

# UPUTSTVO ZA SOFTVERSKI ALAT QucsStudio 3.3.2

## – PRAKTIKUM IZ RAČUNARSKE ANALIZE KOLA –

v0.1

Dr Nikola Basta, asistent

Dr Milka Potrebić, redovni profesor

Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu

Katedra za opštu elektrotehniku

## 1 UVOD

Program *QucsStudio* [1] je simulator električnih kola koji se zasniva na projektu *Qucs* (Quite Universal Circuit Simulator) [2], ali predstavlja jedno zasebno i originalno softversko rešenje. *QucsStudio* obuhvata analizu u stacionarnom režimu, tj. ustaljeni konstantni odziv, kao i u vremenskom (*transient*) i frekvencijskom (AC) domenu, te je pogodan za rešavanje problema iz predmeta Teorija električnih kola i Praktikum iz računarske analize kola [3], gde je fokus prevashodno na linearnim električnim mrežama. Takođe, *QucsStudio* poseduje i mogućnost rešavanja nelinearnih kola, mikrotalasnih vodova (*transmission lines*), sistema sastavljenih od telekomunikacionih (*system components*) i digitalnih (*digital components*) komponenti, ali te opcije nisu razmatrane u ovom uputstvu.

Ovo uputstvo ima za cilj da studentima približi osnove rešavanja kola pomoću računarske simulacije kroz primere zadataka sa linearnim električnim mrežama.

## 2 INSTALACIJA

Link ka zip datoteci programa nalazi se na stranici <http://dd6um.darc.de/QucsStudio/download.html>. Nakon snimanja zip datoteke na hard disk i njegovog otpakivanja, nije potrebna nikakva instalacija. Program se pokreće putem izvršne datoteke na putanji *QucsStudio/bin/qucs.exe*.

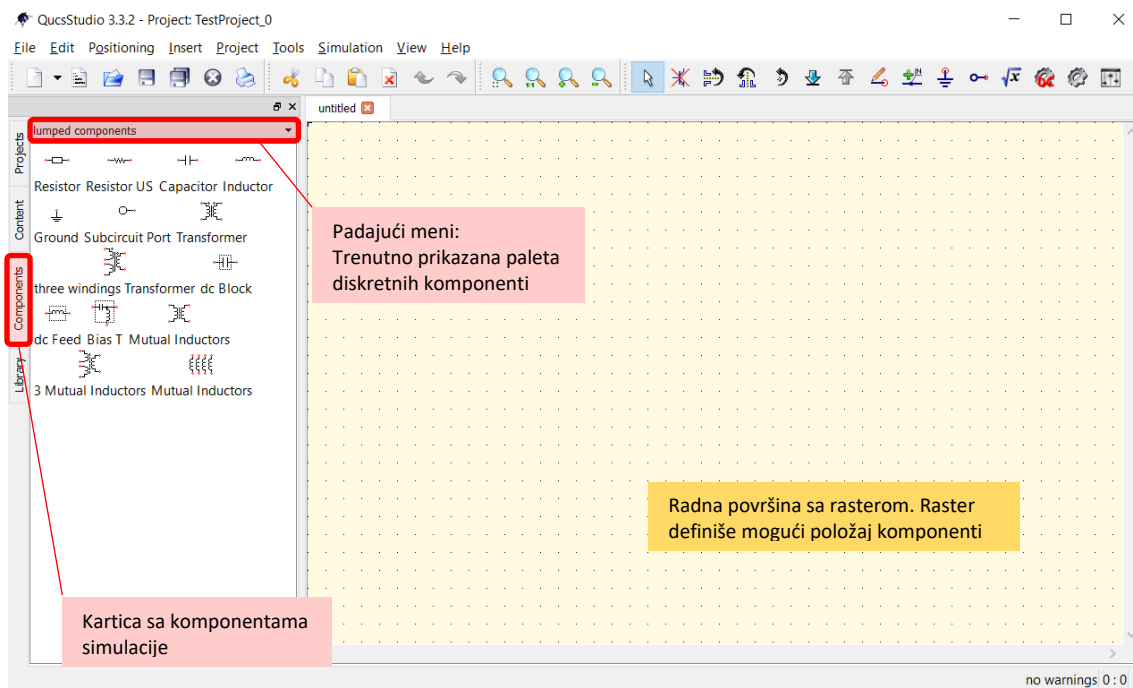
## 3 KREIRANJE KOLA

### 3.1 Korisnički interfejs

Korisnički interfejs je tipičnog formata (slika 1). Sastoji se od trake sa alatkama (*toolbar*) u gornjem delu ekrana sa najčešće korišćenim komandama za operisanje nad samom datotekom šeme ili projekta i za manipulaciju komponentama objekata. Sa desne strane nalazi se radna površina sa rasterom čvorova (*nodes*), a se leve paleta objekata koja obuhvata:

- listu projekata (*Projects*);
- sadržaj odabranog projekta (*Content*);
- generičke (idealizovane) komponente, parametre simulacije i dijagrame (*Components*);
- biblioteku modela komercijalnih komponenti (*Library*);

Prozori sa radnim površinama odabiraju se karticama (*tabs*). U njima se prikazuje šema električnog kola, odnosno rezultat simulacije. Unutar iste radne površine moguće je kombinovati električnu šemu i grafikw s rezultatima, što je korisno za dokumentaciju.



Slika 1. Izgled korisničkog interfejsa. Levo je prikazan odeljak palete sa diskretnim komponentama, a desno radna površina sa rasterom.

### 3.2 Elementi


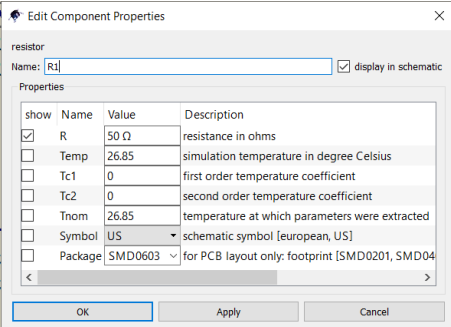
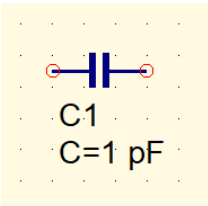
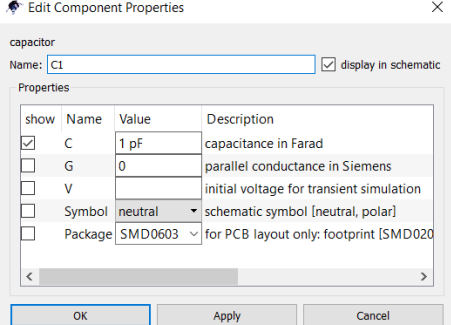
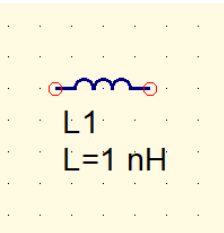
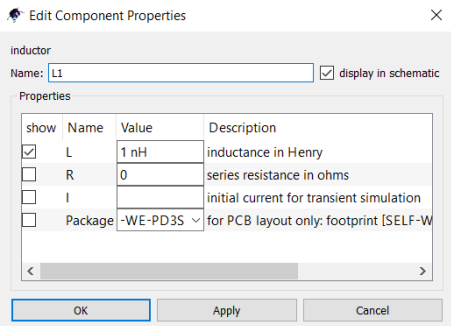
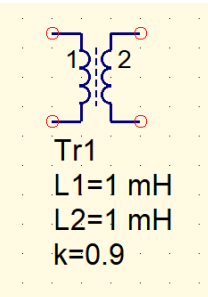
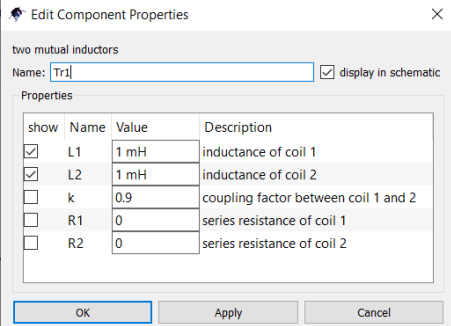
Pored idealnih pasivnih komponenti (otpornik, kondenzator, kalem, spregnuti kalemovi) i standardnih nezavisnih generatora (jednosmerni strujni i naponski, prostoperiodični strujni i naponski), u *QucsStudio*-u postoje i kontrolisani generatori, i to u sve četiri varijante: naponski ili strujni generator kontrolisan naponom ili strujom.

Nezavisne generatore čiji pobudni signali su složene funkcije vremena i koji se ne mogu realizovati kombinacijom standardnih generatora i komponenti, realizujemo pomoću tzv. izvora definisanih datotekom (*File Based Voltage Source* - FBVS) i (*File Based Current Source* - FBCS). Oni predstavljaju naponski, odnosno strujni generator, čija se funkcije napona, odnosno struje zadaju tabelarnim unosom u datoteci, u vidu dva vektora-kolone: prvi vektor određuje frekvenciju ( $x$ -osu), a drugi vrednost funkcije ( $y$ -osu). Dodatno, može se definisati linearna, kubna ili stepenasta interpolacija između zadatih tačaka.

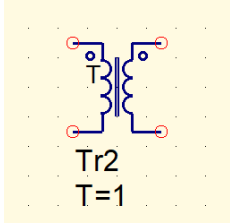
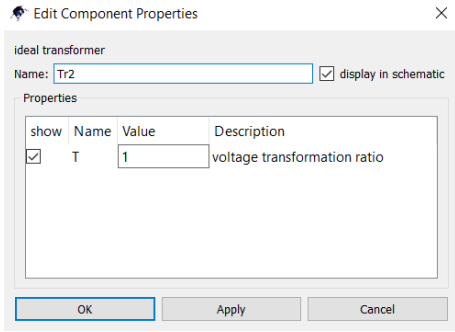
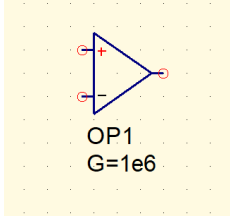
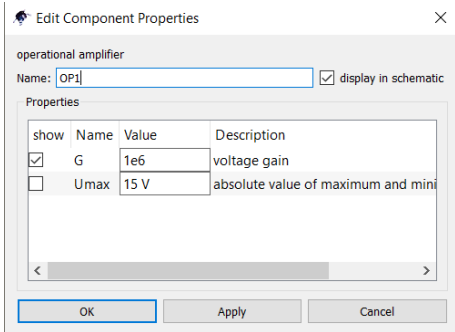
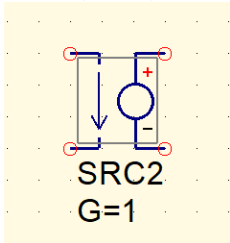
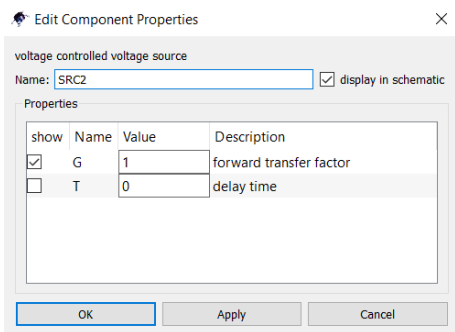
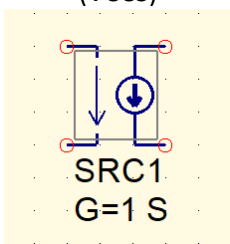
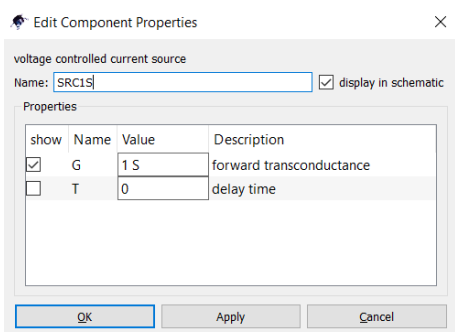
Od nelinearnih komponenti, izdvajamo operacioni pojačavač, diodu i tranzistor. Od posebnog interesa je operacioni pojačavač, koji u suštini predstavlja nelinearan sklop izuzetno velikog nominalnog pojačanja ( $10^4 \div 10^6$ ). Međutim, on se uglavnom nalazi u konfiguraciji sa povratnom spregom (pozitivnom ili negativnom), koja omogućava da kolo bude linearno, a posmatrane prenosne karakteristike konačnog pojačanja.

U tabeli 1 dat je pregled zavisnih i nezavisnih izvora (*Components > sources*), operacionog pojačavača (*Components > nonlinear components*) i diskretnih komponenti (*Components > lumped components*), kao i njihovih parametara. Pored osnovnih definicionih parametara i prirodnih početnih uslova (napona kondenzatora i struja kalemova) postoje i dodatni parametri, kao što su parazitni efekti, temperaturni koeficijenti i vremensko kašnjenje, kojim se modeluju realne komponente.

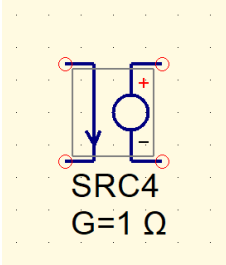
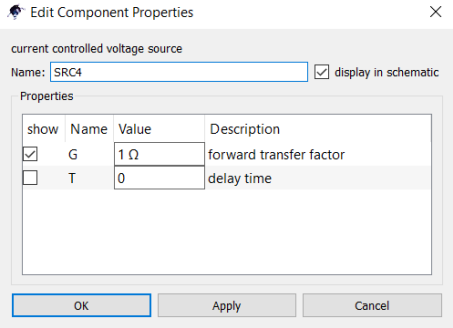
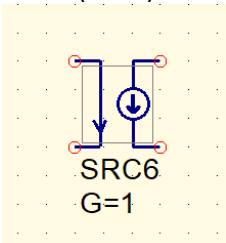
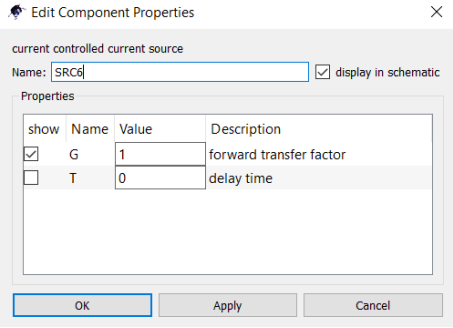
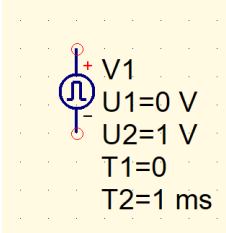
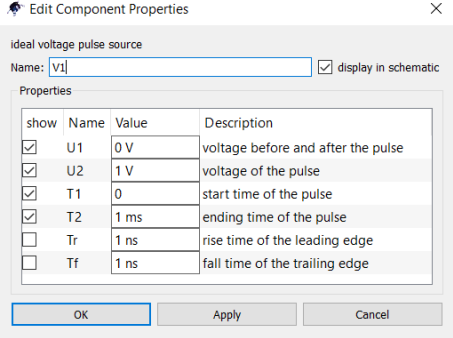
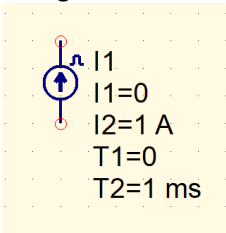
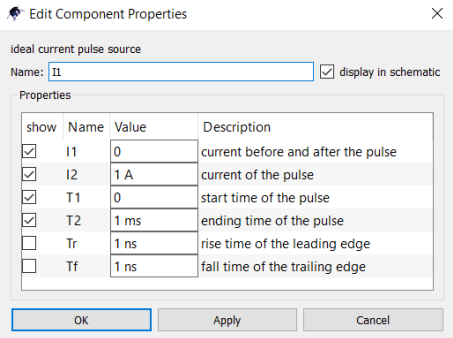
Tabela 1. Prikaz osnovnih elemenata (diskretnih komponenti) i njihovih parametara.

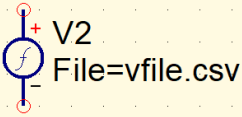
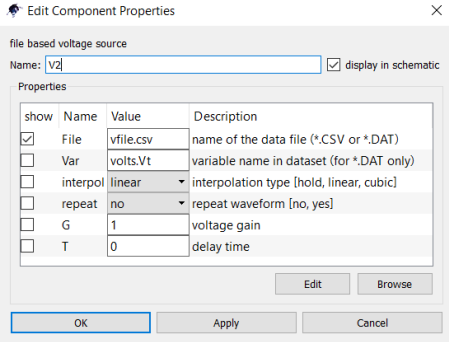
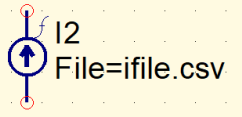
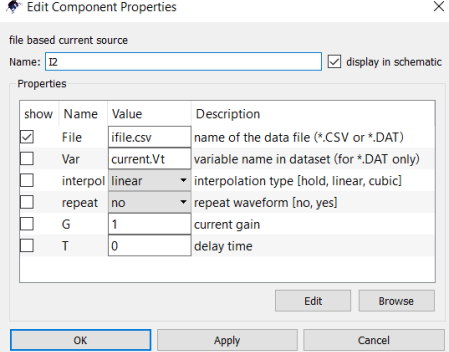
Element	Jednačine elementa	Parametri elementa
<p>Otpornik</p> 	$u = R \cdot i$	
<p>Kondenzator</p> 	$i = C \frac{du}{dt}$	
<p>Kalem</p> 	$u = L \frac{di}{dt}$	
<p>Linearni induktivni transformator<sup>1</sup></p> 	$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt}$ $u_2 = L_{12} \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt}$ $k = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}}$	

<sup>1</sup> Na četvoropolima u QucsStudio-u pristup 1 je sa leve strane, a pristup 2 sa desne.

<p>Idealni transformator</p>  <p>Tr2 T=1</p>	$u_1 = m u_2$ $i_1 = -\frac{1}{m} i_2$	
<p>Operacioni pojačavač<sup>2</sup></p>  <p>OP1 G=1e6</p>	$u_1 = 0$ $i_1 = 0$	
<p>Naponski kontrolisan naponski generator (VCVS)</p>  <p>SRC2 G=1</p>	$u_2 = a u_1$ $i_1 = 0$	
<p>Naponski kontrolisan strujni generator (VCCS)</p>  <p>SRC1 G=1 S</p>	$u_1 = 0$ $i_2 = g u_1$	

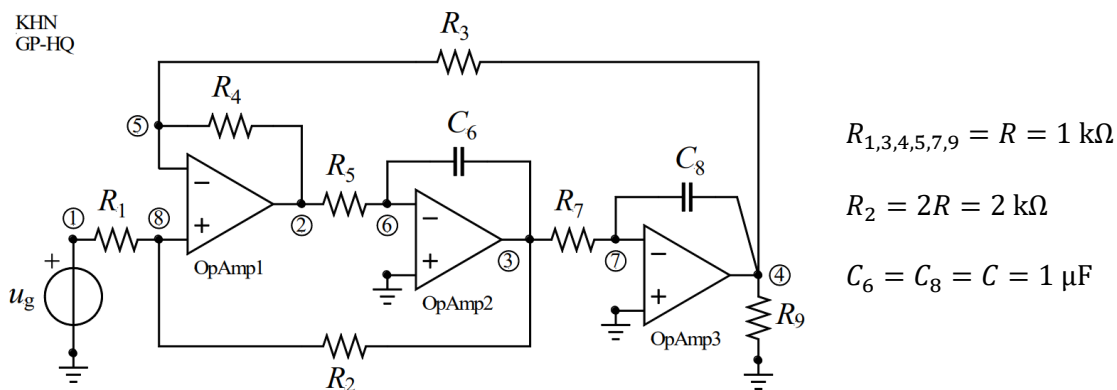
<sup>2</sup> Kod komponente operacionog pojačavača, iako su vidljiva samo tri terminala, podrazumevamo implicitno da postoji četvrti terminal na pristupu 2 (na izlazu pojačavača) koji se nalazi na nultom potencijalu, tj. potencijalu referentnog čvora.

<p>Strujno kontrolisan naponski generator (CCVS)</p>  <p>SRC4 G=1 Ω</p>	$u_1 = 0$ $u_2 = r i_1$	 <p>Edit Component Properties</p> <p>current controlled voltage source</p> <p>Name: SRC4 <input checked="" type="checkbox"/> display in schematic</p> <p>Properties</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>show</th> <th>Name</th> <th>Value</th> <th>Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>G</td> <td>1 Ω</td> <td>forward transfer factor</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>T</td> <td>0</td> <td>delay time</td> </tr> </tbody> </table> <p>OK Apply Cancel</p>	show	Name	Value	Description	<input checked="" type="checkbox"/>	G	1 Ω	forward transfer factor	<input type="checkbox"/>	T	0	delay time																
show	Name	Value	Description																											
<input checked="" type="checkbox"/>	G	1 Ω	forward transfer factor																											
<input type="checkbox"/>	T	0	delay time																											
<p>Strujno kontrolisan strujni generator (CCCS)</p>  <p>SRC6 G=1</p>	$u_1 = 0$ $i_2 = a i_1$	 <p>Edit Component Properties</p> <p>current controlled current source</p> <p>Name: SRC6 <input checked="" type="checkbox"/> display in schematic</p> <p>Properties</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>show</th> <th>Name</th> <th>Value</th> <th>Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>G</td> <td>1</td> <td>forward transfer factor</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>T</td> <td>0</td> <td>delay time</td> </tr> </tbody> </table> <p>OK Apply Cancel</p>	show	Name	Value	Description	<input checked="" type="checkbox"/>	G	1	forward transfer factor	<input type="checkbox"/>	T	0	delay time																
show	Name	Value	Description																											
<input checked="" type="checkbox"/>	G	1	forward transfer factor																											
<input type="checkbox"/>	T	0	delay time																											
<p>Impulsni naponski generator</p>  <p>V1 U1=0 V U2=1 V T1=0 T2=1 ms</p>	<p>/</p>	 <p>Edit Component Properties</p> <p>ideal voltage pulse source</p> <p>Name: V1 <input checked="" type="checkbox"/> display in schematic</p> <p>Properties</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>show</th> <th>Name</th> <th>Value</th> <th>Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>U1</td> <td>0 V</td> <td>voltage before and after the pulse</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>U2</td> <td>1 V</td> <td>voltage of the pulse</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>T1</td> <td>0</td> <td>start time of the pulse</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>T2</td> <td>1 ms</td> <td>ending time of the pulse</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Tr</td> <td>1 ns</td> <td>rise time of the leading edge</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Tf</td> <td>1 ns</td> <td>fall time of the trailing edge</td> </tr> </tbody> </table> <p>OK Apply Cancel</p>	show	Name	Value	Description	<input checked="" type="checkbox"/>	U1	0 V	voltage before and after the pulse	<input checked="" type="checkbox"/>	U2	1 V	voltage of the pulse	<input checked="" type="checkbox"/>	T1	0	start time of the pulse	<input checked="" type="checkbox"/>	T2	1 ms	ending time of the pulse	<input type="checkbox"/>	Tr	1 ns	rise time of the leading edge	<input type="checkbox"/>	Tf	1 ns	fall time of the trailing edge
show	Name	Value	Description																											
<input checked="" type="checkbox"/>	U1	0 V	voltage before and after the pulse																											
<input checked="" type="checkbox"/>	U2	1 V	voltage of the pulse																											
<input checked="" type="checkbox"/>	T1	0	start time of the pulse																											
<input checked="" type="checkbox"/>	T2	1 ms	ending time of the pulse																											
<input type="checkbox"/>	Tr	1 ns	rise time of the leading edge																											
<input type="checkbox"/>	Tf	1 ns	fall time of the trailing edge																											
<p>Impulsni naponski generator</p>  <p>I1 I1=0 I2=1 A T1=0 T2=1 ms</p>	<p>/</p>	 <p>Edit Component Properties</p> <p>ideal current pulse source</p> <p>Name: I1 <input checked="" type="checkbox"/> display in schematic</p> <p>Properties</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>show</th> <th>Name</th> <th>Value</th> <th>Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>I1</td> <td>0</td> <td>current before and after the pulse</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>I2</td> <td>1 A</td> <td>current of the pulse</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>T1</td> <td>0</td> <td>start time of the pulse</td> </tr> <tr> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>T2</td> <td>1 ms</td> <td>ending time of the pulse</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Tr</td> <td>1 ns</td> <td>rise time of the leading edge</td> </tr> <tr> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Tf</td> <td>1 ns</td> <td>fall time of the trailing edge</td> </tr> </tbody> </table> <p>OK Apply Cancel</p>	show	Name	Value	Description	<input checked="" type="checkbox"/>	I1	0	current before and after the pulse	<input checked="" type="checkbox"/>	I2	1 A	current of the pulse	<input checked="" type="checkbox"/>	T1	0	start time of the pulse	<input checked="" type="checkbox"/>	T2	1 ms	ending time of the pulse	<input type="checkbox"/>	Tr	1 ns	rise time of the leading edge	<input type="checkbox"/>	Tf	1 ns	fall time of the trailing edge
show	Name	Value	Description																											
<input checked="" type="checkbox"/>	I1	0	current before and after the pulse																											
<input checked="" type="checkbox"/>	I2	1 A	current of the pulse																											
<input checked="" type="checkbox"/>	T1	0	start time of the pulse																											
<input checked="" type="checkbox"/>	T2	1 ms	ending time of the pulse																											
<input type="checkbox"/>	Tr	1 ns	rise time of the leading edge																											
<input type="checkbox"/>	Tf	1 ns	fall time of the trailing edge																											

<p>Naponski generator definisan fajlom</p> 	<p><math>u(n\Delta t) = f(n)</math>, gde je <math>n = 1, 2, 3, \dots</math> redni broj koraka, a <math>\Delta t</math> korak simulacije</p>	
<p>Strujni generator definisan fajlom</p> 	<p><math>i(n\Delta t) = f(n)</math>, gde je <math>n = 1, 2, 3, \dots</math> redni broj koraka, a <math>\Delta t</math> korak simulacije</p>	

### 3.3 Kreiranje šeme

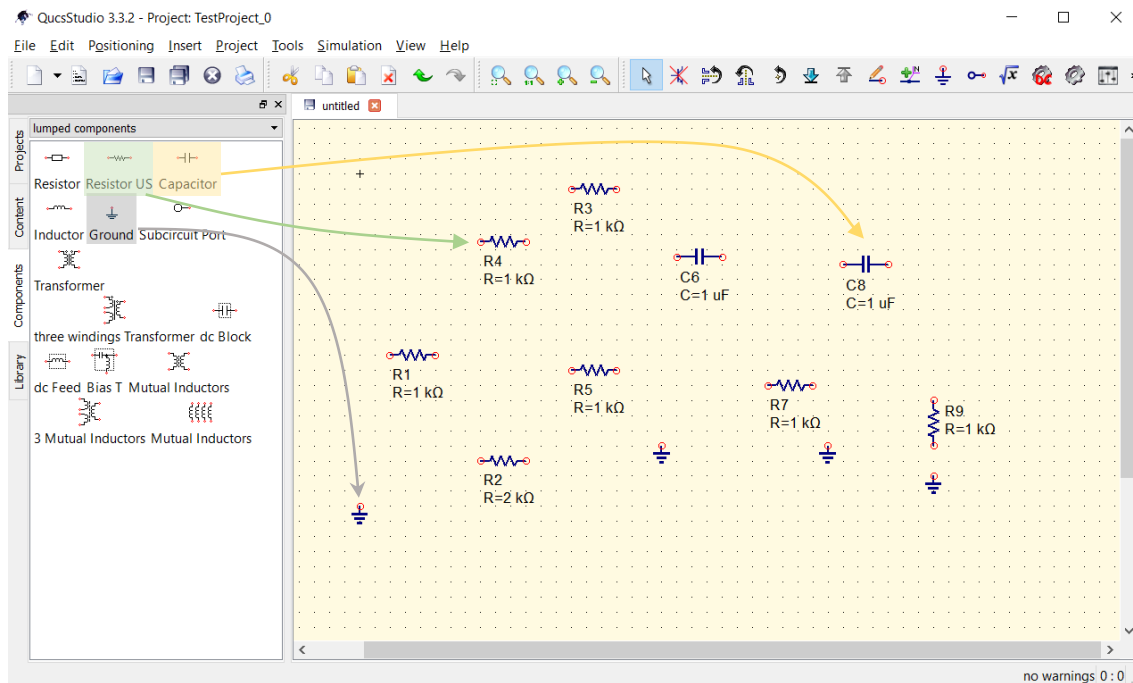
Na primeru aktivnog *Kerwin-Huelsman-Newcomb* (KHN) filtra sa slike 2, prikazaćemo proceduru kreiranja šeme. Kolo se sastoji od otpornika, kondenzatora, operacionih pojačavača i jedne naponske pobude. U delu palete sa diskretnim komponentama nalaze se potrebni pasivni elementi: otpornik<sup>3</sup> (*Resistor*), kondenzator (*Capacitor*) i referentni čvor (*Ground*). Prevlačenjem (*drag-and-drop*) elemenata sa palete u



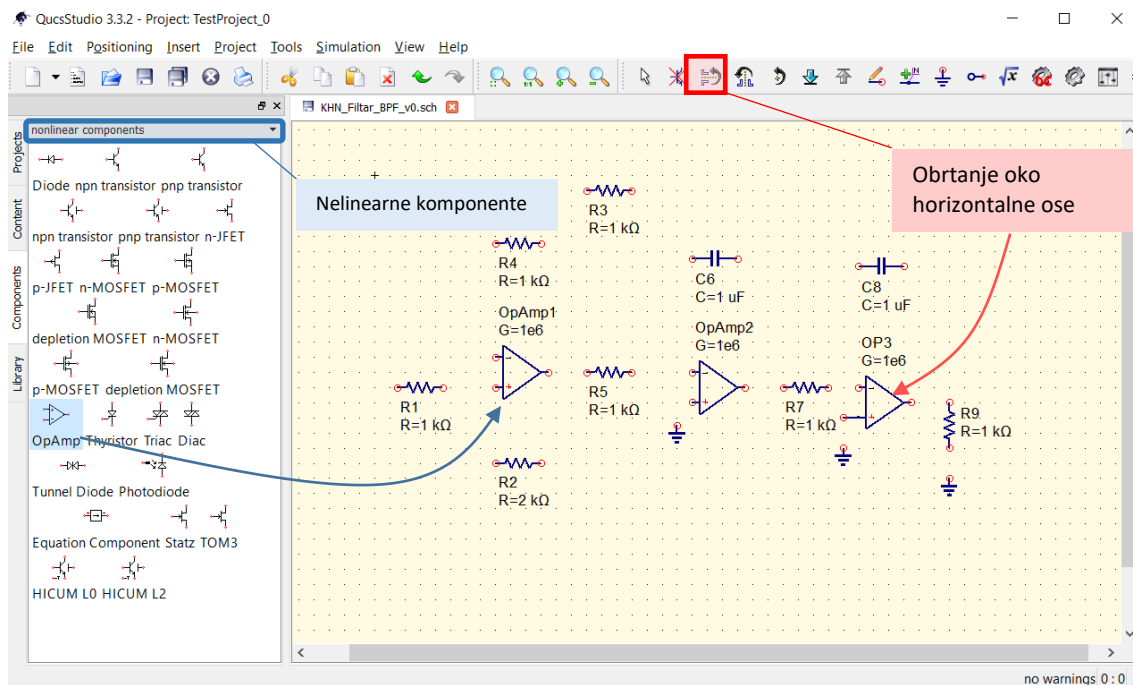
Slika 2. Primer kola za simulaciju. Univerzalni KHN filtar, koji na izlazima 2, 3 i 4 funkcioniše kao propusnik visokih učestanosti, opsega učestanosti i niskih učestanosti, respektivno.

<sup>3</sup> Postoje dve vrste simbola za otpornik: prema evropskom (*Resistor*) i američkom (*Resistor US*) standardu.

radnu površinu, fiksiramo ih na raster. Na slici 3 prikazani su pasivni elementi, a na slici 4, dodati su i operacioni pojačavači<sup>45</sup>.



Slika 3. Kreiranje šeme: postavljanje pasivnih elemenata.

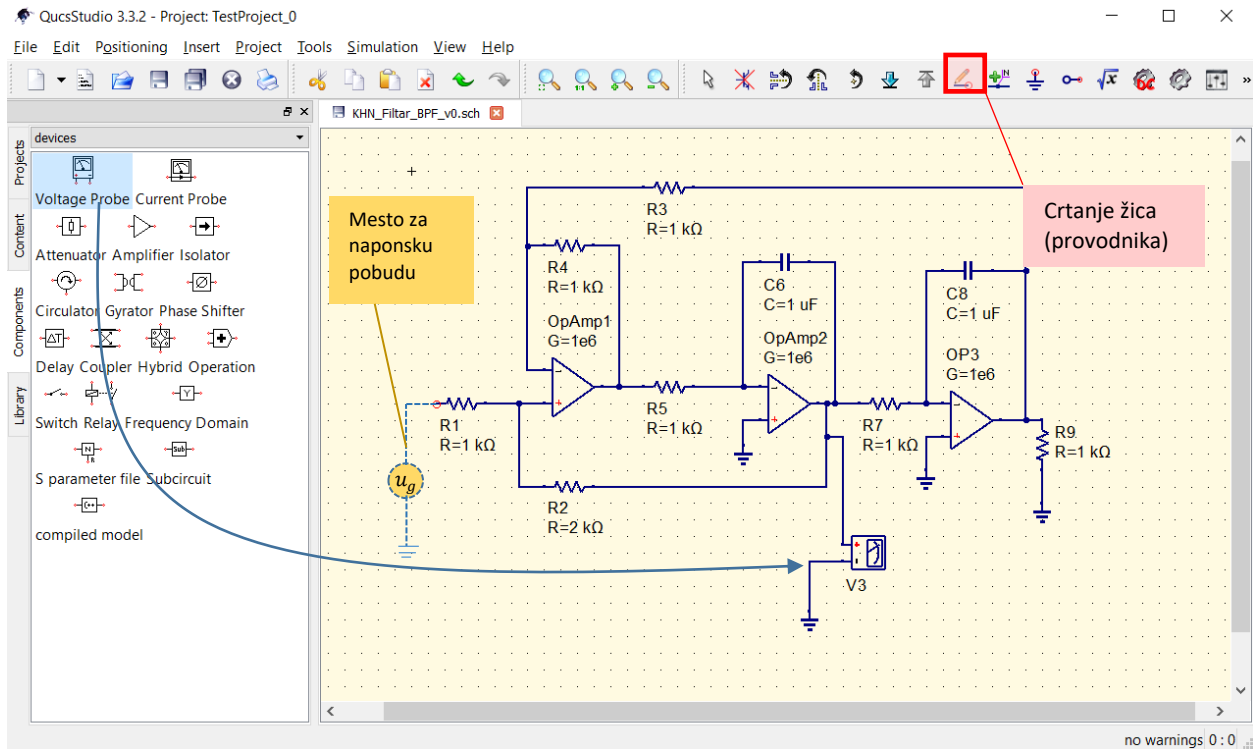


Slika 4. Kreiranje šeme: postavljanje operacionih pojačavača.

<sup>4</sup>Idealni operacioni pojačavači imaju beskonačno pojačanje, ali pretpostavljeno konačno pojačanje od  $10^6$  u *QucsStudio*-u je sasvim dovoljno.

<sup>5</sup>Radi preglednije slike, operacioni pojačavači mogu biti rotirani oko horizontalne ose (*Mirror about X axis*).

Elementi se sada mogu povezati žicama, kao na slici 5. Crtanje žice se može pokrenuti klikom na terminale elementa ili iz trake sa alatka, dugmetom za crtanje žice (*Insert Wire*). Napone i struje određujemo voltmetrom i ampermetrom, koji se u paleti nalaze pod *Uređaji (Components > devices)*. Na grafiku sa rezultatima se prikazuje i ime uređaja koji meri signal, te se njegovim smislenim imenovanjem dobija jasniji pregled rezultata analize. Posmatračemo napon na izlazu operacionog pojačavača *OpAmp2*, tj. potencijal čvora 3, ( $v_3$ ), te voltmetar označavamo sa *V3*, u skladu sa šemom na slici 2. Šema kola se čuva u datoteci čiji naziv ima format *ime\_datoteke.sch* i prikazan je na kartici iznad radne površine.



Slika 5. Povezivanje elemenata provodnicima i postavljanje voltmetra između čvora 3 i referentnog čvora.

## 4 SIMULACIJA

Kada je električna šema kola, izuzev pobude, realizovana, potrebno je definisati tip simulacije i njene parametre. Tipovi simulacije su dati u formi komponenti pod *Simulacije (Components > simulations)*, koje se takođe mišem prevlače na radnu površinu pored šeme kola. Osnovni tipovi simulacije koji su ovde od interesa jesu (1) analiza u stacionarnom režimu, tj. analiza ustaljenog konstantnog odziva (*dc simulation*), (2) analiza prelaznih procesa, tj. analiza u vremenskom domenu (*transient simulation*) i (3) analiza u frekvencijskom domenu, tj. analiza ustaljenog prostoperiodičnog odziva (*ac simulation*). Koristeći isti primer kao u odeljku 3.3, izvršićemo analizu pri različitim režimima rada.

### 4.1 Analiza u vremenskom domenu (transient simulation)

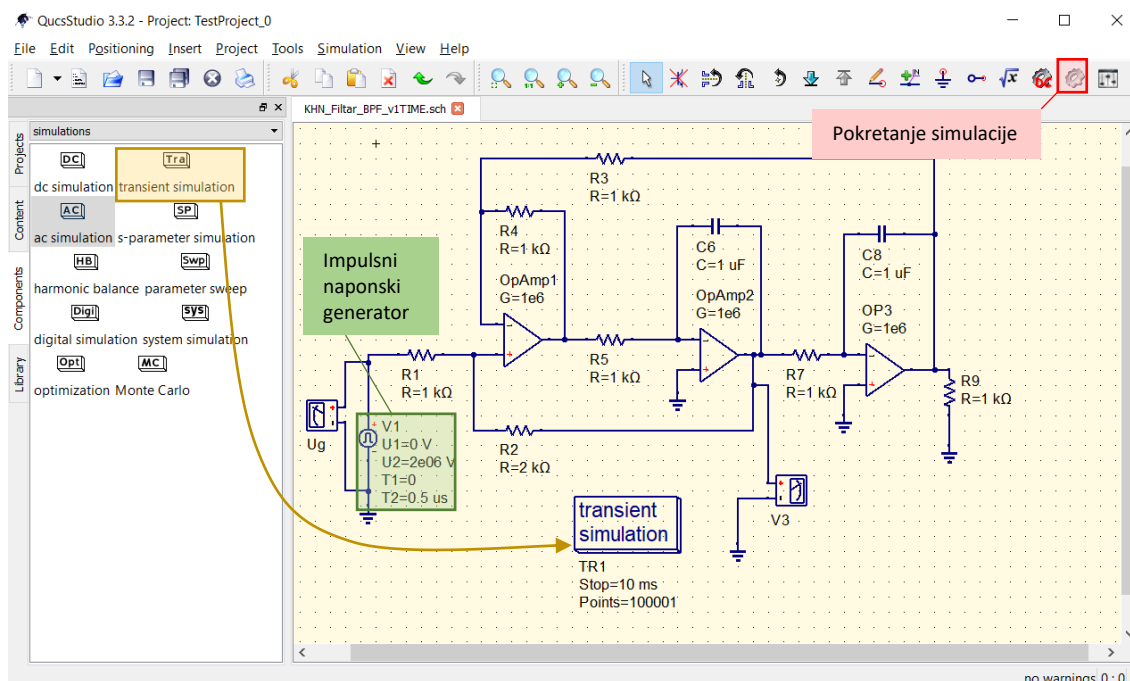
Simulacijom kola u vremenskom domenu odredićemo impulsni odziv za napon  $v_3$ . Naponsku pobudu, stoga, moramo definisati kao aproksimaciju Dirakove delta funkcije  $\delta(t)$ . Postoje različiti impulsi koji se



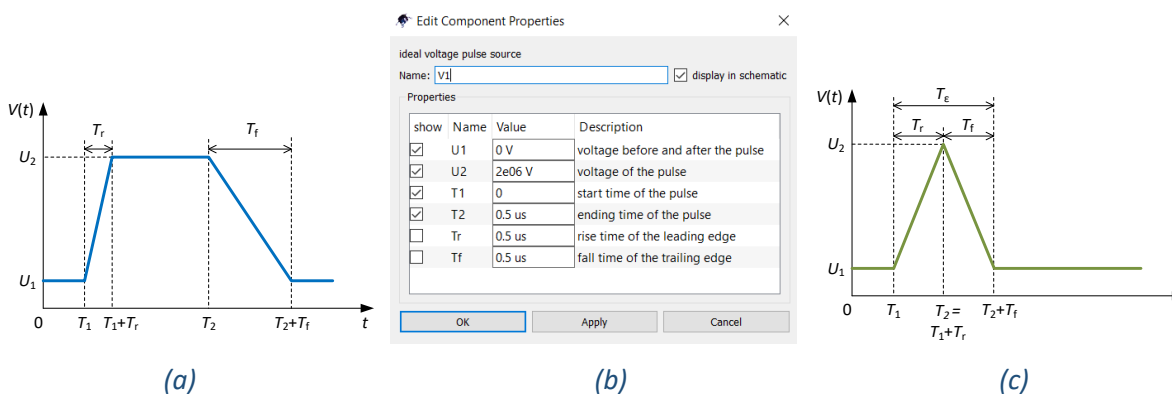
parametrima mogu podesiti tako da približno predstavljaju delta funkciju, a mi se odlučujemo za trougaoni impuls, dat izrazom

$$\delta(t) \approx \delta_\epsilon(t) = \begin{cases} \frac{4t}{T_\epsilon^2}, & 0 < t \leq \frac{T_\epsilon}{2} \\ -\frac{4t}{T_\epsilon^2}, & \frac{T_\epsilon}{2} < t \leq T_\epsilon \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (1)$$

Trougaoni impuls realizovaćemo korišćenjem impulsnog naponskog izvora, (*Ideal voltage pulse source*). Ova impulsna pobuda je trapezoidnog tipa, koja se pogodnim odabirom parametara može transformisati u trougaonu.



Slika 6. Šema KHN filtra sa impulsnim generatorom, voltmetrom i objektom za analizu kola u vremenskom domenu (transient simulation).

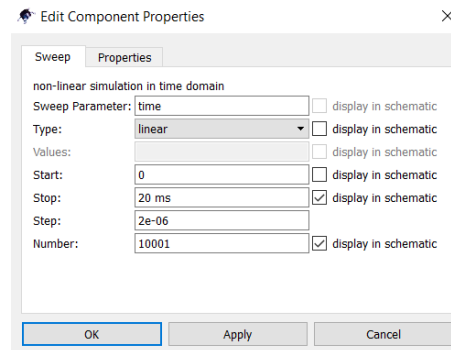


Slika 7. (a) Impulsna pobuda trapezoidnog oblika i (b) njeni vremenski parametri. (c) Trougaoni impuls.

Na slici 7a prikazan je oblik impulsne pobude, a njeni vremenski parametri, odnosno njihovo značenje na slici 7b. Uzimamo da je  $T_\epsilon = 10^{-4}$  s, prema jednačini (1), te amplituda impulsa iznosi  $2 \cdot 10^4$ . U

*QucsStudio*-u jednakokraki trougaoni impuls postižemo podešavanjem uzlazne ivice da bude jednaka silaznoj, a  $T_1 + T_r = T_2$ , kao na slikama 7b i 7c.

Komponentu koja omogućava analizu kola u vremenskom domenu (*transient simulation*) prevlačimo u radnu površinu, a dvostrukim klikom otvaramo prozor sa njenim parametrima, među kojima izdvajamo: prikaz vremenske ose (*Type*), početak simulacije (*Start*), kraj simulacije (*Stop*), korak simulacije (*Step*) i broj odbiraka (*Number*), kao što je prikazano na slici 8.



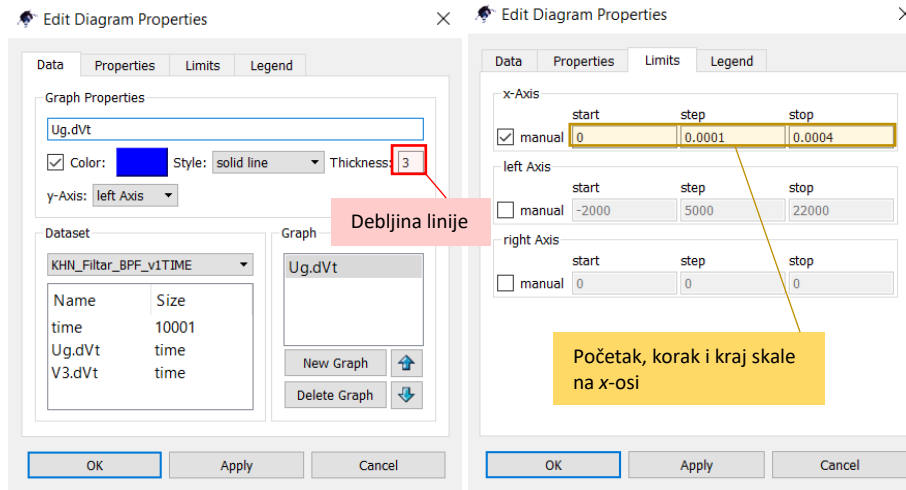
Slika 8. Parametri analize u vremenskom domenu (*transient simulation*).

Trajanje simulacije potrebno je podesiti tako da je ono veće od vremena potrebno da se završe svi prelazni procesi. Dužina trajanja prelaznih procesa određena je najvećom vremenskom konstantom kola, koju u složenijim primerima, kao što je KHN filter, nije lako očitati direktno sa šeme kola. Formalno, morali bismo vremensku konstantu odrediti iz polove transfer funkcije. Međutim, na osnovu vrednosti kapacitivnosti i otpornosti u kolu, može se proceniti red veličine vremenske konstante,  $\sim RC = 1$  ms. Usvajamo, stoga da trajanje simulacije bude 20 ms. S obzirom da pobudni impuls veoma kratko traje, opredeljujemo se za nešto više vremenskih odbiraka, kako bi on bio što tačnije aproksimiran i prikazan u što boljoj rezoluciji. Simuliranjem u 10001 tački, postižemo vremenski korak od  $\Delta t = T_c/50 = 2 \mu s$ .

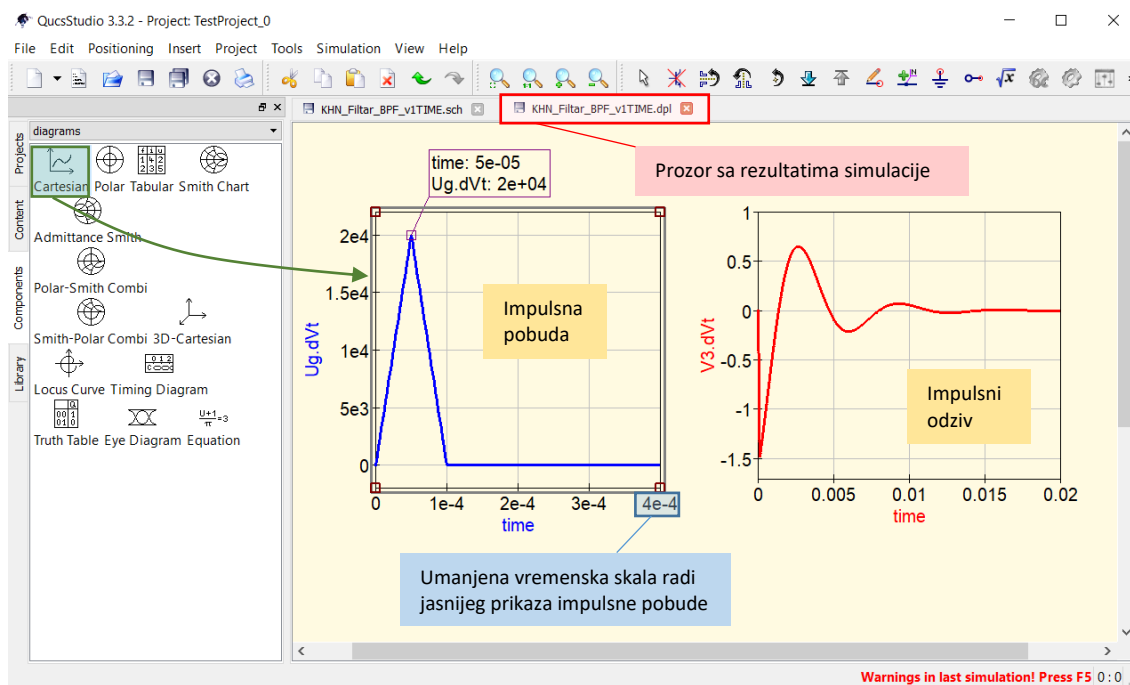
Analiza kola se pokreće odabirom komande komande *Simulate* u traci sa alatkama (slika 6). Po završetku simulacije, automatski se u novoj prozoru prikazuje grafik sa oba napona izmerenim voltmetrima. Rezultati simulacije se čuvaju u datoteci u formatu *ime\_datoteke.dpl*.

Uopšte, veličine od interesa, naponi, struje i od njih izvedene veličine, mogu se prikazati na jednom ili na više različitih grafika. U ovom primeru, trenutne vrednosti napona  $u_g$  (pobude) i  $v_3$  (odziva) prikazaćemo odvojeno, na dva grafika. Odabiranjem dodatnog grafika sa dekartovim koordinatnim sistemom (*Components > diagrams > Cartesian*) u prozoru sa rezultatima, i dvostrukim klikom na njega, otvara se prozor gde možemo definisati njegova svojstva, kao što je prikazano na slici 9.

Unosi u kartici sa podacima (*Data*) u polju za prikaz (*Graph*), određuju koji mereni naponi i struje će biti prikazani. Korišćenjem komandi za kreiranje novih grafika (*New Graph*) i brisanje (*Delete*), kao i odabiranjem željenog odziva iz liste (*Dataset*), podešavamo da u prvom grafiku stoji samo funkcija pobude, *Ug.dVt*, prikazana plavom linijom, debljine 3. Dodatno, u kartici za definiciju granica skale (*Limits*) skraćujemo vremensku osu (*x-axis*), u cilju jasnijeg prikaza trougaonog impulsa. Na sličan način, definišemo i sadržaj drugog grafika, gde prikazujemo samo funkciju odziva, *V3.dVt*. Konačan prikaz prozora s rezultatima dat je na slici 10.



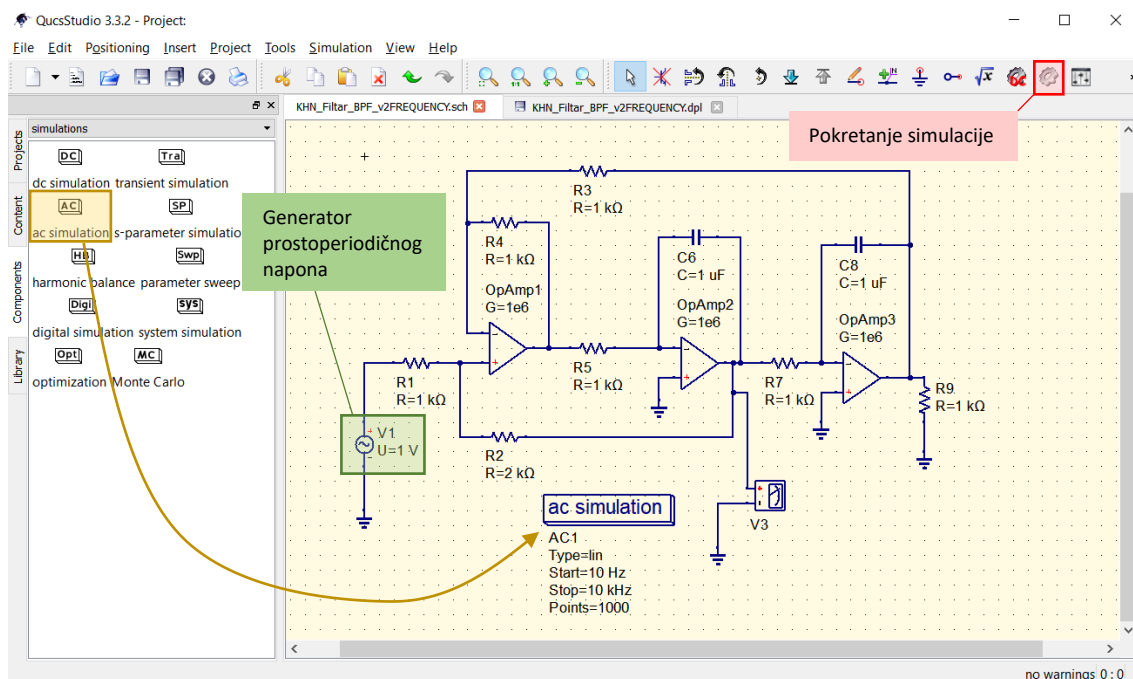
Slika 9. Prozor sa podešavanjima grafika: kartice Data i Limits.



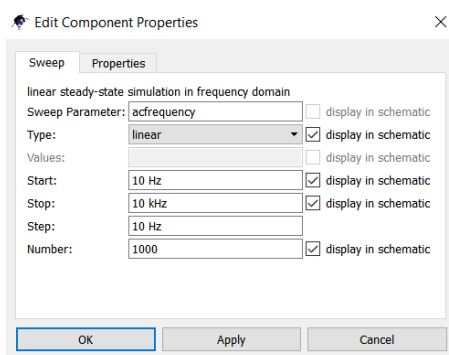
Slika 10. Rezultat simulacije u vremenskom domenu. Trenutne vrednosti pobudnog napona i odziva. Pobudni impuls je prikazan na intervalu [0÷0.4 ms], a odziv na intervalu [0÷20 ms].

## 4.2 Analiza u frekvencijskom domenu (ac simulation)

Polazeći od slike 5, za analizu u frekvencijskom domenu odabiramo generator prostoperiodičnog napona, (*ac Voltage Source*). Amplituda prostoperiodične pobude je 1V, a mereni napon je  $v_3$ , kao na slici 11. Takođe, iz palete odabiramo objekat analize u frekvencijskom domenu (*ac simulation*). U parametrima simulacije (slika 12) unosimo početnu i krajnju frekvenciju željenog opsega - uzimamo interval od 10 Hz do 10 kHz. Simulaciju ćemo obaviti u 1000 tačaka, pa sledi da je razmak između susednih tačaka  $\Delta f = 10$  Hz.



Slika 11. Šema KHN filtra sa generatorom prstoperiodičnog napona, voltmetrom i objektom za analizu kola u frekvencijskom domenu (*ac simulation*).

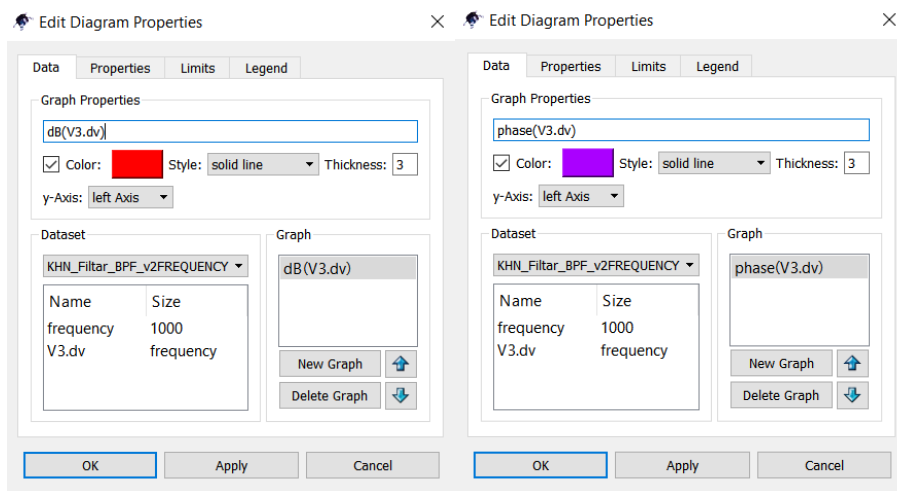


Slika 12. Parametri analize u frekvencijskom domenu (*ac simulaiton*).

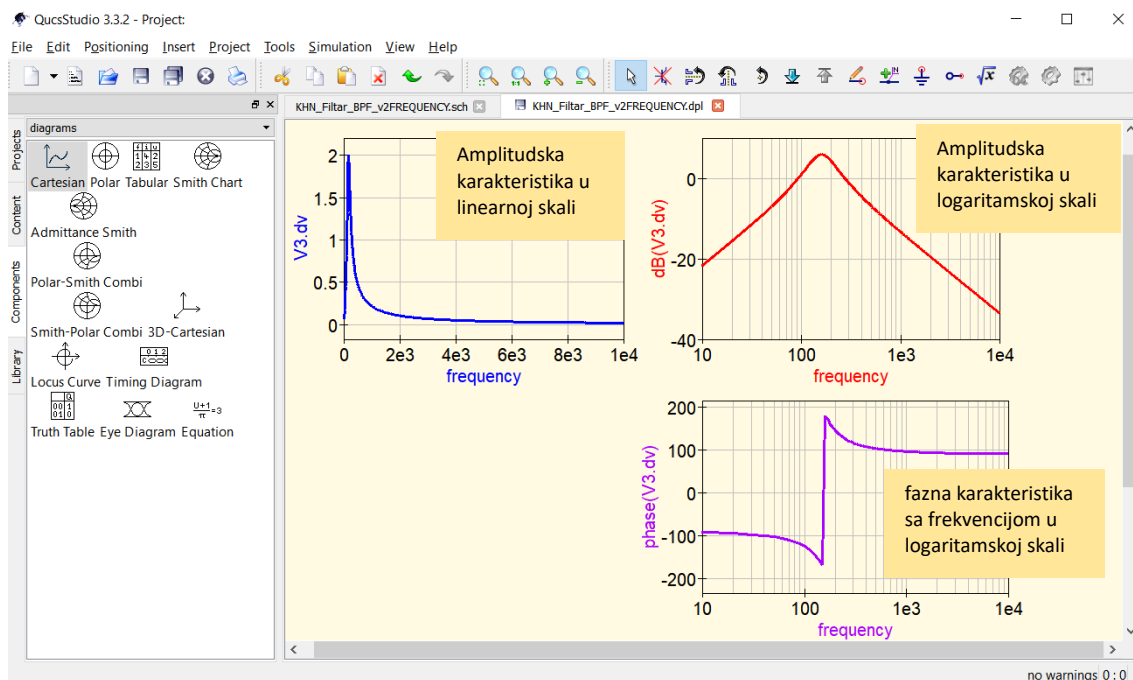
Analizom kola, dobija se grafik amplitudske karakteristike napona, koji je generisan na osnovu izlazne liste (*Dataset*) kompleksnih predstavnika napona<sup>6</sup>,  $v_3.dV$ . Napominjemo, s obzirom da je u datom slučaju amplituda napona generatora 1V, da je amplitudska karakteristika napona  $v_3$  jednaka amplitudskoj

<sup>6</sup> Kompleksni predstavnici u *QucsStudio*-u su fazori čiji moduli odgovaraju amplitudi prostoperiodične veličine, za razliku od našeg standarda, gde moduli fazora prostoperiodičnih veličina odgovaraju njihovim efektivnim vrednostima.

karakteristici transfer funkcije  $H(j\omega) = |V_3(j\omega)|/|U_g(j\omega)|$ . Pošto frekventijski odziv, tj. amplitudsku i faznu karakteristiku, najčešće posmatramo u logaritamskoj skali, na ovom primeru pokazaćemo primenu ugrađenih matematičkih funkcija i opcija koje omogućavaju dodatnu obradu podataka i pregledniji prikaz.



Slika 13. Definisane amplitudske i fazne karakteristike, korišćenjem matematičkih funkcija.

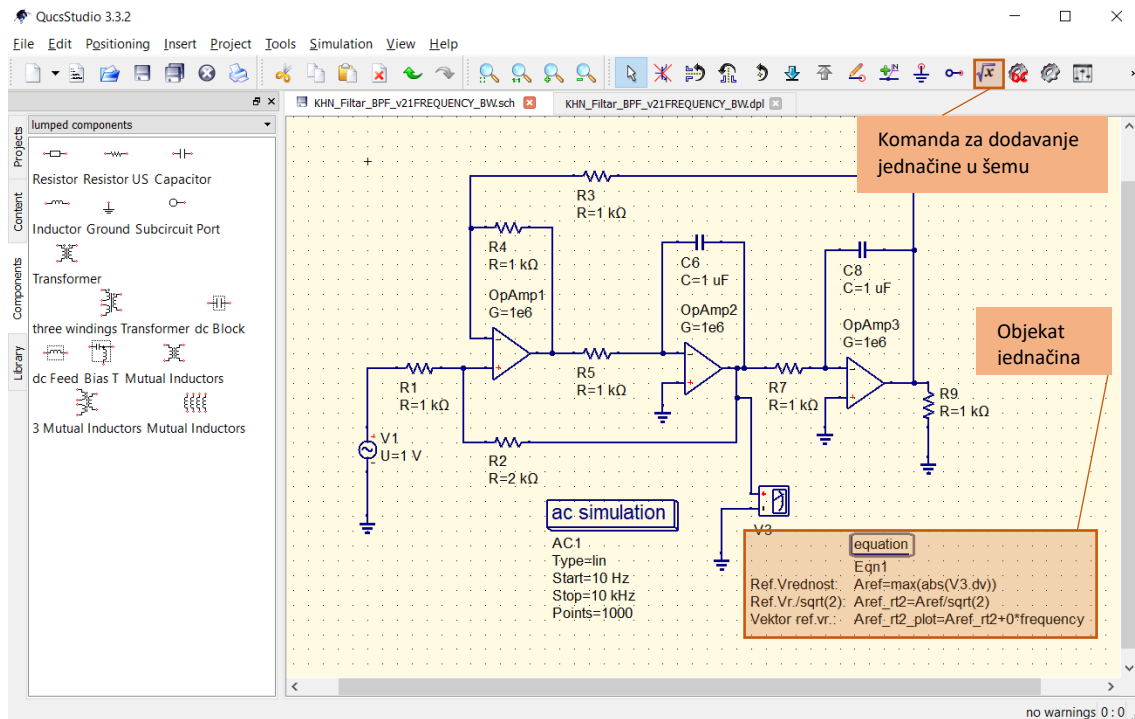


Slika 14. Amplitudska i fazna karakteristika merenog napona.

Dodaćemo najpre dva nova grafika sa dekartovim koordinatnim sistemom. Zatim, dvostrukim klikom na prvi grafik, u datom prozoru, u kartici *Data* i polju *Graph Properties*, definišemo funkciju grafika kao  $dB(V3.dv)$ , kao što je prikazano na slici 13. Ugrađena funkcija  $dB(.)$  slika amplitudu napona  $V3.dv$  u tzv. decibele, prema formuli  $20 \log_{10}|x|$ . U istom prozoru, pod karticom sa atributima (*Properties*), potrebno je podesiti logaritamsku skalu označavanjem odgovarajućeg polja za potvrdu (*logarithmical X Axis Grid*). Rezultujuća amplitudska karakteristika u logaritamskoj skali prikazana je crvenom linijom na slici 14. Da bismo prikazali faznu karakteristiku, potrebno je na trećem grafiku, na sličan način, primeniti funkciju

$phase(V3.dV)$ , koja određuje argument kompleksnog predstavnika napona po formuli  $arg(x)$ , a vraća vrednosti u stepenima. Na slici 14 prikazana su sva tri grafika napona: (1) amplitudska karakteristika, kod koje je automatski podešena linearna skala, (2) amplitudska karakteristika u logaritamskoj skali i (3) fazna karakteristika u logaritamskoj skali. Naglašavamo da je u slučaju amplitudske karakteristike izvršena logaritamska kompresija skale i na x- i na y-osi. U prvom slučaju to je postignuto prostim aktiviranjem opcije grafika, a u drugom, korišćenjem matematičke funkcije.

U cilju određivanja propusnog opsega dobijene amplitudske karakteristike, potrebno je da sa grafika procenimo njegove granične učestanosti. U te svrhe, postavimo objekat jednačine iz trake sa alatkama (*Insert Equation*) u radnu površinu pored šeme kola (Slika 15). Dvostrukim klikom otvara se prozor gde dodajemo (*Add*) proizvoljan broj jednačina, a njih definišemo kao na slici 16.



Slika 15. Šema KHN filtra sa dodatim objektom jednačina.

Edit Component Properties

variable declaration by user equation

Name: Eqn1  display in schematic

show	Name	Value	Description
<input checked="" type="checkbox"/>	Aref	max(abs(V3.dv))	Ref.Vrednost:
<input checked="" type="checkbox"/>	Aref_rt2	Aref/sqrt(2)	Ref.Vr./sqrt(2):
<input checked="" type="checkbox"/>	ref_rt2_plot	Aref_rt2+0*frequency	Vektor ref.vr.:
<input type="checkbox"/>	Export	yes	put result into dataset ly

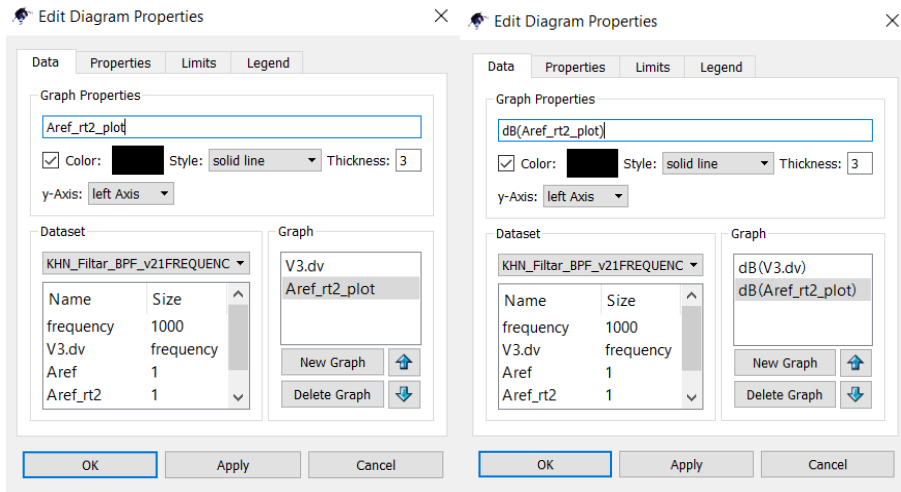
Buttons: Add, Remove, OK, Apply, Cancel

- *Aref* je referentna, odnosno maksimalna vrednost amplitudskog spektra;
- $Aref\_rt2 = Aref/\sqrt{2}$ ;
- *Aref\_rt2\_plot* predstavlja vektor, tj. niz čiji elementi su jednaki i iznose *Aref\_rt2*. Takav niz se može dobiti prostim sabiranjem skalarne vrednosti i vektora nula:  $Aref\_rt2\_plot = Aref\_rt2 + 0*frequency$ , gde je *frequency* vektor zadatih učestanosti;

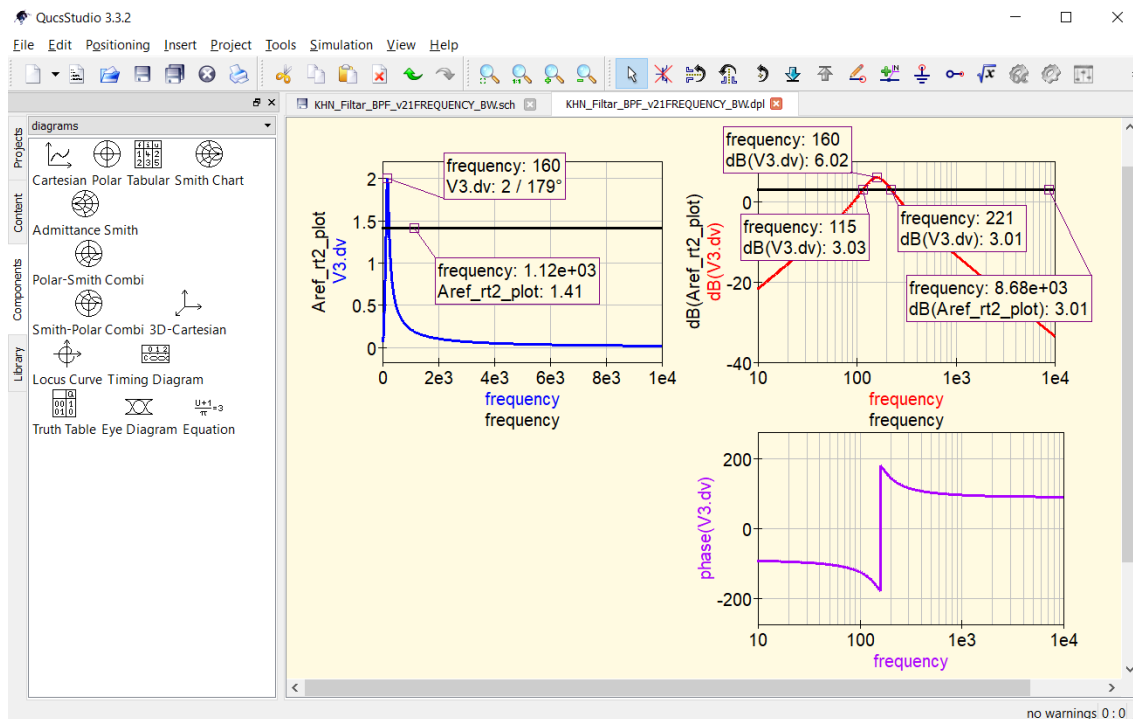
Slika 16. Prozor objekta jednačina sa matematičkim izrazima i njihovim objašnjenjem.

U grafiku sa linearnom skalom (plava linija), potrebno je priključiti vektor  $Aref\_rt2\_plot$  u polje sa prikazanim funkcijama (*Graph*), dok je u grafiku sa logaritamskom skalom (crvena linija) potrebno primeniti i funkciju  $dB(.)$ , kao na slici 17. Rezultat ovih operacija prikazan je na slici 18. Konačno, sa date slike očitavamo:

- maksimum amplitudske karakteristike iznosi  $A_{ref} = 2$ , odnosno  $A_{ref,dB} = 6.02$  dB;
- nivo  $A_{ref}/\sqrt{2} = \sqrt{2}$ , odnosno 3.01 dB;
- na preseku crne i crvene krive granične vrednosti  $f_{g1} \approx 115$  Hz i  $f_{g2} \approx 221$  Hz;
- Propusni opseg je  $B_{3dB} = [f_{g1}, f_{g2}]$ , a njegova širina  $\Delta f = f_{g2} - f_{g1} = 106$  Hz;

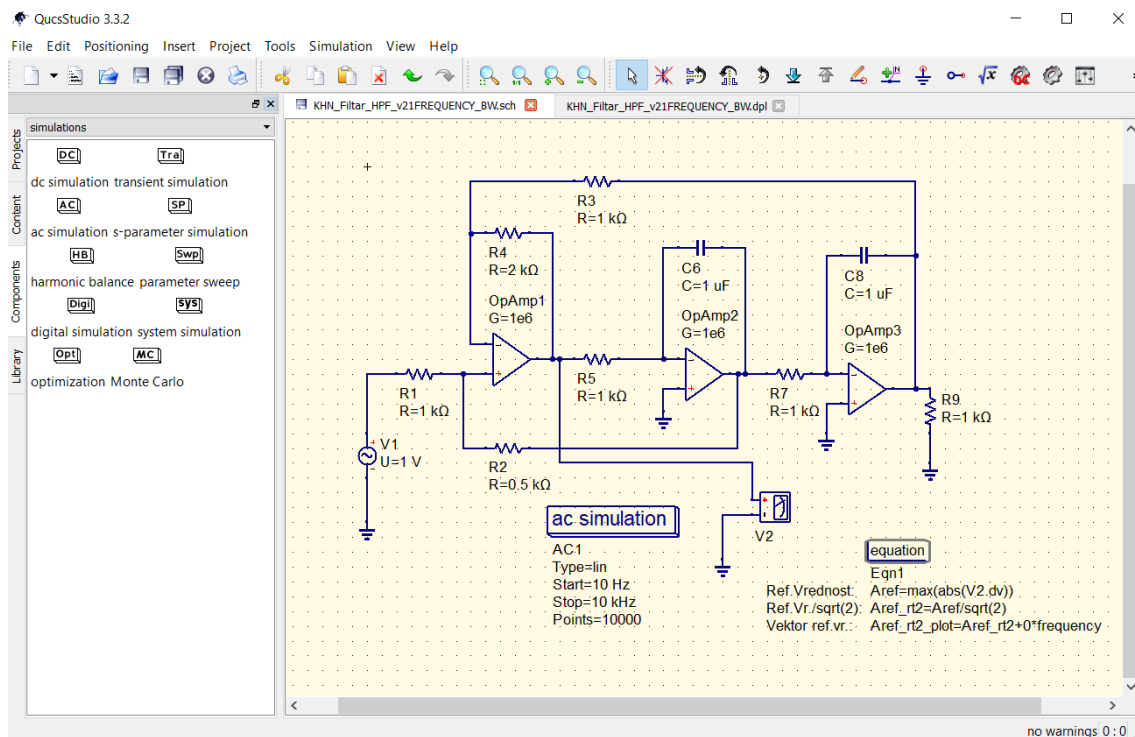


Slika 17. Prikaz prozora za podešavanje grafika sa linearnom i logaritamskom skalom.

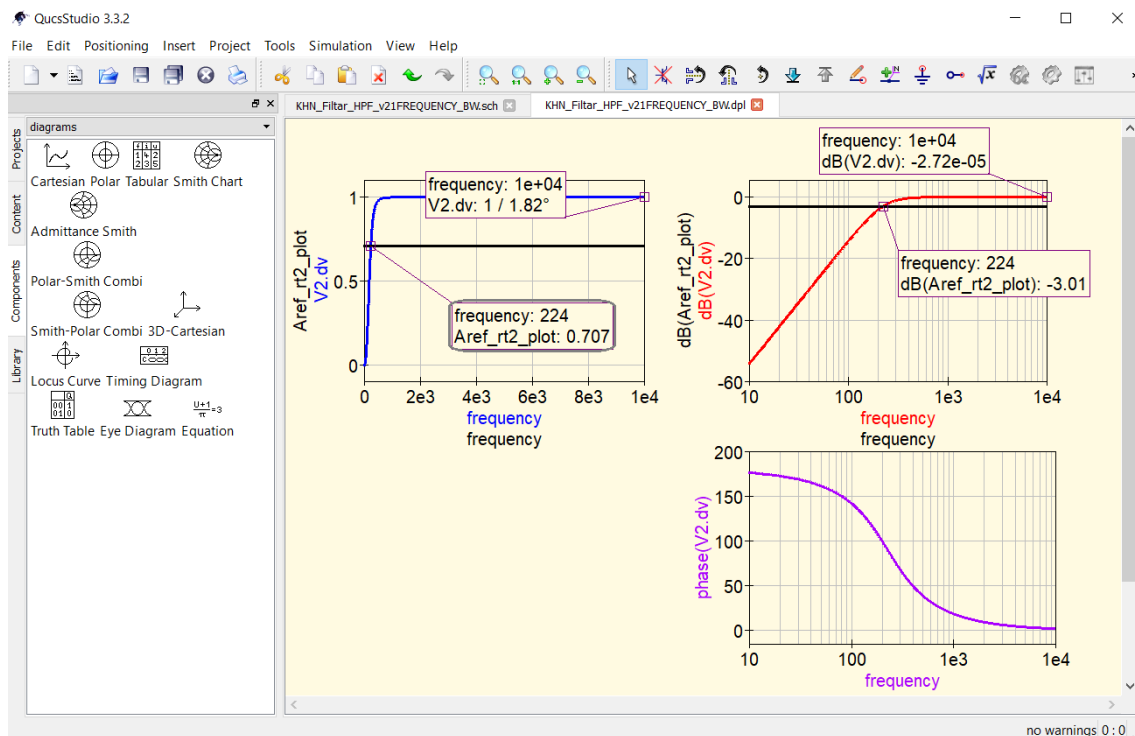


Slika 18. Amplitudska karakteristika merenog napona sa dodatim trodecibelskim nivovima (crna linija) i fazna karakteristika.

Čitaocu se ostavlja da pokuša da na sličan način, za napone  $v_2$  i  $v_4$  (slika 2), odredi impulsni, odnosno frekvencijski odziv, kao i propusni opseg. Za propusnike visokih ( $v_2$ ) i niskih ( $v_4$ ) učestanosti potrebno je zameniti vrednosti otpornika,  $R_2 = R_4/4 = 500 \Omega$  i  $R_2 = R_4 = 500 \Omega$ , respektivno. Rešenja su data na slikama 19 – 22.

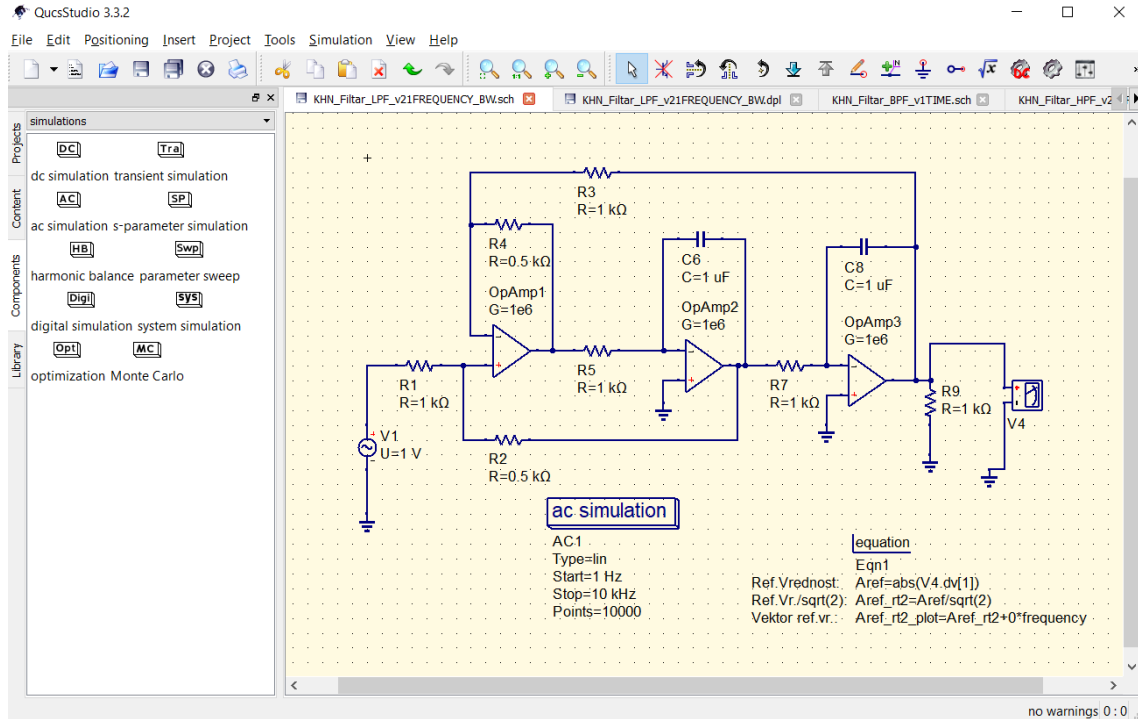


Slika 19. KHN Filtar propusnik visokih učestanosti: šema kola.

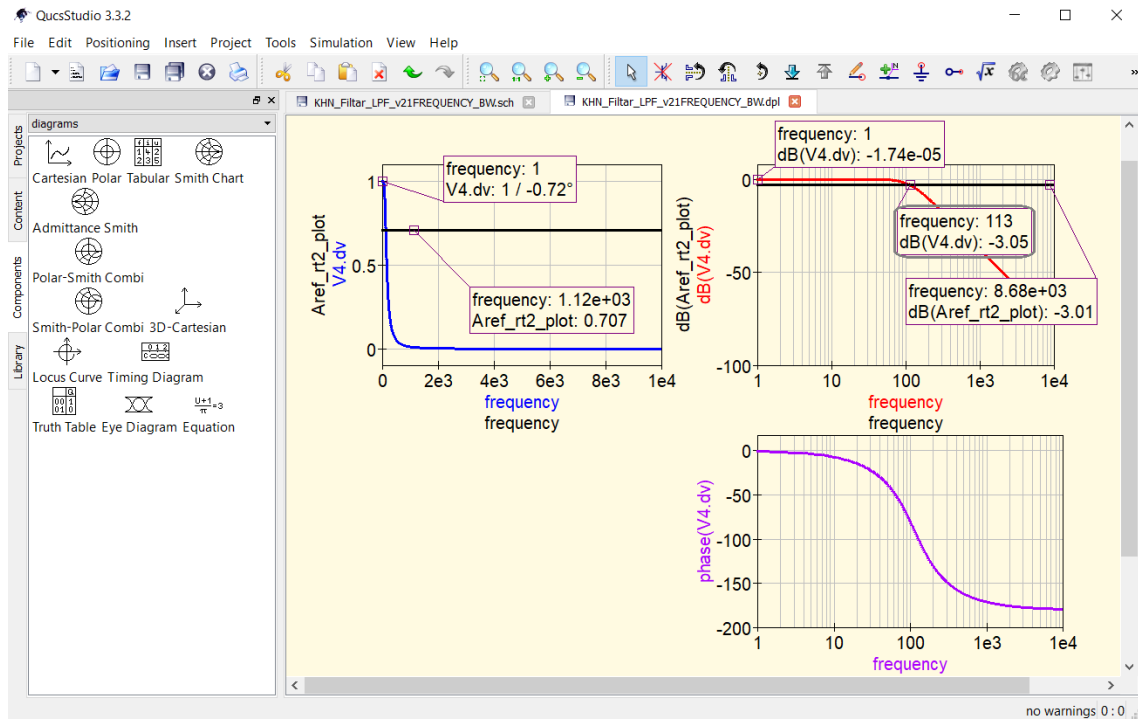


Slika 20. KHN Filtar propusnik visokih učestanosti: frekvencijski odziv.





Slika 21. KHN Filtar propusnik niskih učestanosti: šema kola.



Slika 22. KHN Filtar propusnik niskih učestanosti: frekvencijski odziv.

## 5 REFERENCE

- [1] <http://dd6um.darc.de/QucsStudio/qucsstudio.html>
- [2] <http://qucs.sourceforge.net/>
- [3] <http://tek.etf.rs/>