

Prikaz negativne otpornosti realizovane pomoću konvertora negativne impedanse

IVAN V. MARTINOVIĆ, Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet, Podgorica, Crna Gora

Pregledni rad
UDC: 621.3.072.31
DOI: 10.5937/tehnika1904549M

U ovom radu, na jednostavan način, prikazan je pojam negativne otpornosti. Iako je ovaj pojam uočen još u 19. vijeku on i danas izaziva nelagodu, prije svega jer negativna otpornost ne postoji kao diskretna komponenta. Negativna otpornost u ovom radu realizovana je koristeći konvertor negativne impedanse. Kako bi se lakše uočio uticaj negativne otpornosti u električnom kolu za prikaz iskorišćeno je kolo djelitelja napona koje je analizirano numerički i simbolički. Numerička analiza izvršena je simulacijom u programu LTspice, dok je simbolička analiza odrađena u programskom paketu Wolfram Mathematica. Prvo je analizirano kolo djelitelja napona sa pozitivnim vrijednostima otpornika nakon čega je jedan otpornik zamijenjen sa otpornikom negativne otpornosti. Takođe su odrađene simulacije za pozitivnu i negativnu ekvivalentnu otpornost kola. Kako bi prikaz ovog pojma bio cjelovit u radu je prikazana praktična realizacija kola djelitelja napona.

Ključne riječi: negativna otpornost, konvertor negativne impedanse, otpornost

1. UVOD

Pojava negativne otpornosti prvi put je primijećena prilikom istraživanja električnih lukova (electric arcs) koji su se koristili za osvetljenje tokom 19. vijeka [1]. Prvi, koji je primijetio da se napon na elektrodama luka smanjuje povremeno kako se struja luka povećava bio je Alferd Niavde [2]. Uočena pojava je sama po sebi bila kontraverzna jer je poznato da otpornost pasivnog uređaja ne može biti negativna tako da su većina istraživača toga vremena smatrali da je to sekundarni efekat zbog temperature [3], [4]. Proširujući istraživanja Hertha Ayrton je nizom preciznih eksperimenata koji su određivali I-V karakteristiku ustanovila da kriva ima područje negativnog nagiba. Rezultati ovog istraživanja su poslužili da se definiše koncept diferencijalne otpornosti i prihvaćeno je da lukovi imaju negativan diferencijalni otpor. Početkom 20. vijeka interesovanje za negativnom otpornošću ticalo se radio komunikacije. Nakon otkrića dinatrona pojam negativne otpornosti se vezao za njega iako je bilo uređaja koji su na bolji način izražavali ovo svojstvo [5].

Sredinom 20. vijeka tipični predstavnik kola sa negativnom otpornošću je bio konvertor negativne impedanse. U moderno doba registrovano je dosta komponenti koje u jednom svom dijelu rada izražavaju svojstvo negativne otpornosti, a to su: halogena stakla, organski poluprovodnici, itd.

U ovom radu je prikazana realizacije negativne otpornosti uz pomoć operacionog pojačavača i njena primjena u kolu djelitelja napona.

2. OTPORNOST

Otpornost predstavlja fizičku pojavu koju karakteriše suprotstavljanje dijela električnog kola kretanju električne struje (naelektrisanja). Pomenuta pojava je karakteristika za element kod kojeg se uspostavljanjem vremenski konstante struje generiše napon na njegovim krajevima koji je proporcionalan toj struji. Relacija između napona na njegovim krajevima i struje u njemu je jednoznačno određena Omovim zakonom i glasi [6]:

$$U = R * I \quad (1)$$

Takođe važi i obrnuta relacija, ako se otpornik (R) priključi na napon (U), u njemu će proticati struja (I). Struja je proporcionalna naponu i recipročnoj vrednosti električne otpornosti, tj. električnoj provodnosti (G) [6].

$$I = G * U = \frac{1}{R} * U \quad (2)$$

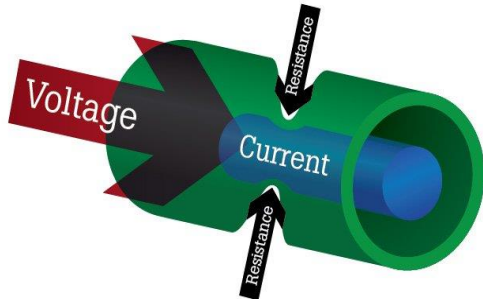
Adresa autora: Ivan Martinović, Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet, Podgorica, Džordža Vašingtona bb, Crna Gora

e-mail: ivanma@ucg.ac.me

Rad primljen: 15.05.2019.

Rad prihvacen: 22.07.2019.

Koeficijent srazmere (R) predstavlja veličinu koja se zove električna otpornost, i koja se izražava u omima (Ω). Njena recipročna vrijednost naziva se električna provodnost (G) i izražava se u simensima (S) [6].



Slika 1 - Otpornost

Pomenuta definicija predstavlja samo jedan idealizovan slučaj jer veza između struje i napona zavisi i od vremena, temperature i drugih faktora. Takođe, relacija (1) važi samo za takozvane linearne otpornike (metale). Kada je riječ o naizmjeničnoj struji govori se o četiri vrste otpornosti i to su: omska, induktivna, kapacitivna i prividna otpornost (impedansa), dok kod jednosmjerne struje u ustaljenom (stacionarnom) stanju, govori se samo o omskoj (aktivnoj) otpornosti [6].

Komponente kod kojih se koristi osobina električne otpornosti nazivaju se otpornici. Otpornici se mogu koristiti za mjerenje drugih električnih ili neelektričnih veličina. Od električnih veličina takva je na primjer struja (šantovi), dok kod neelektričnih veličina postoje brojne mogućnosti kao što su temperatura (Pt-100), mehanička naprezanja (tenzometarske trake), itd.

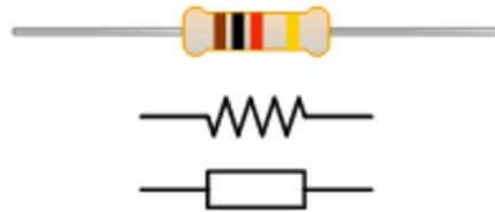
Otpornici visoke tačnosti se koriste i u mjernim instrumentima i drugim elektronskim uređajima. Prilikom izbora odgovarajućeg otpornika potrebno je poznavati karakteristike otpornika, a to su [6]:

- Nazivna otpornost;
- Tolerancija;
- Snaga otpornika;
- Dinamika zagrijavanja i hlađenja otpornika;
- Termički šum;
- Električna vremenska konstanta otpornika;
- Maksimalni napon otpornika;
- Starenje;
- Osjetljivost na vlagu;
- Pouzdanost;

3. POZITIVNA I NEGATIVNA OTPORNOST

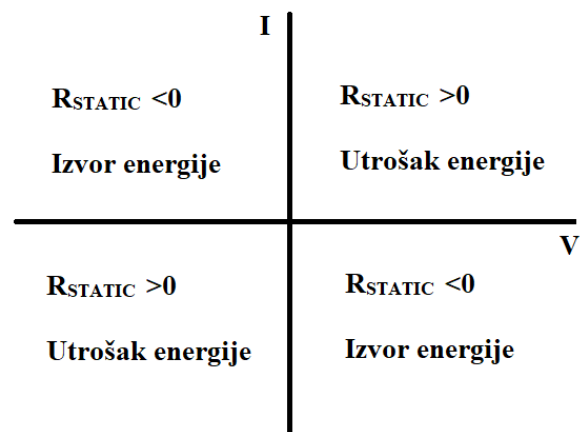
Omski otpornici (slika 2) predstavljaju pozitivnu otpornost kod koje se struja i napon mijenjaju u istom smjeru pri istim uslovima. Ovo je suprotno negativnoj otpornosti koja predstavlja svojstvo da se struja kroz jedan dio električnog kola i napon na njemu mijenjaju

u suprotnim smjerovima. U odnosu na pozitivne otpornike negativni otpornici ne postoje kao diskretne komponente.



Slika 2 – Izgled otpornika kao diskretne komponente i šematski prikaz

Takođe razlika između pozitivne i negativne otpornosti je u I-V karakteristici. Za pozitivnu otpornost I-V karakteristika će imati pozitivan nagib dok će negativna otpornost imati negativan nagib.



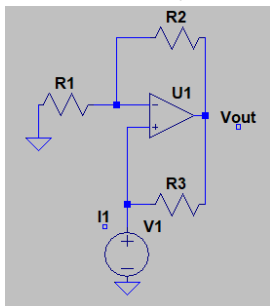
Slika 3 – Izgled I-V karakteristike za pozitivnu i negativnu otpornost

Negativna otpornost se može pojaviti u kolu ako su prisutne aktivne komponente koje pružaju izvor energije. Prisustvo aktivnih komponenti je neophodno jer struja kroz negativnu otpornost predstavlja izvor energije, dok struja kroz pozitivan otpornik predstavlja utrošak energije [7].

4. NEGATIVNA OTPORNOST I OPERACIONI POJAČAVAČ

Svojom pojavom šezdesetih godina prošlog vijeka operacioni pojačavači (OP) napravili su revoluciju u elektronici. Odjednom su i najsloženija elektronska kola postala jednostavna. Jednostavna šema, jednostavan proračun, jednostavna realizacija. U početku zamišljeni samo kao pojačavači signala, svojom jednostavnošću rada izvanrednom linearnošću i stabilnošću brzo su osvojili i mnoga druga područja primjene [8]. Stoga, operacioni pojačavač se u određenoj konfiguraciji može upotrijebiti za realizaciju negativne otpornosti. Kolo koje u konfiguraciji sa operacionim pojačavačem omogućava dobijanje negativne otpornosti naziva se konvertor negativne impedanse [9].

Konvertor negativne impedanse predstavlja neinvertujući pojačavač (slika 4) čija je ulazna otpornost negativna (R_{in}). Postoje dva načina za realizaciju konvertora negativne impedanse. Prvi način omogućava realizaciju konvertora negativne otpornosti inverzijom napona, dok drugi omogućava realizaciju konvertora negativne otpornosti sa inverzijom struje.



Slika 4 – Konvertor negativne impedanse

$$\frac{V_{out} - V_1}{R_2} = \frac{V_1}{R_1} \quad (3)$$

$$\frac{V_{out}}{R_2} = V_1 * \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (4)$$

$$V_{out} = V_1 * \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) \quad (5)$$

$$V_{out} = V_1 * \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (6)$$

$$I_1 = \frac{V_1 - V_{out}}{R_3} = \frac{V_1 - V_1 - V_1 * \frac{R_2}{R_1}}{R_3} \quad (7)$$

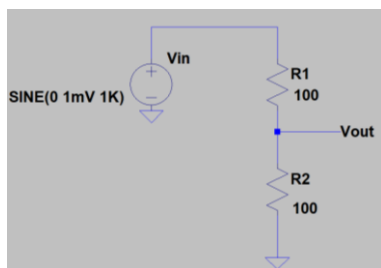
$$I_1 = -V_1 * \frac{R_2}{R_1 * R_3} \quad (8)$$

$$R_{in} = \frac{V_1}{I_1} = -R_3 * \frac{R_1}{R_2} \quad (9)$$

Postavljanjem sistema jednačina (1)-(8) omogućeno je određivanje ulazne otpornosti (izraz 9) kola konvertora negativne impedanse. Posmatrajući izraz (9) može se uočiti da izlazna otpornost (ulazni napon (V_1)/ulazna struja (I_1)) direktno zavisi od otpornika R_1 , R_2 i R_3 . U praktičnoj realizaciji moguće je realizovati ovaj konvertor negativne impedanse sa potenciometrima kako bi se mogla podešavati izlazna otpornost.

5. ANALIZA NEGATIVNE OTPORNOSTI

U radu je korišćenjem kola djelitelja napona (slika 5) na jednostavan način prikazan koncept negativne otpornosti.



Slika 5 – Kolo djelitelja napona

Izlazni napon (V_{out}) prikazanog kola direktno je proporcionalan proizvodu ulaznog napona (V_{in}) i vrijednosti otpora otpornika R_2 , dok je obrnuto proporcionalan zbiru vrijednosti otpora otpornika R_1 i R_2 [10].

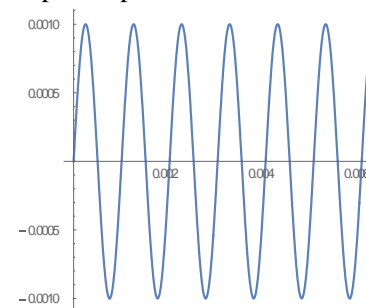
$$V_{out} = V_{in} * \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (10)$$

$$V_{in} = V_{amp} * \sin(2 * \pi * f * t) \quad (11)$$

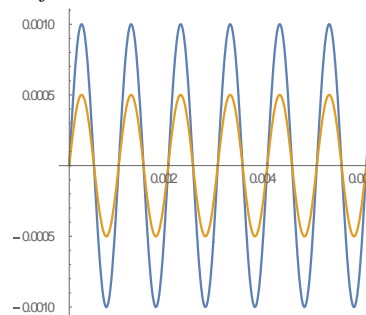
$$V_{out} = \frac{V_{amp} * R_2}{R_1 + R_2} * \sin(2 * \pi * f * t) \quad (12)$$

$$V_{out} = \frac{V_{amp} * R}{R_1 + R} * \sin(2 * \pi * f * t) \quad (13)$$

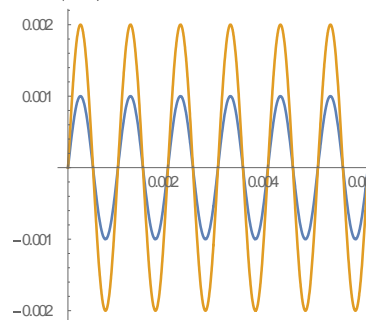
Ukoliko je ulazni napon (V_{in}) prostoperiodičnog talasnog oblika (izraz (11)), V_{out} će takođe biti istog talasnog oblika čija će se faza mijenjati u zavisnosti od vrijednosti otpora otpornika R_1 i R_2 .



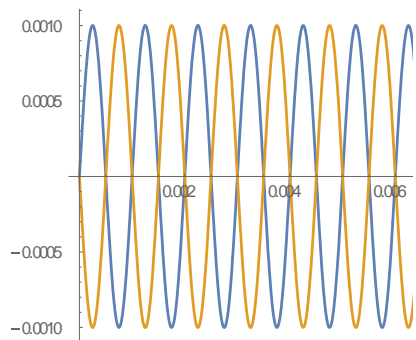
Slika 6 – Talasni oblik ulaznog signala (V_{in}) sa $V_{amp}=1$ mV i $f=1$ KHz



Slika 7 – Talasni oblik ulaznog signala-plava boja: Žuta boja-Talasni oblik na osnovu izraza (12) $R_1=R_2=100 \Omega$



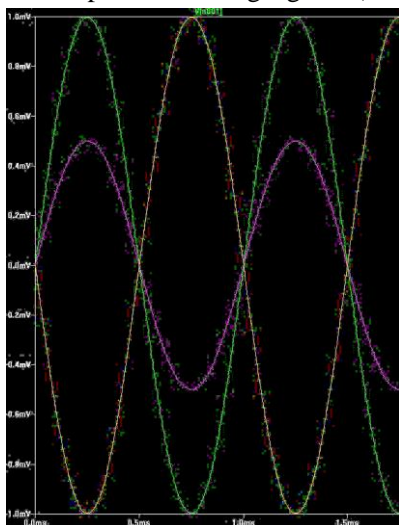
Slika 8 – Talasni oblik ulaznog signala-plava boja: Žuta boja-Talasni oblik na osnovu izraza (13) $R_1=5 \Omega$, $R=10 \Omega$



Slika 9 – Talasni oblik ulaznog signala-plava boja: Žuta boja-Talasni oblik izlaznog signala na osnovu izraza (13) za $R_1 > |R|$; $R_1 = 20 \Omega$, $R = 10 \Omega$

Izraz (12) predstavlja vrijednost izlaznog napona (V_{out}) u slučaju kada oba otpornika (R_1 i R_2) u kolu djelatelja napona imaju pozitivnu vrijednost otpora. Kada se u kolu djelatelja napona umjesto otpornika R_2 ubaci otpornik čija je otpornost negativna ($R_2 = R$, $R < 0$) izlazni napon će imati vrijednost koja odgovara izrazu (13). Na osnovu ovog izraza može se zaključiti da će izlazni napon (V_{out}) biti fazno pomjeren za 180° u odnosu na ulazni napon (V_{in}) ukoliko je $R_1 > |R|$. Svi prikazani grafici i izrazi su rezultat simboličke analize u programskom paketu Wolfram Mathematica.

Osim simboličke analize u ovom radu je prikazana i numerička analiza koja je sprovedena u programu LTSpice. Na slici 10 predstavljen je rezultat simulacije kola djelatelja napona. Ulazni napon (V_{in} -zelena boja) je prostoperiodičan signal sinusnog talasnog oblika sa amplitudom 1 mV i frekvencijom 1 kHz. Izlazni signal (V_{out} - roza boja) je istog talasnog oblika i faze kao ulazni signal. Međutim, amplituda izlaznog signala je duplo manja od amplitude ulaznog signala (izraz (12)).

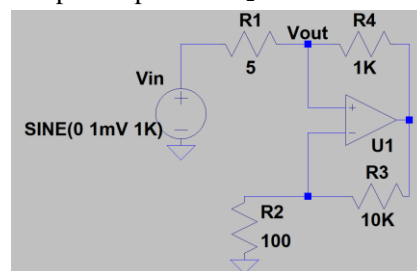


Slika 10 – Odzivi u vremenskom domenu djelatelja napona

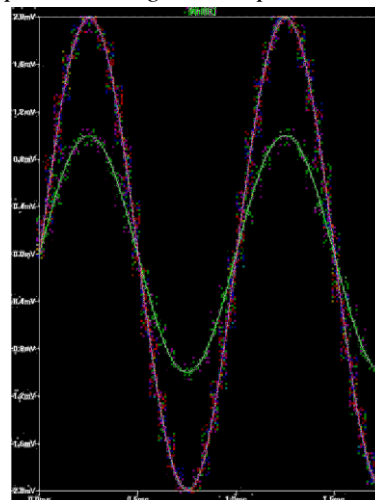
Posmatrajući sliku 10 može se uočiti talasni oblik narandžaste boje koji predstavlja struju kroz naponski

izvor koja u pozitivnoj poluperiodi napona ima smer od naponskog izvora, dok u negativnoj poluperiodi struja ima smer ka naponskom izvoru. Ovakav smjer struje je očekivan jer ovo kolo posjeduje pozitivnu ekvivalentnu otpornost.

U daljoj analizi potrebno je umjesto otpornika R_2 priključiti otpornik negativne otpornosti koji je realizovan pomoću konvertora negativne impedanse. Kolo djelatelja napona nakon priključenja otpornika negativne otpornosti prikazano je na slici 11. Na osnovu izraza (9) vrijednost negativne otpornosti za odgovarajuće vrijednosti otpornosti otpornika R_2 , R_3 i R_4 iznosi -10Ω . Nakon izvršene simulacije, a na osnovu izraza (13) amplituda izlaznog napona je dva puta veća od ulaznog napona. Smjer struje kroz naponski izvor je takav da pri pozitivnoj poluperiodi ulaznog napona struja „uvire“ u naponski izvor dok pri negativnoj poluperiodi struja ima smjer od izvora. Ovaj smjer struje se ne poklapa sa smjerom struje u kolu prikazanom na slici 5 jer je ekvivalentna otpornost toga kola pozitivna dok je u ovom slučaju ekvivalentna otpornost negativna. Ukoliko želimo da ekvivalentna otpornost bude pozitivna, a samim tim i smjer struje suprotan od smjera struje u kolu prikazanom na slici 11 potrebno je napraviti takvu konfiguraciju u kojoj će vrijednost otpora otpornika R_1 biti veća nego apsolutna vrijednost otpora otpornika R_2 .

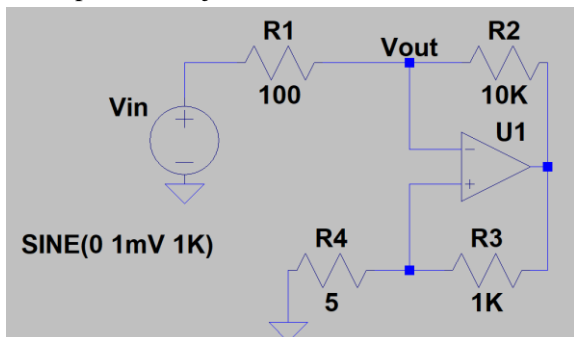


Slika 11 – Realizacija kola djelatelja napona sa otpornikom negativne otpornosti

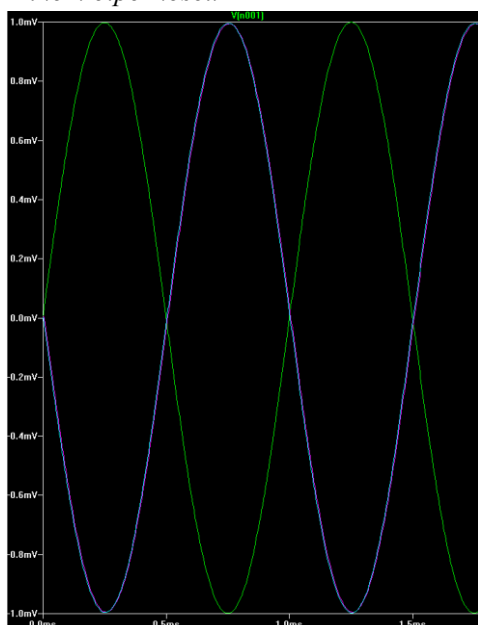


Slika 12 – Odzivi u vremenskom domenu kola djelatelja napona sa negativnom otpornošću

Na slici 13 prikazana je takva konfiguracija gdje je negativna otpornost -50Ω , dok otpornost otpornika R_1 ima vrijednost 100Ω . Izlazni napon ovog kola nije u fazi sa ulaznim signalom jer na osnovu izraza (13) izlazni napon ima vrijednost $-V_{in}$.



Slika 13 – Realizacija kola sa pozitivnom ekvivalentnom otpornošću



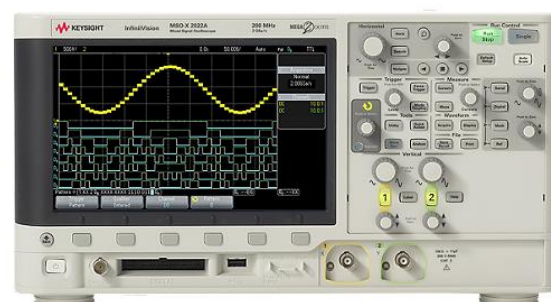
Slika 14 – Odzivi u vremenskom domenu kola sa pozitivnom ekvivalentnom otpornošću

Sprovedene analize (simbolička i numerička) su pokazale identične rezultate tako da talasni oblici koji su dobijeni u numeričkoj analizi u potpunosti prate grafike i izraze koji su dobijeni u simboličkoj analizi.

6. IMPLEMENTACIJA KOLA DJELITELJA NAPONA

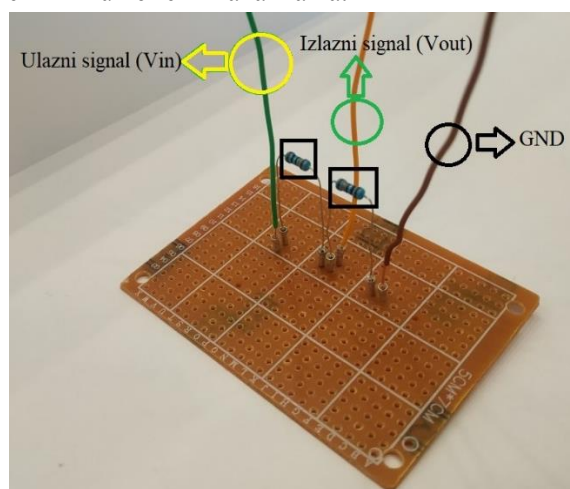
Nakon sprovedene simboličke i numeričke analize pristupilo se implementaciji kola djelitelja napona u laboratoriji. U cilju generisanja ulaznog napona upotrijebljen je generator funkcija, dok je za snimanje signala u karakterističnim tačkama upotrijebljen osciloskop (slika 15). U slučaju da se analizirano kolo želi implementirati i analizirati van laboratorija od izuzetne

koristi mogu biti virtuelni instrumenti [11], [12], [13] koji se instaliraju na PC-u ili pametnom telefonu/tabletu. Virtuelni instrumenti se uklapaju u savremeni koncept informaciono-komunikacionih tehnologija omogućavajući analizu realizovanog električnog kola bilo gdje i bilo kada.

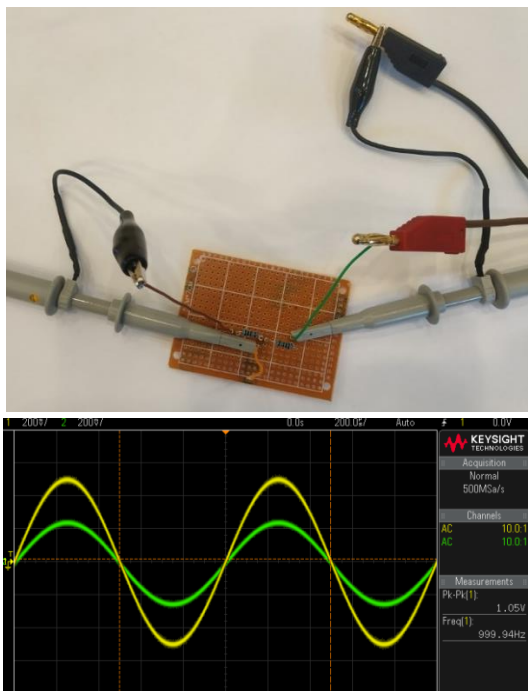


Slika 15 – Laboratorijski instrumenti korišćeni u cilju analize realizovanog kola

Prvo je analizirano kolo djelitelja napona sa dva otpornika od po $100\text{K}\Omega$ (slika 16). Kao ulazni signal (V_{in}) upotrijebljena je sinusoida amplitude 1Vpp i frekvencije 1KHz dobijene u generatoru funkcija. Nakon izvršenih snimanja signala u karakterističnim tačkama (V_{in} , V_{out}) može se uočiti da izlazni signal ima dva puta manju amplitudu u odnosu na ulazni signal (slika 17). Takođe treba napomenuti da se dobijeni rezultat u potpunosti slaže sa ranije sprovedenim simboličkim i numeričkim analizama.

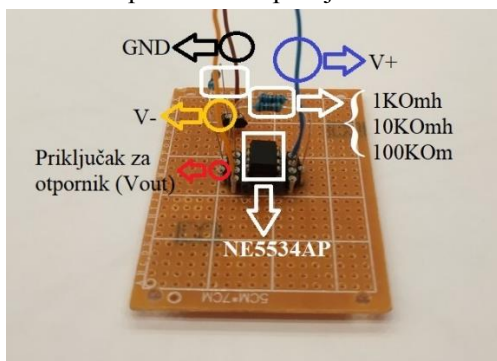


Slika 16 – Realizovano kolo djelitelja napona sa označenim komponentama i priključcima



Slika 17 – Realizovano kolo djelitelja napona sa snimljenim talasnim oblicima

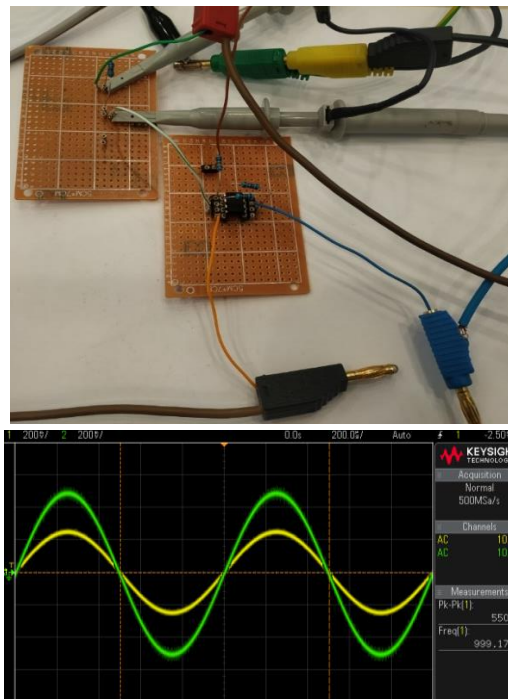
Nakon implementacije djelitelja napona sa dva otpornika koji su imali pozitivne vrijednosti otpornosti, realizovano je kolo konvertora negativne impedanse (slika 4). U ovoj realizaciji korišćen je NE-5534AP operacioni pojačavač [14] koji je napajan iz izvora sa +12V/-12V. U cilju provjere ispravnosti rada operacionog pojačavača savjetuje se testiranje istog u formi jediničnog pojačavača. Na slici 18 prikazano je realizovano kolo konvertora negativne impedanse sa označenim komponentama i priključcima.



Slika 18 – Konvertor negativne impedanse

Kao što se može vidjeti na slici 18 u realizaciji konvertora negativne impedanse iskorišćeni su otpornici $R_1=100\text{ K}\Omega$, $R_2=10\text{ K}\Omega$, $R_3=1\text{ K}\Omega$. Na osnovu izraza (9) i datih vrijednosti otpora ovako realizovana negativna otpornost ima vrijednost $-10\text{ K}\Omega$. Redno sa ovom otpornošću vezan je otpornik od $5\text{ K}\Omega$. Nakon sprovedenih mjerenja može se uočiti da je izlazni signal dva puta veće amplitude u odnosu na ulazni signal (slika 19). Implementacija sprovedena u ovom radu

predstavlja verifikaciju rezultata dobijenih simboličkom i numeričkom analizom.



Slika 19 – Realizovano kolo djelitelja napona sa negativnim otpornikom i snimljenim talasnim oblicima

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu na jednostavan način prikazan je pojam negativne otpornosti. Ovaj rad predstavlja doprinos promovisanja upotrebe negativne otpornosti u svim onim slučajevima gdje može biti od pomoći. Takođe, ovaj rad predstavlja doprinos u nastavi elektrotehnike, jer omogućava da se prikazani postupak iskoristi u nastavi kao studentski projekat ili laboratorijska vježba u cilju jednostavnijeg razumjevanja pojma negativne otpornosti.

Negativna otpornost se između ostalog može koristiti za poništavanje pozitivne impedanse, kao na primjer strujnog ili naponskog izvora. Kod strujnog izvora unutrašnju otpornost čini beskonačno velikom, dok u naponskom izvoru eliminiše unutrašnju otpornost. U daljim radu na ovu temu mogli bi da se prikažu i drugi načini realizacije negativne otpornosti, tj. prikaz komponenti koje u jednom svom dijelu rada izražavaju ovo svojstvo.

LITERATURA

- [1] Sungook H. Wireless, *From Marconi's Black-Box to the Audion*, USA: MIT Press, 2001.
- [2] Niaudet A, *La Lumiere Electrique No. 3*, pp. 287, 1881.

- [3] Garcke E, *Lighting*, Encyclopedia Britannica, University press, Vol 11 No. 16, pp. 660-661, 1911.
- [4] Heaviside O, Correspondence: *Negative Resistance*, The Electrician, London, 1892.
- [5] Herlod E. W, Negative Resistance and Devices for Obtaining it, *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, Vol. 23, pp. 1201-1223, 1935.
- [6] Radetic R, Električna Otpornost pojava i merenje, *Info Elektronika*, Bor, 2015.
- [7] Morecroft J, Pinto A. Curry W. A. *Principles of Radio Communication*, Andesite Press, 2015.
- [8] Radetic R, Operacioni pojačivači sa zbirkom šema: odabrana poglavlja, *Info Elektronika*, Bor, 2014.
- [9] Chen W.-K, *The Circuits and Filters Handbook*, CRC Press, 2003.
- [10] Horowitz P, *Negative Resistor*, Harvard University-Physics 123 course lecture, 2004.
- [11] KEUWLSOFT, Dual channel function / waveform / signal generator for the speaker / headphone audio output. [citirano 15.06.2019]. Dostupno na: <http://www.keuwl.com/FunctionGenerator/>
- [12] Visual Analyser, virtuelni instrument, [citirano 15.06.2019]. Dostupno na: <http://www.sillanumsoft.org/>
- [13] Soundcard Oscilloscope, Christian Zeitnitz, [citirano 15.06.2019]. Dostupno na: https://www.zeitnitz.eu/scope_en
- [14] Datasheet NE5534AP, Texas Instruments, [citirano 15.06.2019]. Dostupno na: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/27255/TI/NE5534AP.html>

SUMMARY

REPRESENTATION OF THE NEGATIVE RESISTANCE REALIZED WITH NEGATIVE IMPEDANCE CONVERTER

In this paper, we presented the concept of negative resistance in a simplified way. Although the negative resistance was noticed even in the 19th century, it still causes inconveniences due to its absence as a discrete component. In this paper, the negative resistance was realized using a negative impedance converter. To understand clearly its influence in the electric circuit, a voltage divider circuit was used, which was analyzed both numerically and symbolically. The numerical analysis was performed in the simulation program LTspice, while the symbolic analysis was conducted in the Wolfram Mathematica software package. First, a voltage difference circuit with a positive resistor value was analyzed, after that one of the resistors was replaced with a negative resistance resistor. Additionally, simulations for the positive and negative equivalent resistance of the circuits were performed. Finally, the practical realization of the voltage divider circuit was demonstrated in order to make this concept more complete.

Key words: *negative resistance, negative impedance converter, resistance*