпорник

Звучник - $8\Omega/1W$

Напојување од $10V$

Електрична шема за реализација



Слика 18: Електрична шема на инвертирачки операциски засилувач

Да се нацрта пин дијаграм на ОЗ $\mu A741$

1⁰ На прото-плочка да се монтираат елементите според зададената шема на слика 18.

Користејќи каталог за операцискиот засилувач $\mu A 741$ да се нацрта редоследот на изводите! На кој извод се приклучува напојувањето? _____

2⁰ Да се приклучи тон генератор на влез на засилувачот. Да се нагоди вредноста на влезниот напон на $10mV$ и фреквенција $1kHz$. Да се измери излезниот напон U_{iz} и да се пресмета напонското засилување.

$U_{iz} =$ _____, $A =$ _____ = _____.

3⁰ Да се изработи монтажна шема потребна за изработка на печатена плочка.

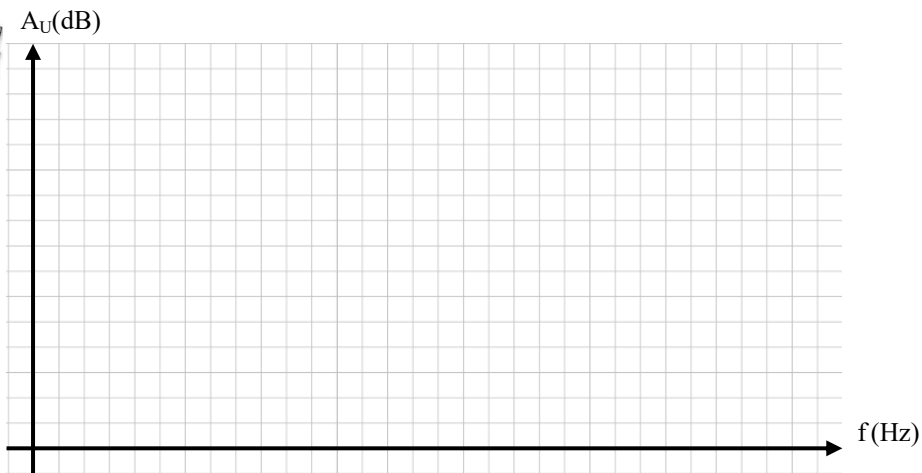
4⁰ Да се изработи печатена плочка, да се монтираат и да се залемат елементите според дадената шема.

5⁰ Да се приклучи тон генератор на влез на засилувачот. Да се нагоди вредноста на влезниот напон на $10mV$. Да се менува фреквенцијата според зададените вредности во табелата и да се измери соодветната вредност на излезниот напон. Резултатите да се запишат во табелата. Да се пресмета напонското засилување.



f (Hz)	1	4	8	10	20	40	80	100	200
U_{iz} (V)									
$A_U = U_{iz}/U_{v1}$									
A_U (dB) = $20 \log U_{iz}/U_{v1}$									

6⁰ Да се нацрта фреквенциска карактеристика - зависност на засилувањето од фреквенцијата.



7⁰ Од графикот да се одреди долната и горната гранична фреквенција (фреквенции на кои засилувањето опаѓа за 3dB). $f_d = \underline{\hspace{2cm}}$ Hz, $f_g = \underline{\hspace{2cm}}$ Hz.

8⁰ Да се пресмета пропусниот опсег B на засилувачкото коло (разлика на граничните фреквенции). $B = f_g - f_d = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$ Hz

9⁰ На осцилоскоп да се следат излезниот и влезниот напон и да се нацртаат на ист график. Што заклучуваш?



Заклучок:

ПРАКТИЧНА ВЕЖБА БРОЈ 11

ОПЕРАЦИСКИ ЗАСИЛУВАЧ СО РЕГУЛАЦИЈА НА ЗАСИЛУВАЊЕТО

Краток опис на колото:

Операцискиот засилувач LM386 е наменет за градба на аудиозасилувачи со мали влезни напони. Вредноста на неговото засилување кое е во опсег од 20 до 200 пати, може да се менува со додавање на надворешни елементи во основната шема на аудиозасилувачот. На слика 19 а) е дадена шема на аудиозасилувач со вградено засилување од 20 пати.

Потребни елементи:

- ОЗ LM386 – операциски засилувач
- $R_1=10\Omega$ – отпорник
- $C_1=47\text{nF}$ - керамички кондензатор
- $U=(9-12)\text{V}$ - напон за напојување
- $R_p=4\Omega, 0,25\text{W}$ - потрошувач звучник
- $VR1=10\text{k}\Omega$ – потенциометар
- $C_2=220\mu\text{F}$ - електролитски кондензатор
- $C_3=100\text{nF}$ - керамички кондензатор

Дополнителни елементи

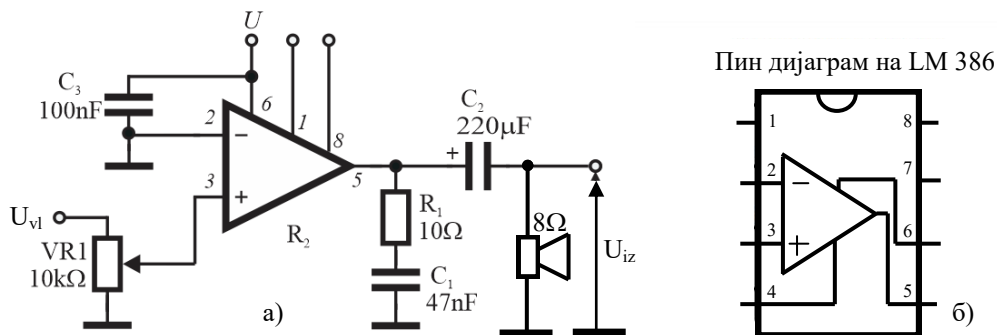
- $C_3=10\mu\text{F}$ - електролитски кондензатор
- $R_3=680\Omega$ – отпорник

Електрична шема за реализација

Користејќи каталожки податоци за LM 386 одреди го распоредот на изводите!

Распоред на изводите на LM 386:

1. Приклучок за промена на засилувањето
2. Инвертирачки влез
3. Неинвертирачки влез
4. Негативен приклучок за напојувањето (маса)
5. Излез
6. Позитивен приклучок за напојувањето
7. Приклучок за премостување (не е употребен во оваа шема)
8. Приклучок за промена на засилувањето



Слика 19: а) Електрична шема на засилувач со регулација на засилувањето б) пин дијаграм на LM 386

ИЗРАБОТИ

1⁰ На прото-плочка да се монтираат елементите според зададената шема на слика 19 а).

2⁰ Да се приклучи тон генератор на влез на засилувачот. Да се нагоди вредноста на влезниот напон на 10mV и фреквенција 1kHz. Да се измери излезниот напон U_{iz} и да се пресмета напонското засилување.

$U_{iz} = \underline{\hspace{2cm}}$, $A = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}$.

3⁰ Со поврзување на електролитскиот кондензатор C_3 од $10 \mu\text{F}$, позитивниот пол на извод 1 а негативниот на извод 8 на операцискиот засилувач, засилувањето на колото ќе изнесува 200.

4⁰ Да се изработи монтажна шема потребна за изработка на печатена плочка за колото со додаден електролитски кондензатор меѓу изводите 1 и 8.

5⁰ Да се изработи печатена плочка, да се монтираат и да се залемат елементите според дадената шема.

6⁰ Да се приклучи тон генератор на влез на засилувачот. Да се нагоди вредноста на влезниот напон на 10mV . Да се измери излезниот напон U_{iz} и да се пресмета напонското засилување.

$$U_{iz} = \underline{\hspace{2cm}}, A = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}.$$

7⁰ Со поврзување на сериска врска на отпорникот R_3 од $1,2\text{k}\Omega$ и електролитскиот кондензатор C_3 од $10 \mu\text{F}$, засилувањето на колото ќе изнесува 50.

8⁰ Да се приклучи тон генератор на влез на засилувачот. Да се нагоди вредноста на влезниот напон на 10mV . Да се измери излезниот напон U_{iz} и да се пресмета напонското засилување.

$$U_{iz} = \underline{\hspace{2cm}}, A = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}}.$$

9⁰ Засилувањето на колото може да се менува и со движење на лизгачот на потенциометарот.

Како зависи засилувањето од големината на приклучениот отпор од потенциометарот?

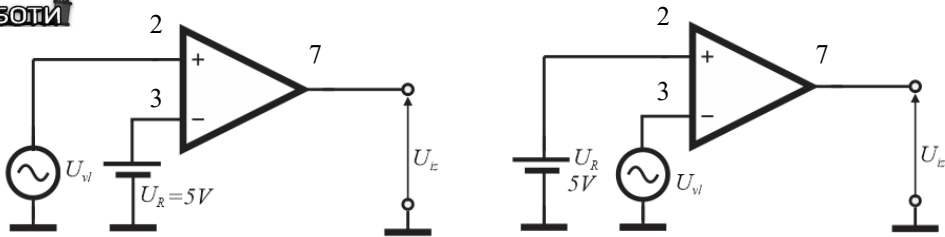
Заклучок:

ПРАКТИЧНА ВЕЖБА БРОЈ 12 КОМПАРАТОРСКО КОЛО СО ОПЕРАЦИСКИ ЗАСИЛУВАЧ

Краток опис на колото: Напонски компаратор е коло кое споредува два напона. Излезниот напон може да има една од двете можни вредности зависно од тоа кој од двата влезни напона е поголем. При реализација со операциски засилувач може да работи во отворена јамка (без повратна спрега) или да користи позитивна повратна спрега. И во двете изведби излезниот напон одговара на позитивниот или на негативниот напон на заситување на засилувачот. Влезниот напон може да се доведе на инвертирачкиот или на неинвертирачкиот влез, со тоа можни се две изведби на компаратор со операциски засилувач.

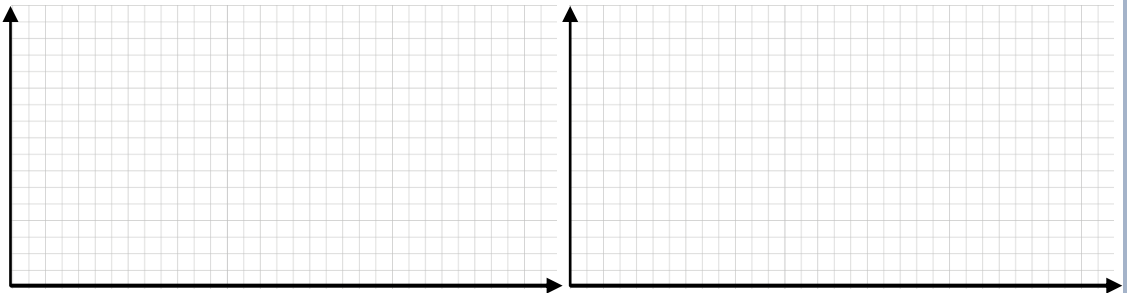
1⁰ На монтажна плочка да се реализираат двете изведби (слика 20) користејќи еден од операциските засилувачи LM 311, LM 393 или LM 339. Како влезен напон да се земе сигнал од функциски генератор со различни форми.

ИЗРАБОТИ

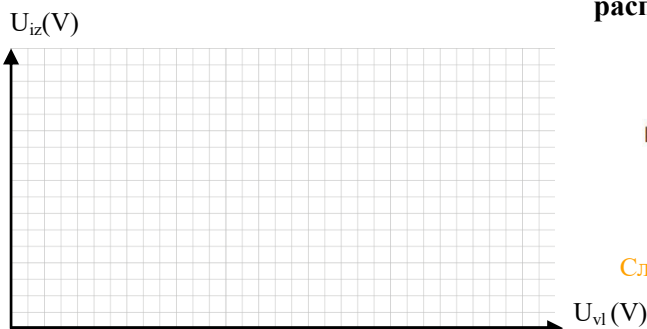


Слика 20: Напонски компаратори со операциски засилувач

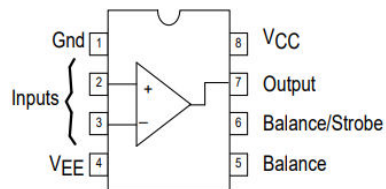
2⁰ За двете изведби да се нацрта брановата форма на влезниот и излезниот сигнал.



3⁰ Според добиените резултати од графикот, да се нацрта преносна карактеристика на колото.



**Да се поврзе колото LM 311 според
распоредот на неговите пинови!**



Слика 21: Пин дијаграм на LM 311

ПРАКТИЧНА ВЕЖБА БРОЈ 13 НАПОНСКИ КОМПАРАТОР СО LM 311

Краток опис на колото:

Колото претставува напонски компаратор кој го споредува влезниот напон доведен на инвертирачкиот или неинвертирачкиот влез на операциското коло со референтниот еднонасочен напон U_R . LED диодата ќе го сигнализира моментот на издначување на влезниот напон со референтниот. Отпорникот R служи за ограничување на струјата низ LED диодата.

Потребни елементи:

LM 311 – напонски компаратор

U_R – извор на еднонасочен напон

R $1k\Omega$ – отпорник

LED диода

Да се извадат каталошки податоци за LM 311!

Електрична шема за реализација на компараторското коло (слика 22)

Да се внимава на распоредот на изводите на интегрираното коло при монтирање на печатена плочка!

Распоредот на изводите на интегрираното коло LM 311 е прикажан на слика 21 (гледано од горната страна, спротивно од изводите).

1⁰ Да се изработи монтажна шема потребна за изработка на печатена плочка.

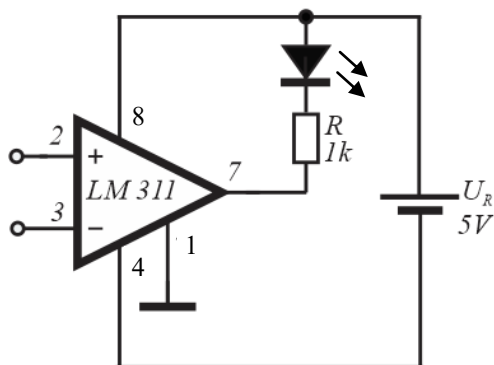
2⁰ Да се изработи печатена плочка, да се монтираат и да се залемат елементите според дадената шема.

3⁰ Да се приклучи тон генератор на инвертирачкиот влез на LM 311.

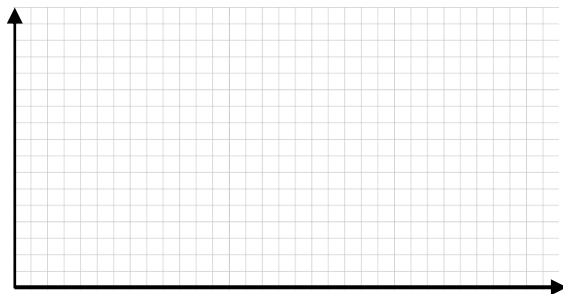
4⁰ Со осцилоскоп да се снимат брановите форми на излезниот напон (пин 7) и на влезниот напон (пин 3).

5⁰ Вежбата да се реализира со приклучување на тон генераторот на неинвертирачкиот влез на LM 311.

6⁰ Да се нацртаат снимените напони.



Слика 22: Електрична шема на напонски компаратор со LM 311



Која е разликата при двете изведби? Што согледуваш? Што ќе се случи ако референтниот напон има вредност 12V?

ПРАКТИЧНА ВЕЖБА БРОЈ 14 RC-ОСЦИЛАТОР СО ВИНОВ МОСТ

Краток опис на колото:

RC-осцилаторот со Винов мост спаѓа во групата хармониски осцилатори бидејќи на неговиот излез се добиваат сигнали со синусоиден облик. Како засилувачки елемент се користи операциски засилувач а позитивната повратна врска се реализира со RC-елементи. Повратната врска го побудува колото и овозможува самоодржување на осцилациите со кружна фреквенција $\omega_0=1/RC$.

При проектирање на колото потребно е да биде задоволен условот:

$$\frac{R_4}{R_3} > \frac{R_2}{R_1} + \frac{C_2}{C_1} \quad \text{Провери дали условот е задоволен за дадената шема!}$$

Потребни елементи:

ИК 741 – напонски стабилизатор за +12V

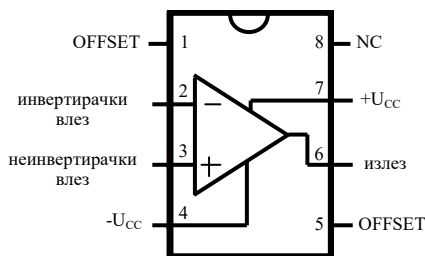
C_1 и C_2 0,1 μ F – кондензатори со променлива капацитивност

R_1, R_2 и R_3 10k Ω – отпорници

R_4 21,5k Ω – отпорник

Да се извадат каталожки податоци за потребните елементи!

Пин дијаграм на ИК 741

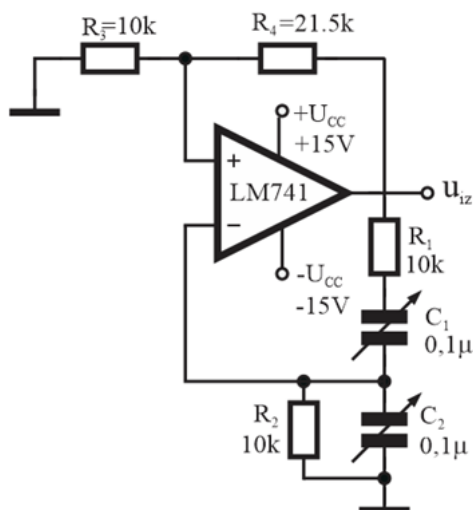


Да се внимава на распоредот на изводите на интегрираното коло при монтирање прото-плочка и на печатена плочка!

Распоредот на изводите на интегрираното коло ИК 741 е прикажан на слика 23 (гледано од горната страна, спротивно од изводите).

Слика 23: Распоред на изводите на ИК 741

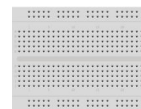
Електрична шема за реализација на осцилаторното коло (слика 24)



Слика 24: Електрична шема на осцилатор со Винов мост

1⁰ Да се допише формулата за резонантната фреквенција на осцилаторот и да се одреди нејзината вредност.

$$\omega_0 = \frac{1}{LC} = \frac{1}{LC} = \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} =$$



2⁰ На прото-плочка да се монтираат елементите според зададената шема.

3⁰ Со осцилоскоп да се сними брановата форма на излезниот напон и да се измери периодот на добиените осцилации.

$$T = \text{_____} \text{ s}$$

4⁰ Според добиената вредност за периодата, пресметај ја фреквенцијата на осцилирање и спореди ја со пресметаната фреквенција под точка 1.

$$f_0 = \text{_____} \text{ Hz}$$

Забелешка: _____



ИЗРАБОТИ

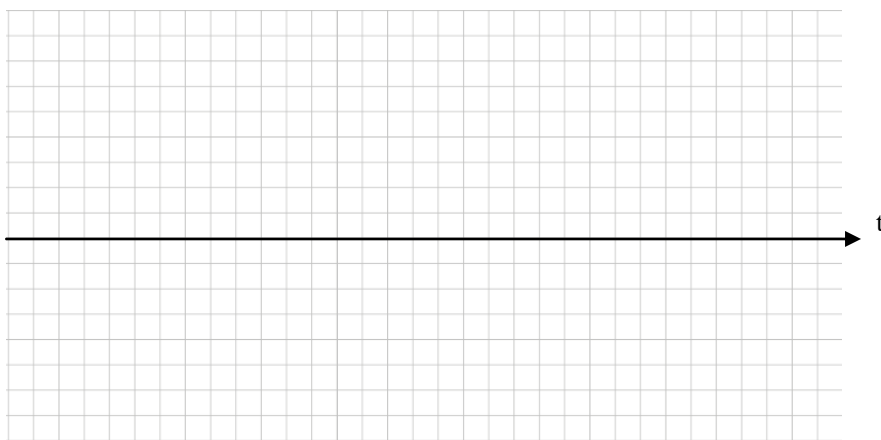
5⁰ Да се изработи монтажна шема потребна за изработка на печатена плочка.

6⁰ Да се изработи печатена плочка, да се монтираат и да се залемат елементите според дадената шема.

7⁰ Со осцилоскоп да се снимат брановите форми на излезниот напон и напонот на неинвертирачкиот влез и да се покаже дека сигналите се во фаза.

8⁰ Да се нацртаат снимените напони.

$u_{iz}(t)$
 $u_i(t)$



Заклучок:

ПРАКТИЧНА ВЕЖБА БРОЈ 15 АСТАБИЛНО КОЛО СО ОПЕРАЦИСКИ ЗАСИЛУВАЧ

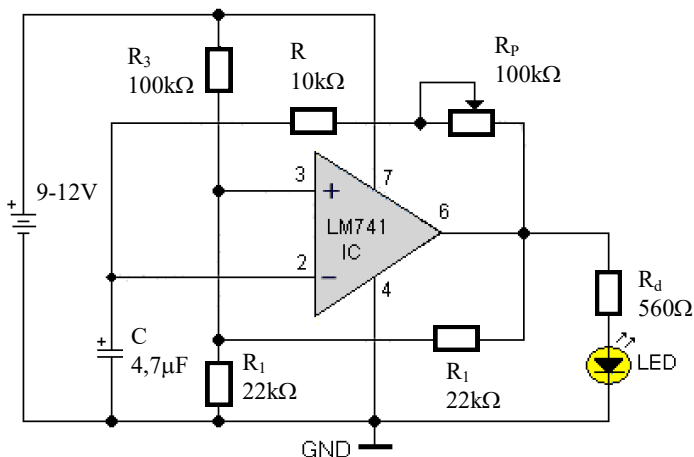
Електричната шема на практичната реализација на моностабилното коло со реален ОПЗ, поточно со ИК 741, која е прикажана на слика 25, популарно се нарекува „трепкач“ бидејќи светлечката LED диода непрекинато се пали и гаси. Оваа шема претставува дополнителна модификација на астабилното коло реализирано со операциски засилувач 741 бидејќи се напојува само од еден извор кој може да биде во опсегот од 9V до 12V. Покрај ова, од неинвертирачкиот влез до напојувањето е приклучен уште еден отпорник $R_3=100k\Omega$ со кој е овозможено подолго полнење и празнење на кондензаторот C, а со тоа и добивање на фреквенција од околу 1Hz што обезбедува гледање на трепкањето на светлечката LED диода. Фреквенцијата на трепкање може да се нагодува со менување на положбата на потенциометарот $R_p=100k\Omega$. Светењето на LED диодата може да стане поинтензивно доколку отпорникот со кој се ограничува струјата што тече низ неа се намали од 560Ω на 470Ω .

Внимавајте! Струјата која протекува низ диодата НЕ смее да биде поголема од 25mA. Оптималната вредност е помеѓу 10 и 20 mA, или стандардно околу 15mA.

Електрична шема за реализација на астабилното коло (слика 25)

Потребни елементи:

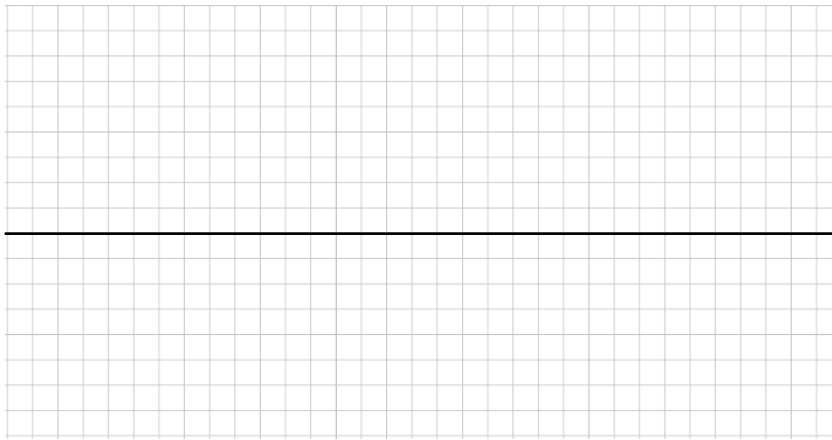
LM 741 – интегрирано коло
 C $4,7\mu F$ – кондензатор
 C₂ 10nF – електролитски кондензатор
 R₁ и R₂ 22k Ω – отпорници
 R₃ 100k Ω – отпорник
 R_d 560 Ω – отпорник
 R 10k Ω – отпорник
 R_p 100k Ω – потенциометар
 LED диода жолта
 9-12V – извор на еднонасочен напон (батерија)



Слика 25: Електрична шема на трепкач

- 1⁰ На прото-плата да се монтираат елементите според зададената шема.
- 2⁰ Едниот канал на осцилопот треба да го поврзеш на излезниот пин [6] од ИК на операцискиот засилувач 741, додека другиот канал на неговиот инвертирачки влез на пинот [2] во кој се спојуваат отпорникот R и кондензаторот C.
- 3⁰ Со помош на осцилопот треба да ги снимеш и нацрташ брановите форми на излезниот напон $u_{Iz}(t)$ на пинот [6] и напонот на кондензаторот C $u_C(t)$ на инвертирачкиот влез на операцискиот засилувач, пин [2]. При тоа нагоди три различни вредности на потенциометарот и тоа од (1) $R_p=20k\Omega$, (2) $R_p=50k\Omega$ и (3) $R_p=80k\Omega$ така што всушност ќе извршиш три снимања со цртање.
- 4⁰ Одреди го времетраењето на излезните импулси и нивната периода внимателно гледајќи ги графициите на осцилопот.

$u_{iz}(t)$
 $u_C(t)$



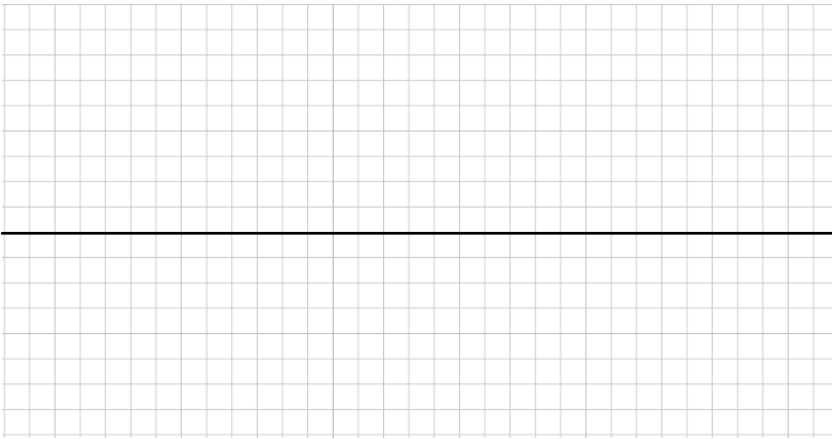
(1) $R_p=20k\Omega$

$T_{P1} = \underline{\hspace{2cm}}$

$T_{P2} = \underline{\hspace{2cm}}$

$T = \underline{\hspace{2cm}}$

$u_{iz}(t)$
 $u_C(t)$



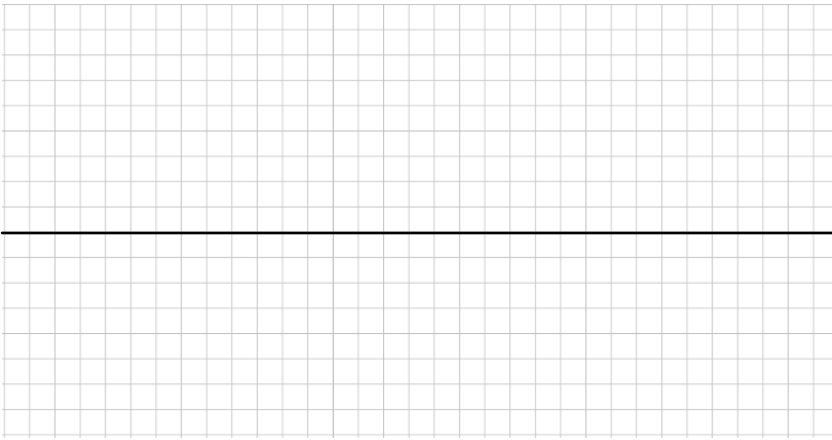
(2) $R_p=50k\Omega$

$T_{P1} = \underline{\hspace{2cm}}$

$T_{P2} = \underline{\hspace{2cm}}$

$T = \underline{\hspace{2cm}}$

$u_{iz}(t)$
 $u_C(t)$



(3) $R_p=80k\Omega$

$T_{P1} = \underline{\hspace{2cm}}$

$T_{P2} = \underline{\hspace{2cm}}$

$T = \underline{\hspace{2cm}}$

5⁰ Пресметај ги истите времетраења според равенките кои ти се познати од теоретските часови.

(1) $T_{P1} = \underline{\hspace{2cm}}$ $T_{P2} = \underline{\hspace{2cm}}$ $T = \underline{\hspace{2cm}}$

(2) $T_{P1} = \underline{\hspace{2cm}}$ $T_{P2} = \underline{\hspace{2cm}}$ $T = \underline{\hspace{2cm}}$

(3) $T_{P1} = \underline{\hspace{2cm}}$ $T_{P2} = \underline{\hspace{2cm}}$ $T = \underline{\hspace{2cm}}$

6⁰ Пополни ги дадените табели и за двете вежби споредувајќи ги резултатите од практично реализираните вежби со оние од равенките наведени во лекцијата.

(1) $R_p=20\text{ k}\Omega$ $R=R_p+R=30\text{ k}\Omega$	T_{P1}	T_{P2}	T	Коментар
Пресметана T_p				
Измерена T_M				
Отстапување *)				

(2) $R_p=50\text{ k}\Omega$ $R=R_p+R=60\text{ k}\Omega$	T_{P1}	T_{P2}	T	Коментар
Пресметана T_p				
Измерена T_M				
Отстапување *)				

(3) $R_p=80\text{ k}\Omega$ $R=R_p+R=90\text{ k}\Omega$	T_{P1}	T_{P2}	T	Коментар
Пресметана T_p				
Измерена T_M				
Отстапување *)				

*) Отстапување [%] = $[(T_p - T_M)/T_p] \times 100$

Електричната шема дадена на слика 26 претставува уште една реализација на „трепкач“ но со две диоди кои наизменично се палат и гасат. Со дадените вредности на елементите фреквенцијата на осцилирање ќе биде околу 1Hz што значи дека секоја секунда ќе светне по една диода.

7⁰ Да се изработи монтажна шема потребна за изработка на печатена плочка.

8⁰ Да се изработи печатена плочка, да се монтираат и да се залемат елементите според дадената шема.

9⁰ Да се повторат чекорите од анализата на претходниот трепкач.

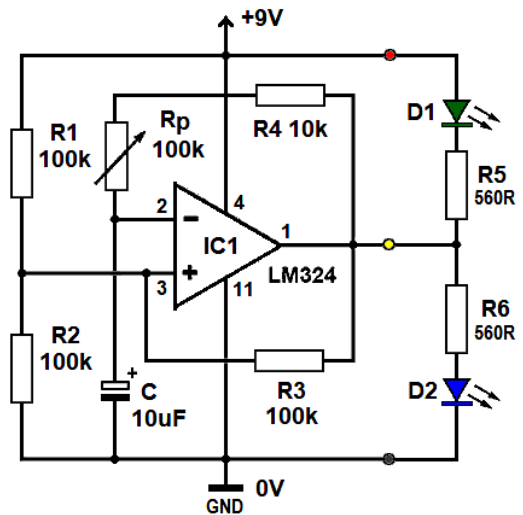
Да се користат каталожки податоци за интегрираното коло LM324.

Користи ги следните изрази за пресметка:

$$\tau = (R_4 + R_p)C = RC$$

$$T_p = \tau \ln \frac{|9V - 3V|}{|9V - 6V|} = RC \ln 2 \quad T_0 = \tau \ln \frac{|0V - 6V|}{|0V - 3V|} = RC \ln 2 \quad T = T_p + T_0 = 2RC \ln 2$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2RC \ln 2}$$



Слика 26: Електрична шема на астабилно коло со LM324

ПРАКТИЧНА ВЕЖБА БРОЈ 16 МОНОСТАБИЛНО КОЛО СО ИК 741

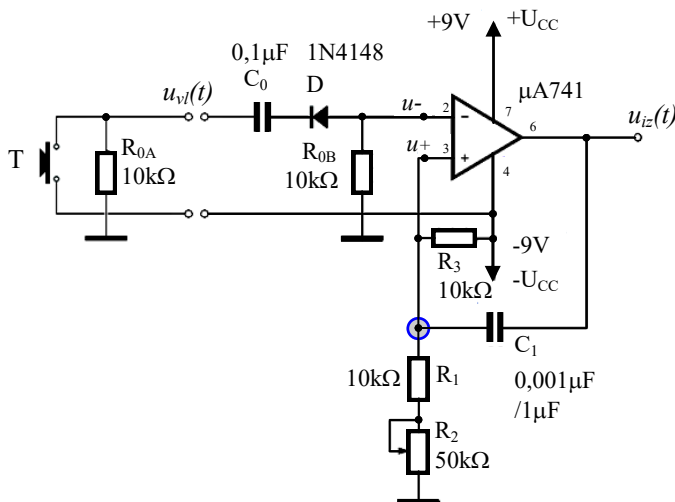
Краток опис на колото:

Електричната шема на практичната реализација на моностабилното коло со реален операциски засилувач, поточно со линеарно интегрирано коло 741, е прикажана на слика 27. На основната принципиелна шема се извршени следните дополнувања:

- За да се елиминира нежелното влијание на позитивниот шилест импулс кој ќе се појави веднаш по диференцирањето на побудниот негативен импулс, во серија со кондензаторот C_0 е поврзана диодата D која го пропушта само негативниот “шилест”, а позитивниот го блокира;
- За да се извршат повеќе испитувања отпорникот R_1 е заменет со сервиската комбинација од два отпорници: еден фиксен R_1 од $10\text{k}\Omega$ и потенциометар R_2 од $50\text{k}\Omega$. Со потенциометарот може да се нагодува времето на полнење на кондензаторот, поточно временската константа τ , а со тоа и времетраењето на излезниот позитивен импулс;
- За да се избегне употребата на дополнителен негативен извор $-U_{BB}$ е применет отпорникот $R_3=10\text{k}\Omega$ кој е поврзан од неинвертирачкиот влез на 741 до неговото негативно напојување -9V . Со ова се формира напонски делител R_3 и (R_1+R_2) кој овозможува потенцијалот на неинвертирачкиот влез да се нагодува преку влијанието на вредноста на потенциометарот R_2 во равенката за напонскиот делител:

$$u_+ = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_3} (-U_{CC})$$

Електрична шема за реализација на моностабилното коло



Слика 27: Електрична шема на моностабилното коло со интегрирано коло 741

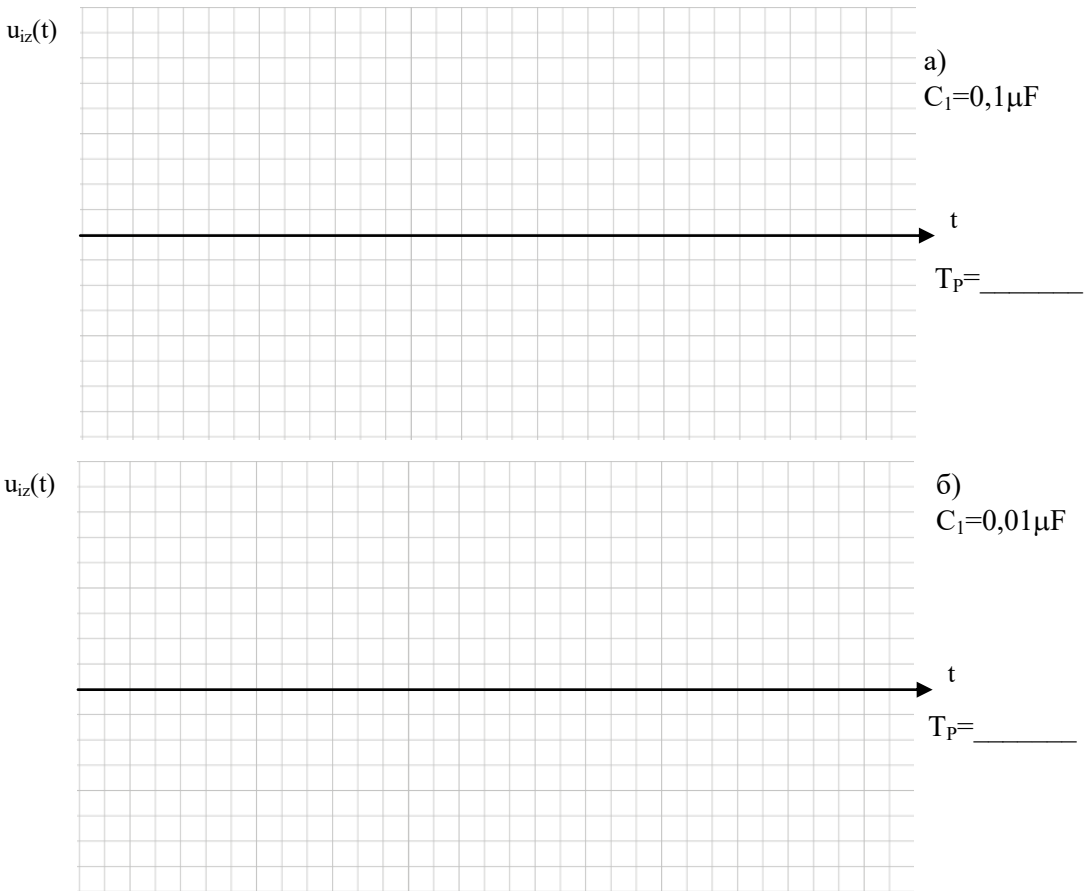
1⁰ На прото-плочка да се монтираат елементите според дадената електрична шема.

2⁰ Да се поврзе едниот канал на осцилоскопот со излезот од колото (пин 6). Со менување на положбата на потенциометарот R_2 да се извршат шест мерења за различни вредности на потенцијалот во точката на неинвертирачкиот влез u_+ и тоа за 1) $u_+ = -U_{cc}/3 = 3V$; 2) $u_+ = -U_{cc}/2 = 4.5V$; 3) $u_+ = -2U_{cc}/3 = 6V$, но земајќи два различни кондензатори: а) $C_1 = 0,1\mu F$ и б) $C_1 = 0,01\mu F$. По секое мерење да се одреди времетраењето на импулсот T_p , да се пополни табелата во која треба да се споредат резултатите добиени со теоретската анализа.

3⁰ Да се изработи монтажна шема потребна за изработка на печатена плочка.

4⁰ Да се изработи печатена плочка, да се монтираат и да се залемат елементите според дадената шема.

5⁰ Истите мерења да се извршат и на изработената печатена плочка.



$C_1 = 0,1\mu F$	$-U_{BB} = -U_{cc}/3 = -3V$	$-U_{BB} = -U_{cc}/2 = -4,5V$	$-U_{BB} = -2U_{cc}/3 = -6V$
Пресметани:			
Измерени:			
Остапување:			

$C_1 = 0,01\mu F$	$-U_{BB} = -U_{cc}/3 = -3V$	$-U_{BB} = -U_{cc}/2 = -4,5V$	$-U_{BB} = -2U_{cc}/3 = -6V$
Пресметани:			
Измерени:			
Остапување:			

ПРАКТИЧНА ВЕЖБА БРОЈ 17 АСТАБИЛНО КОЛО СО ВРЕМЕНСКО ИК 555

Интегрираното коло 555 функционира како астабилно коло ако на него се поврзат два отпорника и еден кондензатор како на слика 28. Со додавање елементи на основната конфигурација (1) се добиваат различни примени на астабилниот мултивибратор (2) и (3). Практичната модификација (2) претставува тестер за ИК 555, кој ја прикажува исправноста на ИК со наизменично трепкање на двете LED диоди со еднакви временски интервали. Со поврзување на звучник и електролитски кондензатор (3) на основната конфигурација (1), се добива тон генератор.

Потребни елементи:

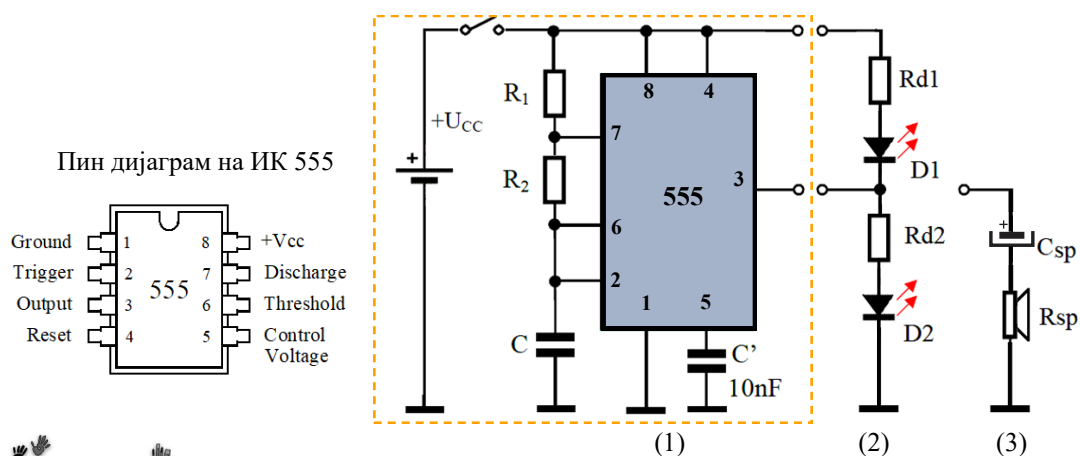
	Вежба 1: униполарен такт НФ-сигнал	Вежба 2: Тестер за ИК 555	Вежба 3: Тон генератор
Отпорници	(I) $R_1=47k\Omega$, $R_2=100k\Omega$; (II) $R_1=100k\Omega$, $R_2=47k\Omega$.	$R_1=1k\Omega$, $R_2=150k\Omega$, $R_{d1}=R_{d2}=390\Omega$	$R_1=R_2=10k\Omega$ и $R_{SP}=8\Omega$
Кондензатори	$C=10nF$	$C_{elek} = +10\mu F$	$C=0,1\mu F$, $C_{SPelek} = +22\mu F$
LED-диоди:		црвени	

$U_{CC}=9V$ - напојување со еднонасочен напон

ИК 555 - интегрирано коло

$C'=10nF$ - кондензатор

Електрична шема за реализација на практични примени со астабилниот мултивибратор со ИК555

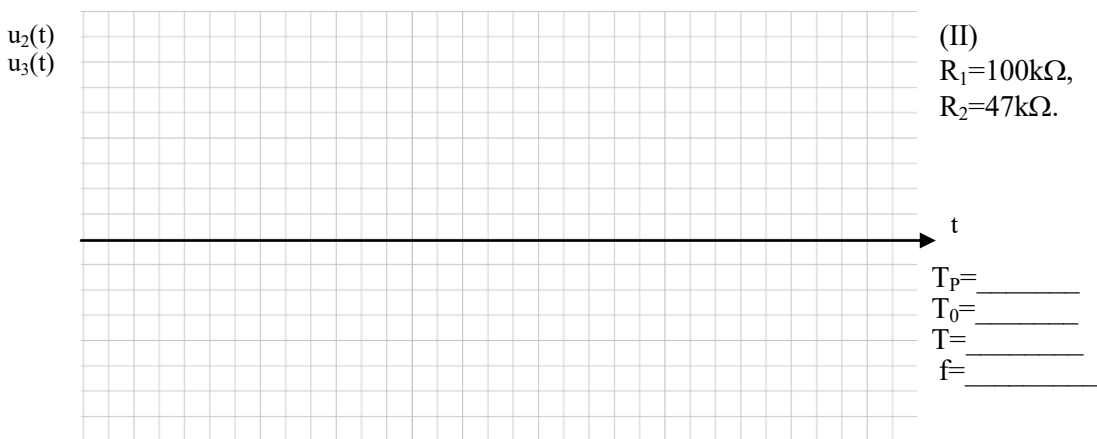
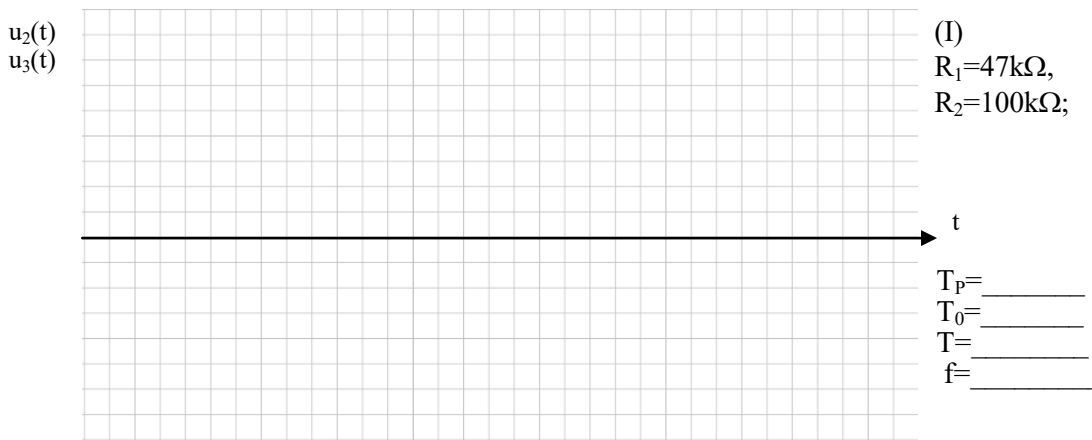


Слика 28: Електрична шема на астабилни кола со ИК555

1⁰ На прото-плочка да се монтираат елементите според основната шема (1).

2⁰ Да се поврзе едниот канал на осцилоскопот со излезот од колото (пин 3) а другиот на кондензаторот C (пин 2).

3⁰ Со осцилоскоп да се снимат и да се нацртаат брановите форми на излезниот напон и напонот на кондензаторот C за двете комбинации на отпорниците R_1 и R_2 при взаемна промена на местата. Од осцилограмот да се одредат времетраењата на импулсот T_P , паузата T_0 , периодата T , како и вредноста на фреквенцијата f .



4⁰ Дали влијае промената на вредноста на R_1 и на R_2 врз временските интервали T_P , T_0 , T и врз фреквенцијата f ? Образложи во куסי црти.

5⁰ Дали со соодветен избор на отпорниците R_1 и R_2 на излезот од астабилното коло може да се добие квадратен сигнал, т.е. низа од имулси и паузи со еднакво времетраење ($T_P=T_0$). Определи го тој однос меѓу нив за колото да генерира квадратен сигнал.

6⁰ Да се изработи монтажна шема потребна за изработка на печатена плочка за практичната модификација (2).

7⁰ Да се изработи печатена плочка, да се монтираат и да се залемат елементите според дадената шема.

8⁰ Добиениот уред може да се користи за проверување исправност на некое ИК 555. Тестираното ИК ќе биде исправно само ако двете LED диоди светат наизменично и со еднакви временски интервали.

ПРАКТИЧНА ВЕЖБА БРОЈ 18 МОНОСТАБИЛНО КОЛО СО ИК 555

На слика 29 е дадена електрична шема на моностабилен мултивибратор со временско коло ИК 555 кој може да се користи како „трепкач“.

Потребни елементи:

ИК 555 – интегрирано временско коло

$C' = 10\text{nF}$ – кондензатор

$C = 10/15\mu\text{F}$ – електролитски кондензатор

$R_0 = 10\text{k}\Omega$, $R_1 = R_2 = 560\Omega$, $R_{\text{ПОТ}} = 500\text{k}\Omega$ – отпорници

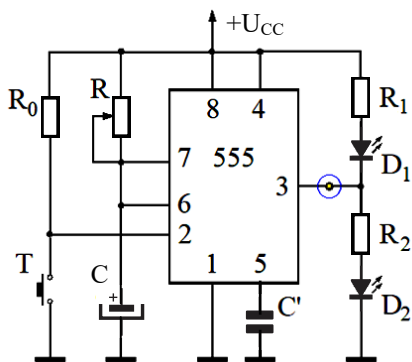
$R = 180\text{k}\Omega/270\text{k}\Omega/360\text{k}\Omega$ - потенциометар

D_1 D_2 - зелена и црвена LED диода

$U_{\text{CC}} = 12\text{V}$ – извор на еднонасочен напон

Да се извадат каталожки податоци за потребните елементи!

Електрична шема за реализација на астабилниот мултивибратор



Слика 29: Електрична шема на моностабилно коло со ИК 555

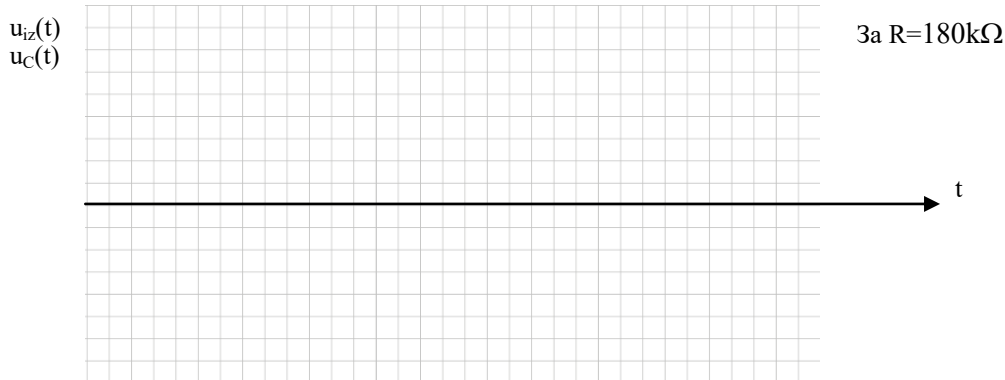
Да се внимава на распоредот на изводите на ИК 555 при монтирање на прото плочка според неговиот пин дијаграм.

1⁰ На прото плочката да се монтираат елементите според зададената шема.

2⁰ Едниот канал на осцилоскопот да се поврзе на излезниот пин [3] од ИК 555, додека другиот канал на спојната точка кадешто се поврзани пиновите [6] со [7] и кондензаторот C .

3⁰ Со осцилоскоп да се снимат и нацртаат брановите форми на излезниот напон $u_{\text{из}}(t)$ и напонот на кондензаторот C $u_{\text{C}}(t)$ така што моментално ќе се притисне и отпушти тастерот Т.

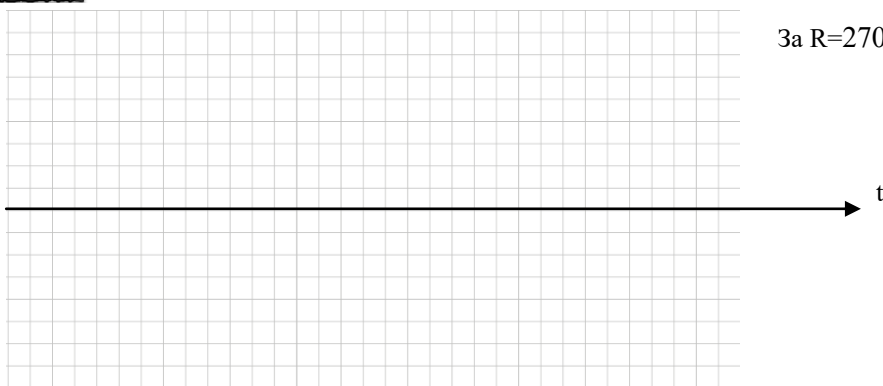
Да се подесат три различни вредности на потенциометарот според нумеричката задача за мултивибратори, на (1) $180\text{k}\Omega$, (2) $270\text{k}\Omega$, (3) $360\text{k}\Omega$ и повтори претходната постапка на снимање.





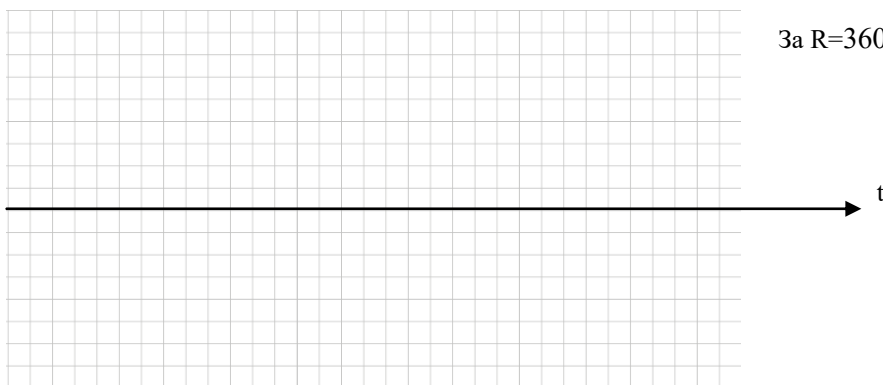
$u_{iz}(t)$
 $u_c(t)$

За $R=270k\Omega$



$u_{iz}(t)$
 $u_c(t)$

За $R=360k\Omega$



4⁰ Колкаво е времетраењето на излезниот импулс?
Напиши го изразот за:

$T_P =$ _____.

5⁰ Пополни ги дадените табели.

За $C=10\mu F$

T_P (sec) \ R_{POT}	180 k Ω	270 k Ω	360 k Ω
пресметана T_P			
измерена T_M			
отстапување (%) [($T_P - T_M$)/ T_P] x 100			

За $C=15\mu F$

T_P (sec) \ R_{POT}	180 k Ω	270 k Ω	360 k Ω
пресметана T_P			
измерена T_M			
отстапување (%) [($T_P - T_M$)/ T_P] x 100			

ПРАКТИЧНА ВЕЖБА БРОЈ 19 ЕДНОНАСОЧЕН ИЗВОР ЗА НАПОЈУВАЊЕ +/-12V

Краток опис на колото:

Колото претставува двојно (симетрично) напојување од +/-12V.

Со помош на мрежниот трансформатор, мрежниот напон од 220V со фреквенција 50Hz се трансформира во два напони со помала вредност (15V). Ефективната вредност на напонот на секундарот треба да биде приближно еднаква на излезниот напон. Низ секундарна навивка на трансформаторот протекува струја со јачина од 1A. Со Грецовиот спој, составен од насочувачки диоди 4X1N4007, наизменичниот напон се насочува во еднонасочен а со електролитските кондензатори се филтрира наизменичната компонента на напонот. Керамичките кондензатори придонесуваат за стабилна работа на напонските стабилизатори ИК 7812 и ИК 7912. Интегрираните кола ИК 7812 и ИК 7912 на излез го сведуваат влезниот напон на колото и го стабилизираат на вредноста одредена со карактеристиките на колото.

Потребни елементи:

Мрежен трансформатор со секундар со среден извод

ИК 7812 – напонски стабилизатор за +12V

ИК 7912 – напонски стабилизатор за -12V

D₁-D₄ 1N4007, 1000V, 1A - целобранов насочувач (Грецов спој)

C₁ и C₂ 2200μF/35V – електролитски кондензатори

C₃ и C₄ 0,22μF/50V - керамички кондензатори

C₅ и C₆ 100μF/35V – електролитски кондензатори

C₇ и C₈ 0,1μF/50V - керамички кондензатори

црвена LED диода - индикација дека уредот е вклучен

R₁ 2,7kΩ/0,5W – отпорник за ограничување на струјата низ LED диодата.

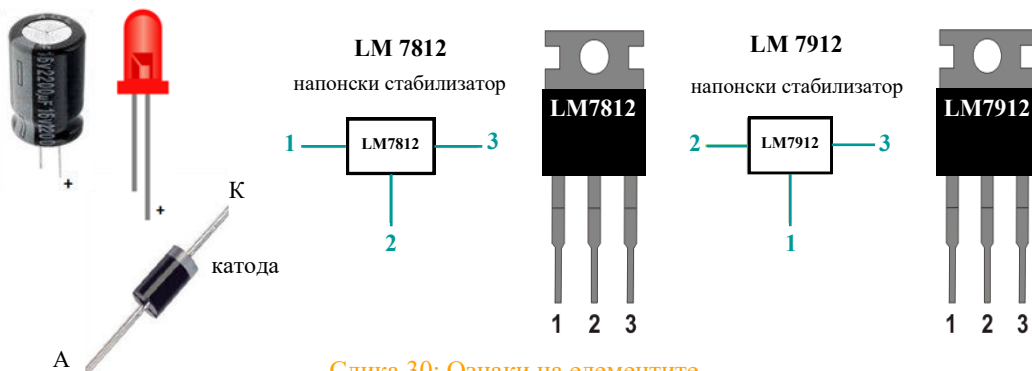
Да се внимава на поларитетот на елементите при монтирање на печатената плочка!

На куќиштето на електролитскиот кондензатор, негативниот приклучок е означен со вертикална сива лента на која е запишан знакот „-“.

Подолгиот извод кај LED диодата е анода.

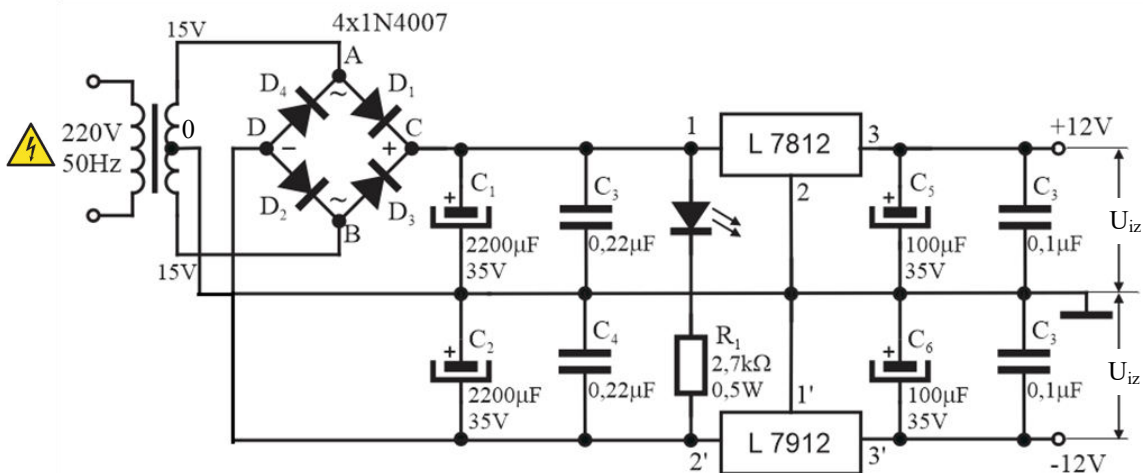
Катодата кај насочувачката диода е означена со прстен.

Распоредот на изводите на интегрираните кола е прикажан на слика 30.



Слика 30: Ознаки на елементите

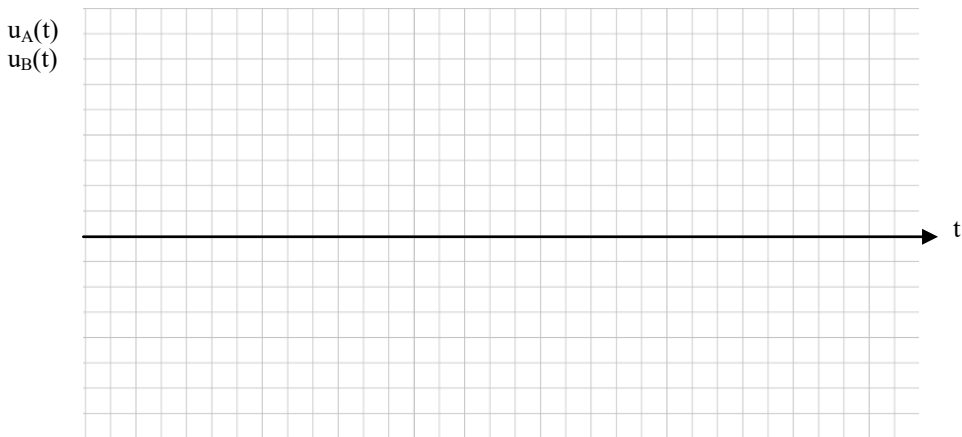
Електрична шема за реализација (слика 31)



Слика 31: Електрична шема на еднонасочен извор за напојување +/-12V

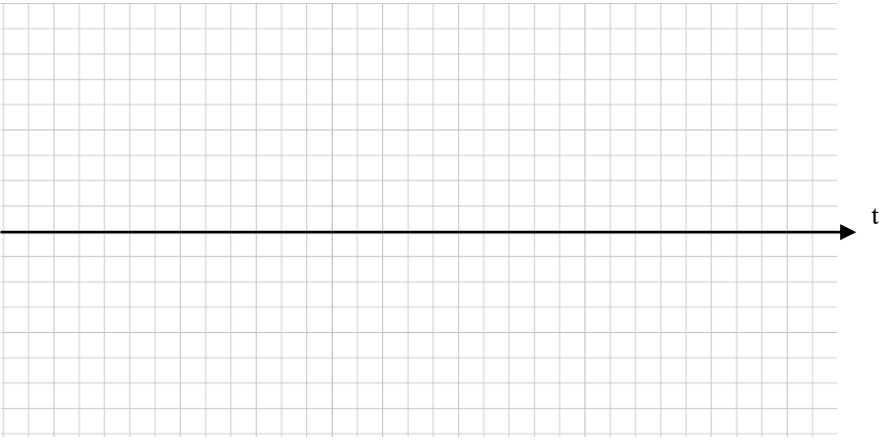
ИЗРАБОТИ

- 1⁰ На прото-плочка да се монтираат елементите според зададената шема.
 - 2⁰ Да се измерат еднонасочните напони на приклучоците на напонските стабилизатори: позитивен меѓу точките 1-2 (U_{12}) и 3-2 (U_{32}), и негативен меѓу точките 2'-1' ($U_{2'1'}$) и 3'-1' ($U_{3'1'}$).
- $U_{12} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ V}$ $U_{32} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ V}$ $U_{2'1'} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ V}$ $U_{3'1'} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ V}$.
- 3⁰ Да се измери со осцилоскоп колкава е брановидноста на напонот во точките 3 и 3' во однос на масата.
- $U_T = \Delta U = \underline{\hspace{1cm}} \text{ V}$.
- 4⁰ Да се изработи монтажна шема потребна за изработка на печатена плочка.
 - 5⁰ Да се изработи печатена плочка, да се монтираат и да се залемат елементите според дадената шема.
 - 6⁰ Со осцилоскоп да се испита функционалноста на колото следејќи ги брановите форми на напоните во точките A, B, 1 и 2'. Спореди ги напоните U_A и U_B , и брановидноста во точките U_1 и U_2 . Образложи ја споредбата.
 - 7⁰ Да се нацртаат снимените напони.



Заклучок:

$u_1(t), u_2(t)$



Заклучок:

ПРАКТИЧНА ВЕЖБА БРОЈ 20 ЛАБОРАТОРИСКИ ИЗВОР НА НАПОН

Краток опис на колото:

Колото претставува извор за напојување со регулација на излезниот напон од 1,2V до 30V.

Со помош на мрежниот трансформатор, мрежниот напон од 220V со фреквенција 50Hz се трансформира во наизменичен напон со вредност од 24V. Низ секундарната навивка на трансформаторот протекува струја од 1A. Со Грецовиот спој, составен од насочувачки диоди 4x1N4007, наизменичниот напон се насочува во еднонасочен а со електролитските кондензатори се филтрира наизменичната компонента на напонот. Диодите D₅ и D₆ служат за заштита од куса врска на интегралното коло. Керамичкиот кондензатор придонесува за стабилна работа на напонскиот стабилизатор ИК 317. Со пинот 1 на интегрираното коло ИК 317 се регулира вредноста на излезниот напон од 1,2V до 30V. Вредноста на излезниот напон се пресметува според формулата:

$$U_{iz} = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{R_p}{R_1}\right)$$

каде со R_p е означена паралелната врска на отпорникот R₂ и потенциометарот VR1 со кој се менува вредноста на излезниот напон:

$$R_p = \frac{VR1 \cdot R_2}{VR1 + R_2}$$

Потребни елементи:

Мрежен трансформатор со секундар за 24V

ИК 317 – напонски стабилизатор со регулација на напон

D₁-D₄ 1N4007, 1000V, 1A - целобранов насочувач (Грецов спој)

D₅, D₆ 1N4007 – насочувачки диоди

C₁ 1000μF/35V – електролитски кондензатор

C₂ 0,1μF – керамички кондензатор

C₃ 470μF/35V - електролитски кондензатор

C₄ 10μF/35V - електролитски кондензатор

VR1 10kΩ – потенциометар

R₁ 220Ω – отпорник

R₂ 12kΩ – отпорник

Да се внимава на поларитетот на елементите при монтирање на печатената плочка!

На куќиштето на електролитскиот кондензатор, негативниот приклучок е означен со вертикална сива лента на која е запишан знакот „-“.

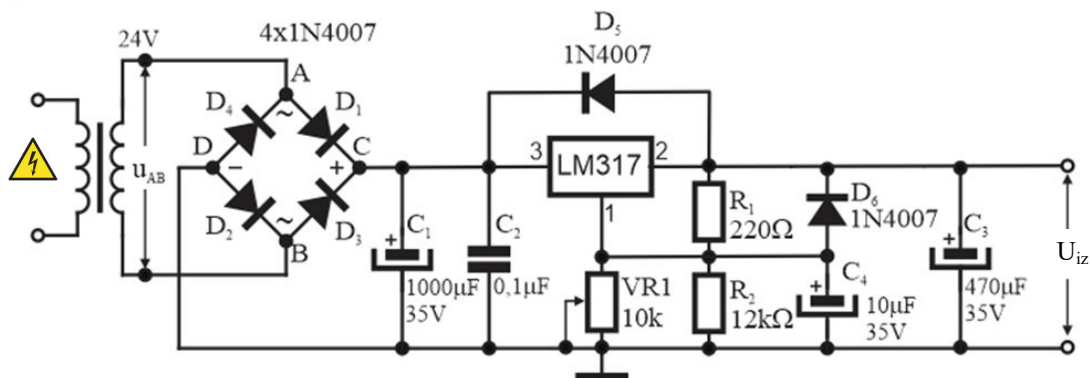
Катодата кај насочувачката диода е означена со прстен.

Распоредот на изводите на интегрираното коло е прикажан на слика 32.



Слика 32: Ознаки на елементите

Електрична шема за реализација (слика 33)



Слика 33: Електрична шема на лабораториски извор на напон

1⁰ На прото-плочка да се монтираат елементите според зададената шема.

2⁰ Со универзален инструмент да се измерат еднонасочните напони меѓу точките C-D (U_{CD}) и излезниот напон (U_{iz}).

$$U_{CD} = \text{_____ V}, \quad U_{iz} = \text{_____ V}.$$

3⁰ Да се одредат и да се обележат положбите на лизгачот на потенциометарот VR1 за добивање на следните излезни напони:



ИЗРАБОТИ

Излезен напон (V)	1,5	3	4,5	9	12
VR1 (положба)					

4⁰ Да се изработи монтажна шема потребна за изработка на печатена плочка.

5⁰ Да се изработи печатена плочка, да се монтираат и да се залемат елементите според дадената шема.

6⁰ Со мерење на вредноста на еквивалентната отпорност R_p (паралелна врска на R_2 и делот на VR1 одреден со положбата на лизгачот) и мерење на излезниот напон, да се провери формула за излезниот напон. Образложи!

$$U_{iz} = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{R_p}{R_1}\right)$$



ИЗРАБОТИ

VR1 (Ω)					
Излезен напон (V)					

7⁰ Која е улогата на пинот 1 на интегрираното коло LM 317?

Што заклучуваш?

8⁰ Која е улогата на пинот 1 на интегрираното коло LM 317?

Паралелната врска на отпорникот R_2 и потенциометарот $VR1$ може да се замени со еден отпорник R_p .

Предлог-листа на вредности на отпорностите R_1 и R_p за добивање на потребен фиксен излезен напон:

Излезен напон (V)	R_1 (Ω)	R_p (Ω)
1,51	330	68
3,03	330	470
4,50	150	390
6,04	470	1800
9,06	240	1500
12,40	390	3300
24,17	180	3300

Префикси што се употребуваат во меѓународниот систем на единици

Вредност	Назив	Ознака	Вредност	Назив	Ознака
10^{-24}	јокто	y	10^{24}	јота	Y
10^{-21}	зепто	z	10^{21}	зета	Z
10^{-18}	ато	a	10^{18}	екса	E
10^{-15}	фемто	f	10^{15}	пета	P
10^{-12}	пико	p	10^{12}	тера	T
10^{-9}	нано	n	10^9	гига	G
10^{-6}	микро	μ	10^6	мега	M
10^{-3}	мили	m	10^3	кило	K
10^{-2}	центи	c	10^2	хекто	h
10^{-1}	деци	d	10^1	дека	da

ОСНОВНИ SI ЕДИНИЦИ

Физичка величина		Единица	
Назив	Ознака	Назив	Ознака
Должина	<i>l</i>	метар	m
Маса	<i>m</i>	килограм	kg
Време	<i>t</i>	секунда	s
Јачина на струја	<i>I</i>	ампер	A
Термодинамичка температура	<i>T</i>	келвин	K
Количество супстанција	<i>n</i>	мол	mol
Интензитет на светлина	<i>I_v</i>	кандела	cd

НЕКОИ ИЗВЕДЕНИ SI ЕДИНИЦИ

Назив на величината	Симбол на величината	Назив на единицата	Симбол на единицата	Дефиниција за единицата
Сила	<i>F</i>	Њутн	N	$\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
Притисок	<i>P</i>	Паскал	Pa	$\text{N}/\text{m}^2=\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$
Енергија	<i>E</i>	Јул	J	$\text{N}\cdot\text{m}=\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$
Густина	ρ	kg на m^3	kg/m^3	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$

СОДРЖИНА

Модуларна единица 1. Електронски компоненти

1. Класификација на електронските компоненти.....	4
1.1 Диоди.....	5
1.1.1 Насочувачки диоди.....	6
1.1.2 Зенер диоди.....	6
1.1.3 Импулсни диоди.....	7
1.1.4 Фотодиоди.....	8
1.1.5 LED диоди.....	9
1.1.6 Капацитивни (варикап) диоди.....	9
1.1.7 PIN диоди.....	10
1.1.8 Тунел диоди.....	10
1.2. Транзистори.....	11
1.2.1 Биполарни транзистори.....	11
1.2.2 Униполарни транзистори.....	13
1.3 Означување на диодите и транзисторите.....	15
1.4 Тиристори.....	17
1.4.1 Дијак.....	18
1.4.2 Тријак.....	18
1.5 Интегрирани кола.....	19
Провери го своето знаење.....	20
1.6 Поларизација на електронските компоненти.....	22
1.7 Поларизација на диодата.....	23
1.7.1 Статички карактеристики на диодата.....	24
1.7.2 Ограничување при работа на диодата.....	24
1.8 Поларизација на биполарен транзистор.....	26
1.8.1. Статички карактеристики на транзисторот.....	27
1.8.2 Ограничување при работа на транзисторот.....	28
1.9 Поларизација на униполарен транзистор.....	29
1.9.1 Статички карактеристики на униполарен транзистор.....	30
1.10 Поларизација на тиристорот.....	32
1.10.1 Статички карактеристики на тиристорот.....	32
Провери го своето знаење.....	33
Прашања за утврдување на знаењата од МЕ 1.....	34

Модуларна единица 2. Диоди

2.1 Диодни кола.....	37
2.1.1 Диодни ограничувачи.....	38
2.1.2 Диодни насочувачи.....	40
2.1.3 Диодни стабилизатори на напон.....	42
Провери го своето знаење.....	44
2.1.4 Светлечки LED диоди.....	45
2.1.5 Фотодиоди.....	47
Провери го своето знаење.....	49
2.1.6 Диодни логични кола.....	50
Прашања за утврдување на знаењата од МЕ 2.....	52

Модуларна единица 3. Транзистори	
3.1 Поларизација на биполарен транзистор.....	55
3.1.1 Принцип на работа на транзисторско коло.....	57
3.1.2 Транзистор како прекинувачки елемент.....	60
3.1.3 Инвертор со биполарен транзистор.....	62
Провери го своето знаење.....	64
3.2 Поларизација на униполарен MOSFET транзистор.....	65
3.2.1 Принцип на работа на MOSFET транзистор.....	67
3.2.2 MOSFET како прекинувачки елемент.....	70
3.2.3 Инвертор со униполарен транзистор.....	71
Провери го своето знаење.....	73
Прашања за утврдување на знаењата од МЕ 3.....	74
Модуларна единица 4. Засилувачи	
4.1 Блок-шема на засилувач.....	77
4.2 Параметри на засилувач.....	78
4.3 Фреквентни карактеристики на засилувач.....	79
4.4 Изобличувања кај засилувач.....	81
4.5 Поделба на засилувачите.....	83
4.6 Поларизација на транзисторот во засилувачот.....	88
4.7 Стабилизација на работна точка на засилувач.....	90
4.8 Еквивалентна шема на транзистор.....	92
4.9 Засилувач во спој со заеднички емитер.....	94
4.10 Засилувач во спој со заедничка база.....	97
4.11 Засилувач во спој со заеднички колектор.....	98
Провери го своето знаење.....	100
4.12 Поларизација на MOSFET-от во засилувачот.....	101
4.13 Стабилизација на работна точка на засилувачот.....	102
4.14 Еквивалентна шема на MOSFET-от.....	103
4.15 Засилувач во спој со заеднички сорс.....	105
4.16 Засилувач во спој со заеднички дрејн.....	106
4.17 Засилувач во спој со заеднички гејт.....	107
4.18 Дарлингтонов спој.....	109
4.19 Диференцијален засилувач.....	111
4.20 Засилувачи на моќност.....	114
4.20.1 Засилувач на моќност во класа А.....	115
4.20.2 Пуш-пул засилувач на моќност во класа Б.....	117
4.20.3 Пуш-пул засилувач на моќност во класа АБ.....	119
4.21 Каскадна врска на засилувачи.....	120
4.22 Видови спреги кај засилувачите.....	122
Провери го своето знаење.....	125
Прашања за утврдување на знаењата од МЕ 4.....	126
Модуларна единица 5. Засилувачи со негативна повратна врска	
5.1 Засилувач со повратна врска.....	129
5.2 Видови негативна повратна врска.....	131
5.3 Влијание на негативната повратна врска врз параметрите на засилувачот.....	133

Провери го своето знаење.....	135
Прашања за утврдување на знаењата од МЕ 5.....	136

Модуларна единица 6. Операциски засилувачи

6.1 Идеален операциски засилувач.....	139
6.2 Реален операциски засилувач.....	141
6.3 Инвертирачки операциски засилувач.....	144
6.4 Неинвертирачки операциски засилувач.....	146
6.5 Суматор.....	148
6.6 Диференцијален засилувач.....	149
6.7 Претворувач на струја во напон и на напон во струја.....	150
6.8 Ограничувач со операциски засилувач.....	151
6.9 Компаратори со операциски засилувач.....	153
6.10 Шмитово компараторско коло.....	156
Провери го своето знаење.....	159
Прашања за утврдување на знаењата од МЕ 6.....	160

Модуларна единица 7. Хармонски осцилатори

7.1 Осцилатор со позитивна повратна врска.....	163
7.2 RC-осцилатор со Винов мост.....	165
7.3 Колпицов осцилатор.....	168
7.4 Осцилатор со кварцен кристал.....	170
Провери го своето знаење.....	173
Прашања за утврдување на знаењата од МЕ 7.....	174

Модуларна единица 8. Мултивибратори

8.1 Вовед и основни поими за мултивибраторите.....	177
8.2 Класификација на мултивибраторите.....	179
8.3 Моностабилен мултивибратор со операциски засилувач.....	180
8.4 Астабилен мултивибратор со операциски засилувач.....	183
8.5 Интегрирано временско коло 555.....	185
8.6 Моностабилен мултивибратор со ИК 555.....	187
8.7 Астабилен мултивибратор со ИК 555.....	189
8.8 Генератор на пилест напон со ИК 555.....	192
Провери го своето знаење.....	195
Прашања за утврдување на знаењата од МЕ 8.....	196

Модуларна единица 9. Извори за напојување

9.1 Блок-шема на извор за напојување.....	195
9.2 Полубранов насочувач.....	197
9.3 Целобранов насочувач.....	199
9.4 Насочувач со капацитивен филтер.....	203
9.5 Стабилизатор со Зенер диода.....	205
9.6 Стабилизатор со транзистор.....	207
9.7 Интегрирани стабилизатори.....	209
9.8 Примена на интегрираните стабилизатори.....	211
Провери го своето знаење.....	215
Прашања за утврдување на знаењата од МЕ 9.....	216

Нумерички задачи

Диодни кола.....	223
Транзистори.....	227
Засилувачи.....	232
Засилувачи со негативна повратна врска.....	238
Операциски засилувачи.....	240
Хармониски осцилатори.....	243
Мултивибратори.....	246
Извори за напојување.....	251

Практични вежби

Практична вежба број 1. Испитување на диоди и транзистори.....	257
Практична вежба број 2. Снимање на статички карактеристики на диоди.....	260
Практична вежба број 3. Снимање на статички карактеристики на биполарни транзистори.....	262
Практична вежба број 4. Снимање преносна карактеристика на униполарен MOSFET транзистори.....	264
Практична вежба број 5. „И“ и „ИЛИ“ Логички кола со два влеза.....	265
Практична вежба број 6. Насочувач со една диода.....	266
Практична вежба број 7. Стабилизатор на напон со Зенер диода.....	267
Практична вежба број 8. Проектирање засилувач со заеднички емитер.....	268
Практична вежба број 9. Засилувач со негативна повратна врска.....	271
Практична вежба број 10. Линеарно коло со операциски засилувач.....	273
Практична вежба број 11. Операциски засилувач со регулација на засилувањето.....	275
Практична вежба број 12. Компараторско коло со операциски засилувач.....	277
Практична вежба број 13. Напонски компаратор со LM 311.....	278
Практична вежба број 14. RC-Осцилатор со Винов мост.....	279
Практична вежба број 15. Астабилно коло со операциски засилувач.....	281
Практична вежба број 16. Моностабилно коло со ИК 741.....	284
Практична вежба број 17. Астабилно коло со временско ИК 555.....	286
Практична вежба број 18. Моностабилно коло со ИК 555.....	288
Практична вежба број 19. Еднонасочен извор за напојување +/- 12V.....	290
Практична вежба број 20. Лабораториски извор на напон.....	293

КОИСТЕНА 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, Скопје, 1995
- [3] Milman – Halkias „*Integrated electronics: analog and digital circuits and systems*“, 1972
- [4] Милутин Петковиќ „*Електроника*“ учебник за III степен на занимањата од електротехничката струка со насока слаба струја и автоматика, Просветно дело, Скопје, 1993
- [5] Зоран Тасиќ „*Електроника II*“ за електротехничките училишта, Просветно дело, Скопје, 1982
- [6] Ратко Опачиќ „*Електроника I*“ за други разред електротехничке школе, Завод за уџбенике, Београд, 2008
- [7] Александра Ристиќ „*Електроника I*“ за други разред електротехничке школе, Завод за уџбенике, Београд, 2017
- [8] Наташа Божиновска „*Електроника*“ за II година електротехничка струка, МОН, Скопје, 2010
- [9] Јани Сервини „*Основи на мерењата и логички кола*“ за II година електротехничка струка, МОН, 2010
- [10] Wayne Storr „*Basic electronics tutorials*“, free internet edition, 2016 (<http://www.electrinics-tutorials.ws>)
- [11] Robert Boylestad/Louis Nashelsky „*ELECTRONIC DEVICES AND CIRCUIT THEORY*“, New Jersey Columbus, Ohio
- [12] <http://www.learnabout-electronics.org/>

