Универзитет у Београду
Електротехнички факултет

ИНВЕРТУЈУЋИ САБИРАЧ

Хардверски пројекат

Теорија електричних кола

Ментор:
проф. др Дејан Тошић,
редовни професор

Студенти:
Матија Додовић, 2018/0072
Владимир Јанковић, 2018/0121

Београд, Децембар 2020.

САДРЖАЈ

САДРЖАЈ ..... **I**

1. УВОД **1**

2. СОФТВЕРСКО РЕШАВАЊЕ ЕЛЕКТРИЧНОГ КОЛА **2**

2.1. Ручно решавање 2
2.2. Симболичко решавање 3
2.3. Нумеричко решавање 5

3. ХАРДВЕРСКО РЕШЕЊЕ ЕЛЕКТРИЧНОГ КОЛА **7**

3.1. Коришћене реалне компоненте за формирање кола 7
3.2. Формирање електричног кола 8

4. ВИРТУЕЛНА ЛАБОРАТОРИЈА **14**

4.1. Мобилна апликација 14
4.2. Повезивање напонских генератора 15
4.3. Симулација осцилоскопа 17
4.4. Реализација кола помоћу виртуелне лабораторије 18

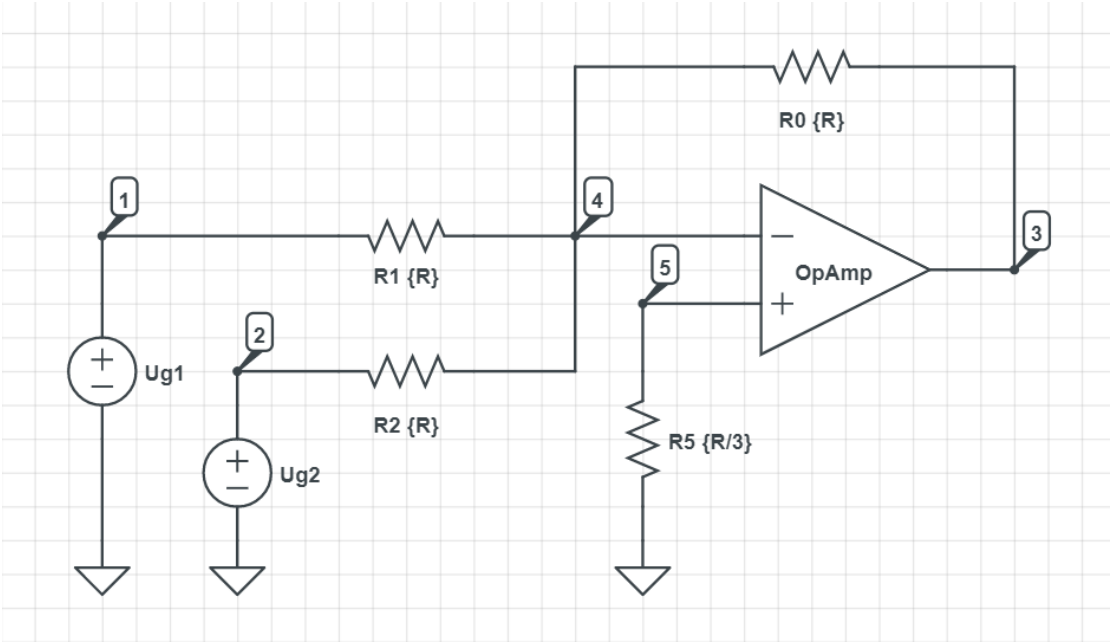
5. ЗАКЉУЧАК **20**

ЛИТЕРАТУРА **21**

1. Увод

У оквиру предмета Теорија електричних кола [6], на одсеку за Рачунарску технику и информатику, могућа је израда пројекта у ком би се реализовало неко од електричних кола приказано у настави.

У овом пројекту је приказана (и софтверска и хардверска) реализација електричног кола која представља инвертујући сабирач улазних напона. Шема тог електричног кола је дата на слици 1. Посматрани излаз кола је потенцијал чвора 3 (напон између чворова 3 и 0 је излаз кола који је од интереса и он се идентификује са потенцијалом чвора 3).



Слика 1: Шема електричног кола инвертујућег сабирача. Чворови су нумерисани од 1 до 5, док је нулти (0) везан за уземљење.

Симболичке вредности улазних напона и отпорника су коришћене у симболичким решавањима, док ће конкретне вредности бити представљене у делу где се оне и користе за конкретна израчунавања.

Коло са слике 1 је решено ручно (хеуристика), симболички (користећи софтвер за симболичко решавање *MAXIMA* [3], уз надградњу у виду софтвера *SALECx* [7]), а затим и нумерички (користећи софтвере за нумеричко решавање *LTspice* [2] и *Micro-Cap12* [4]) са бројним вредностима који ће бити коришћени у хардверској реализацији.

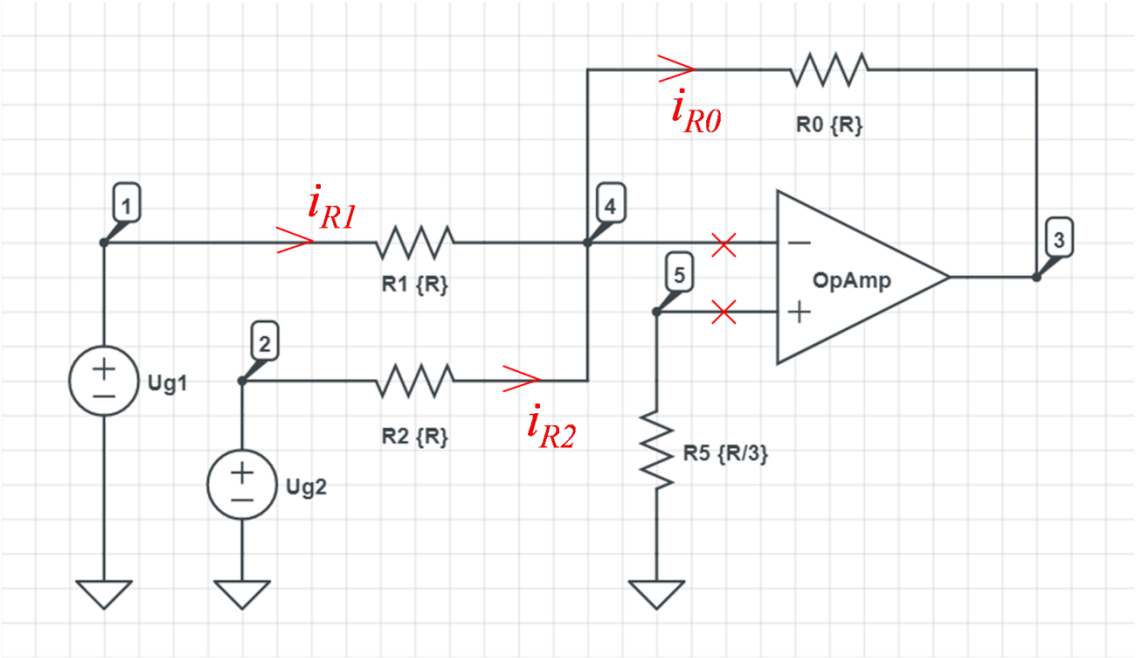
Након софтверске потврде логичке исправности кола, оно је реализовано реалним компонентама и резултати таквог кола су упоређени са онима добијеним нумеричком анализом.

2. СОФТВЕРСКО РЕШАВАЊЕ ЕЛЕКТРИЧНОГ КОЛА

Електрично коло инвертујућег сабирача, чија је шема дата на слици 1, поступно је решено ручно као и користећи одговарајуће алате за симболичко и нумеричко решавање кола.

2.1. Ручно решавање

Приликом ручног решавања, уведене су ознаке приказане на следећој слици:



Слика 2: Електрично коло са означеним вредностима струја грана. Прецртане гране имају струју идентички једнаку 0.

Поступак ручног решавања кола се огледа у идентификовању струја грана. Струја и напон првог приступа (идеалног) операционог појачавача су једнаки нули:

$$V_4 - V_5 = 0$$

$$I_4 = 0$$

На основу ових релација долази се до:

$$\frac{V_5 - 0}{R_5} = I_5 = I_4 = 0$$

Одатле следи да је:

$$V_5 = 0 = V_4$$

Применом Кирхофовог закона за струје на чвор 4 добија се:

$$I_{R_0} = I_{R_1} + I_{R_2}$$

односно, када се струје изразе преко потенцијала чворова:

$$\frac{V_4 - V_3}{R_0} = \frac{Ug_1 - 0}{R_1} + \frac{Ug_2 - 0}{R_2}$$

Излазни напон кола је једнак потенцијалу V_3, и сређивањем израза по овом потенцијалу добија се:

$$V_3 = -R_0\left(\frac{Ug_1}{R_1} + \frac{Ug_2}{R_2}\right)$$

Када се у израз за потенцијал V_3 уврсти једнакост отпорника $R_0 = R_1 = R_2 = R$, добија се израз (који оправдава име електричног кола са слике 1, инвертујући сабирач):

$$V_3 = -(Ug_1 + Ug_2)$$

2.2. Симболичко решавање

Симболичко решавање кола са слике 1 урађено је у софтверу за симболичко решавање *MAXIMA*, уз коришћење софтвера *SALECx*:

```
(%i1) load("C:\\Users\\Matija\\Desktop\\SALECx.mac");
      Dejan Tosic, SALECx 2019 v1.0
      Symbolic Analysis of Linear Electric Circuits with Maxima
(%o1) C:\Users\Matija\Desktop\SALECx.mac

(%i2) SALECxPrint: true;
(%o2) true
```

Слика 3: Увоз софтвера за симболичко решавање SALECx у софтвер MAXIMA, као припрема платформе за симболичко решавање кола са слике 1.

Наредба у уносу 2 гарантује да се поред решења испишу и (додатни) параметри (спецификација елемената, валидност улаза, симболичке вредности елемената, почетни услови за одговарајуће елементе, једначине по систему MNA (*Modified Nodal Analysis*) и одзиви по којима се систем MNA решава). Коло са слике 1 се уноси као списак елемената у формату:

```
(%i3) Sabirac: [
      ["V", "Ug1", 1, 0, Ug1],
      ["R", "R1", 1, 4, R],
      ["R", "R2", 2, 4, R],
      ["V", "Ug2", 2, 0, Ug2],
      ["R", "R5", 5, 0, R/3],
      ["R", "R0", 4, 3, R],
      ["OpAmp", "OmAmp", [4,5], 3]
      ];
(%o3) [[V,Ug1,1,0,Ug1],[R,R1,1,4,R],[R,R2,2,4,R],[V,Ug2,2,0
      ,Ug2],[R,R5,5,0,R/3],[R,R0,4,3,R],[OpAmp,OmAmp,[4,5],3]]
```

Слика 4: Унос списка елемената за коло сабирача.

У листи *Sabirac* се налазе описи свих елемената кола са слике 1, где опис елемента преставља листу са одговарајућим параметрима. Уколико је у питању отпорник или напонски извор, општи облик елемента листе је:

$$["\text{Vrsta}", "\text{Simboličko_ime}", plus_čvor, minus_čvor, Vrednost]$$

док уколико се ради о операционом појачавачу, шаблон је следећи:

$$["Vrsta", "Simboličko_ime", [neinvertujući_plus_čvor, neinvertujući_minus_čvor], izlazni_čvor]$$

```
(%i4) Sabirac_odzivi: SALECx(Sabirac);
```

Symbolic Analysis of Linear Electric Circuits with Maxima
SALECx version 1.0, Prof. Dr. Dejan Tošić, tosic@etf.rs
Number of nodes excluding 0 node: 5
Electric circuit specification: $[[V, Ug1, 1, 0, Ug1], [R, R1, 1, 4, R], [R, R2, 2, 4, R], [V, Ug2, 2, 0, Ug2], [R, R5, 5, 0, \frac{R}{3}], [R, R0, 4, 3, R], [OpAmp, OmAmp, [4, 5], 3]]$
Supported element: **[true, true, true, true, true, true, true]**
Element values: $[Ug1, R, R, Ug2, \frac{R}{3}, R, \mathbf{false}]$
Initial conditions: **[false, false, false, false, false, false, false]**
MNA equations: $[\frac{V_1-V_4}{R}+I_{Ug1}=0, \frac{V_2-V_4}{R}+I_{Ug2}=0, \frac{V_3-V_4}{R}+I_{OmAmp}=0, \frac{V_4-V_3}{R}+\frac{V_4-V_2}{R}+\frac{V_4-V_1}{R}=0, \frac{3V_5}{R}=0, V_4-V_5=0, V_2=Ug2, V_1=Ug1]$
MNA variables: $[V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, I_{OmAmp}, I_{Ug2}, I_{Ug1}]$

(%o4) $[V_1=Ug1, V_2=Ug2, V_3=-Ug2-Ug1, V_4=0, V_5=0, I_{OmAmp}=\frac{Ug2+Ug1}{R}, I_{Ug2}=-\frac{Ug2}{R}, I_{Ug1}=-\frac{Ug1}{R}]$

Слика 5: Позив софтвера за симболичко решавање SALECx и испис елемената што је постигнуто наредбом у линији 2 (формат је објашњен раније). На крају се налазе и симболичке вредности свих потенцијала чворова и струја од интереса.

Овај софтвер ће на основу листе елемената *Sabirac* направити систем једначина MNA и решити га као систем линеарних једначина по променљивама које су: потенцијали свих чворова осим нултог, струја напонских генератора и излазна струја операционог појачавача.

```
(%i5) V : V[3], Sabirac_odzivi, expand;
(%o5) -Ug2-Ug1
```

Слика 6: Издвојено решење напона V_3.

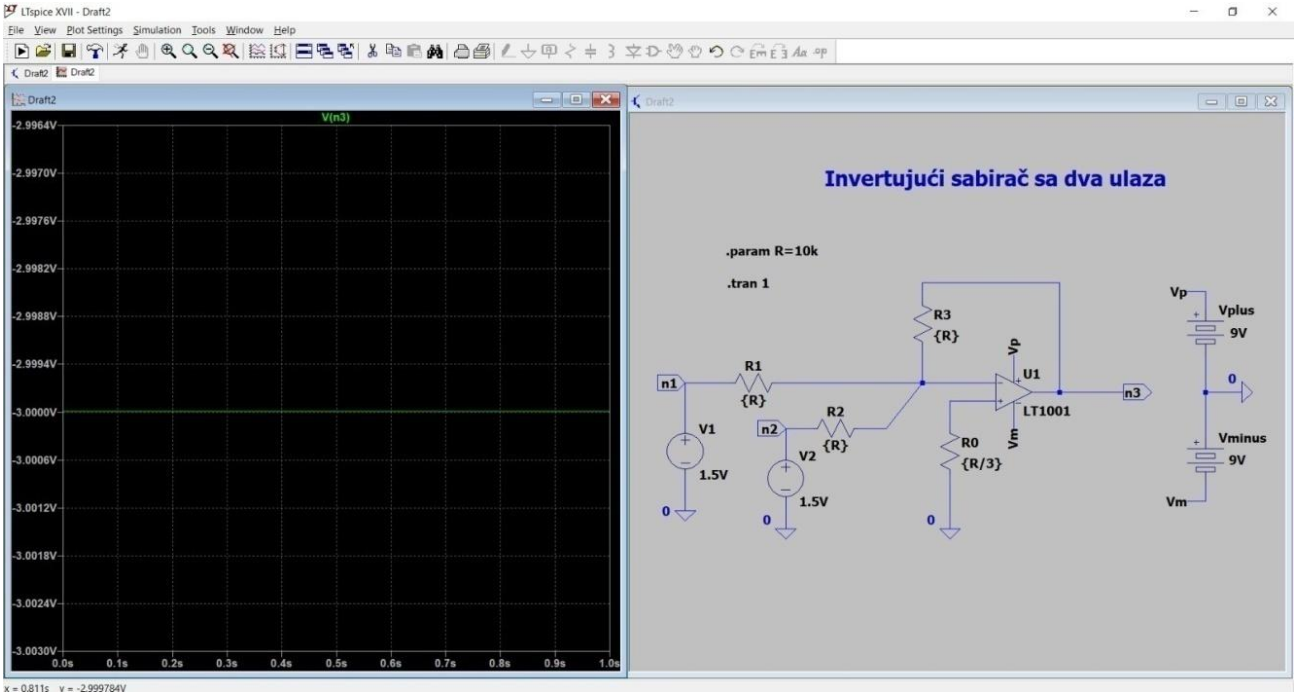
Излазни напон $V_3 = -(Ug_2 + Ug_1)$ се поклапа са хеуристичким решавањем.

2.3. Нумеричко решавање

Симболичко решавање кола даје симболичку везу између величина и у овом случају нам даје понашање кола (потврда да коло представља инвертујући сабирач). За прављење електричног кола са реалним компонентама, потребно је урадити, поред симболичке анализе, и нумеричку анализу.

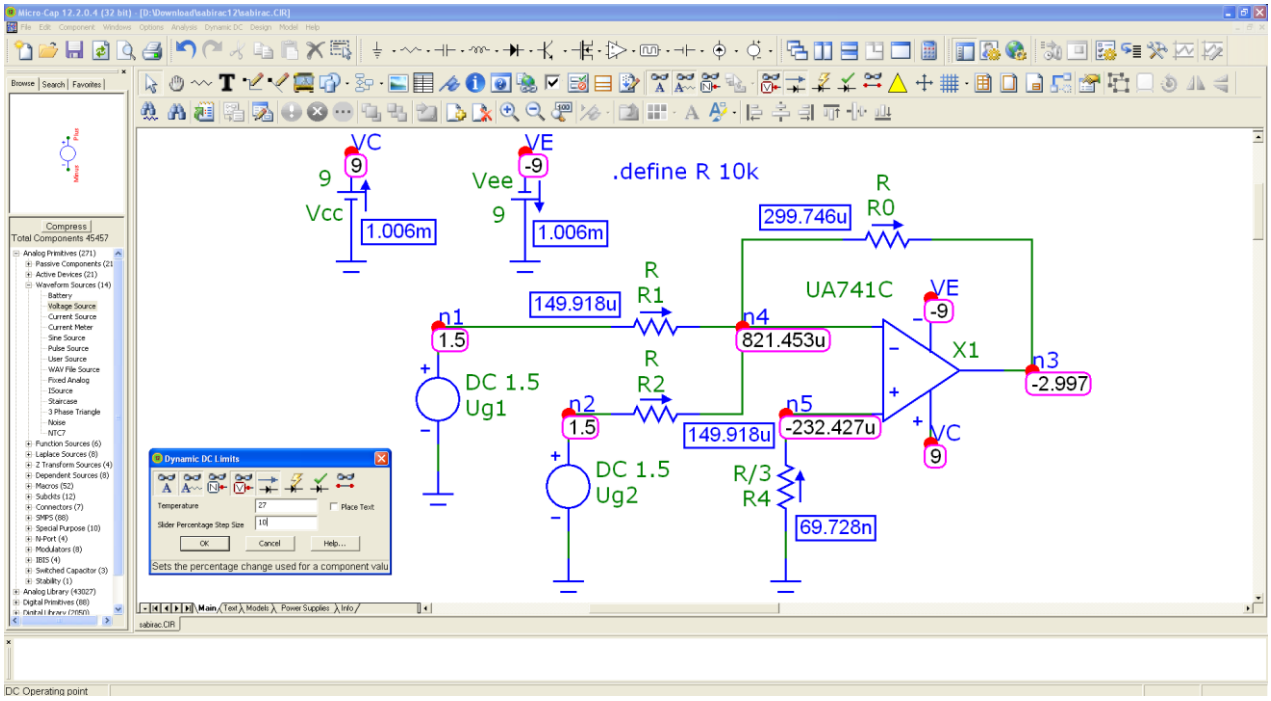
На слици 6 (са десне стране) је представљено електрично коло инвертујућег сабирача, реализовано у програму *LTspice*. Конкретне вредности за елементе су еквивалентне онима које ће бити коришћене у конкретној реализацији са реалним елементима.

Вредност потенцијала чвора V_3 је једнак негативној вредности збира 2 улазна напона (2 генератора константног напона од 1,5V су на чворовима 1 и 2). Напон чвора 3 је једнак -3V што је очекивано на основу симболичког решења. Негативан напон потврђује да је ово шема инвертујућег сабирача. Зависност решења од времена је приказана на левој страни слике 7.



Слика 7: Приказ електричног кола инвертујућег сабирача у програму LTspice (десно) и график временске зависности напона (лево).

Исто коло је решавано и у програму *Micro-Cap12*, где су, поред константне вредност извора од 1,5V, додата и два параметра: темпаратура (27 степени) и проценат промене (10%). На слици 8 је коло инвертујућег сабирача. Излазни напон кола је -2,997V (потенцијал чвора 3). Разлог одступања од тачне вредности, 3V, су унета одступања од потпуно идеалних елемената.



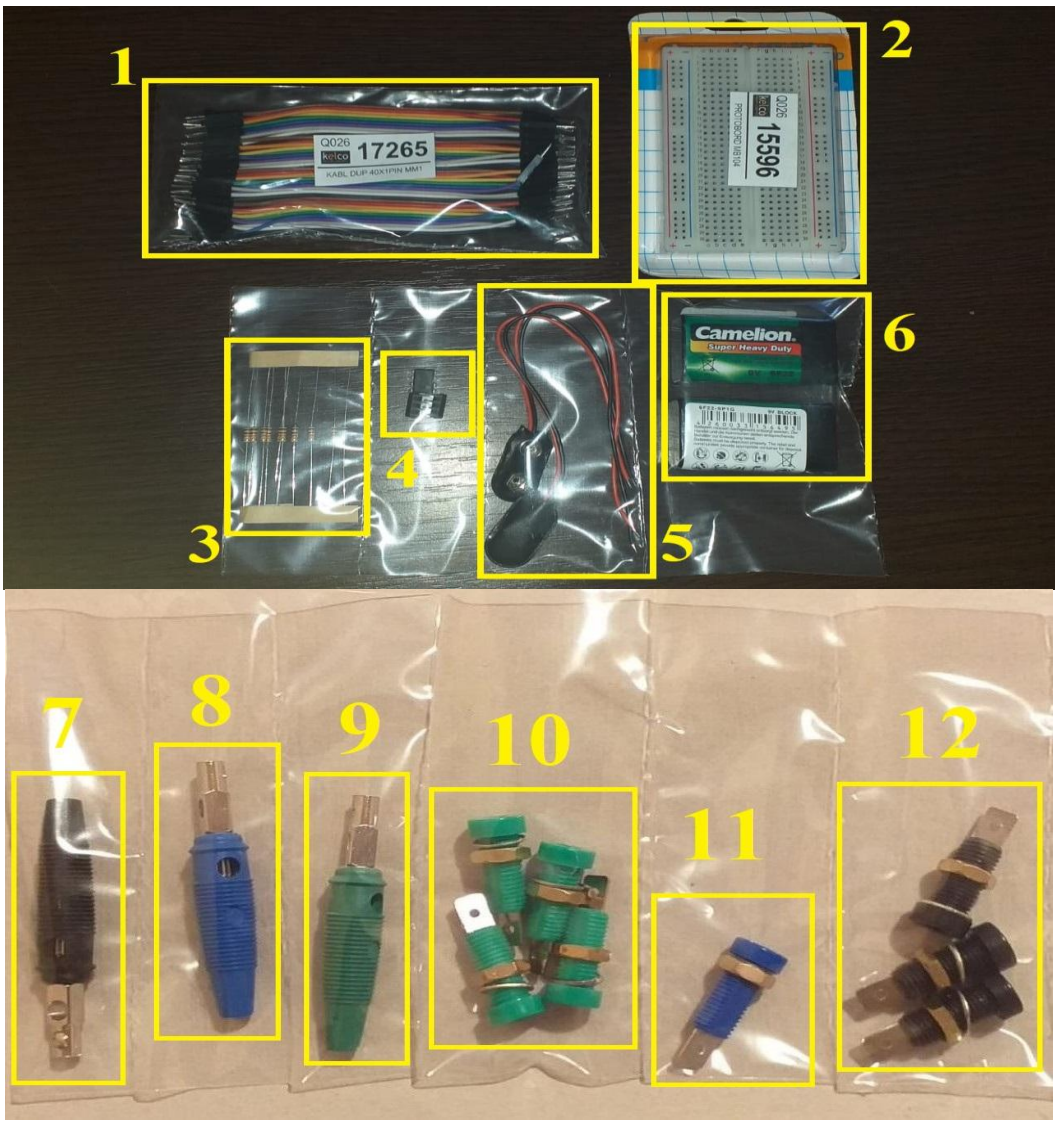
Слика 8: Симулација електричног кола инвертујућег сабирача у програму Micro-Cap12.

3. ХАРДВЕРСКО РЕШЕЊЕ ЕЛЕКТРИЧНОГ КОЛА

У изради хардверског инвертујућег сабирача, коришћене су реалне компоненте. На основу шеме са слике 1, склопљено је електрично коло. Излазни напон је мерен мултимером, и тај резултат је упоређен са оним из софтверске анализе.

3.1. Коришћене реалне компоненте за формирање кола

На сликама 9 и 10 су приказани делови са редним бројем и након тога је у табели 1 написан назив компоненте, коришћена количина и набавна цена.



Слика 9 и 10: Хардверске компоненте.

Редни број са слика 7 и 8	Назив компоненте	Количина коришћених компоненти	Укупна цена (у валути РСД)
1	Каблови за повезивање контаката	10-15	417,96[1]
2	Protoboard	1	277,65
3	Отпорник (10 kΩ; max 0.25W; 5%)[2]	4	11,30
4	Операциони појачавач (OpAmp 741)	1	29,43
5	Конектор за батерију од 9V	2	73,06
6	Батерија (9V)	2	178,96
7	Банана конектор (4mm BU20 црна (нула))	1	155,26
8	Банана конектор (4mm BU20 плава (минус))	1	155,26
9	Банана конектор (4mm BU20 зелена (плус))	1	155,26
10	Буксна (4mm BB4 зелена (плус))	1	151,58
11	Буксна (4mm BB4 плава (минус))	1	151,58
12	Буксна (4mm BB4 црна (нула))	1	151,58

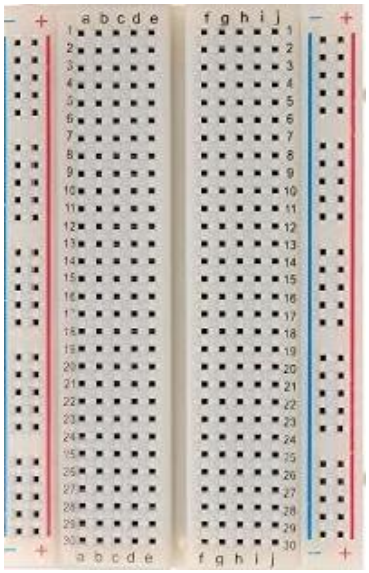
Табела 1: Листа свих коришћених елемената. Укупно је потребно 1908,88 динара.

3.2. Формирање електричног кола

Поступак формирања елекричног кола је представљен кроз колекцију слика.

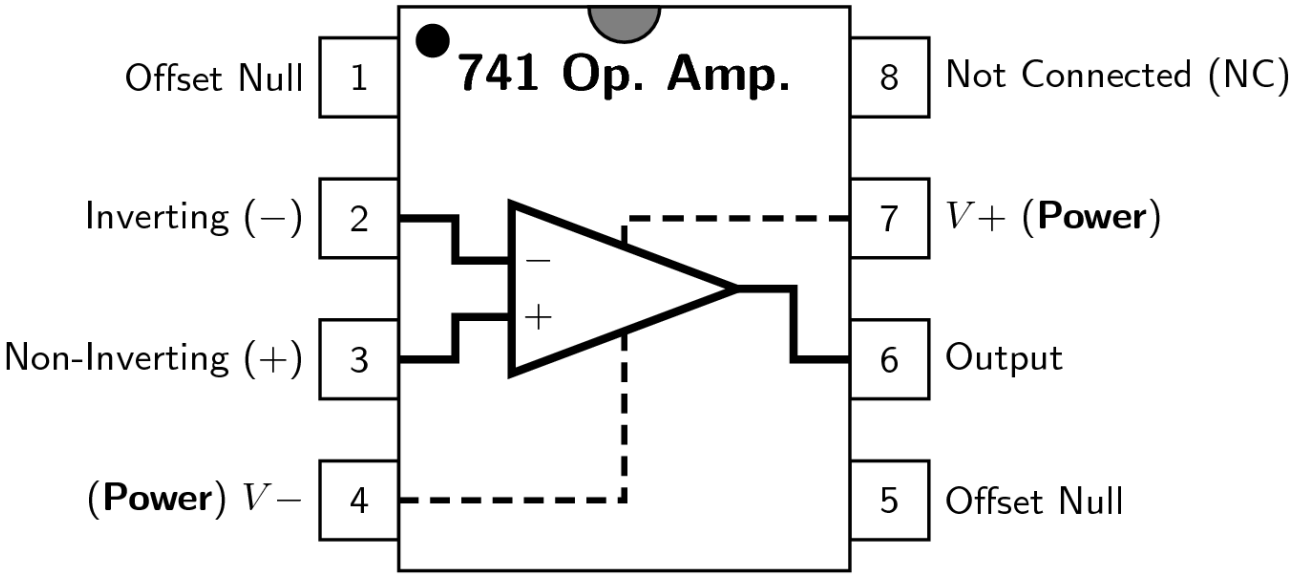
Електрично коло је формирано на protoboard-у (шематски приказ је на слици 11). Protoboard је повољан за коришћење јер су хоризонталне линије на истом потенцијалу, односно галвански спојене, док су вертикалне линије галвански раздвојене. Исти потенцијал хоризонталних линија се користи да се на исти потенцијал повежу елементи који би на шеми били на истом чвору.

[1] Минимална количина коју је могуће купити је 40 комада.
[2] Параметри отпорника су отпорност, максимална снага коју сме да прими а да не прегори и толеранција одступања од фабричке вредности.

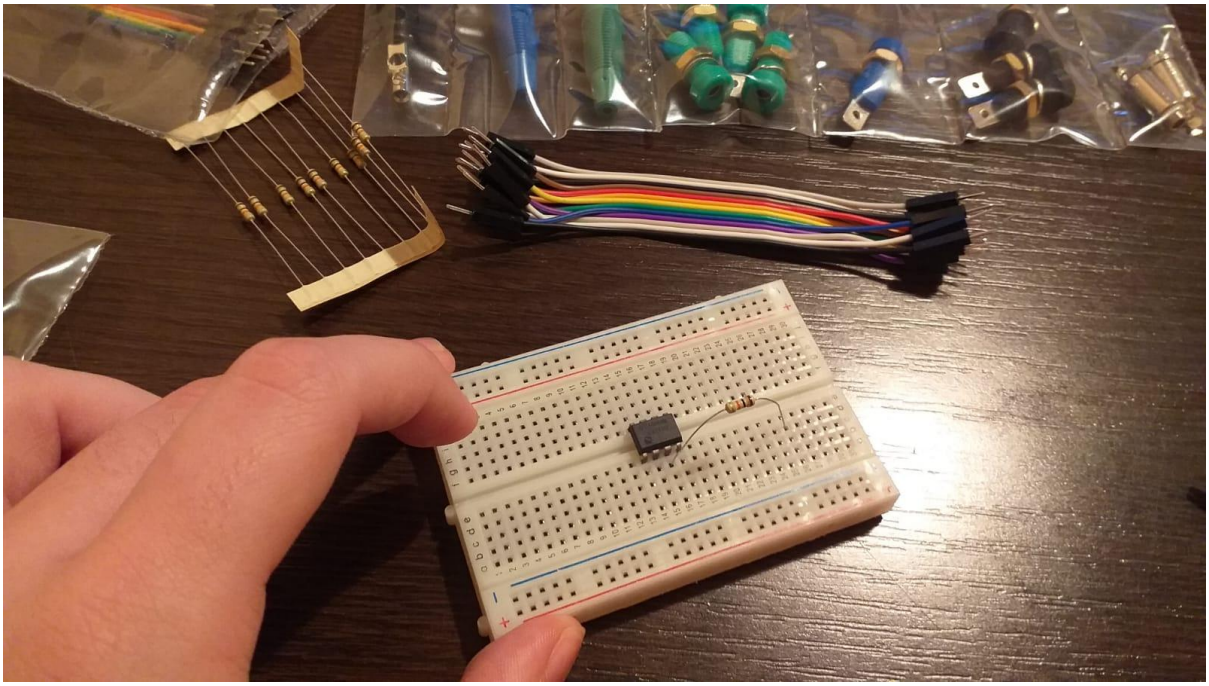


Слика 11: Protoboard.

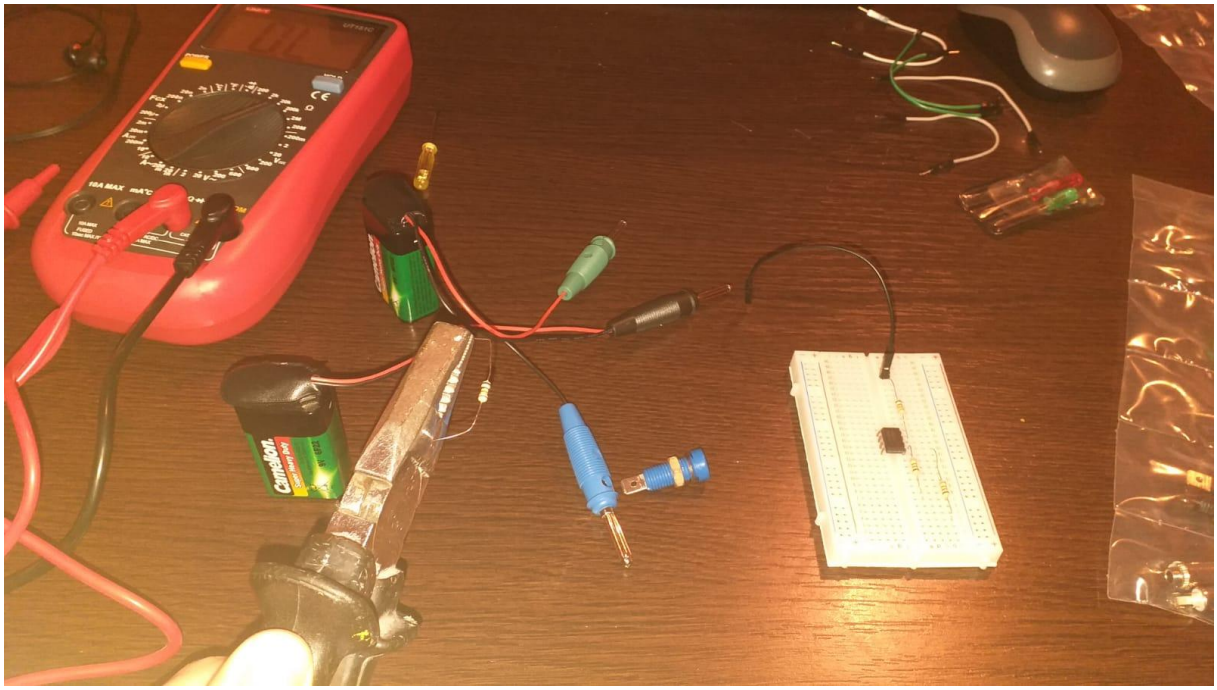
Операциони појачавач се повезује преко средине protoboard-а и начин приказан на слици 12. Разлог оваквог постављања је да не дође до кратког спајања крајева операционог појачавача.



Слика 12: Шематски приказ повезивања операционог појачавача.

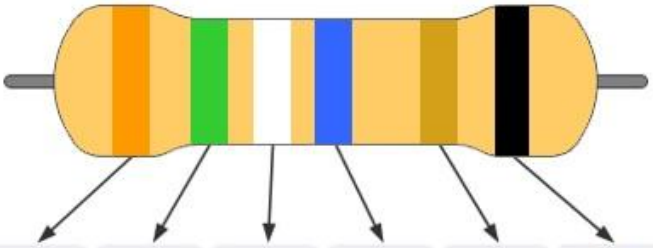


Слика 13: Постављање опетационог појачавача и отпорника.



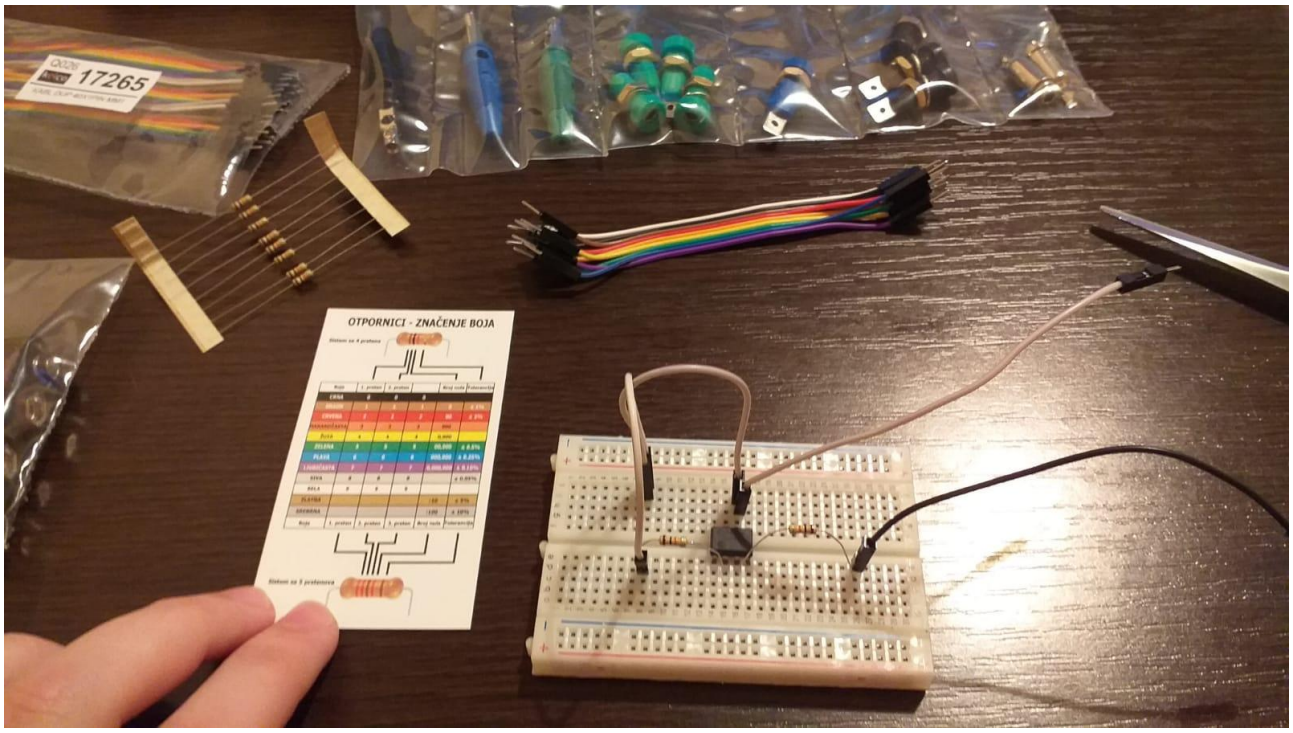
Слика 14: Савијање отпорника да се лепо уклопе на protoboard-у.

Отпорници су резистивни елементи који се карактеришу вредностима отпорности изражени у омима. Сваки отпорник има стандардизован начин одређивања отпорности заснован на бојама које се налазе на њему. На слици 13 је приказана релација отпорност-боја (*resistor color code*).

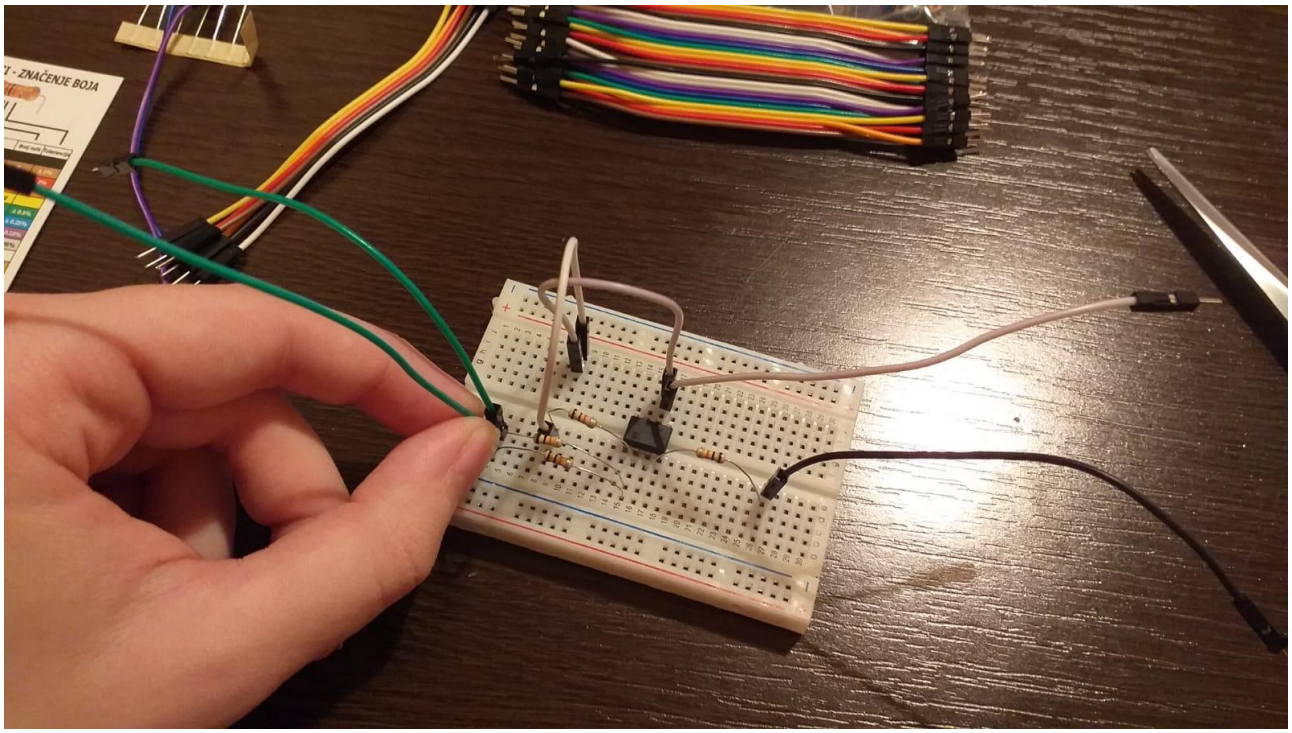


	1st digit	2nd digit	3rd digit	multiply	tolerance	TCR (ppm/K)
Black	0	0	0	1	1% (F)	100
Brown	1	1	1	10	2% (G)	50
Red	2	2	2	100		15
Orange	3	3	3	1K		25
Yellow	4	4	4	10K		
Green	5	5	5	100K	0.5% (D)	
Blue	6	6	6	1M	0.25% (C)	10
Violet	7	7	7	10M	0.1% (B)	5
Gray	8	8	8	100M	0.05% (A)	
White	9	9	9	1G		
Gold				0.1	5% (J)	
Silver				0.01	10% (K)	
None					20% (M)	

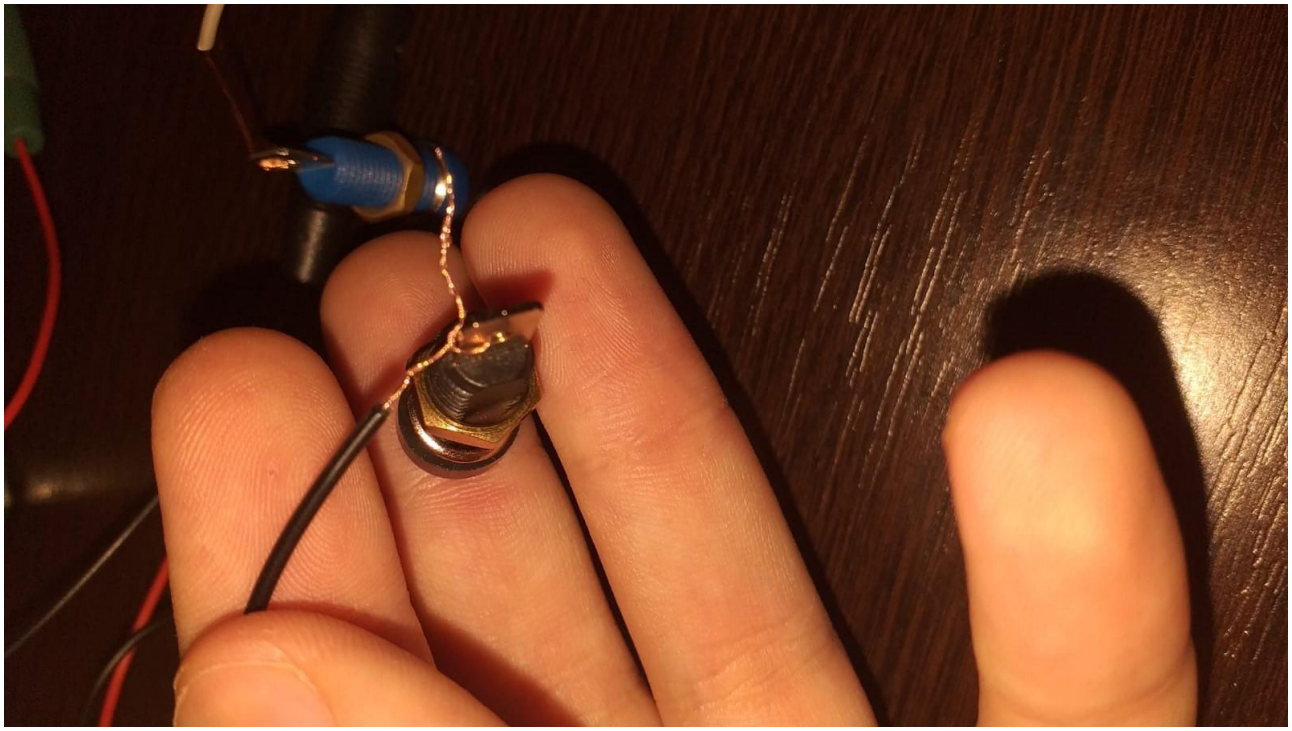
Слика 15: Одређивање отпорности отпорника на основу боје.



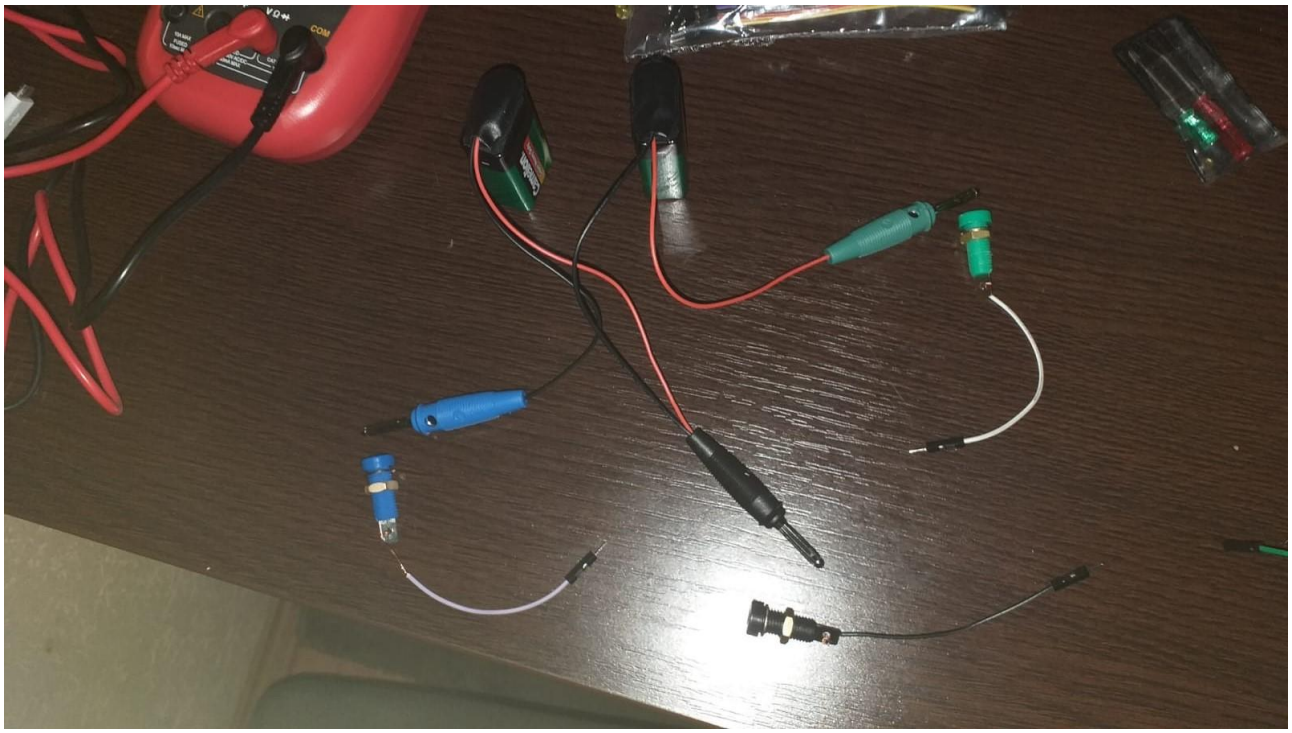
Слика 16: Постављање отпорника и каблова за повезивање контаката – први део.



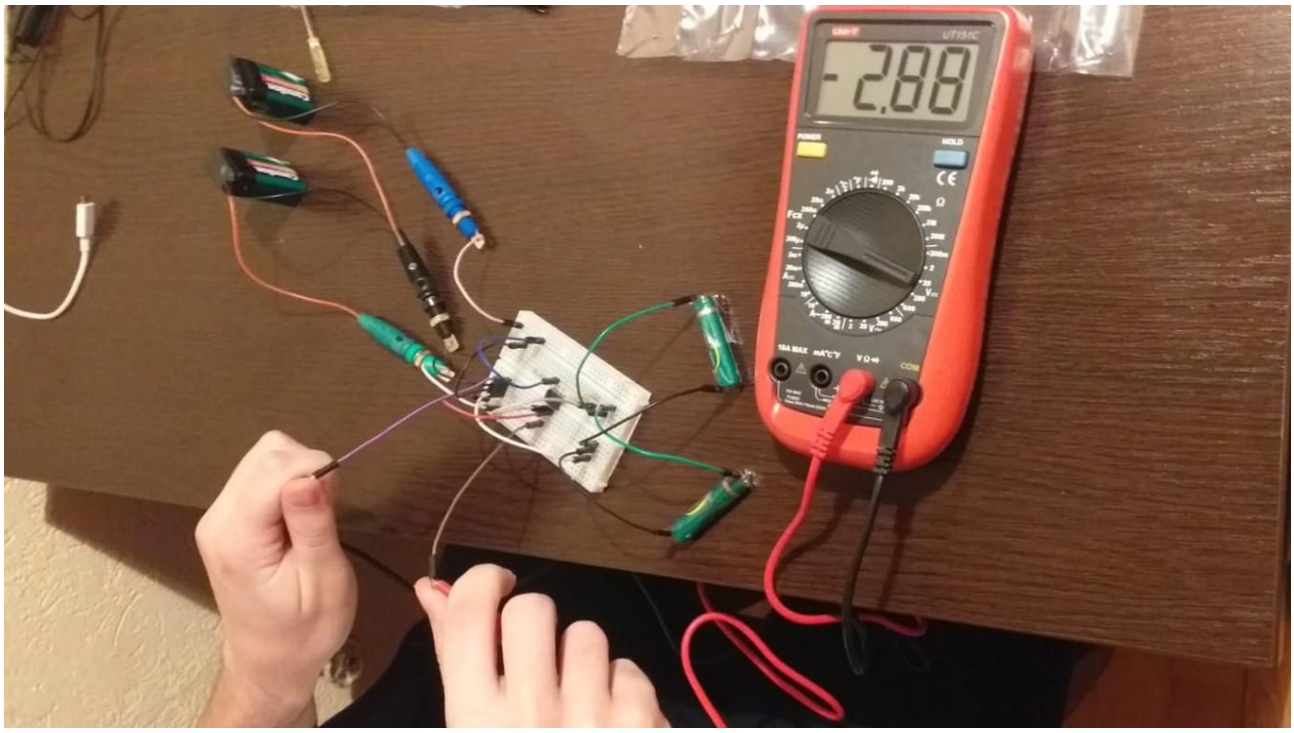
Слика 17: Постављање отпорника и каблова за повезивање контаката – други део.



Слика 18: Повезивање буксне бакарном жицом. Увезано, не лемљено.



Слика 19: Батерије употребљене за напајање операционог појачавача.



Слика 20: Мерење излазног напона операционог појачавача мултимером.

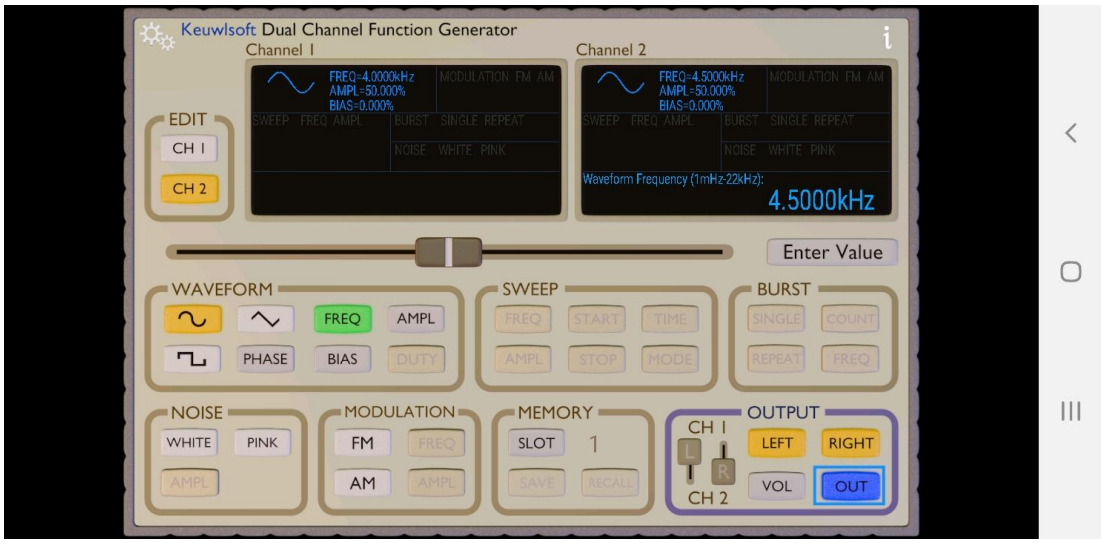
Као генератори су коришћене 2 батерије од 1.5V, док је излазни напон, који се очитава са мултимера, приближно једнак -3V.

4. ВИРТУЕЛНА ЛАБОРАТОРИЈА

Електрично коло инвертујућег сабирача реализовано је помоћу 2 батерије константног напона. У насавку је приказана реализација истог кола, с тим да је извор напона наизменичан и генерисан је преко апликације телефона. Очитавање резултата је урађено преко софтвера који симулира осцилоскоп на лаптопу.

4.1. Мобилна апликација

Андроид апликација која је коришћена за генерисање наизменичног напона се назива *Function generator* [1]. На слици 21 се налази приказ ове апликације (*screenshot* екрана у току рада са апликацијом).



Слика 21: Function generator апликација у току рада.

Могуће је генерисати 2 излазна сигнала на 2 канала (*Channel 1 и Channel 2* на слици). Подешавање одговарајућег канала се бира одговарајућим тастером *CH1* или *CH2* у делу *EDIT*. Подешавање излазог сигнала се ради (оно што је било потребно у овој реализацији) у делу *WAVEFORM*. Могућ је избор облика сигнала: синусоидни, тестерасти или поворке правоугаоних сигнала. Такође, могуће је подесити угаону фреквенцију, амплитуду и фазу, преко клизача (*slider*) или директним уношењем вредности.

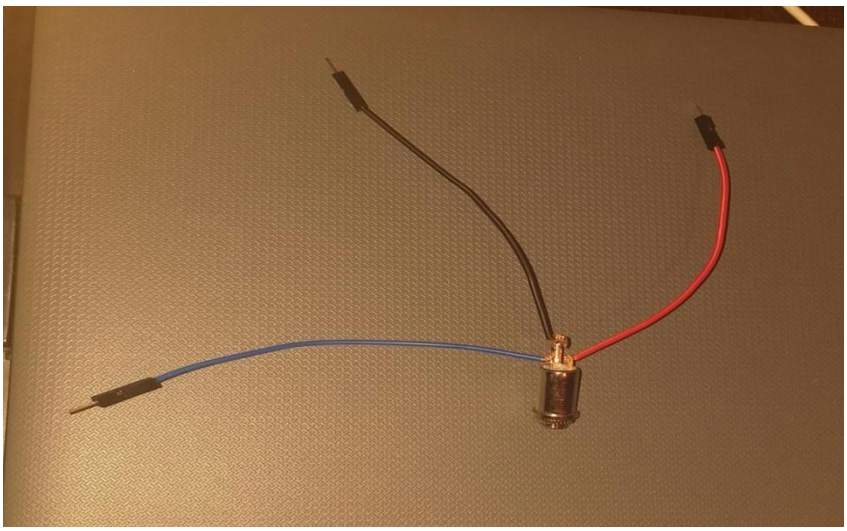
Додатно је могуће подесити који канал је *LEFT (L)* а који *RIGHT (R)*. Уобичајено је да се на леви излаз пушта први канал, а на десни излаз други канал, али се то може подешавати клизачима у делу *OUTPUT*. Дугме *OUT* емулира сигнале подешене у апликацији док се активирањем дугмади *LEFT* и *RIGHT* активирају излази кроз који се пуштају одговарајући емулирани сигнали (у зависности од клизача *L* и *R*).

У реализацији кола инвертујућег сабирача као напонски извори су коришћена 2 сигнала различитих фреквенција: 4000Hz и 4500Hz.

4.2. Повезивање напонских генератора

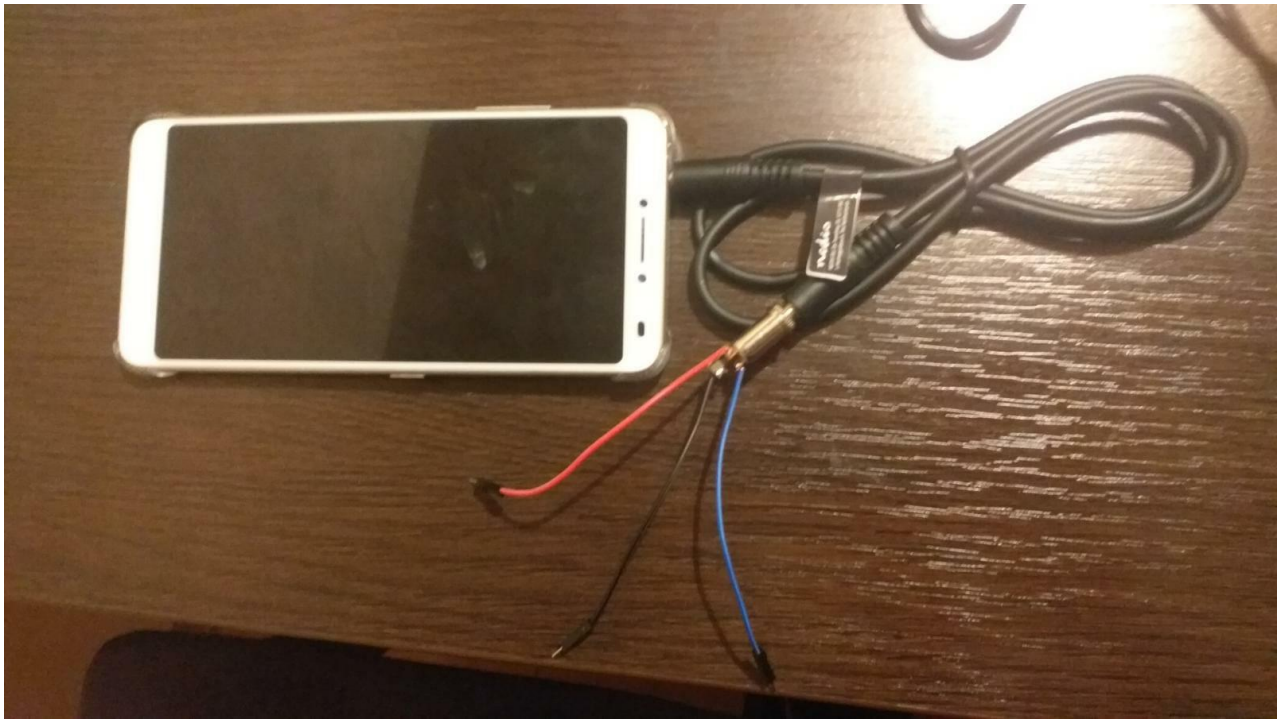
Коришћењем апликације *Function generator* симулирају се напонски извори. За повезивање телефона на електрично коло инвертујућег сабирача (а самим тим и генератора) потребни су одговарајући стерео кабал и конектор, приказани на слици 22.

Слика 22: Стерео кабл са два мушка краја и стерео женски конектор (задња страна) (лево) и три излаза из стерео женског конектора (предња страна) – леви канал, десни канал, уземљење (десно).



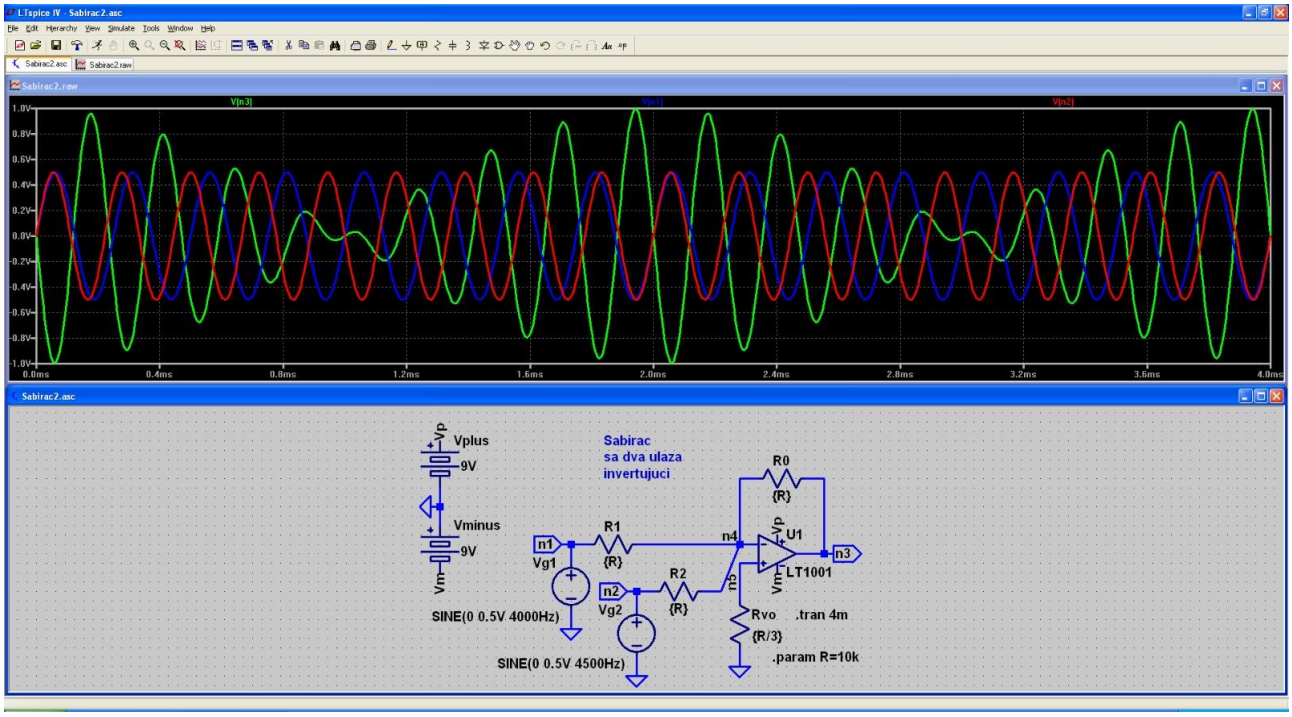
Слика 23: Галванско повезивање жица на леви и десни канал и уземљење.

На женски стерео конектор повезана су 3 кабла (галванска веза, каблови су везани за конектор а не лемљени) за два канала и уземљење, што је приказано на слици 23. На слици 24 се налази комплетно повезан телефон са конекторима спреман да се прикључи на електрично коло сабирача.



Слика 24: Повезивање стерео конектора на телефон – један улаз, и женски конектор – други улаз.

У програму LTspice је симулирано коло са овим напонским изворима и резултат је приказан на слици 25.



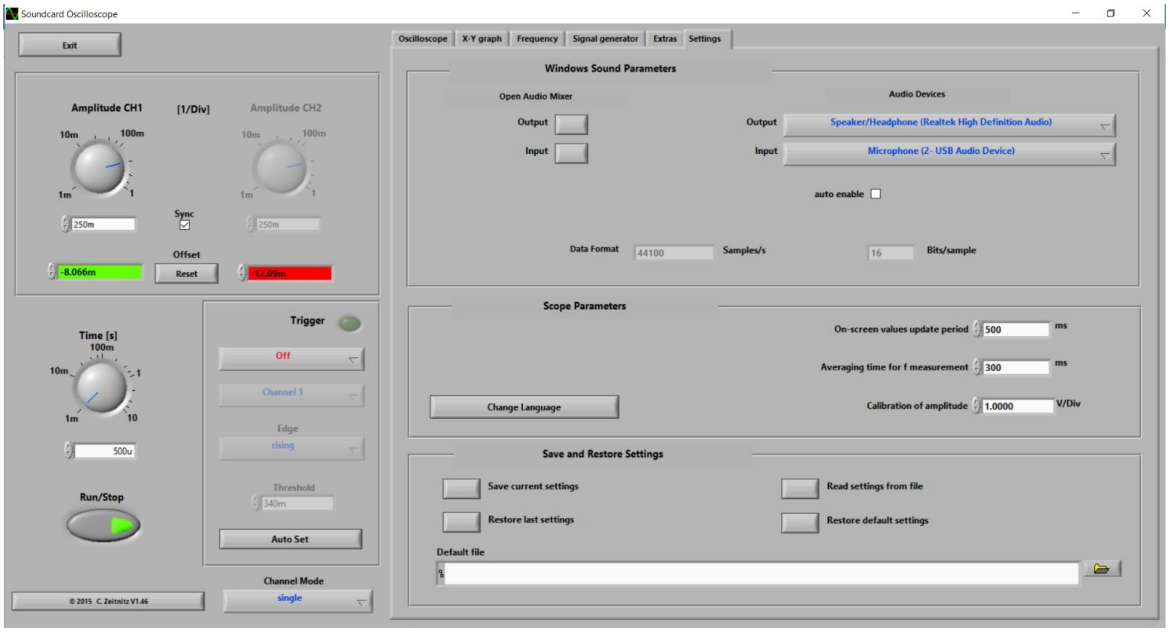
Слика 25: Електрично коло инвертујућег сабирача са временски промењивим напонским изворима кружних учестаности 4000Hz и 4500Hz симулирано у програму LTspice. На графику зависности напона од времена су плавом и црвеном бојом приказани напонски извори, док је зеленом бојом приказан излаз кола.

4.3. Симулација осцилоскопа

Да би се очитао излазни сигнал операционог појачавача на лаптоп уређај, потребно је остварити везу са портом за улазни уређај (*input*) лаптопа, који је најчешће представљен као улаз за микрофон. Ради заштите звучне картице самог уређаја, коришћена је екстерна звучна картица, која се повезује за лаптоп преко *USB* порта. Екстерна звучна картица коришћена у овом пројекту има два стерео улаза за повезивање једног улазног уређаја (микрофон) и једног излазног уређаја (звучници, слушалице). Звучна картица која је коришћена је приказана на слици 26.

Слика 26: Звучна картица.

Програм који се користи за очитавање излаза електричног кола преко звучне картице је *Soundcard Oscilloscope* [5]. Подешавање улазних параметара виртуелног осцилоскопа приказано је на слици 27. Подешава се улазни ток сигнала, очекивана амплитуда и време, што се може подешавати и у току самог рада осцилоскопа.

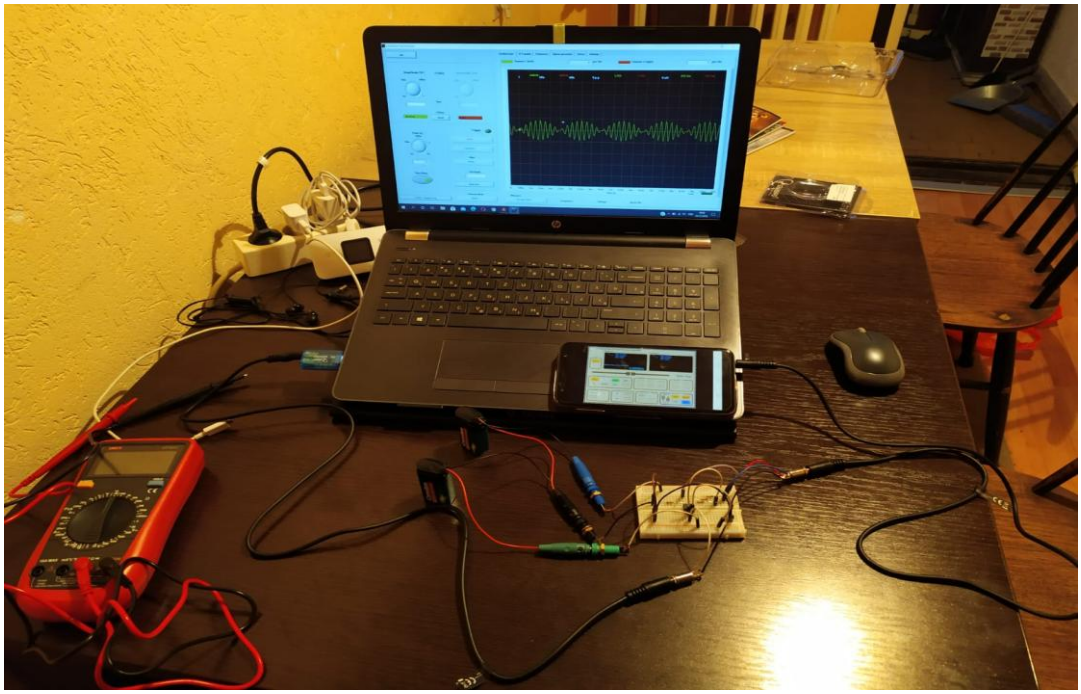


Слика 27: Мени за подешавање улазних параметара осцилоскопа.

Виртуелни осцилоскоп служи за приказивање излазног сигнала инвертујућег сабирача чији су временски зависни улазни сигнали генерисани на начин описан у претходном поглављу. На апсциси је приказано време а на ординати вредност напона за одговарајући временски тренутак. Подешавање се врши избором одговарајућег броја подеока на који ће се сигнал дискретизовати (прецизније се подешава однос волти по подеоку и времена по подеоку; могућа је и аутоматкса конфигурација ових односа дугметом *Auto Set*). На падајућем менију *Measure*, избором опције *Hz and volts*, могуће је показати вредност фреквенције (у Hz), размак између максималног и минималног пика (*Peak-to-Peak*) вредности напона (у V) и ефективне вредности напона.

4.4. Реализација кола помоћу виртуелне лабораторије

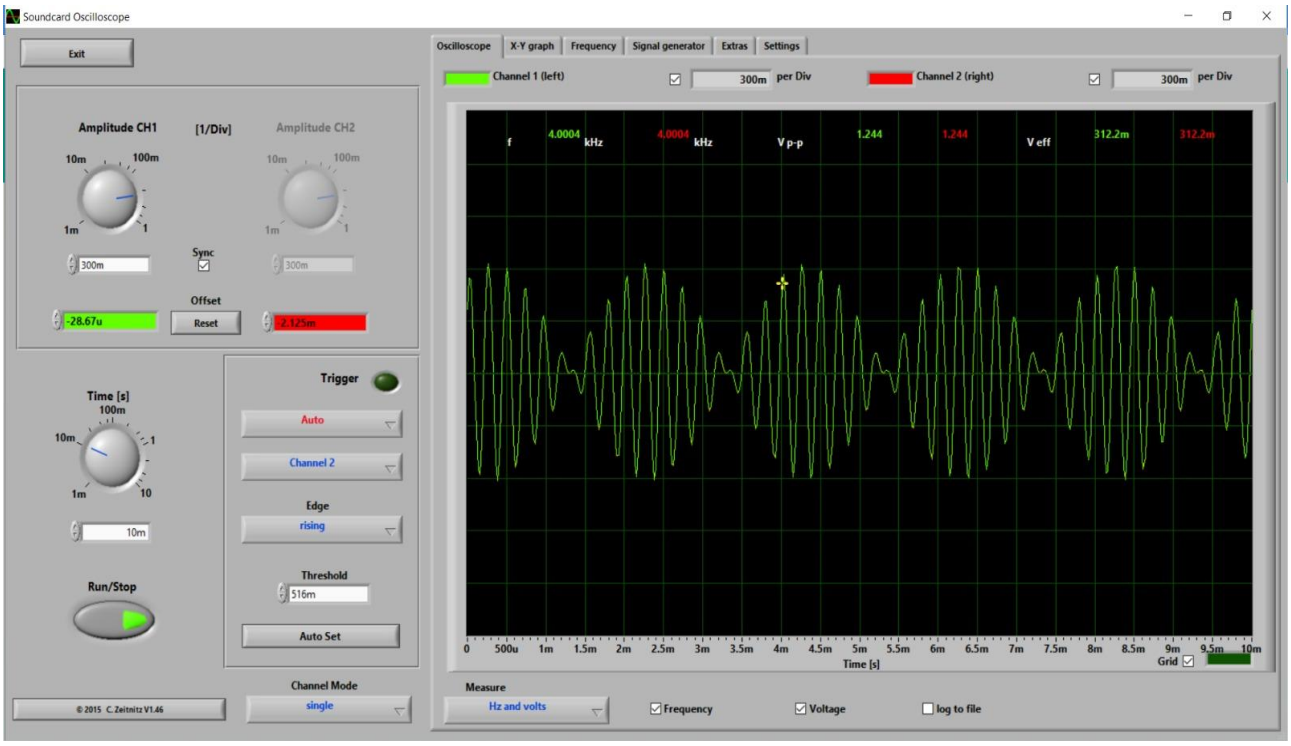
Електрично коло инвертујућег сабирача са напонским изворима генерисаним преко апликације за телефон, пријемом излазног сигнала преко звучне картице и приказ резултата одговарајућим софтвером за симулацију осцилоскопа приказано је на слици 28.



Слика 28: Комплетна шема генератора (симулирано телефоном), инвертујућег сабирача и виртуелног осцилоскопа (симулирано на лаптопу).

На слици 29 се налази приказ рада виртуелног осцилоскопа за електрично коло инвертујућег сабирача. У одређеним временским тренуцима сигнали су у фази када је и излазни напон максималан, док је у неким тренуцима разлика фаза улазних сигнала таква да су они у контра фази, што резултује напоном приближне вредности 0.

Добијени резултати се слажу са нумеричким резултатима оваквог кола, симулираног у програму LTspice. График добијен нумеричком анализом, приказан на слици 25, и виртуелним осцилоскопом се слажу по облику, тренду и амплитудама.



Слика 29: Приказ излаза инввертујућег сабирача на виртуелном осцилоскопу.

5.ЗАКЉУЧАК

Израда овог инвертујућег сабирача показује одступање резултата услед различитости реалних хардверских компоненти од теоријски идеалних. У решавању електричих кола и у софтверу *LTspice* (где је рађена нумеричка анализа), као и приликом симболичког решења, претпостављају се идеални елементи. То подразумева да су идеални: генератори (без унутрашње отпорности), операциони појачавач (напон и струја првог приступа су идентични једнаки нули), отпорници (отпорност не одступа од задате вредности), кратки спојеви, конектори, жице (без унутрашње отпорности и губитака). Моделовањем неких реалних фактора у софтверу *Micro-Cap12* показује да ће излаз кола бити различит у односу на теоријски очекивану вредност. Утицај реалних, горе побројаних фактора, утиче на излазни напон и он је различит од теоријски очекиване вредности. Реални фактори који су присутни у електричном колу са реалним компонентима не утичу на знак решења чиме се оправдава назив инвертујући сабирач. Одступања у резултату, у односу на софтверска решавања, нису значајно велика и израда инвертујућег сабирача показује да је теоријско моделовање електричних кола оправдано и да без већих измена структурна шема кола може да се реализује реалним компонентама, а да резултати буду блиски очекиваним. Електрично коло инвертујућег сабирача је потврђено и напонским изворима који су временски променљиви реализацијом виртуелне лабораторије. Мерења су обавњена симулираним осцилоскопом и потврђује се концепт инвертујућег сабирача (сабирање тренутних вредности 2 улазна напона) и у случају временски променљивих извора.

Литература

[1] Function Generator (http://www.keuwl.com/FunctionGenerator/, 01.10.2021.)

[2] LTspice (https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators.html, 01.10.2021.)

[3] Maxima (https://maxima.sourceforge.io/, 01.10.2021.)

[4] MicroCap12 (http://www.spectrum-soft.com/index.shtm, 01.10.2021.)

[5] Souncard Oscilloscop (https://www.zeitnitz.eu/scope_en, 01.10.2021.)

[6] Teorija električnih kola – sajt predmeta (http://tek.etf.rs/, 12.11.2020.)

[7] Tošić V. D., Potrebić, M. M. (2019). Symbolic analysis of linear electric circuits with Maxima CAS. Application of Free Software and Open Hardware. Belgrade. Serbia: Zenodo.