

Optimizacija rezonantnog filtra kod bežičnog prijenosa energije

Penić, Nikola

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:379338>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-18**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni studij

**OPTIMIZACIJA REZONANTNOG FILTRA KOD
BEŽIČNOG PRIJENOSA ENERGIJE**

Diplomski rad

Nikola Penić

Osijek, 2017.

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Osijek,

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Ime i prezime studenta:	Nikola Penić
Studij, smjer:	Diplomski studij, Računarstvo
Mat. br. studenta, godina upisa:	0165045941
Mentor:	doc.dr.sc. Davor Vinko
Sumentor:	
Predsjednik Povjerenstva:	
Član Povjerenstva:	
Naslov diplomskog rada:	Optimizacija rezonantnog filtra kod bežičnog prijenosa energije
Primarna znanstvena grana rada:	
Sekundarna znanstvena grana (ili polje) rada:	
Zadatak diplomskog rada:	Simulirati kombinacije serijskog rezonantnog filtra i paralelnog LC kruga te provjeriti rezultate u laboratorijskim uvjetima
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: Jasnoća pismenog izražavanja: Razina samostalnosti:

Potpis sumentora:

Potpis mentora:

Dostaviti:

1. Studentska služba

U Osijeku,

godine

Potpis predsjednika Odbora:



ETFOS
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET OSIJEK



Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek,

Ime i prezime studenta:

Nikola Penić

Studij :

Diplomski studij

Mat. br. studenta, godina upisa:

0165045941, 2013.

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: Optimizacija rezonantnog filtra kod bežičnog prijenosa energije

izrađen pod vodstvom mentora doc.dr.sc. Davor Vinko

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TEHNOLOGIJE	2
2.1. ZAVOJNICA	2
2.2. KONDENZATOR	2
2.3. LC REZONANTNI KRUG	3
2.4. SERIJSKI REZONANTNI FILTER	5
3. SIMULACIJA	7
3.1. SHEMA	7
3.2. THD	14
3.3. ESR	18
3.4. POSTUPAK ODREĐIVANJA VRIJEDNOSTI LC KRUGA	21
4. PRAKTIČNI RAD	21
4.1. $L = 2.33 \mu\text{F}$, $C = 400 \text{ nF}$ U PARALELI.....	22
4.2. $L = 23.3 \mu\text{F}$, $C = 40 \text{ nF}$ U PARALELI.....	24
4.3. $L = 233 \mu\text{F}$, $C = 4 \text{ nF}$ U PARALELI.....	25
5. ZAKLJUČAK	28
LITERATURA	29
SAŽETAK	30
ABSTRACT	31
ŽIVOTOPIS	32
PRILOG	33

1. UVOD

Bežični prijenos energije je termin koji obuhvaća veći broj različitih tehnologija za prijenos energije. Energija se može prenositi električnim ili magnetskim poljem, elektromagnetskim poljem, mikrovalnim mikrovalnim i svjetlosnim zračenjem i sl. U zadnjih desetak godina sve se veći broj sustava prebacuje na bežični način rada. Postoje velike prednosti u odnosu na konvencionalni način odnosno prijenos energije preko žice, kao što su jednostavnost korištenja uređaja koji rade na principu bežičnog prijenosa energije (od električnih četkica za zube, preko RDIF uređaja i smart kartica pa do bežičnih punjača za mobitele čiji smo marketinški porast vidjeli tek ove godine razvojem jeftinijih modela punjača), izdržljivost (kablovi punjača su poznati po čestim kvarovima), sigurnost (punjenje mobitela te slušanje glazbe tijekom vožnje, bez potrebe za spajanjem u utičnicu) i sl. Pri bežičnom prijenosu energije postoje i problemi kao što su sporiji prijenos energije te disipacija, cijena bežičnih uređaja te još uvijek poprilično nezgodno korištenje uređaja tijekom prijenosa energije zbog ograničene udaljenosti na kojoj prijenos može efikasno raditi.

Zadatak diplomskog rada je kroz simulacije i laboratorijska mjerenja optimizirati serijski rezonantni LC filter sklopa predajnika kod bežičnog prijenosa energije.

2. TEHNOLOGIJE

2.1. Zavojnica

Zavojnica je prvi od dva osnovna elementa LC kruga. Kad struja prolazi kroz zavojnicu, u njoj se stvara magnetsko polje te se tako skladišti energija. Jedinica za induktivitet je henry (H) nazvana po fizičaru Josephu Henryu, a najčešće se koriste jedinice mikrohenry (μH) i milihenry (mH). S obzirom na namjenu, zavojnice dijelimo na visoko i niskofrekventne, a mogu biti bez jezgre ili s jezgrom.



Sl. 2.1. Zavojnica s feritnom jezgrom [6]

2.2. Kondenzator

Kondenzator je drugi osnovni element LC kruga. Naboj na pločama kondenzatora stvara električno polje te se takvo skladišti u kondenzatoru. Jedinica za kapacitet kondenzatora je farad (F), u čast izumitelju Michaelu Faradayu. Najčešće koristimo kondenzatore veličine od pikofarada (pF) do milifarada (mF). Kondenzatori se rade od dva vodljiva materijala i dielektrika između u koji se skladišti električna energija. Vodljive ploče mogu biti od različitih folija, tankog sloja filma, metalne, elektrolitske i sl. Dielektrik između vodljivih ploča uglavnom je načinjen od keramike, stakla, plastičnog filma, papira i sličnih nevodljivih materijala.



Sl. 2.2. Keramički kondenzatori [7]

2.3. LC rezonantni krug

LC rezonantni krug je krug sastavljen od zavojnice L te kondenzatora C spojenih u seriju ili paralelu. Koristi se za generiranje signala ili primanje signala na određenoj frekvenciji te je ključna komponenta u mnogim elektroničkim uređajima. Sam LC rezonantni krug funkcionira tako da sprema električnu energiju tako što kondenzator sprema energiju u obliku električnog polja a zavojnica sprema energiju u obliku magnetskog polja. Funkcionira tako da se pri pražnjenju kondenzatora puni zavojnica te obratno stvarajući rezonanciju koja radi na frekvenciji ovisnoj o karakteristikama kondenzatora i zavojnice.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Sl. 2.3. Rezonantna frekvencija [10]

Gdje je:

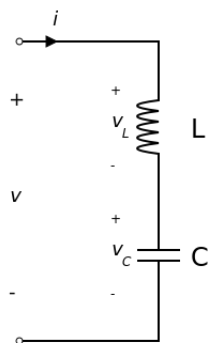
f - rezonantna frekvencija

L - induktivitet zavojnice

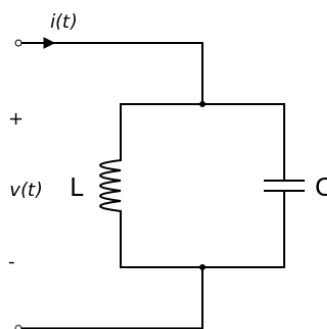
C - kapacitet kondenzatora

Cilj što boljeg LC kruga je prenijeti signal sa što manjim prigušivanjem (eng. *damping*).

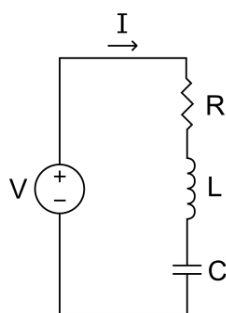
Na slikama 2.4. i 2.5. možemo vidjeti serijski i paralelni LC krug. Slike predstavljaju idealne LC krugove jer u praksi imamo gubitke na elementima koje ćemo u simulaciji predstaviti s otpornicima. Slika 2.6. predstavlja realan serijski LC krug u kojem otpornik R predstavlja unutarnji otpor u kondenzatoru i zavojnici. Taj otpor prigušuje vrijednosti napona te smanjuje maksimum rezonantne frekvencije. Idealni LC krug postoji samo u domenama supravodljivosti. Serijski RLC krug koristiti se kao serijski rezonantni filter. Realni primjeri LC krugova prikazani su na slikama 2.7. i 2.8.



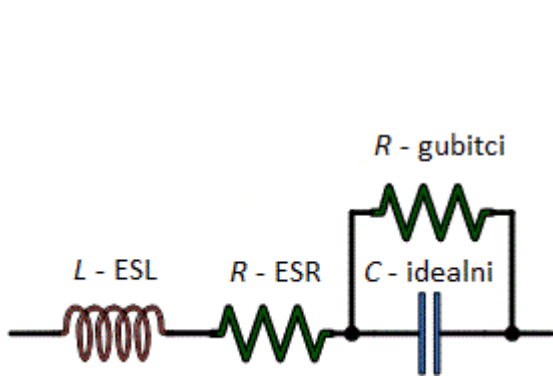
Sl. 2.4. Serijski LC krug [1]



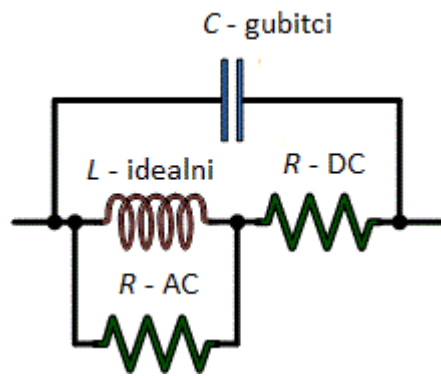
Sl. 2.5. Paralelni LC krug [1]



Sl. 2.6. LC krug s otpornikom u seriji [8]



Sl. 2.7. Realan kondenzator [11]



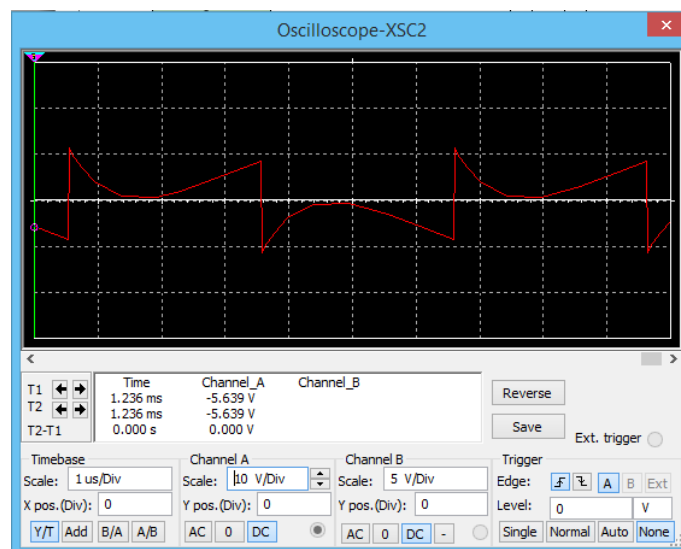
Sl. 2.8. Realna zavojnica [12]

Slike 2.7. i 2.8. predstavljaju stvarne (realne) modele zavojnice i kondenzatora. Na slici 2.7. vidi se otpornik označen „R – gubitci“. On zapravo predstavlja paralelnu otpornu komponentu na kondenzatoru koja reagira na izmjeničnu struju. Tu se stvaraju gubitci naboja zbog prolaska struje kroz neidealni dielektrik. „R – ESR“ uz „L – ESL“ predstavlja ekvivalentne gubitke prolaskom istosmjerne struje, odnosno označava gubitke na idealnom kondenzatoru „C – idealni“ nastale zbog karakteristika ploča korištenih u kondenzatoru.

Slika 2.8. predstavlja realnu zavojnicu gdje na idealnu zavojnicu „ L – idealni“ utječu parazitski gubici i to u obliku parazitskog kapaciteta „ C – gubici“ koji zbog približenih navoja zavojnice stvara kapacitet unutar zavojnice. „ R – DC“ i „ R – AC“ predstavljaju gubitke koji nastaju prolaskom istosmjernne, odnosno izmjenične struje kroz zavojnicu.

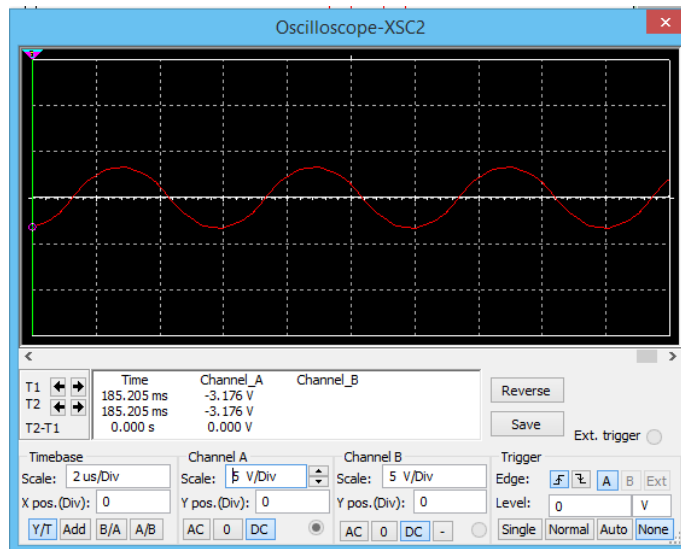
2.4. Serijski rezonantni filter

Pri simulaciji koristi se LC krug s otpornikom koji predstavlja unutarnji otpor u kondenzatoru i zavojnici. Ako se paralelni strujni krug spoji na pravokutni izvor napona, javljaju se oscilacije u obliku strujnih šiljaka, što se može vidjeti na slici 2.8 (vrijednosti u paraleli: $L = 2.33 \mu\text{H}$, $C = 400 \text{ nF}$):



SI.2.9. Oscilacije napona na otporu R_2

Ovakav rezultat dobija se zbog viših harmonika pravokutnog oblika signala. Viši harmonici su umnošci fundamentalne frekvencije koji izobličuju signal zbog nelinearnog otpora u sklopu. Da bi se to uklonilo, u seriju se stavljaju zavojnica i kondenzator, odnosno stavlja se serijski LC krug koji mijenja rezultatni napon kao što se vidi na slici 2.9. (vrijednosti induktiviteta i kapaciteta dodanih u seriju: $L = 23.3 \mu\text{H}$, $C = 40 \text{ nF}$):



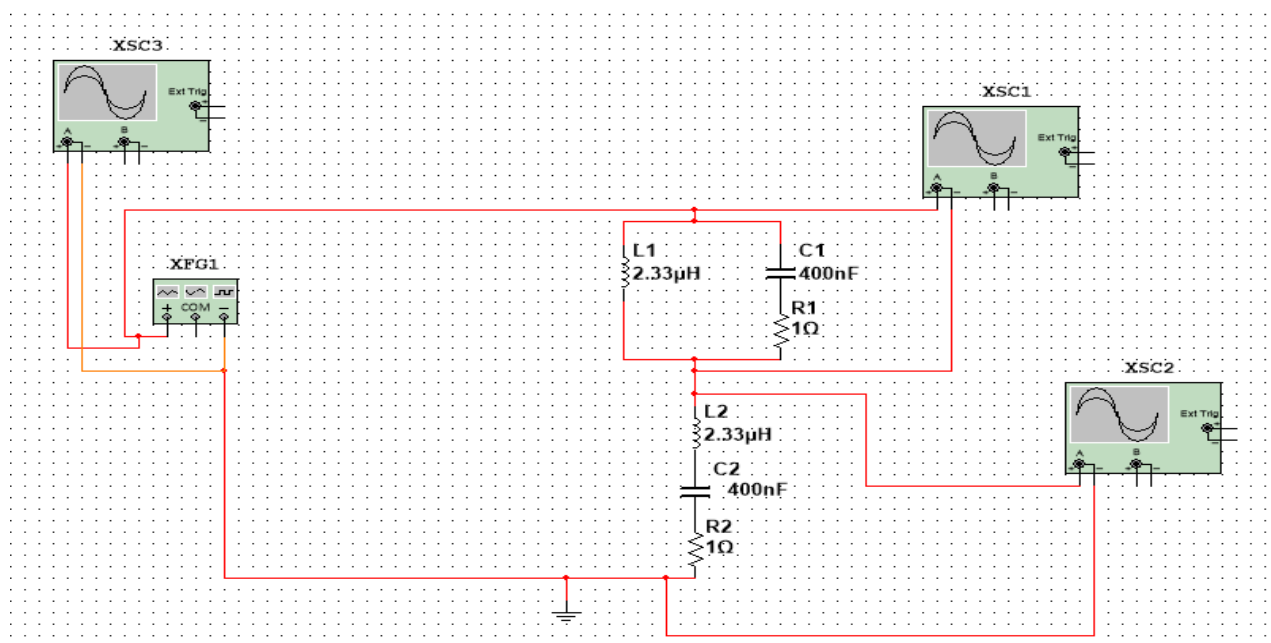
Sl. 2.10. Ispravljen napon na otporniku R_2 dodavanjem LC serijskog kruga

Zbog toga što serijski rezonantni krug ima veći otpor na frekvencijama izvan rezonantne, te on ograničava strujne šiljke na otporniku R_2 .

3. SIMULACIJA

3.1. Shema

Pri simulaciji koristio se program NI Multisim. NI Multisim (prethodno se zvao MultiSIM) je program za izradu te simulaciju elektroničkih krugova. Prvo se zvao Electronics Workbench te ga je 1999. napravila tvrtka Interactive Image Technologies te je 2005. godine prodan National Instruments tvrtci koja ga preimenjuje u NI Multisim. Shema je vidljiva na slici 3.1. :



Sl. 3.1. Shema simuliranog kruga

Gdje su :

XFG_1 – funkcijski generator

$XSC_{1,2,3}$ – osciloskopi

L_1 – zavojnica u paralelnom spoju

C_1 – kondenzator u paralelnom spoju

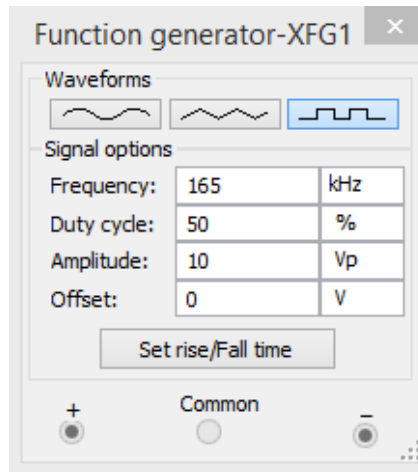
R_1 – otpornik koji predstavlja gubitke u paralelnom spoju

L_2 – zavojnica u serijskom spoju

C_2 – kondenzator u serijskom spoju

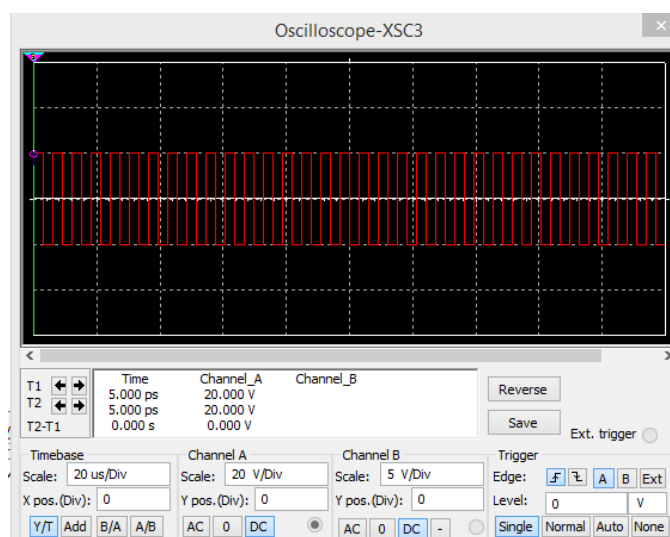
R_2 – otpornik koji predstavlja gubitke u serijskom spoju

Na funkcijskom generatoru je zadana frekvencija od 165 kHz pravokutnog signala amplitude 10 V kao što možemo vidjeti na slici 3.2.



Sl. 3.2. Funkcijski generator

Izgled izlaznog signala funkcijskog generatora vidljiv je preko osciloskopa XSC3, na slici 3.3. Cilj je dobiti na izlazu što više sinusni signal na paralelnom dijelu strujnog kruga bez oscilacija i prevelikih gubitaka.



Sl. 3.3. Izlazne vrijednosti

Na slici 3.4. paralelni LC krug rezonira na očekivanoj frekvenciji uz male nepravilnosti, no zbog toga što je u funkcijski generator unesena izračunata frekvencija, pretpostavlja se da je to zbog greške u simulatoru što će biti potrebno potvrditi u laboratorijskom eksperimentu.

U simulaciji paralelni LC krug ostaje na vrijednostima od $L = 2.33 \mu\text{H}$ i $C = 300 \text{ nF}$ te se vrijednosti kondenzatora i zavojnice mijenjaju samo u serijskom LC krugu i to za umnožak od 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10 kao što se može vidjeti na tablici 3.1.:

Tablica 3.1. Korištene vrijednosti

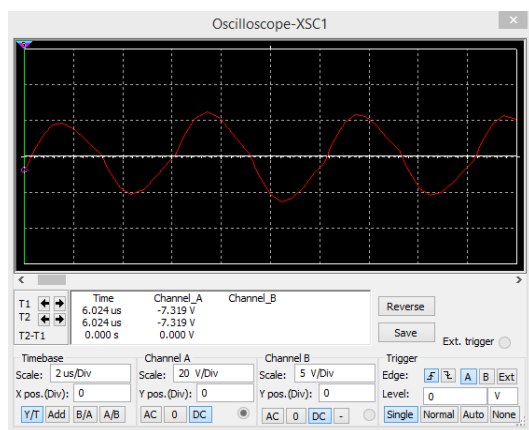
Paralelni krug	Serijski krug
$L = 2.33 \mu\text{H}, C = 400 \text{ nF}$	$L = 2.33 \mu\text{H}, C = 400 \text{ nF}$
$L = 2.33 \mu\text{H}, C = 400 \text{ nF}$	$L = 4.66 \mu\text{H}, C = 200 \text{ nF}$
$L = 2.33 \mu\text{H}, C = 400 \text{ nF}$	$L = 11.65 \mu\text{H}, C = 80 \text{ nF}$
$L = 2.33 \mu\text{H}, C = 400 \text{ nF}$	$L = 23.3 \mu\text{H}, C = 40 \text{ nF}$
$L = 2.33 \mu\text{H}, C = 400 \text{ nF}$	$L = 46.6 \mu\text{H}, C = 20 \text{ nF}$
$L = 2.33 \mu\text{H}, C = 400 \text{ nF}$	$L = 116.5 \mu\text{H}, C = 8 \text{ nF}$
$L = 2.33 \mu\text{H}, C = 400 \text{ nF}$	$L = 233 \mu\text{H}, C = 4 \text{ nF}$

Početne unesene vrijednosti serijskog LC kruga su identične paralelnom krugu:

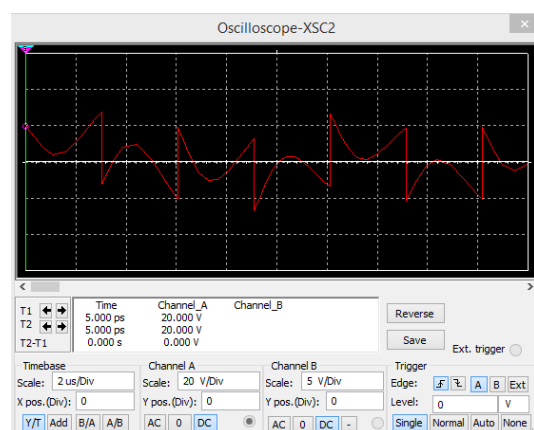
$$C = 2.33 \mu\text{H}$$

$$L = 400 \text{ nF}$$

$$f = 165 \text{ kHz}$$



Sl. 3.4. Paralelni LC krug ($L = 2.33 \mu\text{H}$)



Sl. 3.5. Serijski LC krug ($L = 2.33 \mu\text{H}$)

U paralelnom krugu vidi se nepravilan signal dok je u serijskom LC krugu vidljiva nepravilna razlika između pravokutnog valnog oblika s izvora i sinusnog valnog oblika (napon na paralelnom krugu).

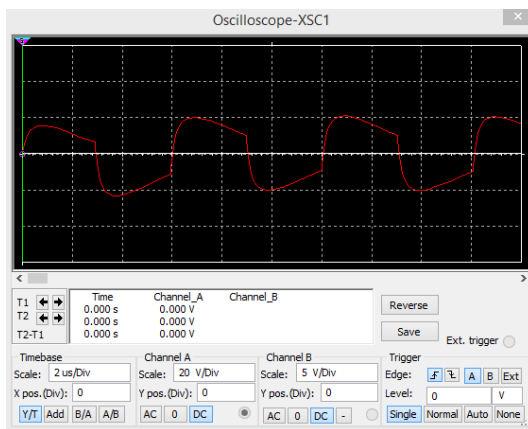
Unesene vrijednosti kondenzatora i zavojnice u serijskom LC krugu su za prvi slučaj bile jednake vrijednostima u paralelnom krugu, odnosno 400 nF za kapacitet te $2.33\mu\text{H}$ za induktivitet.

Može se zaključiti da ova kombinacija nije dobra zbog toga što izlazni signal na paralelnom i serijskom LC krugu nije idealan te je potrebno dobiti neizobličeni sinus na paralelnom LC krugu.

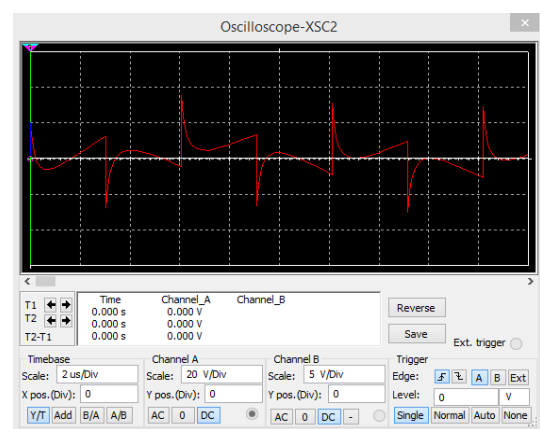
Nakon toga se smanjuje induktivitet za 10 puta a kapacitet povećava za 10 puta te se ponovo provodi mjerenje te dobijaju vrijednosti sa slike 3.6 i 3.7:

$$L = 0.233\ \mu\text{H}$$

$$C = 4000\ \text{nF}$$



Sl. 3.6. paralelni LC krug ($L = 0.233\ \mu\text{H}$)

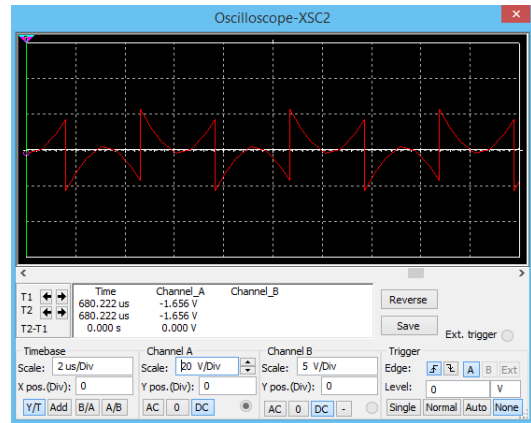
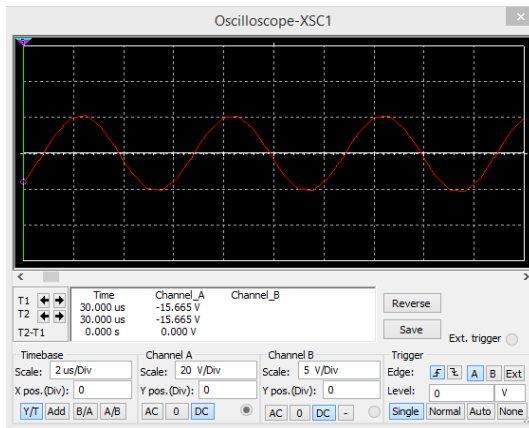


Sl. 3.7. serijski LC krug ($L = 0.233\ \mu\text{H}$)

Po slikama je vidljivo da ne samo da je paralelni izlazni signal postao izobličeniji već je sada i serijski signal postao lošiji te sam LC krug nije u rezonanciji, što je značilo da se krive vrijednosti smanjuju, odnosno povećavaju. Sljedeći korak je bio vratiti sve elemente na originalne vrijednosti serijskog LC kruga te sada probati povećati induktivitet za 10 puta te smanjiti kapacitet za 10 puta:

$$L = 23.3\ \mu\text{H}$$

$$C = 40\ \text{nF}$$



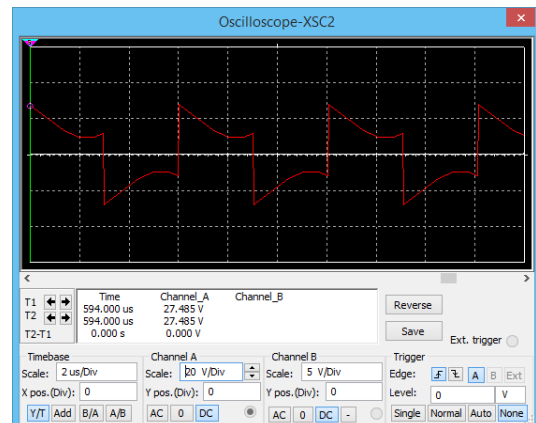
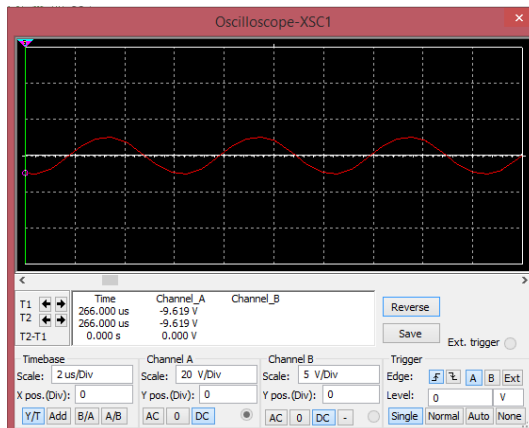
Sl. 3.8 Paralelni LC krug ($L = 23.3 \mu\text{H}$) **Sl. 3.9.** Serijski LC krug ($L = 23.3 \mu\text{H}$)

Sada se na slici 3.8. vidi da je paralelni LC krug u stabilnoj rezonanciji (nema pretjeranog izobličenja u paralelnom krugu, te je serijski krug najslabiji razlici pravokutnog i sinusnog signala) što je očekivan rezultat. Rezultati su zadovoljavajući za prvi korak, te se ova kombinacija uzima kao najbolja do sad i prema njoj se dalje rade izmjene i mjerenja.

Nakon ovakvog rezultata radi se još jedna izmjena vrijednosti kako bi se provjerilo je li moguće dobiti još bolje izlazne signale, no na izlaznom sinusnom signalu primjećuje se smanjenje amplitude, što se vidi na slikama 3.10. i 3.11. :

$$L = 233 \mu\text{H}$$

$$C = 4 \text{ nF}$$

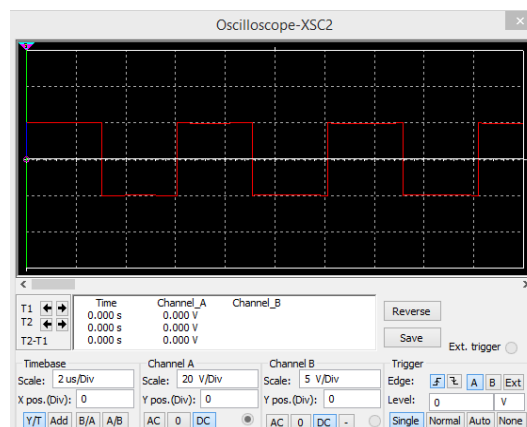
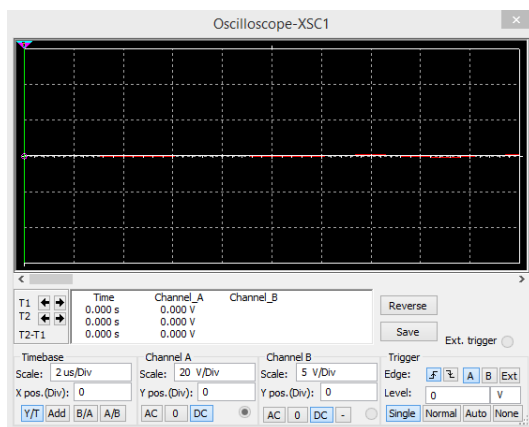


Sl. 3.10. Paralelni LC krug ($L = 233 \mu\text{H}$) **Sl. 3.11.** Serijski LC krug ($L = 233 \mu\text{H}$)

Radi još jedne provjere još se jednom povećava induktivitet te smanjuje kapacitet za 10 te se dobijaju očekivani rezultati kompletnog gubitka sinusoide, prikazano na slici 3.12.

$$L = 2330 \mu\text{H}$$

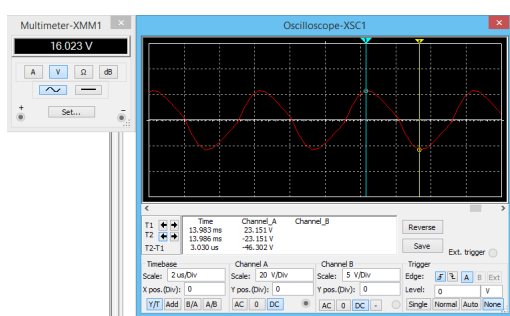
$$C = 0.4 \text{ nF}$$



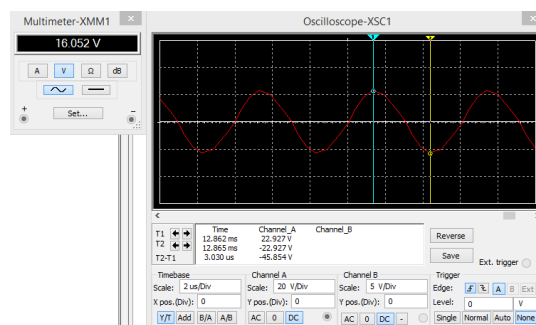
Sl. 3.12. Paralelni LC krug ($L = 2330 \mu\text{H}$) **Sl. 3.13. Serijski LC krug ($L = 2330 \mu\text{H}$)**

Iz prvih simulacija se da zaključiti da je najbolje iskoristiv primjer s induktivitetom od $23.3 \mu\text{H}$ te kapacitetom od 40 nF u seriji uz $2.33 \mu\text{H}$ i 400 nF u paraleli (što znači da je induktivitet u seriji 10 puta veći od paralele a kapacitet serije 10 puta manji) te se s tom kombinacijom nastavlja s daljnjim mjerenjima.

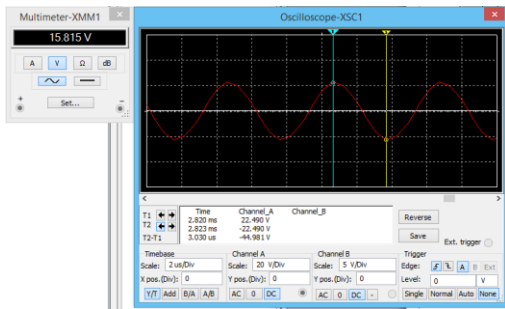
Nakon odluke o korištenju induktivitet od $23.3 \mu\text{H}$ te kapaciteta od 40 nF , potrebno je pobliže provjeriti vrijednosti omjera i to tako da se naizmjenice obrnuto proporcionalno mijenja kapacitet i induktivitet za umnožak vrijednosti od 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10 da bi se pobliže moglo vidjeti koja je kombinacija optimalna bez potrebe mijenjanja frekvencije s početnih 165 kHz . Pri tome se mjeri efektivna vrijednost pomoću multimetra radi lakšeg grafičkog prikaza rezultata.



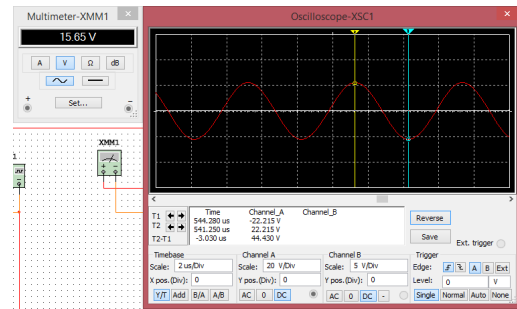
Sl. 3.14. $2.33 \mu\text{H} - 400 \text{ nF}$



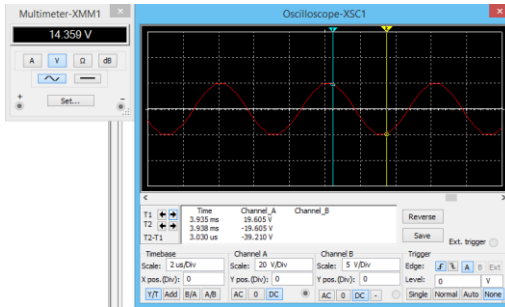
Sl. 3.15. $4.66 \mu\text{H} - 200 \text{ nF}$



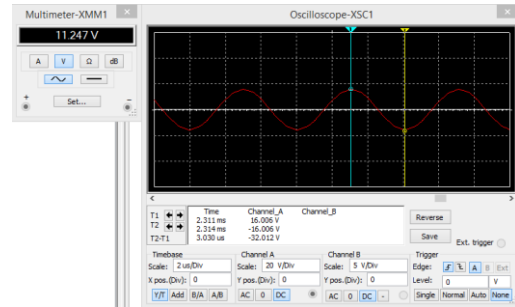
Sl. 3.16. $11.65\mu\text{H} - 80\text{ nF}$



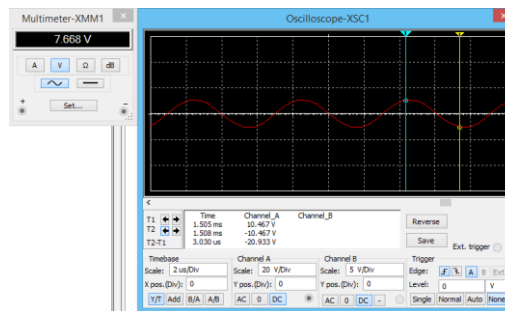
Sl. 3.17. $23.3\mu\text{H} - 40\text{ nF}$



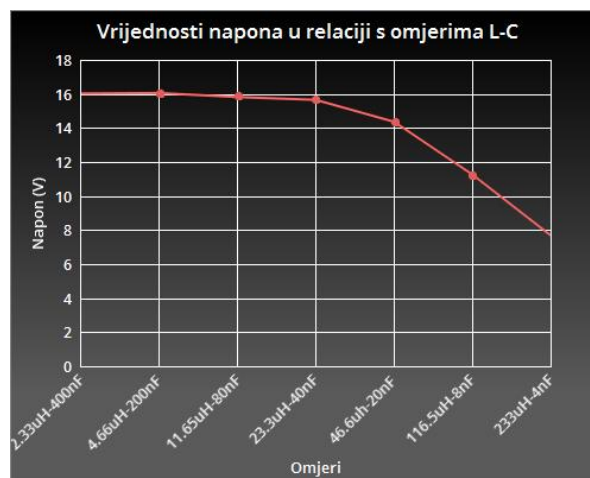
Sl. 3.18. $46.6\mu\text{H} - 20\text{ nF}$



Sl. 3.19. $116.5\mu\text{H} - 8\text{ nF}$



Sl. 3.20. $233\mu\text{H} - 4\text{ nF}$



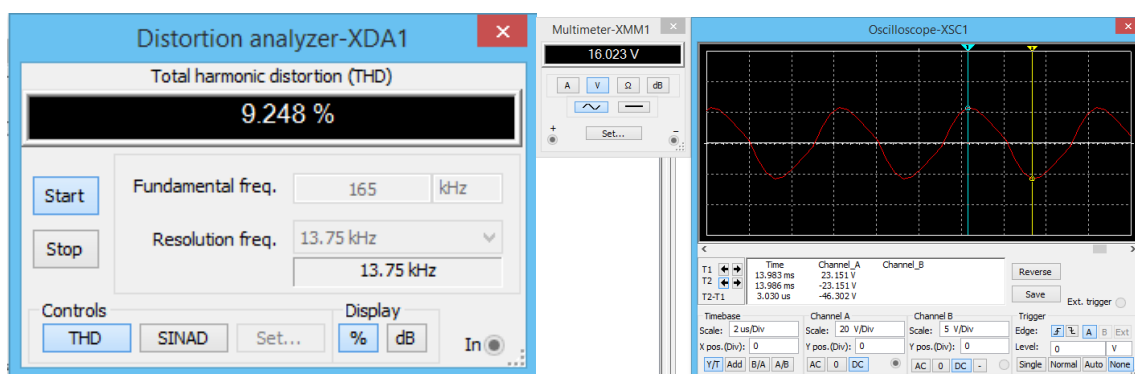
Sl. 3.21. Graf odnosa napona te omjera induktiviteta i kapaciteta u serijskom krugu (vrijednosti paralele: $L = 2.33\mu\text{H}$, $C = 400\text{nF}$)

Po grafu može se zaključiti da su prihvatljivi rezultati do $23.3 \mu\text{H}$ i 40 nF , odnosno efektivna vrijednost napona ne opada značajno. Sljedeće se provjerava na kojim vrijednostima napona dolazi do promjene oblika amplitude, odnosno gdje se zbog utjecaja viših harmonika izobličava amplituda.

3.2. THD

Nakon provjere prve kombinacije rezonantnog filtera, provjeravao se THD (engl. *Total Harmonic Distorsion*). THD označava količinu harmoničkih distorzija u krugu koje izobličuju rezonanciju. U elektrotehnici standard za dozvoljene razine harmoničkih distorzija iznosi do 5% prihvatljivo uz pretpostavku da najveći pojedini harmonik ne prelazi 3% [9].

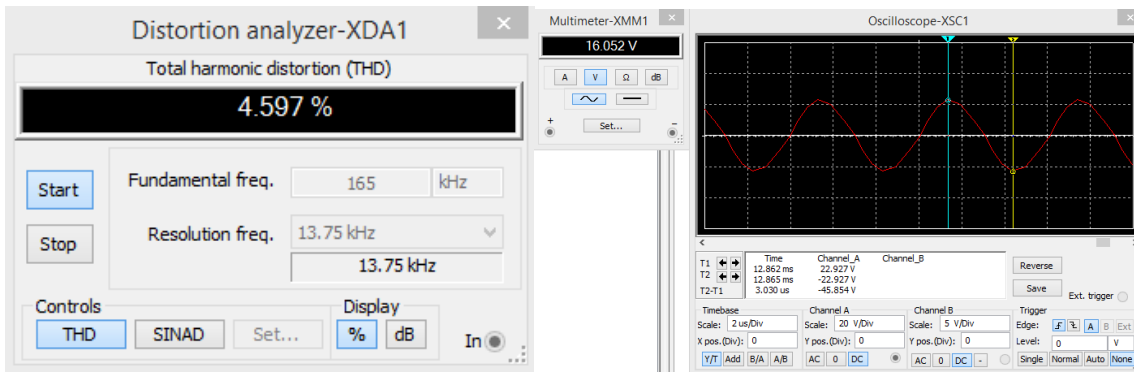
Vrijednosti na paraleli su: $L = 2.33 \mu\text{H}$ i $C = 400 \text{ nF}$. Ako se uzme predložena granica od 5% prihvatljivosti, možemo vidjeti kako je kombinacija od $2.33 \mu\text{H}$ i 400 nF neprihvatljiva jer je THD preko 5%.



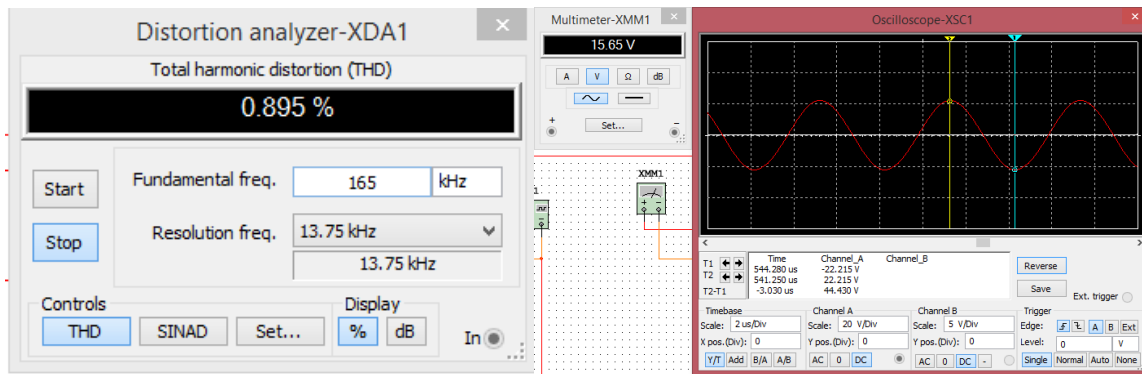
Sl. 3.22 Neprihvatljiv THD pri $2.33 \mu\text{H}$ i 400 nF

Na slici 3.22 mogu se primjetiti izobličenja amplitude koja predstavljaju postotak THD-a, odnosno postotak izobličenja sinusoide u odnosu na valni oblik bez harmoničkih distorzija.

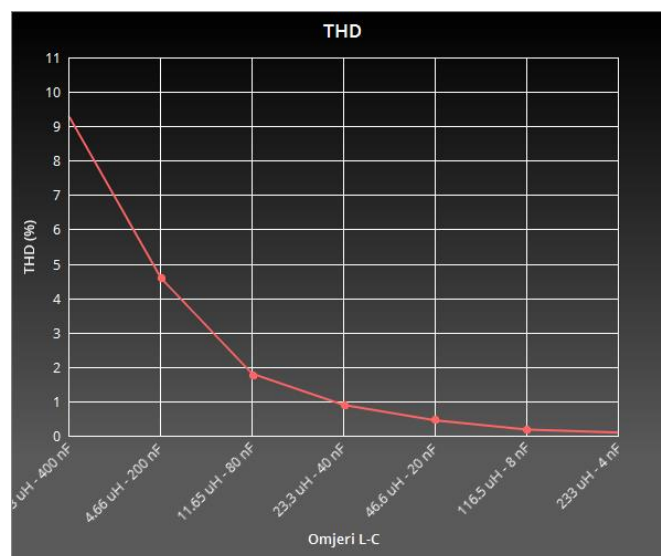
Povećanjem induktiviteta rješava se problem prevelikog THD-a što je vidljivo na slikama 3.23 te 3.24:



SI 3.23 $L = 4.66 \mu\text{H}$, $C = 200 \text{ nF}$



SI 3.24 $L = 23.3 \mu\text{H}$, $C = 40 \text{ nF}$



SI 3.25 THD graf paralelni krug s tim da je serijski krug – $L = 2.33\mu\text{H}$ i $C = 400\text{nF}$

Na slici 3.25 vidi se da povećavanjem induktiviteta te smanjivanjem kapaciteta THD opada ispod 5% te je već na kombinaciji 4.66 μH – 200 nF prihvatljiv. Zaključeno je da je sinusoida stabilnija te imamo manje harmoničkih oscilacija uz veći induktivitet, no mora se paziti da ne bude prevelik (do 23.3 μH kao što se vidi na Sl. 3.21) što bi dovelo do smanjivanja amplitude na paraleli. Nakon provjere THD-a vidljivo je da je optimalni odnos serijskog i paralelnog kruga takav da je induktivitet u paralelnom krugu 10 puta manji od serijskog, te kapacitet u paralelnom 10 puta veći od serijskog. Sukladno tome potrebno je napraviti provjeru omjera serijskog i paralelnog kruga, što je moguće napraviti mijenjanjem induktiviteta i kapaciteta paralelnog kruga po sljedećim tablicama:

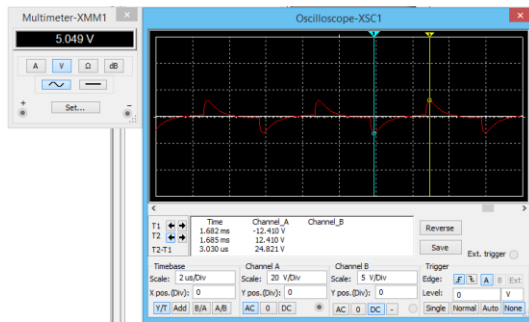
Tablica 3.2. Induktivitet u paraleli 10 puta manji, kapacitet 10 puta veći

Paralelni krug	Serijski krug
$L = 0.233 \mu\text{H}, C = 4000 \text{ nF}$	$L = 0.233 \mu\text{H}, C = 4000 \text{ nF}$
$L = 0.233 \mu\text{H}, C = 4000 \text{ nF}$	$L = 0.466 \mu\text{H}, C = 2000 \text{ nF}$
$L = 0.233 \mu\text{H}, C = 4000 \text{ nF}$	$L = 1.165 \mu\text{H}, C = 800 \text{ nF}$
$L = 0.233 \mu\text{H}, C = 4000 \text{ nF}$	$L = 2.33 \mu\text{H}, C = 400 \text{ nF}$
$L = 0.233 \mu\text{H}, C = 4000 \text{ nF}$	$L = 4.66 \mu\text{H}, C = 200 \text{ nF}$
$L = 0.233 \mu\text{H}, C = 4000 \text{ nF}$	$L = 11.65 \mu\text{H}, C = 80 \text{ nF}$
$L = 0.233 \mu\text{H}, C = 4000 \text{ nF}$	$L = 23.3 \mu\text{H}, C = 40 \text{ nF}$

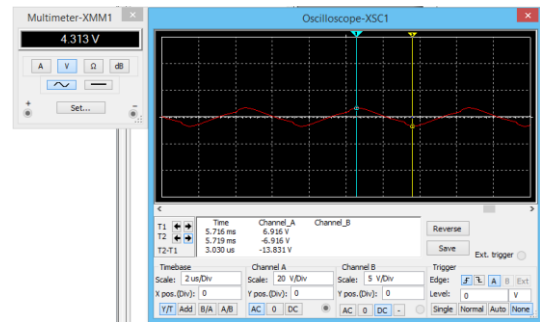
Tablica 3.2. Induktivitet u paraleli 10 puta veći, kapacitet 10 puta manji

Paralelni krug	Serijski krug
$L = 23.3 \mu\text{H}, C = 40 \text{ nF}$	$L = 23.3 \mu\text{H}, C = 40 \text{ nF}$
$L = 23.3 \mu\text{H}, C = 40 \text{ nF}$	$L = 46.6 \mu\text{H}, C = 20 \text{ nF}$
$L = 23.3 \mu\text{H}, C = 40 \text{ nF}$	$L = 116.5 \mu\text{H}, C = 8 \text{ nF}$
$L = 23.3 \mu\text{H}, C = 40 \text{ nF}$	$L = 233 \mu\text{H}, C = 4 \text{ nF}$
$L = 23.3 \mu\text{H}, C = 40 \text{ nF}$	$L = 466 \mu\text{H}, C = 2 \text{ nF}$
$L = 23.3 \mu\text{H}, C = 40 \text{ nF}$	$L = 1165 \mu\text{H}, C = 0.8 \text{ nF}$
$L = 23.3 \mu\text{H}, C = 40 \text{ nF}$	$L = 2330 \mu\text{H}, C = 0.4 \text{ nF}$

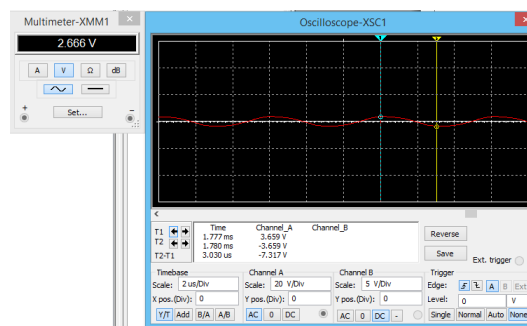
U sljedećim primjerima postavljene su vrijednosti u paraleli na $L = 0.233 \mu\text{H}$ te $C = 4000 \text{ nF}$, te provedena skraćena analiza s početka:



SI 3.26 $L = 0.233 \mu\text{H}$, $C = 4000 \text{ nF}$ u seriji



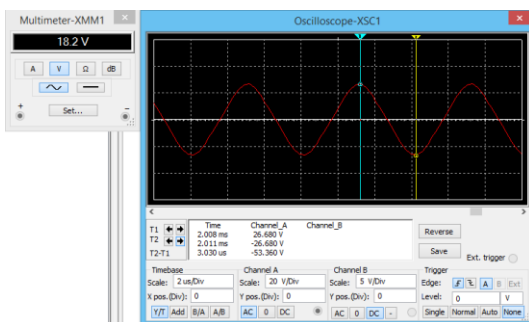
SI 3.27 $L = 2.33 \mu\text{H}$, $C = 400 \text{ nF}$ u seriji



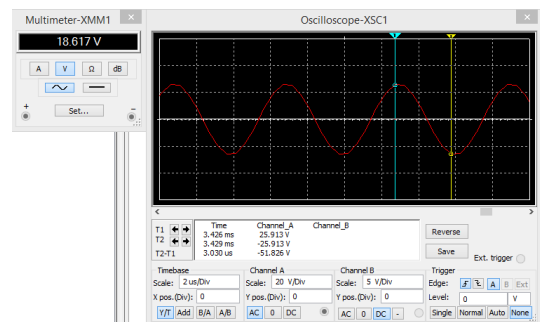
SI 3.28 $L = 23.3 \mu\text{H}$, $C = 40 \text{ nF}$ u seriji

Kao što se može vidjeti, kada je na paraleli induktivitet premali, amplituda drastično pada, te se može zaključiti da je 10 puta manji induktivitet na paraleli od početnog induktiviteta ($2.33 \mu\text{H}$) nepogodan za daljnja mjerenja.

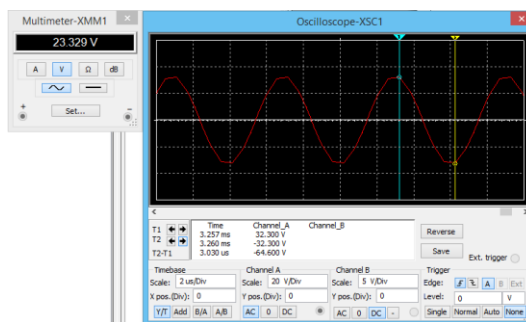
Nakon toga uzima se 10 puta veći induktivitet od početnog ($23.3 \mu\text{H}$) i 10 puta manji kapacitet što znači da je su u paraleli iznosi induktiviteta i kapaciteta iznosili $233 \mu\text{H}$ i te se provode skraćena mjerenja:



SI 3.29 $L = 23.3 \mu\text{H}$, $C = 40 \text{ nF}$ u seriji



SI 3.30 $L = 233 \mu\text{H}$, $C = 4 \text{ nF}$ u seriji



SI 3.31 $L = 2330 \mu\text{H}$, $C = 0.4 \text{ nF}$ u seriji

Drugi set mjerenja prikazuje očekivane rezultate, gdje je veći induktivitet bolji te zaključujemo da je 10 puta veći induktivitet u seriji optimalan odnos. Svi rezultati su u skladu s prijašnjim grafovima i rezultatima te se može provjeriti utjecaj povećavanja/smanjivanja ESR vrijednosti kondenzatora na valne oblike.

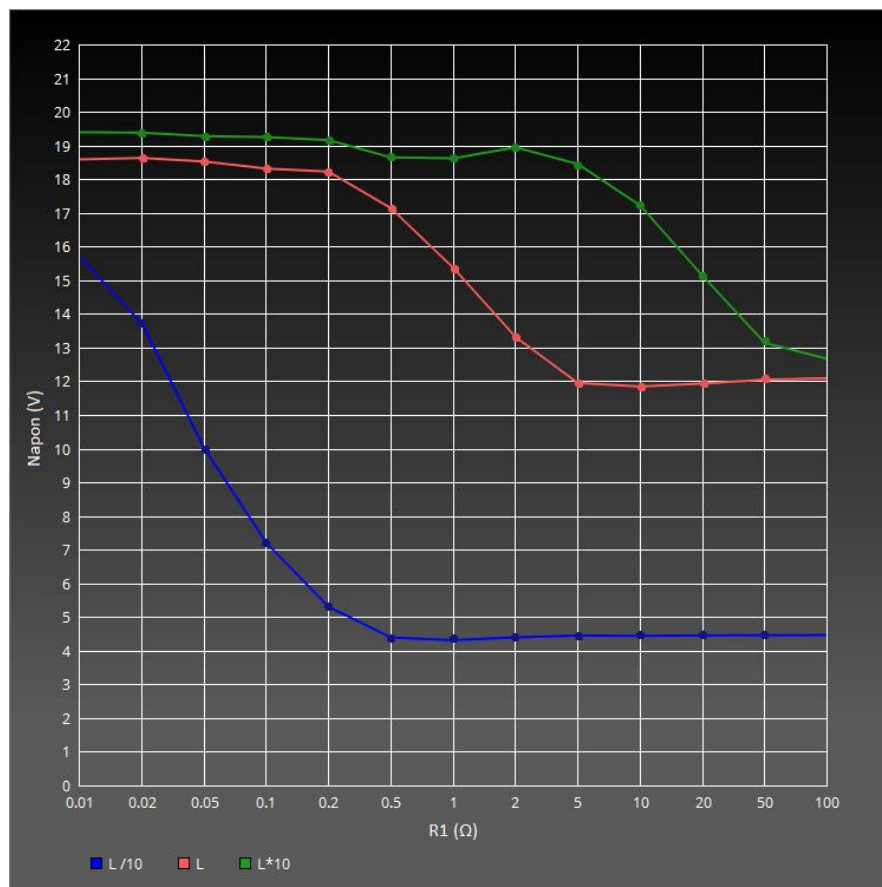
3.3. ESR

U mjerenju ESR (engl. *Equivalent Series Resistance*) predstavlja realni otpor kondenzatora koji nastaje zato što se tijekom simulacije koriste idealni modeli, što u stvarnosti nije moguće zbog unutarnjeg otpora svih elemenata. Mjerenje se provodi tako da se mijenjaju vrijednosti otpora R_1 i R_2 sa slike 3.1. te mjeri napon na njima. Otpornici R_1 i R_2 koji predstavljaju otpor na kondenzatorima C_1 i C_2 . Otpori se mijenjaju tako da se prvo mijenja samo otpor R_1 umnoškom od 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 10, 20, 50 te 100, dok je R_2 nepromjenjen (1Ω) te nakon toga isti postupak ponavlja s R_2 dok je otpornik R_1 nepromjenjen (1Ω). Takva mjerenja provode se opet na tri slučaja: s početnim vrijednostima paralelnog kruga, s 10 puta većim induktivitetom, te s 10 puta manjim induktivitetom da bi se vidjelo utječe li promjena vrijednosti LC kruga na samu vrijednost ESR-a kondenzatora.

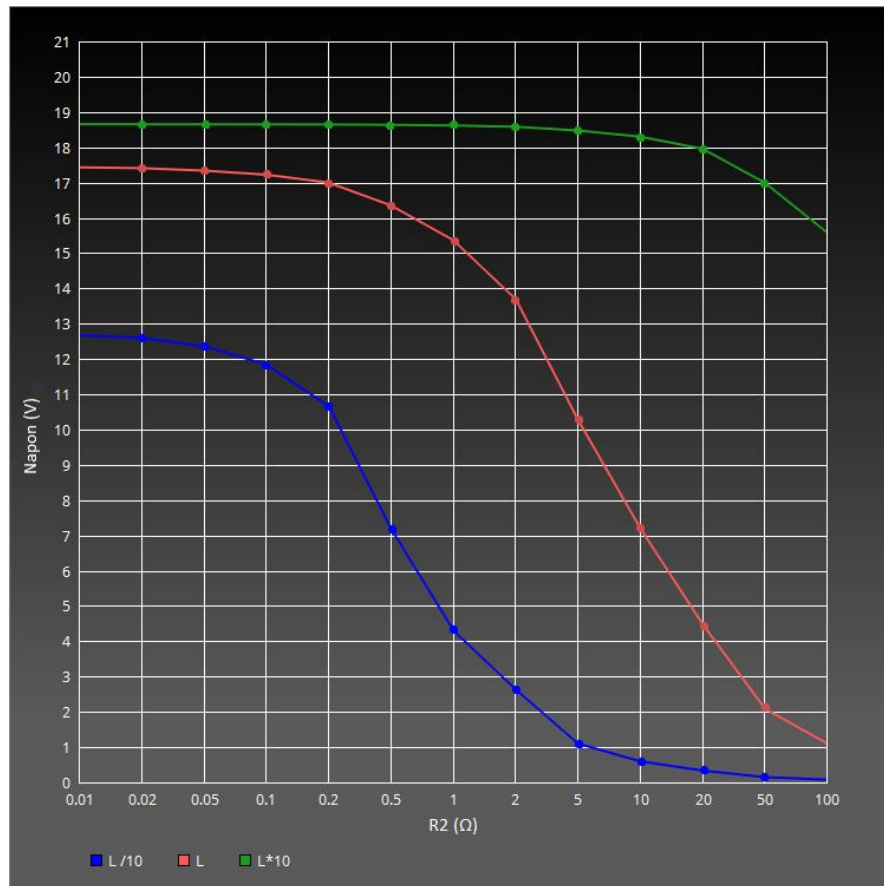
Rezultati mjerenja vidljivi su na sljedećim grafovima u kojima crvena linija predstavlja mjerenja s originalnim vrijednostima, plava mjerenja s 10 puta manjim induktivitetom, a zelena s deset puta većim induktivitetom, odnosno:

Tablica 3.3. Boje na grafu i vrijednosti koje predstavljaju

Boja	Vrijednosti u paraleli	Vrijednosti u seriji
Crvena	$L = 2.33 \mu\text{H}$, $C = 400 \text{ nF}$	$L = 23.3 \mu\text{H}$, $C = 40 \text{ nF}$
Plava	$L = 0.233 \mu\text{H}$, $C = 4000 \text{ nF}$	$L = 2.33 \mu\text{H}$, $C = 400 \text{ nF}$
Zelena	$L = 23.3 \mu\text{H}$, $C = 40 \text{ nF}$	$L = 233 \mu\text{H}$, $C = 4 \text{ nF}$



SI 3.32. Odnos otpora R_1 i napona na paraleli



SI 3.33. Odnos otpora R_2 i napona na paraleli

Na slikama 3.32. i 3.33 vidi se opadanje vrijednosti napona u ovisnosti o povećanju otpora u paraleli, odnosno seriji LC kruga. Vidljivo je da je napon na paraleli otporniji na povećavanje vrijednosti ESR-a u grani, gdje u seriji napon konstantno opada, u paraleli opadne do određene razine te nakon toga ostaje na približno sličnim vrijednostima.

3.4. Postupak određivanja vrijednosti LC kruga

Nakon provjere kombinacija LC paralelnog i serijskog kruga, potvrđene su ranije pretpostavke da je najbolja kombinacija takva da je u seriji induktivitet 10 puta veći a kapacitet 10 puta manji u odnosu na paralelu. Na temelju toga moguće je odrediti kombinacije za svaki rezonantni LC krug tako se da prvo odaberu dva od tri ponuđena elementa paralelnog kruga : frekvencija, induktivitet ili kapacitet. Nakon toga treći element može se naći po ranije spomenutoj formuli za rezonantnu frekvenciju (Sl. 2.3.). Kada se dobije frekvencija te kapacitet i induktivitet paralelnog kruga, preostaje samo pomnožiti induktivitet s 10 i podijeliti kapacitet s 10 te će se dobiti optimalna kombinacija serijskog i paralelnog LC kruga s minimalnim gubitcima na vrijednosti napona i minimalnim harmoničkim distorzijama. Treba se jedino voditi računa da u seriji unutarnji otpor kondenzatora bude što manji zbog naglih opadanja vrijednosti napona što je vidljivo iz ESR grafova. Ako se računa induktivna reaktancija po formuli :

$$Xl = 2 * \pi * f * L$$

gdje je:

- f – frekvencija
- L – induktivitet zavojnice

može se dobiti postotak vrijednosti induktivne reaktancije koji mogu iznositi otpornici R_1 i R_2 prije nego što dođe do prevelikih padova napona na paraleli, što je vidljivo na sljedećim tablicama:

Tablica 3.4. Omjer otpora na paraleli i reaktancije

L_1 (μH)	L_2 (μH)	Xl_1 (Ω)	R_1 (Ω)	R_1/Xl_1	Postotak (%)
0.233	2.33	0.24	0.01	0.042	4.2
2.33	23.3	2.42	0.2	0.083	8.3
23.3	233	24.16	2	0.083	8.3

Tablica 3.5. Omjer otpora na seriji i reaktancije

L_2 (μH)	L_1 (μH)	Xl_2 (Ω)	R_2 (Ω)	R_2/Xl_2	Postotak (%)
2.33	0.233	2.42	0.05	0.02	2
23.3	2.33	24.16	0.5	0.02	2
233	23.3	241.56	20	0.083	8.3

Po tablicama 3.4 i 3.5. vidljivo je da u paraleli otpor R_1 ne bi trebao biti veći od 4% reaktancije Xl_1 , te da serijski otpor R_2 ne bi trebao biti veći od 2% reaktancije Xl_2 .

4. PRAKTIČNI RAD

Nakon što su dobivene sve potrebne informacije te provjerene sve potrebne kombinacije i parametri LC kruga, potrebno je primijeniti stečeno znanje na praktičan rad te u laboratoriju spojiti tri odabrane kombinacije u paralelnom krugu te njima odgovarajuće elemente serijskog kruga, odnosno provjeriti odnose na isti način na koji se provjeravalo u simulacijama. To znači koristiti 3 različita slučaja sa sukladnim odnosima induktiviteta i kapaciteta. U tablici 4.1 mogu se vidjeti vrijednosti korištene u paralelnom krugu. Korištena je proto pločica te najbliže aproksimirane zavojnice i kondenzatore zbog toga što je gotovo nemoguće dobiti točne brojeve koji su dobiveni u simulacijama. U paraleli smo koristili:

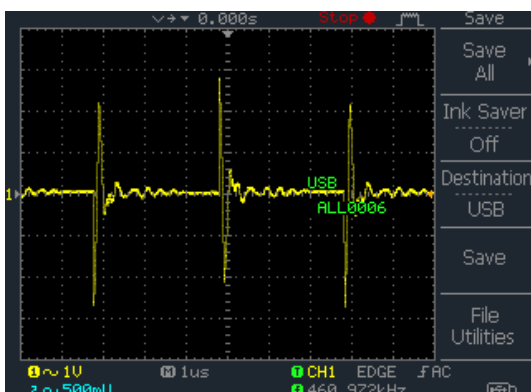
Tablica 4.1. Vrijednosti paralelnog kruga

Paralelni krug
$L = 2.33 \mu\text{H}, C = 400 \text{ nF}$
$L = 23.3 \mu\text{H}, C = 40 \text{ nF}$
$L = 233 \mu\text{H}, C = 4 \text{ nF}$

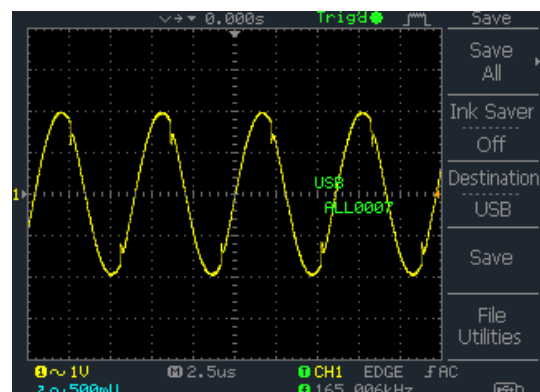
Rezultati su prikazani pomoću osciloskopa tako da se mjeri napone na izvoru, paraleli i seriji LC kruga te ih se uspoređuje s rezultatima simulacija.

4.1. $L = 2.33 \mu\text{F}, C = 400 \text{ nF}$ u paraleli

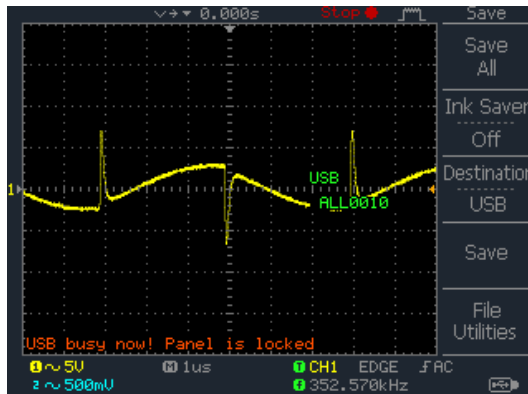
Pri prvom mjerenju korištene su originalne vrijednosti paralelnog kruga ($L = 2.33 \mu\text{H}, C = 400 \text{ nF}$) da bi se provjerilo hoće li se vrijednosti dobivene u laboratoriju poklapati sa simulacijom:



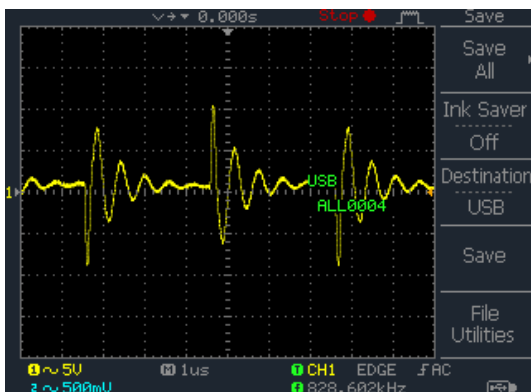
Sl 4.1. Izvor ($L_2 = 2.33 \mu\text{H}, C_2 = 400 \text{ nF}$)



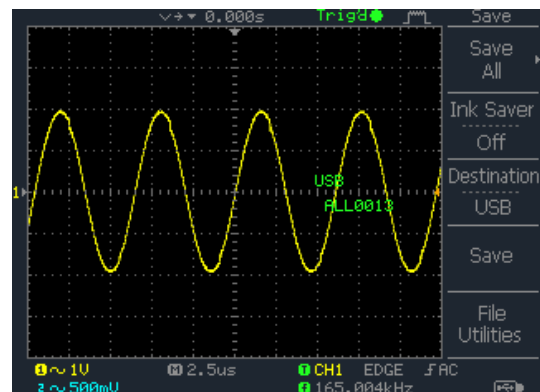
Sl 4.2. Paralela ($L_2 = 2.33 \mu\text{H}, C_2 = 400 \text{ nF}$)



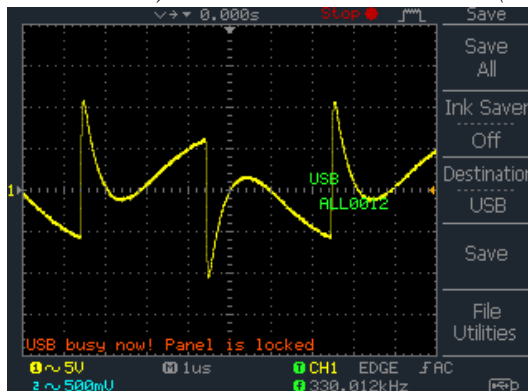
Sl 4.3. Serija ($L_2 = 2.33 \mu\text{H}$, $C_2 = 400 \text{ nF}$)



Sl 4.4. Izvor ($L_2 = 23.3 \mu\text{H}$, $C_2 = 40 \text{ nF}$)



Sl 4.5. Paralela ($L_2 = 23.3 \mu\text{H}$, $C_2 = 40 \text{ nF}$)

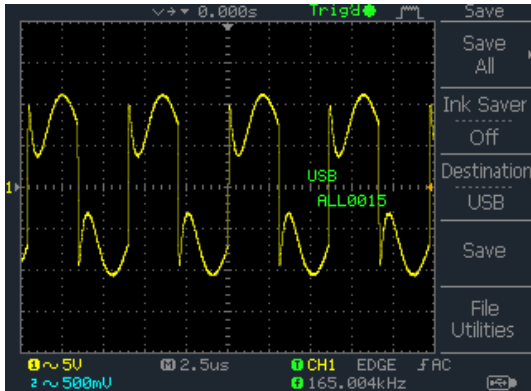


Sl 4.6. Serija ($L_2 = 23.3 \mu\text{H}$, $C_2 = 40 \text{ nF}$)

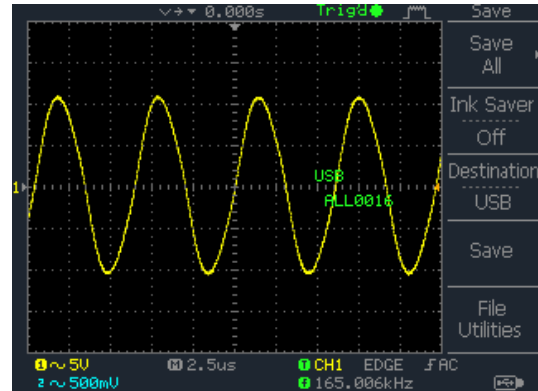
Na prvim kombinacijama prikazani su dva primjera vrijednosti s kojima se obavljalo mjerenje. Slike 4.1, 4.2, te 4.3. prikazuju očekivano lošije rezultate od slika 4.4., 4.5. te 4.6. Izvor na slikama treba biti što sličniji pravokutno, te se na prvoj slici izvora vide puno veći šiljci, odnosno napon na izvoru treba dodatno ispraviti. Slika 4.4. opisuje izvor s većim vrijednostima L_2 i C_2 , te je već vidljiv manji šiljak iako to još nije traženi rezultat. Slika 4.3. opisuje veličine na serijskom LC krugu te on treba biti rezultat razlike između pravokutnog signala i sinusoide na

paraleli, što zbog korištenih veličina nije postignuto. Slika 4.6. prikazuje bolji rezultat, no potrebno je ponoviti mjerenje sa većim vrijednostima induktiviteta na paraleli.

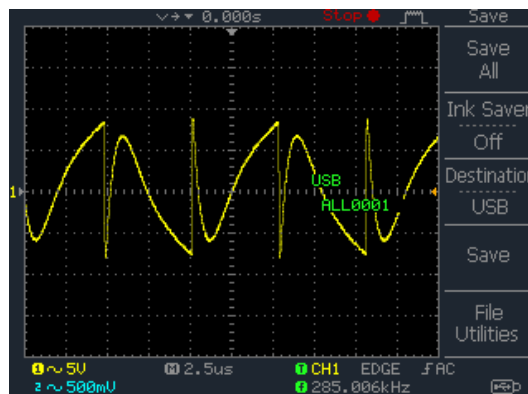
4.2. $L = 23.3 \mu\text{F}$, $C = 40 \text{ nF}$ u paraleli



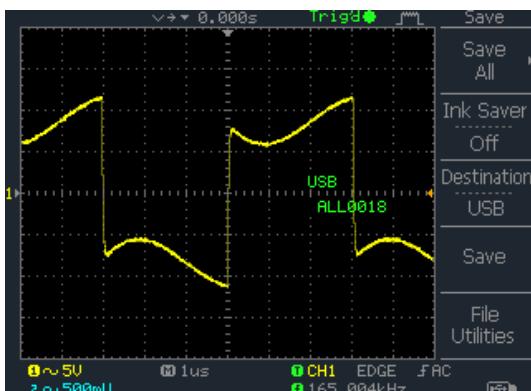
SI 4.7. Izvor ($L_2 = 23.3 \mu\text{H}$, $C_2 = 40 \text{ nF}$)



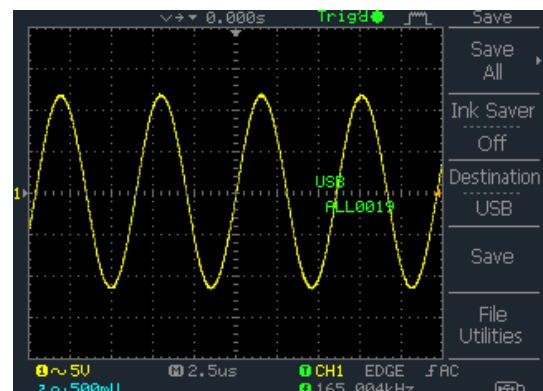
SI 4.8. Paralela ($L_2 = 23.3 \mu\text{H}$, $C_2 = 40 \text{ nF}$)



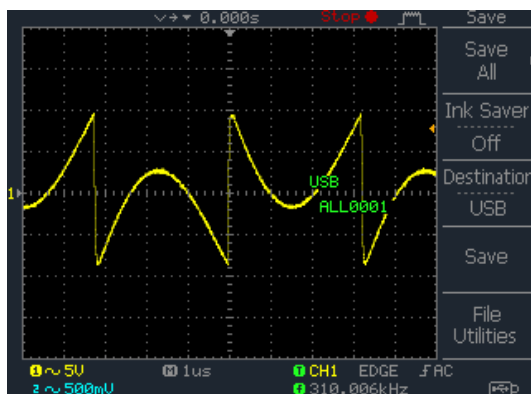
SI 4.9. Serija ($L_2 = 23.3 \mu\text{H}$, $C_2 = 40 \text{ nF}$)



SI 4.10. Izvor ($L_2 = 233 \mu\text{H}$, $C_2 = 4 \text{ nF}$)



SI 4.11. Paralela ($L_2 = 233 \mu\text{H}$, $C_2 = 4 \text{ nF}$)

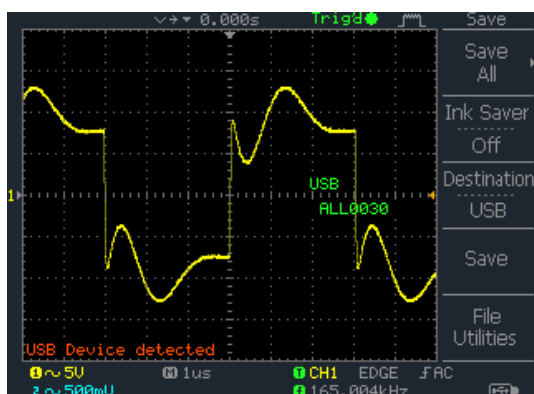


SI 4.12. Serija ($L_2 = 233 \mu H$, $C_2 = 4 nF$)

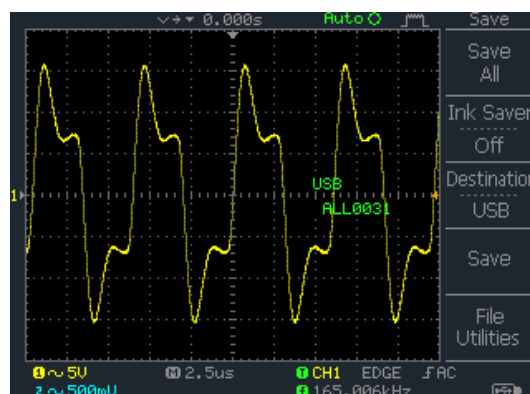
Kao i u prošlom slučaju, rezultati su očekivani te pokazuju kako 10 puta jači induktivitet serije te 10 puta slabiji kapacitet serije uspješno ispravljaju sinusoidu, te se na usporedbama slika 4.7 i 4.10 za izvor, 4.8 i 4.11. za paralelu te 4.9 i 4.12. za seriju može zaključiti da je omjer iz simulacije dobar te uspješno ispravljaju valne oblike. Jedina razlika između simulacije i laboratorijskih rezultata koja je primjetna na paralelnom krugu je amplituda signala, no to je samo zbog razlike u spajanju krugova u simulaciji i praksi. U simulaciji je umjesto na uzemljenje krug bio spojen na minus pa je davao duplo jači signal, no unatoč tome rezultati su dobri i očekivani. Preostaje provjeriti i zadnji slučaj.

4.3. $L = 233 \mu F$, $C = 4 nF$ u paraleli

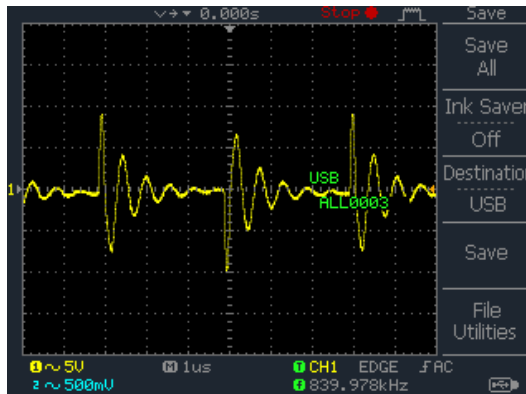
U zadnjoj kombinaciji koristio se još veći induktivitet da bi se provjerilo hoće li signal biti još bolji:



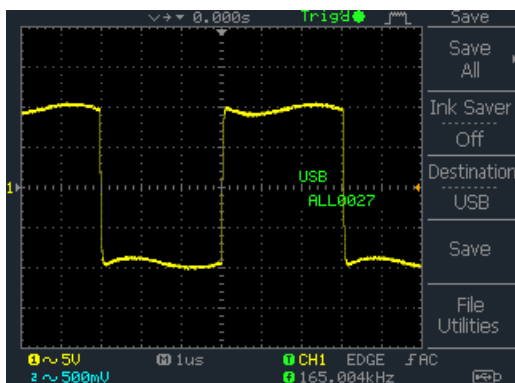
SI 4.13. Izvor ($L_2 = 233 \mu H$, $C_2 = 4 nF$)



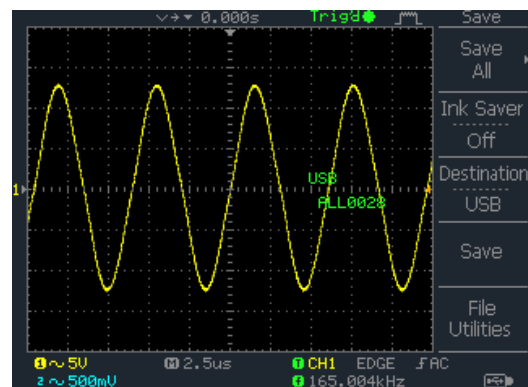
SI 4.14. Paralela ($L_2 = 233 \mu H$, $C_2 = 4 nF$)



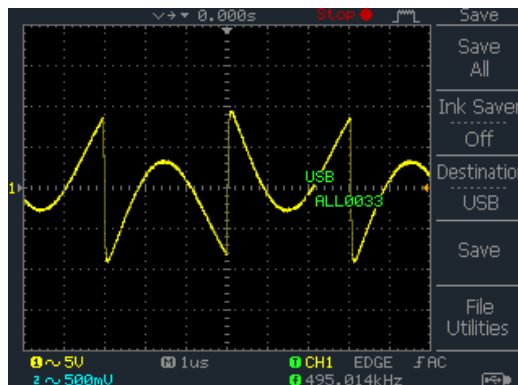
SI 4.15. Serija ($L_2 = 233 \mu\text{H}$, $C_2 = 4 \text{ nF}$)



SI 4.16. Izvor ($L_2 = 2330 \mu\text{H}$, $C_2 = 0.4 \text{ nF}$)



SI 4.17. Paralela ($L_2 = 2330 \mu\text{H}$, $C_2 = 0.4 \text{ nF}$)



SI 4.18. Serija ($L_2 = 2330 \mu\text{H}$, $C_2 = 0.4 \text{ nF}$)

Slike 4.13, 4.14 i 4.15 prikazuju očekivano loše rezultate, dok slike 4.16, 4.17 te 4.18 prikazuju očekivane dobre rezultate. Signal izvora je u drugom slučaju skoro identičan pravokutnom, signal na paraleli i u seriji su sukladni uz samo mali pomak vidljiv na slici 4.18. gdje je donji vrh s lijeve strane izraženiji. Svi rezultati u laboratoriju su onakvi kakve smo očekivali na temelju rezultata simulacije te možemo reći da su kombinacije točne. Od ova tri mjerenja, simulacijama najviše odgovara treće mjerenje u kojem su vrijednosti prikazane na osciloskopu

najbliže rezultatima traženim na početku mjerenja. Napon na paraleli nema gubitaka, napon izvora je najbliži pravokutnom signalu te napon na seriji odgovara razlici između izlaznog signala i sinusoide na paraleli.

5. ZAKLJUČAK

Razvojem novih tehnologija u mobilnoj industriji, elektroenergetici, autoindustriji i sličnim područjima javlja se potražnja za što efikasnijim bežičnim sustavima. Bežični prijenos energije još je u vrlo ranom stadiju te ima jako puno mjesta za napredak tehnologija, pogotovo na tržištu za osobnu primjenu. U diplomskom su radu provedene simulacije različitih kombinacija serijskog i paralelnog LC kruga, uz detalje kao što su THD te ESR kondenzatora. Prije početka zapisane su vrijednosti na koje su postavljani elementi paralelnog i serijskog kruga. Tražen je optimalan odnos LC kruga u seriji i paraleli koji će ispraviti oscilacije koje se događaju zbog različitih razloga navedenih u diplomskom radu. Zabilježeni su izgledi amplitude pri različitim vrijednostima THD-a odnosno harmoničkih oscilacija. Zabilježena je korelacija ESR-a kondenzatora i pada napona na paralelnom krugu te su izračunate vrijednosti koje otpornici mogu imati prije nego što napon na paraleli počne drastično opadati. Provjereni su odnosi LC krugova u seriji i paraleli te je pronađen optimalan odnos koji je nakon toga provjeren u laboratorijskim uvjetima te uspoređeni sa očekivanim rezultatima iz simulacija. Ovaj diplomski rad je dobar početak za ljude koji žele znati kako se filtrira signal te kakve se kombinacije koriste za dobivanje željenih izlaznih signala pri bežičnom prijenosu energije.

LITERATURA

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/LC_circuit (pristup ostvaren 20.9.2016.)
- [2] <https://en.wikipedia.org/wiki/Damping> (pristup ostvaren 20.9.2016.)
- [3] https://www.ibiblio.org/kuphaldt/electricCircuits/AC/AC_6.html (pristup ostvaren 20.9.2016.)
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_power_transfer (pristup ostvaren 20.9.2016.)
- [5] <http://www.sunpower-uk.com/glossary/what-is-equivalent-series-resistance-esr/> (pristup ostvaren 20.9.2016.)
- [6] <http://www.electronics-tutorials.ws/inductor/inductor.html%20> (pristup ostvaren 20.9.2016.)
- [7] <http://www.capacitorguide.com/ceramic-capacitor/> (pristup ostvaren 10.4.2017.)
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/RLC_circuit (pristup ostvaren 10.4.2017.)
- [9] <http://electrical-engineering-portal.com/essential-basics-of-total-harmonic-distortion-thd> (pristup ostvaren 10.4.2017.)
- [10] http://www.thcalasanz.com/thcal/deza_cortina.html (pristup ostvaren 10.4.2017.)
- [11] <http://www.rfcafe.com/references/electrical/capacitance.htm> (pristup ostvaren 10.5.2017.)
- [12] <http://www.rfcafe.com/references/electrical/inductance.htm> (pristup ostvaren 10.5.2017.)

SAŽETAK

Cilj ovog diplomskog rada bio je testirati i prikazati u simulaciji različite kombinacije serijskog i paralelnog rezonantnog kruga, uključujući padove napona, THD i ESR da bi saznali najoptimalniju kombinaciju serijskog rezonantnog filtra i paralelnog LC kruga u sustavu bežičnog prijenosa energije uz najprihvatljivije karakteristike te ih nakon toga provjeriti u laboratoriju.

Ključne riječi: kondenzator, zavojnica, rezonantni krug, THD, ESR, simulacija

ABSTRACT

The purpose of this graduate degree work was to test and simulate different sets of series and parallel resonance circuits, including voltages, THD and ESR results in order to find the most optimal combination of series resonance filter and parallel LC – circuit in wireless energy transfer systems with the most acceptable characteristics and to test them in laboratory conditions.

Keywords: capacitor, inductor, resonance circuit, THD, ESR, simulation

ŽIVOTOPIS

Nikola Penić rođen je 10. travnja 1991. godine u Osijeku, u Republici Hrvatskoj. Osnovnu školu Tin Ujević završio je 2006. godine te iste godine upisuje Elektrotehničku školu u Osijeku. Srednju školu završava 2010. godine i upisuje sveučilišni preddiplomski studij Elektrotehničkog Fakulteta u Osijeku, smjer Računarstvo. Preddiplomski studij završava 2013. godine te upisuje diplomski studij, smjer Procesno računarstvo..

Nikola Penić

PRILOG

U prilogu ovoga rada je DVD koji sadrži sve rezultate simulacija i praktičnog rada te slike korištene u diplomskom radu.