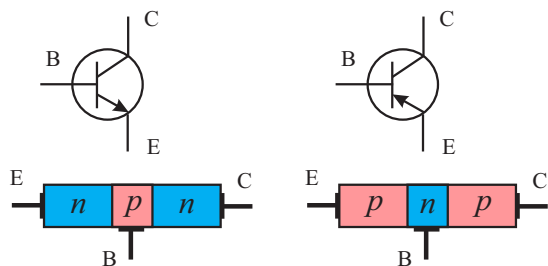
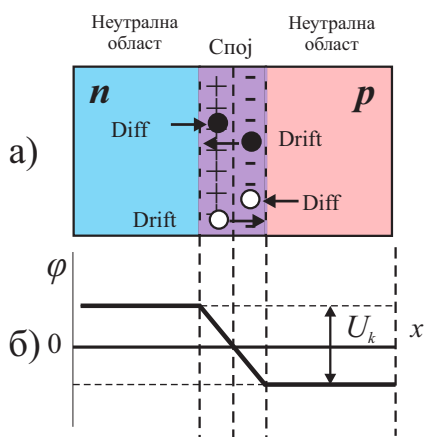


Одређивање карактеристика електронских кола



Слика 1: Символ и шематски приказ *npn* (лево) и *pnp* транзистора (десно). Приликом цртања транзистора у електронским шемама кружић се може изоставити.

сматра се калкулатор IBM 608, начињен 1955. године, искључиво од транзисторских кола. Садржао је преко 3000 германијумских транзистора. Кључни део свих полупроводничких електронских компонената је добро познати **p-n спој**.



Слика 2: *p-n* спој у одсуству спољашњег извора струје. а) Шематски приказ *p-n* споја: пуним кружићима представљени су електрони, а празним шупљине. Са $-$, $+$ означени су некомпензовани јони примеса на споју. б) Расподела потенцијала.

а на другом повећава (слика 3).

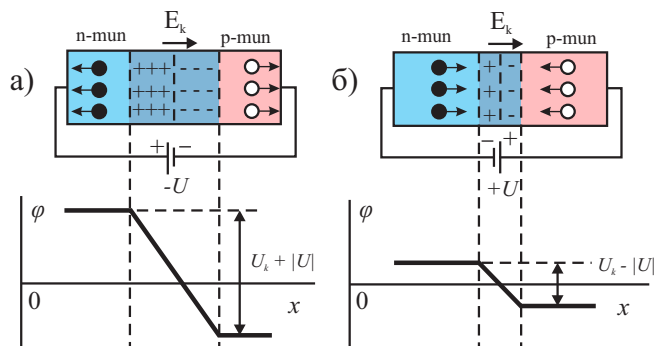
Поларизација транзистора обично се ради помоћу два независна извора електромоторне силе. Даљи текст и ознаке везане за опис рада транзистора односе се на *npn* тип (*pnp* транзистори раде аналогно). У пракси се показало да је за активан режим рада довољно обезбедити да је напон између базе и емитора (U_{BE}) већи од неке мале вредности која зависи од типа транзистора (0,3–0,7 V), а напон између колектора и базе $U_{CB} > -0,4$ V. Детаљнијом анализом показује се да је упрошћен модел транзистора за рад у активном режиму као на слици 4, при чему је

У свом најопштијем значењу, електроника се може дефинисати као област физике која проучава кретање електрона и других носилаца наелектрисања кроз слободан простор и полупроводне материјале. Међутим, најчешће се под појмом електроника подразумева техничка дисциплина која се бави развојем и производњом различитих компонената електричних кола, уређаја и читавих система. Зачетком електронике сматра се откриће електрона 1897. године, што је убрзо довело до проналаaska вакуумских цеви, дуго година коришћених за појачање и исправљање малих електричних сигнала. Међутим, слободно се може рећи да је замена вакуумских цеви полупроводничким елементима - диодама и транзисторима, шездесетих година XX века, довела до праве револуције у електроници и сродним дисциплинама - телекомуникацијама, аутоматици и рачунарској техници. Пионирским подухватом полупроводничке технологије

Биполарни транзистори су активне електронске компоненте које могу истовремено појачати струју и напон улазног сигнала и потрошачу предати већу снагу од оне коју улаже извор сигнала. Назив транзистор настао је повезивањем термина *transfer* и *resistor*, док придев *биполарни* потиче од чињенице да у провођењу струје кроз транзистор учествују и електрони и шупљине. Састоје се од два *p-n* споја и имају три спољашња прикључка. Средњи слој је *база* транзистора, а крајњи - *емитор* и *колектор*. У зависности од редоследа слојева постоје два типа биполарних транзистора: *pnp* и *npn*. Њихова структура и симболи дати су на слици 1. У основи, принцип рада заснива се на функционисању *p-n* споја. У одсуству спољашњег поља, расподела потенцијала на сваком од спојева слична је оној са слике 2. Кроз контакт емитора *n*-типа и базе *p*-типа (за случај *npn* транзистора) одвија се дифузија основних носилаца: електрона из емитора у базу и шупљина из базе у емитор. Притом се уз контакт са стране базе ствара слој некомпензованих, негативно наелектрисаних јона примеса, а са стране емитора слој некомпензованих, позитивно наелектрисаних јона. Услед тога долази до формирања потенцијалне баријере, која смањује струју дифузије. Такође, постоји и струја дрифта као последица овако формиране контактне разлике потенцијала U_k . У одсуству спољашњег поља ове струје су уравнотежене и укупна струја једнака је нули. Слично важи и за спој база-колектор.

За рад транзистора потребно је прикључити га на спољашње напајање, што се уобичајено назива поларизација транзистора. Да би транзистор радио у тзв. активном режиму рада, у коме се остварују добра појачавачка својства, потребно је спој база-емитор поларисати директно (тј. позитиван пол батерије везати за *p*-страну споја, а негативан за *n*-страну), а спој база колектор инверзно. Услед тога се висина потенцијалне баријере на првом споју смањује,

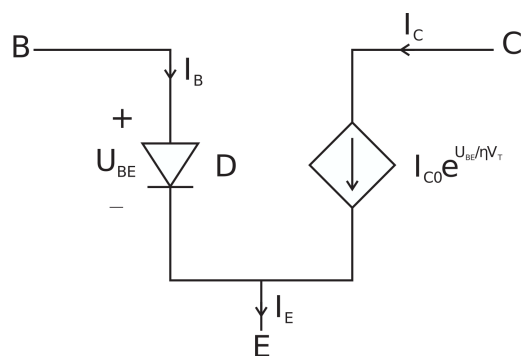
ромбом приказан тзв. напонски контролисан струјни генератор, тј. чињеница да колекторска струја I_C зависи од напона U_{BE} као $I_C = I_{C0}e^{U_{BE}/\eta V_T}$. Овде је V_T температурни напон, дат изразом $V_T = \frac{k_B T}{q_e}$, где је k_B Болцманова константа, T апсолутна температура, а q_e наелектрисање електрона. I_{C0} је параметар који зависи од температуре, а η је корекциони фактор за који се код транзистора коришћених у вежби може узети вредност 1,28.



Слика 3: Шематски приказ а) инверзно, б) директно поларисаног р-п споја. E_k је контактено електрично поље које се јавља услед нагомилавања некомпензованих примесних јона супротног знака на две стране споја.

изобличењем. По дефиницији, појачавач је мрежа са два приступа и симболички се у колу означава као на слици 6 а, а уколико је један прикључак заједнички за улаз и излаз, симбол појачавача је као на слици 6 б.

Појачавачи могу бити веома једноставни и садржати само један транзистор, али и врло комплексни. Да би појачавач могао да се посматра као саставни део сложених електронских кола, потребно је доћи до модела појачавача који се може користити у анализи појачавачких кола без улажења у детаље његове структуре. До параметара модела појачавача може се доћи анализом самог појачавачког кола или експериментално, мерењем улазних и излазних величина и параметара појачавача. Основни параметри појачавача су:



Слика 4: Модел npn транзистора у активном режиму рада.

- Напонско појачање:

$$A_v = \frac{\Delta U_{out}}{\Delta U_{in}}, \quad (1)$$

- Струјно појачање:

$$A_i = \frac{\Delta I_{out}}{\Delta I_{in}}, \quad (2)$$

- Излазна отпорност:

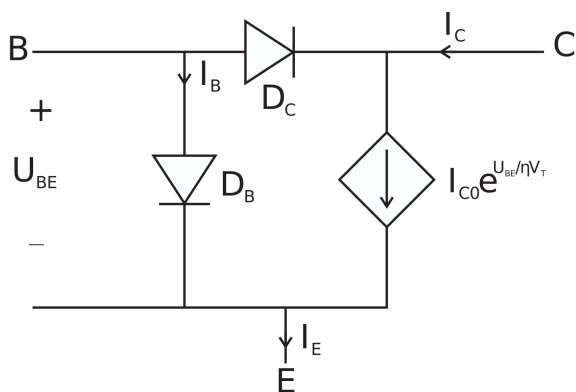
$$R_{out} = \frac{\Delta U_{out}}{\Delta I_{out}}, \quad (3)$$

- Улазна отпорност:

$$R_{in} = \frac{\Delta U_{in}}{\Delta I_{in}}. \quad (4)$$

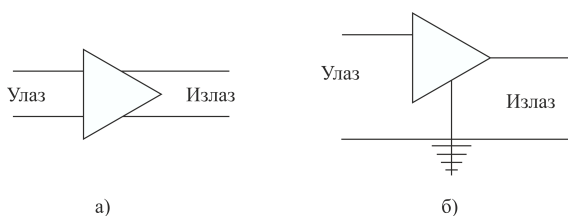
Своју најважнију примену биполарни транзистори налазе управо у појачавачким колима. С обзиром на то да појачавачи имају два улазна и два излазна прикључка, а да транзистор располаже са три спољна прикључка, јасно је да у појачавачком колу један од ових прикључака мора бити заједнички (референтни) за улаз и излаз. У складу са тим, постоје три могуће конфигурације једностепених појачавача са биполарним транзистором:

- појачавач са заједничким емитором (улаз - базна грана, излаз - колекторска грана)
- појачавач са заједничком базом (улаз - емиторска грана, излаз - колекторска грана)
- појачавач са заједничким колектором (улаз - базна грана, излаз - емиторска грана).



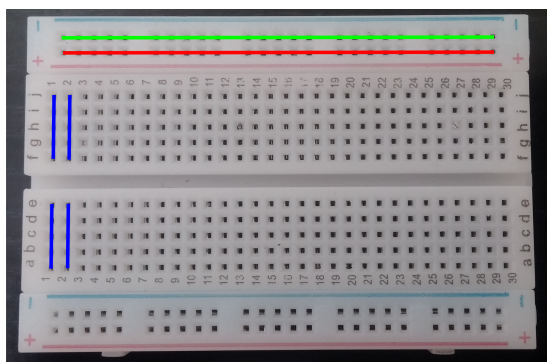
Слика 5: Модел *npr* транзистора у засићењу.

сти, два биполарна *npr* транзистора типа 2N2222, потенциометре, каблове - краткоспојнике, протоплочу, мултиметар и штоперицу. Одговарајуће вредности параметара појединих компонената, као и физичке константе које можете користити при решавању налазе се на крају текста задатка.



Слика 6: а) Општи симбол појачавача; б) Симбол појачавача код кога је један прикључак заједнички за улаз и излаз.

слици 7 тамноплавом линијом). На слици 8 приказан је распоред прикључака (пинова) биполарног транзистора. На ово треба обратити пажњу приликом повезивања елемената у коло.



Слика 7: Физички изглед протоплоче.

Поред већ набројаних основних параметара појачавача, дефинишу се и њихове графичке карактеристике. То су:

- улазна карактеристика: зависност улазне струје од улазног напона, при константном излазном напону, и
- излазна карактеристика: зависност излазне струје од излазног напона, при константној улазnoj струји.

Циљ вежбе је одређивање параметара и карактеристика различитих електронских кола. У првом задатку треба одредити непознату капацитивност кондензатора. У другом задатку анализира се рад биполарног транзистора као појачавача. Трећи задатак садржи експерименталну анализу сложеног електронског кола. Експериментална апаратура која је пред вама садржи: акумулаторску батерију као извор једносмерног напона, кондензатор непознате капацитивности, неколико отпорника различитих отпорности,

На слици 7 приказан је физички изглед протоплоче на којој треба повезати одговарајућа кола. На њој се налазе рупице у које се убадају електронске компоненте и краткоспојници. Све рупице које су спојене линијама на слици 7 електрично су повезане са доње стране плоче. Зеленом линијом означена су места на протоплочи где треба прикључити негативан пол батерије (обележена на плочи са -). На сличан начин, црвеном линијом означена су места где треба прикључити позитиван пол батерије (обележена на плочи са +). Иста таква два низа рупица налазе се и на другој ивици плоче (види слику), али њих не треба користити. Такође, по пет рупица у свакој колони обележеној бројем електрично су повезани (прве две такве колоне спојене су на

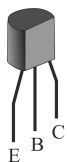
ОПШТЕ НАПОМЕНЕ:

- 1) На батерији се налазе закачени каблови помоћу којих се она може повезати на протоплочу. Негативан крај батерије је прикључен на протоплочу и тај кабл **не треба искључивати** из плоче током целог експеримента, да не би дошло до нехотичног спајања два краја батерије, директно или преко металних делова ваше опреме (сатови, оловке итд.). Позитиван крај батерије прикључити на за то одређена места на протоплочи тек када сте сигурни да сте добро повезали коло.
- 2) Када год не мерите, искључите позитиван крај батерије са протоплоче. Такође, све промене конфигурације или елемената повезаног кола вршити при искљученом позитивном крају батерије.
- 3) Не цимати и не вући каблове на споју са батеријом и не скидати их са исте да не би дошло до кидања.



4) Обратити пажњу на **поларитет кондензатора** (негативан крај има краћи прикључак и означен је цртицом на самом кондензатору). Уколико се обрне поларитет електролитичког кондензатора у колу може доћи до хаварије.

5) Потенциометар је уређај са три извода код кога се обртањем точкића мења отпор између средњег и било ког од крајњих извода, док је отпор између два крајња извода константан.



Слика 8: *Распоред прикључака *nnp* транзистора.*

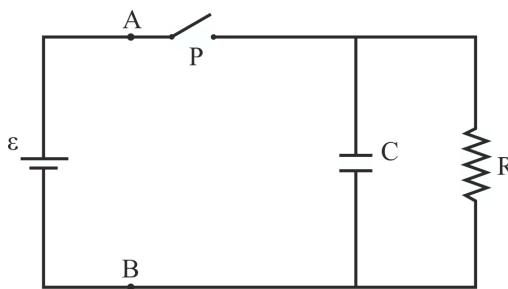
6) Мултиметар користити **искључиво** за мерење напона. Уколико је потребно одредити неку струју, мерити напон на одговарајућем отпорнику. Мултиметар подесити на мерење једносмерних напона, на опсегу до 20 волти, уколико је могуће (потребно је читавати напоне са тачношћу до стотог дела волта).

7) За мерење напона на располагању су вам, по потреби, и танке иглице које се могу поставити на протоплочу. Потребно је иглицу поставити у тачку на протоплати која има исти потенцијал као тачка у којој се жели мерити.

8) Уколико мислите да нешто није у реду са колом, позовите дежурног члана комисије који ће установити да ли је дошло до оштећења неке од компонената. Одговори на питања везана за повезивање кола и коришћење инструмената нису могући.

9) Све битне кораке и претпоставке у извођењу, мерењу и интерпретацији детаљно описати и образложити!

Задатак 1 [6 поена]



Слика 9: *Шема електричног кола за задатак 1.*

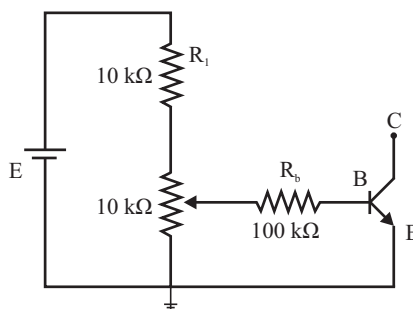
У овом задатку посматра се једноставно линеарно електрично коло, у коме је потребно одредити непознати капацитет кондензатора. Повезати коло као на слици 9. Помоћу батерије која представља извор емс $E \approx 12 \text{ V}$ и одговарајућих отпорника направити извор напајања који испуњава следећа два услова: (1) напон $U_{AB} \approx 6 \text{ V}$ при отвореном прекидачу и (2) напон $U_{AB} \geq 5 \text{ V}$ при затвореном прекидачу (у том смислу, извор емс $\mathcal{E}$ са слике је само симбол). Тек по испуњењу услова (1) повезати остатак кола на овакав извор напајања! Водити рачуна да је максималан напон који кондензатор може да издржи $6,3 \text{ V}$! Такође обратити пажњу на поларитет кондензатора. У сврху прекидача користити обичан кабл - краткоспојник. Вредност отпора у овом колу износи $R = 100 \text{ k}\Omega$.

Након исправног повезивања кола, тако да су задовољени услови (1) и (2), снимити криву пражњења кондензатора и на основу тога одредити његову капацитивност. Проценити грешку капацитивности. Занемарити притом грешку за отпорност R .

Задатак 2

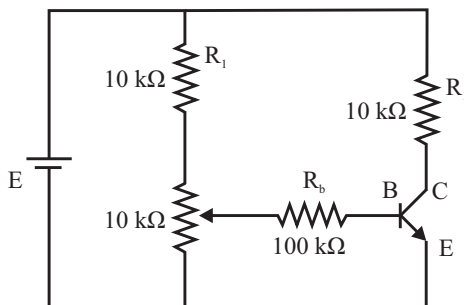
У овом задатку анализира се рад *nnp* биполарног транзистора као појачавача, у конфигурацији са заједничким емитором. За разлику од уобичајеног случаја описаног у уводном тексту, где се поларизација транзистора постиже помоћу два одвојена извора емс, у овом задатку поларизација је извршена помоћу једне батерије. Потенциометар, отпорник и батерија чине коло за поларизацију, док део кола десно од потенциометра представља сам појачавач. Обратити пажњу на распоред пинова транзистора (слика 8). У оквиру овог задатка није потребно одређивати грешке.

а) [2 поена] Повезати коло као на слици 10. Снимити улазну карактеристику појачавача. Нацртати одговарајући график и на основу њега израчунати улазну отпорност оваквог појачавача.



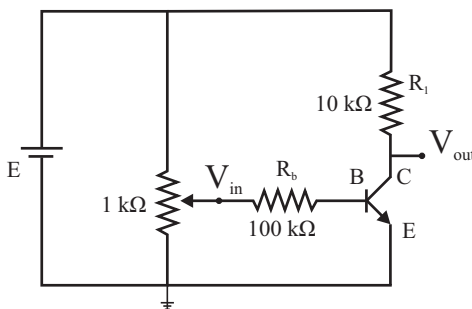
Слика 10: Шема електричног кола за задатак 2 а.

б) [3.5 поена] Повезати коло као на слици 11. Осмислити мерење којим би се могла одредити амбијентална температура. На основу мерења нацртати график и његовом анализом проценити амбијенталну температуру.



Слика 11: Шема електричног кола за задатак 2 б.

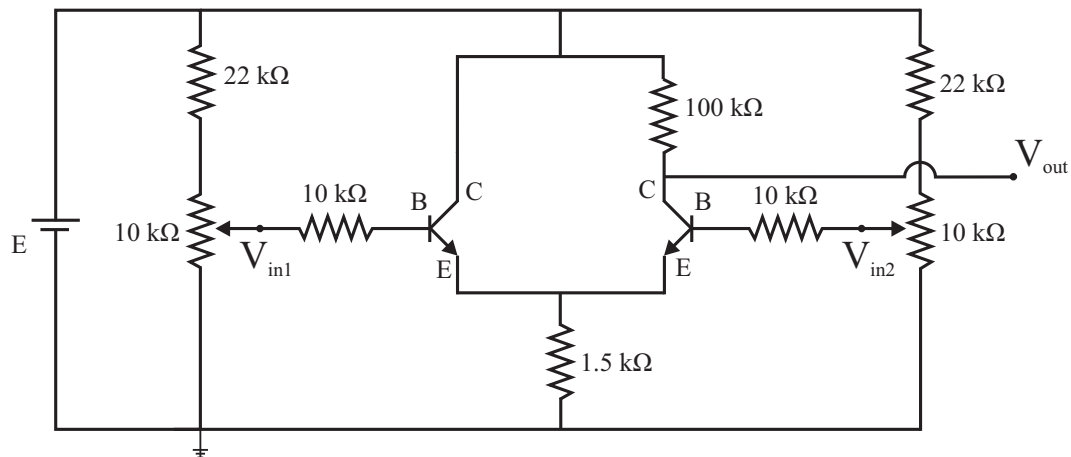
в) [3.5 поена] Повезати коло као на слици 12. Мерити зависност излазног напона од улазног $V_{out}(V_{in})$ за дати појачавач. На основу мерења нацртати график па проценити напонско појачавање појачавача. Ово појачавање одређивати са дела криве који има највећу апсолутну вредност нагиба. Потом извести израз који повезује напонско и струјно појачавање у овом колу и израчунати струјно појачавање појачавача у тој истој области.



Слика 12: Шема електричног кола за задатак 2 в.

Задатак 3 [5 поена]

У овом задатку анализира се сложено електронско коло са два улаза, V_{in1} и V_{in2} , и једним излазом, V_{out} , приказано на слици 13. Повезати коло према шеми датој на слици. Осмислити најоптималнији могући скуп мерења којима би се могло одредити функционисање овог кола. Помоћу тих мерења и на основу њих скицираних графика описати рад и функцију овог кола. Помоћу потенциометара обезбедити да су напонски нивои на оба улаза увек изнад 0,6 V. Није потребно одређивати ниједан нумерички параметар кола, као ни рачунати грешке. У оквиру овог задатка графике не морате цртати на милиметарском папиру, већ их можете скицирати на белим папирима за рад.



Слика 13: Шема електричног кола за задатак 3.

Нумерички подаци које можете користити (и чије се грешке могу занемарити):

Отпорности отпорника (разврстаних на папиру који стоји на вашем радном столу): $1,5 \text{ k}\Omega$, $10 \text{ k}\Omega$, $22 \text{ k}\Omega$, $100 \text{ k}\Omega$.

Отпорности потенциометара: $0\text{--}1 \text{ k}\Omega$, $0\text{--}10 \text{ k}\Omega$.

Електромоторна сила батерије: око 12 V једносмерног напона; уколико вам је потребна тачна вредност, измерите је.

Болцманова константа: $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$.

Наелектрисање електрона: $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Задатке припремили: *др Марко Опачић* и *др Бојан Стојадиновић*, Институт за физику у Београду

Рецензенти: *др Ненад Вукмировић* и *др Данко Бошњаковић*, Институт за физику у Београду

Председник Комисије за такмичења ученика средњих школа: *др Божидар Николић*, Физички факултет, Београд