

# Širokopolasno RF pojačalo izvedeno korištenjem tehnike uklanjanja i obnavljanja ovojnice

---

Milić, Srđan

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:899452>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 156

**ŠIROKOPOJASNO RF POJAČALO IZVEDENO  
KORIŠTENJEM TEHNIKE UKLANJANJA I OBNAVLJANJA  
OVOJNICE**

Srđan Milić

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 156

**ŠIROKOPOJASNO RF POJAČALO IZVEDENO  
KORIŠTENJEM TEHNIKE UKLANJANJA I OBNAVLJANJA  
OVOJNICE**

Srđan Milić

Zagreb, lipanj 2024.

## DIPLOMSKI ZADATAK br. 156

Pristupnik: **Srđan Milić (0036518623)**

Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija

Profil: Elektronika

Mentor: prof. dr. sc. Igor Krois

Zadatak: **Širokopojasno RF pojačalo izvedeno korištenjem tehnike uklanjanja i obnavljanja ovojnice**

### Opis zadatka:

Zadatak rada je napraviti širokopojasno pojačalo za opseg frekvencija 1-7 MHz koje odlikuje visok stupanj iskorištenja od 85%. Pojačalo treba koristiti tehniku uklanjanja i obnavljanja ovojnice (eng. EER-Envelope Elimination and Restoration). Pojačalo će pobuđivati signali jednostavnih modulacija kao što su SSB (eng. Single Side Band), CW (eng. Continuous Wave) i FSK (eng. Frequency Shift Keying). Izlazni signal u linearnom obliku dobiva se korištenjem nelinearnog izlaznog pojačala koje ostvaruje visok stupanj iskorištenja, odnosno signal će biti lineariziran EER tehnikom. Izlazno pojačalo će raditi u prekidačkom režimu rada. Izlazna snaga treba biti maksimalno 50dbm.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

*Mojoj dragoj Karli, hvala ti na beskrajnoj ljubavi, podršci i strpljenju.*

## Sadržaj

Uvod.....	1
1. Pojačala snage.....	3
1.1. Linearnost pojačala snage.....	5
1.2. Tehnika uklanjanja i obnavljanja ovojnice.....	6
2. Arhitektura pojačala snage koristeći tehniku obnavljanja i uklanjanja ovojnice.....	8
2.1. Detektor ovojnice signala.....	9
2.2. Detektor faze/oblikovanje pobudnih impulsa.....	12
3. Serijski PWM modulator.....	14
3.1. Ulazno predpojačalo.....	15
3.2. Antialiasing filter.....	16
3.3. PWM generator.....	18
3.4. Izlazna mreža + DC izolacija kruga upravljačke elektrode.....	21
3.5. Izlazni PWM filter.....	22
3.6. Serijski PWM modulator – zaključak.....	23
4. Izlazno pojačalo klase E.....	24
4.1. Mjerni rezultati izvedbe sustava.....	28
Zaključak.....	30
Literatura.....	31
Sažetak.....	33
Summary.....	35
Skraćenice.....	37

## Uvod

Tridesetih godina prošlog stoljeća dogodio se intenzivniji razvoj radiodifuzijske i radio tehnologije pri čemu su izlazni stupnjevi u odašiljačima i pojačalima u to vrijeme tipično bili izvedeni korištenjem elektronskih ( vakuumskih ) cijevi. Problem takve izvedbe su predstavljale ogromne dimenzije i malo iskorištenje cjelokupnog sustava. Osamdesetih godina prošlog stoljeća događa se prijelaz na jednu elektronsku cijev u izlaznim stupnjevima kao mjera smanjenja troškova rada. Međutim kod ovakvih pojačala skoro svi aktivni elementi su bili tranzistorski, dok je samo izlazni stupanj sadržavao elektronsku cijev koja je tada jedina mogla postići velike izlazne snage i dovoljno veliku robusnost za kontinuiran rad. Tada je bilo moguće postići oko 70% iskorištenja.

Daljnijim razvojem poluvodičke tehnologije pojavljuju se izlazni stupnjevi poluvodičke arhitekture, no u to vrijeme nedostatak tranzistora velike snage predstavljao je značajan izazov pri postizanju velikih izlaznih snaga pojačala. Tako se javila ideja modularne konstrukcije izlaznog pojačala. Umjesto jednog velikog elementa zaslužnog za postizanje velike izlazne snage koristi se puno modula pojačala manje izlazne snage čiji se ulazi pobuđuju istovremeno te njihovi izlazi se zbroje korištenjem mreže za zbrajanje. Ovakav pristup je nudio brojne pogodnosti, nestala je potreba za periodičkom izmjenom elektronskih cijevi zbog opadanja emisivnosti katode s vremenom, a iskorištenje pojačala se kretalo oko 80%.. Sada će u slučaju da jedan modul pregori pojačalo će nastaviti raditi sa nešto manjom izlaznom snagom bez velikih problema.

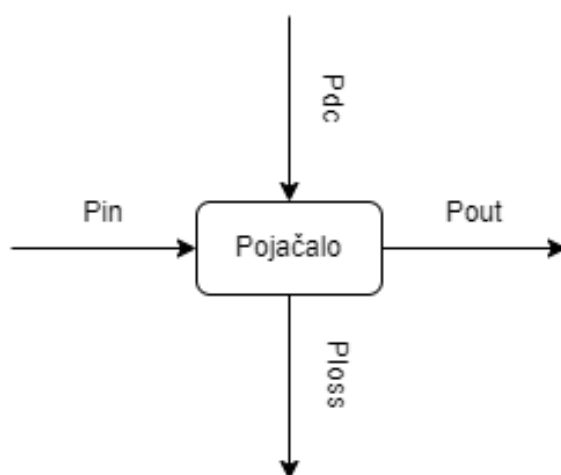
U današnjici spektar signala korišten za prijenos informacija je nepromijenjen dok zahtjevi na brzinu prijenosa podataka kroz kanal neprestano rastu. Da bi se takav trend zadovoljio smišljene su nove vrste modulacija koje su ' spektralno iskorištenije ', drugim riječima korisna informacija je modulirana u promjenu frekvencije, faze i amplitude. Neki od takvih modulacijskih signala su OFDM odnosno QAM, APSK... Takvi signali imaju velik odnos vršne i srednje snage što predstavlja velik problem kod odašiljanja velikom snagom. Pojačalo mora raditi u linearnom režimu rada i naravno iskorištenje pojačala je funkcija razine pobudnog signala. Tipično RF pojačalo AB klase postiže najveće iskorištenje pri radu sa nazivnom snagom, rad sa snagom značajno manjom od nazivne kao posljedicu daje jako malo iskorištenje (oko 20%) što je izrazito nepovoljno na više razina. U to ulazi potrošnja

električne energije, veliki zahtjevi na hlađenje te ogroman izlazni stupanj potreban za postizanje snage takvog tipa. Rješenje problema postoji u obliku Kahn-ove tehnike uklanjanja i obnavljanja ovojnice. To je postupak rastavljanja signala na amplitudnu komponentu i faznu komponentu. Obje komponente se zasebno pojačavaju pojačalima koje odlikuje visoki stupanj iskorištenja potom se signali ponovno spajaju ostvarujući vrlo visok cjelokupan stupanj iskorištenja pojačala snage.



# 1. Pojačala snage

Razvojem radiodifuzijskih i odašiljačkih sustava u pozadini su usporedno nastajale pojedine klase RF pojačala kao osnovni elementi sustava takve vrste. Promotrimo pojačalo snage kao električni sklop koji omogućuje pojačavanje snage signala dovedenog na njegov ulaz. Naravno ulazni i izlazni signali su izmjenični signali visoke frekvencije odnosno frekvencije karakteristične za rad nekog sustava u koje je pojačalo ugrađeno. Drugim riječima RF pojačalo snage možemo promatrati kao elektronički sklop koji omogućuje pretvorbu istosmjerne energije iz izvora u korisnu izmjeničnu energiju koja se predaje trošilu odnosno anteni ili drugom stupnju pojačanja ovisno o primjeni. Svakom pojačalu jedan dio dovedene energije preda se trošilu dok se drugi dio troši na pojačalu za njegov rad. Taj odnos snaga u pojačalu predstavlja stupanj iskorištenja tog pojačala. Raspodjela tokova snage prikazana je na slici Slika 1.1.



Slika 1.1 Tok snage u pojačalu

Postoji više različitih definicija stupnja iskorištenja pojačala snage. Definiramo stupanj iskorištenja kao omjer korisne snage na izlazu pojačala i potrošene snage iz istosmjernog izvora:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{DC}} \quad (1)$$

Ovako definirano iskorištenje često nazivamo engl. *Drain Efficiency* kod MOSFET tranzistora,

Također postoji druga definicija korisnosti odnosno iskorištenja koja uzima u obzir snagu dovedenu za pobudu pojačala te se naziva PAE (engl. *Power-Added Efficiency*):

$$\eta = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{DC}} \quad (2)$$

Također ukupnu korisnost definiramo:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{DC} + P_{in}} \quad (3)$$

Ovdje spomenute formule vrijede samo u slučaju kada nam je modulacija kontinuirani sinusni signal konstantne amplitude (signal ima konstantnu ovojnica). Ukoliko se radi o signalima čija ovojnica se mijenja u vremenu (kao kod AM, QAM ili OFDM modulacija), stupanj iskorištenja pojačala je tada također funkcija vremena, definiramo srednji stupanj iskorištenja:

$$\bar{\eta} = \frac{\overline{P_{out}}}{\overline{P_{DC}}} \quad (4)$$

Pojačala snage možemo podijeliti prema konfiguraciji i kutu vođenja na 6 vrsta odnosno klasa: A, B, C, D, E i F.

Pojačala klase: A, B i C rade u 'linearnom' režimu rada, jedine međusobne razlike su u izvedbi prilagodnih mreža i kutu protjecanja.

Pojačala klase: D, E i F rade u 'nelinearnom' režimu rada, odnosno u prekidačkom režimu rada gdje aktivni element radi kao sklopka. Načini pobude i izlazne mreže definiraju razlike među klasama pojačala.

Kod pojačala klase A radna točka aktivnog elementa je postavljena da struja teče tijekom čitave periode pobudnog signala, ovo daje dobre osobine u pogledu linearnosti pojačala, međutim iskorištenje pojačala je vrlo loše jer mirna struja teče cijelo vrijeme te na izlaznom elementu se pojavljuje velika disipacija snage. Maksimalni teoretski stupanj iskorištenja ovog pojačala je 25%.

Kod pojačala klase B radna točka aktivnog elementa tako je postavljena da struja teče tijekom jedne polovice periode pobudnog signala, stoga je potrebno dodati drugi aktivni element koji onda ostvaruje protutaktni spoj u svrhu osiguranja pojačanja cijele periode pobudnog signala. Ovakav spoj pojačala zbog realnih svojstava aktivnog elementa proizvodi preskočna izobličenja, ali maksimalni teorijski stupanj iskorištenja iznosi 78.5%

Kod pojačala klase C radna točka aktivnog elementa tako je postavljena da struja teče u trajanju manjem od jedne polovice periode pobudnog signala. Ovakvo pojačalo unosi vrlo visoku razinu distorzije pa je u praksi vrlo česta upotreba rezonantnih i filtarskih struktura u svrhu linearizacije, izdvajanja i obnavljanja osnovnog harmonika signala. Međutim pojačalo u klasi C ima vrlo visok stupanj iskorištenja, drugim riječima što je manje vrijeme provođenja tranzistora stupanj iskorištenja raste dok u nekom trenutku se ne približi 100%, no smanjivanjem vremena provođenja tranzistora izlazna snaga pada te teži prema nuli.

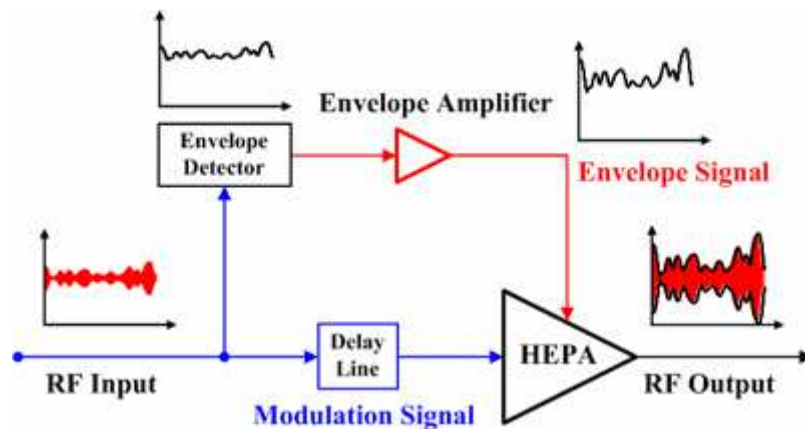
Do sada u klasama A, B i C postoji linearna veza između pobudnog napona i izlazne struje, dok u klasama D, E i F aktivni element radi kao sklopka sa zadatkom da energiju istosmjernog izvora pretvori u pravokutne impulse odnosno izmjeničnu energiju. Spajanjem raznih mreža na izlaz i korištenjem tehnika modulacije napona napajanja postiže se linearizacija izlaznog signala pa možemo reći da pojačala tih klasa mogu proizvesti linearan signal. Također ove vrste pojačala posjeduju osobinu izrazito velikog stupnja iskorištenja(oko 90%), signali stalne amplitude i fazno/frekvencijske modulacije su posebno pogodni za rad u navedenim klasama pojačala.

## **1.1. Linearnost pojačala snage**

Današnje modulacije za prijenos signala zbog velikih zahtjeva na količinu i brzinu prijenosa podataka koriste složene amplitudno-frekvencijski/fazno modulirane komponente. Pojačanje signala ove vrste zahtjeva izuzetno visoku linearnost izlaznog pojačala snage. Drugim riječima potrebno je osigurati da se promjene amplitude ulaznog signala vjerno prenesu kao promjena amplitude izlaznog signala. Kod npr. OFDM modulacije ovojnica tako moduliranog signala sadrži informacije bitne za ispravno mapiranje simbola. U praksi za prijenos odnosno pojačanje ovakvih vrsta signala nameće se korištenje pojačala klase A odnosno B, budući da su jedino te klase pojačala sposobne pojačati signale bez izobličenja, no pojačala klase A i B usprkos zadovoljavajućoj linearnosti unose kao posljedicu velike dimenzije, cijenu rada i održavanje uređaja. Korištenjem postupaka linearizacije moguće je koristiti pojačala klase D, E ili F čije su osobine veliki stupanj iskorištenja u svrhu reprodukcije i osiguranja izvornih odnosa informacija u signalu.

## 1.2. Tehnika uklanjanja i obnavljanja ovojnice

Kao što je ranije spomenuto kod pojačala velikih snaga koriste se nelinearne tehnike za postizanje visokog stupnja iskorištenja jedna od tih tehnika je tehnika uklanjanja i obnavljanja ovojnice (engl. *Envelope Elimination and Restoration*) [1], metodu uklanjanja i obnavljanja ovojnice signala otkrio je L.R. Kahn 1952. godine te je opisao u svom članku o pojačanju SSB (engl. *Single Side Band*) signala korištenjem nelinearnih pojačala snage. Osnovni pristup toj tehnici čini ideja da se signal kojeg se želi pojačati rastavi na dvije komponente kako je prikazano na slici 1.2 (preuzeto sa web stranice mmic.postech.ac.kr [2]).



Slika 1.2 Idejni prikaz tehnike uklanjanja i obnavljanja ovojnice

Za primjer uzmimo AM (amplitudno modulirani) signal, sve informacije koje modulirani signal treba prenijeti nalazi se u ovojnici, dok se u faznom odnosno frekvencijskom dijelu ne nalaze korisne informacije. Postupak se odvija na način da se iz originalnog signala detektorom ovojnice prekopira izvorni oblik ovojnice signala koji se šalje u pojačalo ovojnice. Istovremeno se izdvaja fazni dio signala koji se uobliči u pravokutne impulse potrebne za pobudu nelinearnog pojačala klase D ili E. Pojačalo ovojnice pojačava signale frekvencije modulacijskog signala koje kod AM signala leže u govornom području oko 3kHz.. Budući da je modulacijski signal niskofrekventni arhitektura pojačala ovojnice je klase D koje odlikuje visok stupanj iskorištenja. Te niske frekvencije ne predstavljaju izazov pri električnom i mehaničkom dizajnu. Pojačalo ovojnice spojeno je na stezaljke napajanja glavnog RF izlaznog pojačala, drugim riječima pojačalo ovojnice modulira napon

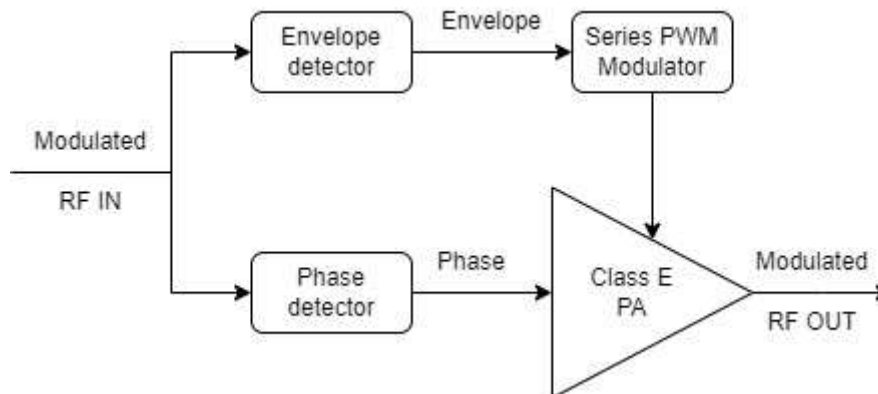
napajanja RF izlaznog pojačala u ritmu signala ovojnice. U idealnom slučaju ne postoji potreba za vremenskom sinkronizacijom između putanje signala ovojnice i putanje signala koji nosi faznu informaciju. Budući da su pojačala sklopovi građeni od realnih komponenti slijedi neizbježna činjenica da se putanje dvaju signala razlikuju uslijed djelovanja parazitnih odnosno i drugih pojava (npr. Millerov efekt). Ukoliko se radi o sustavu koji radi na jednoj frekvenciji potrebnu sinkronizaciju signala najlakše je izvesti jednostavnim sklopom za kašnjenje. U slučaju da sustav mora pokriti neki veći frekvencijski opseg poželjno je sustavu zaduženom za upravljanje kašnjenja ugraditi PLL (engl. *Phase Locked Loop*) odnosno fazno zaključanu petlju u svrhu dinamičkog prilagođenja iznosa kašnjenja.

Da bi opisana metoda radila na ispravan način, postoje uvjeti koji trebaju biti zadovoljeni unutar sustava. Pojačalo ovojnice mora biti direktno (istosmjerno) vezano na stezaljke napajanja RF izlaznog pojačala i mora imati širinu frekvencijskog pojasa barem tri puta veća od najveće frekvencijske komponente signala ovojnice. U svim pasivnim komponentama koje se nalaze u signalnoj putanji potrebno je smanjiti i izjednačiti grupno kašnjenje u propusnom pojasu.

## 2. Arhitektura pojačala snage koristeći tehniku obnavljanja i uklanjanja ovojnice

Na Sliku 2.1 Blok shema sustava prikazana je funkcionalna arhitektura pojačala koje koristi postupak obnavljanja i uklanjanja ovojnice. Prema projektnom zadatku pojačalo mora pokriti frekvencijski raspon 1-7MHz te ispravno raditi sa jednostavnim modulacijama kao što su SSB (engl. *Single Side Band*), CW (engl. *Continous Wave*) i FSK (engl. *Frequency Shift Keying*).

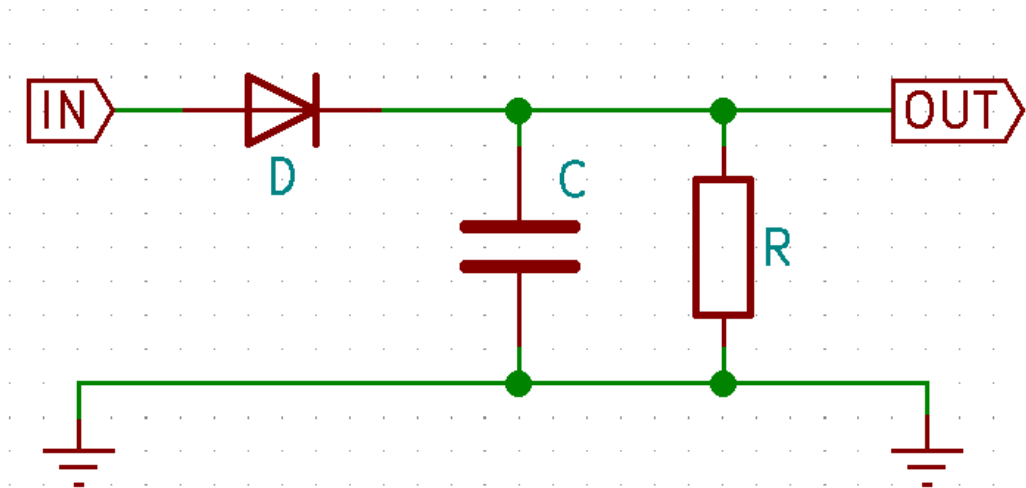
Za analizu sustava podijelit ćemo ga na dvije signalne grane, granu signala ovojnice te granu signala faze. Promotrimo ovojnice signala svih zadanih vrsta modulacije. Najveću frekvenciju nosi ovojnica SSB (engl. *Single Side Band*) signala i ta frekvencija iznosi 3kHz. Detektor ovojnice mora imati gornju graničnu frekvenciju veću od 3kHz. Promotrimo li granu signala faze u slučajevima svih zadanih vrsta modulacije slijedi da fazni detektor mora pravilno oblikovati impulse u frekvencijskom rasponu 1 – 7 MHz.



Slika 2.1 Blok shema sustava

## 2.1. Detektor ovojnice signala

Postoje razni načini detektiranja ovojnice signala, promotriti ćemo najjednostavniju i povijesno najstariju ideju, vršni detektor odnosno diodni detektor, prikazan na Slika 2.2.



Slika 2.2 Diodni detektor

Diodni detektor je električni sklop koji se sastoji od diode  $D$ , kondenzatora  $C$  i otpornika  $R$ . Dioda  $D$  vrši funkciju poluvalnog ispravljanja signala te skupa sa kondenzatorom  $C$  i otpornikom  $R$  formira filter. Česta primjena ovakvog detektora je primanje odnosno demoduliranje AM radiosignala. Ulaz diodnog detektora spaja se na antenu koja prima AM modulirane radiovalove, dioda poluvalno ispravlja ulazni signal potom se kondenzator nabije na trenutnu amplitudu primljenog AM signala, otpornik služi kao ugađanje RC konstante odnosno gornje granične frekvencije RC filtera prvog reda.

Uzmimo  $f_c$  kao frekvenciju vala nosioca (primljeni AM signal), vremensku konstantu  $\tau = RC$  potom slijedi:

$$T = \frac{1}{f_c} \quad (5)$$

Nakon diode vlada napon čija je vrijednost ekvivalentna trenutnoj amplitudi primljenog AM signala, napon na kondenzatoru u trenutku  $t \in (\pi, 2\pi)$  :

$$U(t) = Ue^{-\frac{t}{\tau}} \quad (6)$$

Također uz pretpostavku  $T \ll \tau$ , napon na kondenzatoru u trenutku  $t \in (0, \pi)$  :

$$U(t) = U(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (7)$$

Kombinacijom izraza (5), (6) i (7) dobivamo izraz za valovitost napona:

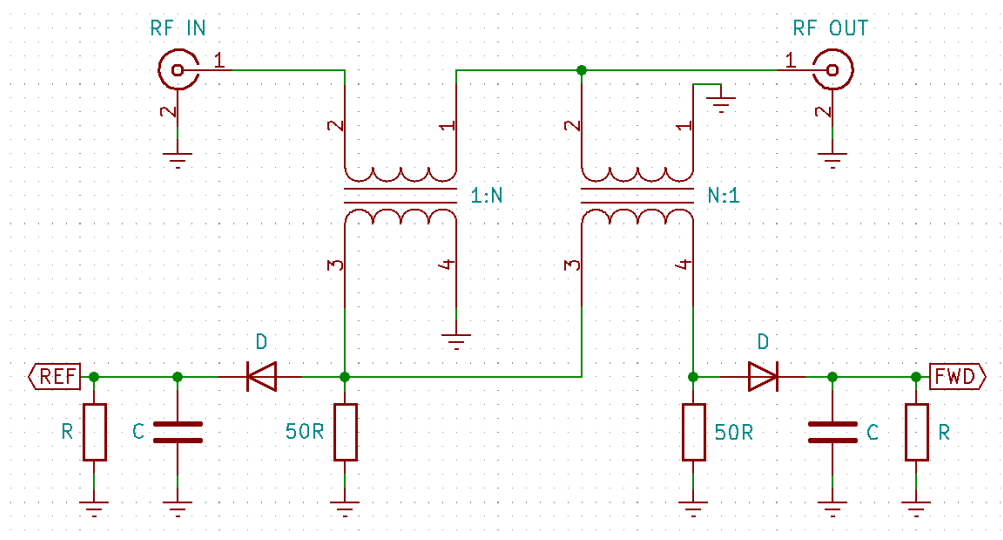
$$\Delta U = \frac{UT}{\tau} \quad (8)$$

Problem ovakve izvedbe detektora čini više faktora: neosjetljivost na signale amplitude manje od praga vođenja diode, valovitost napona  $\Delta U$  i ograničen frekvencijski odziv.<

Budući da pojačalo za ispravan rad zahtjeva 10W pobudne snage, metoda direktnog uzorkovanja odnosno detektiranja ovojnice diodnim detektorom nije primjenjiva iz više razloga. Po standardu svi RF uređaji imaju ulaznu i izlaznu impedanciju  $50\Omega$  drugim riječima pobudna snaga od 10W na ulaznoj impedanciji stvara napon:

$$U = \sqrt{PR} \quad (9)$$

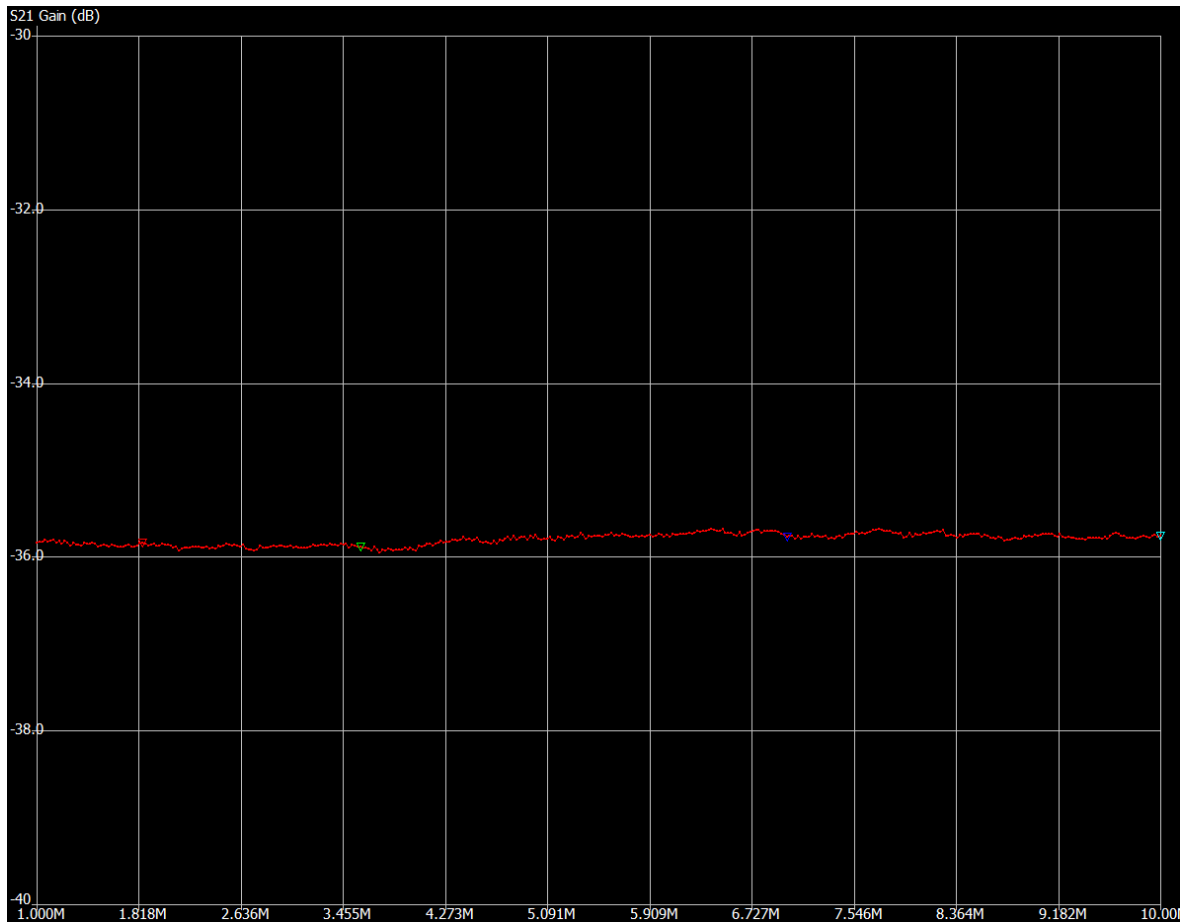
Prema izrazu (9) napon koji vidi ulaz je 22.36V. također poželjno je pri detektiranju ovojnice koristiti incidentnu komponentu vala. Promjenom pobudne frekvencije mijenja se odnos i pozicija stojnog vala na prienosnoj liniji i napon koji uzorkujemo na fiksnoj točki nije isti. Ugradnjom usmjernog sprežnika riješen je problem promjene uzorkovanog napona kao posljedice stojnih valova te se uzorkovani napon smanji na prihvatljivu razinu (do 2.5 V).



Slika 2.3 Detektor ovojnice s usmjernim sprežnikom

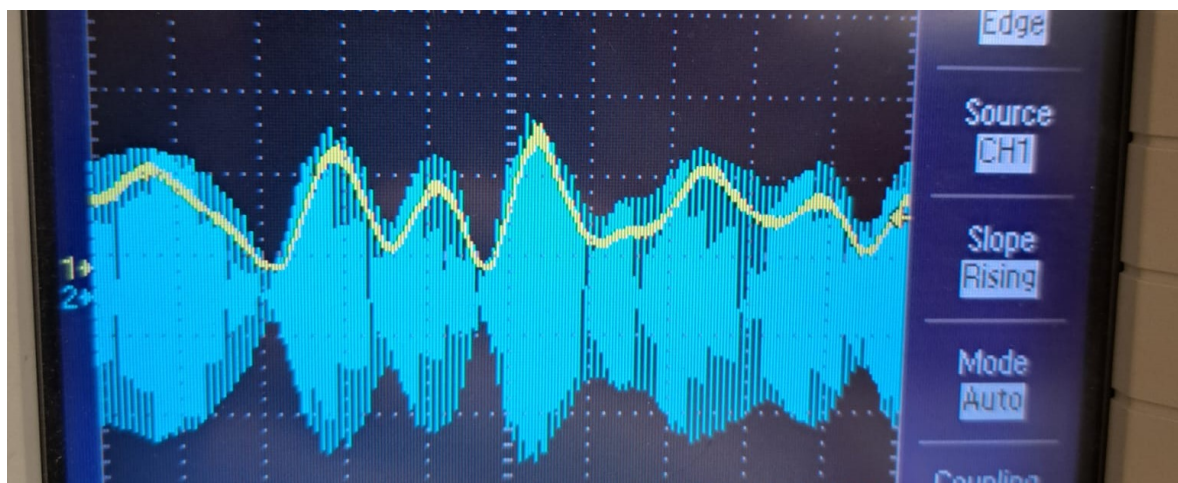
Napravljen je usmjerni sprežnik sprege -16dB, na izlaze sprežnika spojen je diodni detektor. Budući da usmjerni sprežnik na svojim izlazima daje napon ekvivalentan incidentnim i reflektiranim komponentama promjena očitavanja s frekvencijom je u potpunosti eliminirana.





Slika 2.4 Mjerenje sprege između prilaza RF IN i FWD prilaza vektorskim analizatorom mreža

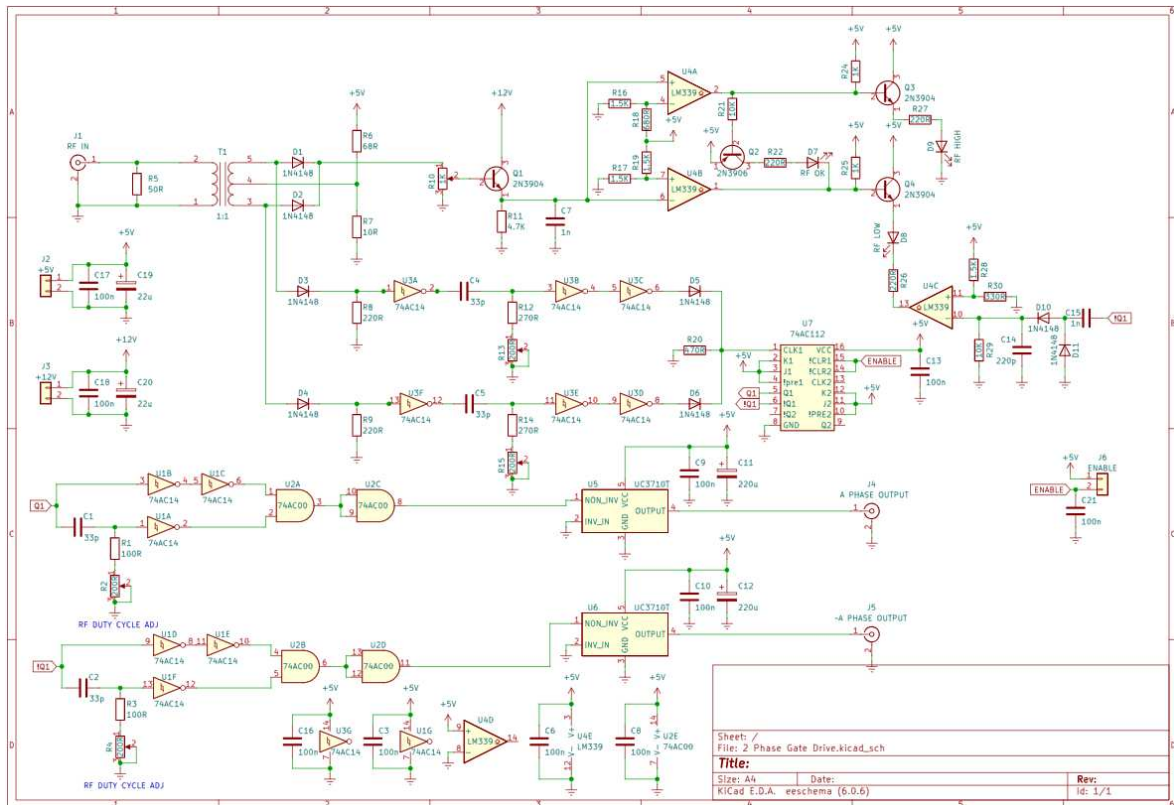
Na Slika 2.4 prikazani su rezultati mjerenja širokopolasnog usmjernog sprežnika vektorskim analizatorom mreža. Važno je napomenuti da postoji razlika između mjerila Y-osi i stvarnog mjerila, sprege sprežnika iznosi -16dB, a ne -36dB kako je prikazano.



Slika 2.5 Izlaz detektora(žuto) ovojnice signala mjeren na FWD stezaljci

## 2.2. Detektor faze/oblikovanje pobudnih impulsa

Kod klasičnih pojačala postoji linearna veza između ulazne veličine (u većini slučajeva je to napon) i izlazne veličine (u većini slučajeva je to struja), no kod nelinearnih pojačala kao pojačalo klase E ulaz i izlaz nisu linearno vezani. Pojačalo klase E zahtjeva pobudni signal u obliku pravokutnih impulsa budući da aktivni element radi kao sklopka.



Slika 2.6 Električna shema sklopa za oblikovanje impulsa

Budući da su pobudni signali sinusnog oblika potrebno je projektirati sklop čiji je zadatak iz sinusnog valnog oblika pobudnog signala dobiti pravokutne impulse frekvencije pobudnog signala bez velikog kašnjenja u odnosu na ulazni signal.

Pobudni uređaj je odašiljačkog tipa, drugim riječima potrebno je poštivati normiranu impedanciju  $50\Omega$ . Galvansko odvajanje odašiljača i elektronike postignuto je transformatorom T1 čiji primarni namot je zaključen  $50\Omega$  otpornikom. Na srednji izvod sekundara transformatora doveden je potencijal od  $0,7V$  u svrhu eliminacije napona praga diode. Drugim riječima osigurano je trenutno vođenje dioda i u trenutcima kada je napon na sekundaru manji od  $0,7V$ . Transformator vrši dvojaku ulogu, prvo daje uzorak signala u električni sklop čiji je zadatak signalizacija potrebne razine pobudne snage putem par

komparatora i led dioda. Drugo daje uzorak signala u mrežu za pretvorbu punovalno ispravljenog sinusnog signala u signal pravokutnih impulsa.

Mreža koju tvore T1, D3, D4, D5, D6, C4, C5, R8, R9, R12, R13, R14, R15 i U3 obavlja funkciju udvostručivanja frekvencije i inicijalnog oblikovanja impulsa. JK bistabil U7 spojen je u spoj brojila odnosno dijeli frekvenciju ulaznih impulsa s dva. Drugim riječima gore spomenutom mrežom podižemo frekvenciju pobudnog signala za faktor 2, dok JK bistabilom dijelimo frekvenciju oblikovanih impulsa faktorom 2 te se vraćamo na početnu frekvenciju pobudnog signala. Navedeni pristup ima prednost u tome da smo napravili dva identična izvora impulsa koji su točno  $180^\circ$  van faze, koji imaju identične amplitude pogodnih za pobuđivanje diferencijalnih izvedbi pojačala.

Za daljnju analizu sklopa dovoljno je promatrati izlaz bistabila Q1 odnosno tu granu. Često kod diferencijalnih izvedbi pojačala u prekidačkom režimu rada potrebno je namjestiti radni omjer signala, drugim riječima postotak perioda signala u kojem je prisutna visoka odnosno niska razina signala. Mreža koju tvore C1, R1, R2, U1 i U2 obavlja funkciju namještanja radnog omjera signala. Drugim riječima signal na izlazu Q1 bistabila U7 dijeli se na dvije grane, jedan dio signala prolazi kroz invertore U1B i U1C, dok drugi dio signala prolazi kroz CR mrežu za kašnjenje te kroz inverter U1A. Stoga nastaje fazni pomak između dvije putanje signala. Budući da obje grane završavaju na logičkim I vratima kao rezultat dobivamo upravljivi radni omjer RF (engl. *Radio Frequency*) signala koji se namješta trimenom R2. Daljnja logička I vrata su spojena u spoj invertora da bi se uštedilo na broju sklopova. Također važno je spomenuti da izlaz TTL porodice sklopova nije u mogućnosti dati dovoljno struje na svom izlazu za visokofrekventne signale stoga je kao izlazni sljeditelj stavljen MOSFET driver UC3710T.



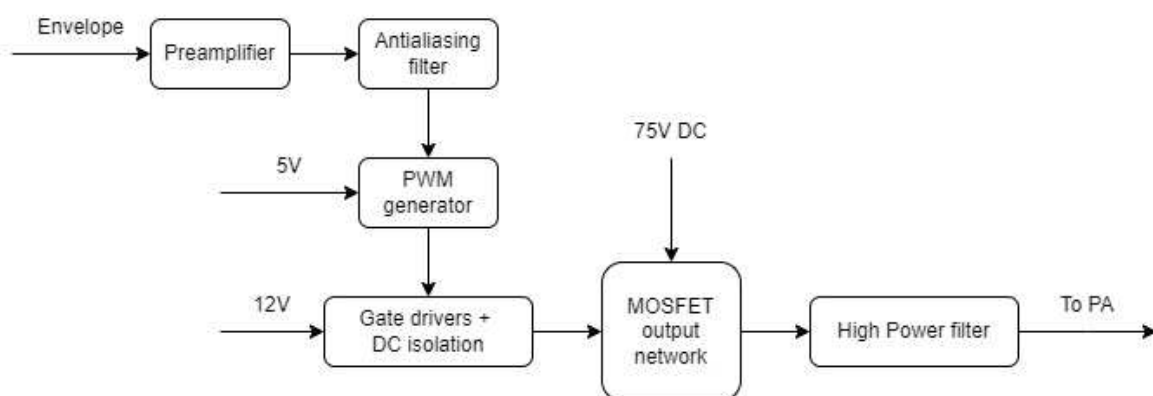
Slika 2.7 Oscilogram signala na izlazu U1C (zeleno) i U2A (žuto)

Na slici 2.7 prikazani su valni oblici na ulazu u logička vrata U2A, nakon logičke I operacije dobivaju se pravokutni impulsi modificiranog radnog omjera.

### 3. Serijski PWM modulator

Tehnika uklanjanja i obnavljanja ovojnice zahtjeva dva lanca za obradu signala. Jedan lanac se bavi detektiranjem ovojnice signala i njenim kondicioniranjem. Dok drugi lanac se bavi uobličavanjem preostalog signala u pravokutni frekvencijsko modulirani signal pogodan za pobudu pojačala klase E. Točka spajanja dvaju lanaca tipično je pojačalo klase D, E ili F.

U našem slučaju potrebno je modulirati dostupni napon napajanja iznosa 75V DC u ritmu ovojnice pobudnog signala. Budući da je frekventni raspon signala ovojnice dovoljno mali (100Hz – 3kHz) odabran je pristup modulacije napona napajanja serijski spojenim aktivnim elementom. Aktivni element korišten za modulaciju je MOSFET tranzistor IRFP450, maksimalni radni napon tranzistora je 500V i maksimalna struja je 14A.



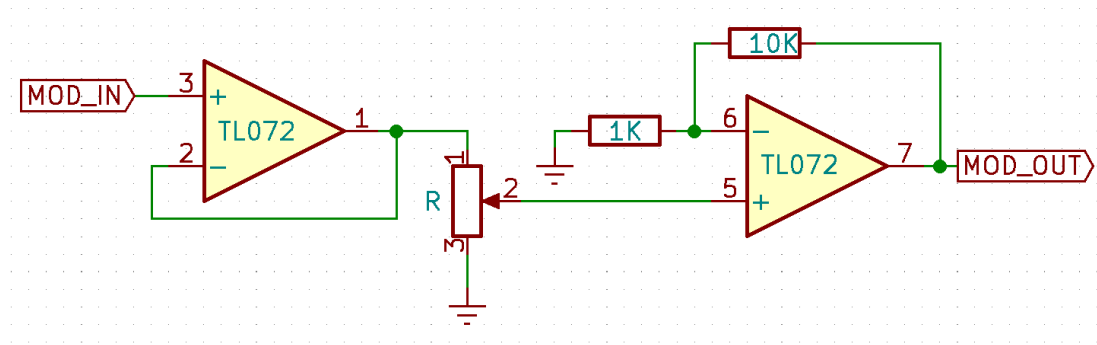
Slika 3.1 Blok shema serijskog PWM modulatora

Parametri serijskog PWM modulatora:

- Napon napajanja: 75V DC
- Ulazni(upravljajući) napon: 0 - 5V
- Izlazni napon: 0 – 70V
- Izlazna struja: 0 – 3.5A
- Impedancija tereta 20  $\Omega$
- THD: 5%, harmonici: -25 dBc minimum
- Frekvencija PWM generatora: 120 kHz

### 3.1. Ulazno predpojačalo

Ulazni stupanj serijskog PWM (engl. *Pulse Width Modulation*) modulatora čini predpojačalo u obliku kaskadnog spoja slijedila i neinvertirajućeg pojačala. Operacijsko pojačalo u spoju slijedila ostvaruje veliku ulaznu impedanciju, drugim riječima ulazni otpor modulatora neće opteretiti izlaz detektora ovojnice odnosno diodnog detektora.



Slika 3.2 Električna shema ulaznog predpojačala

Predpojačalo je izvedeno korištenjem niskošumnog dvostrukog operacijskog pojačala TL072, operacijsko pojačalo napaja se simetričnim napajanjem  $\pm 12V$ , pojačanje predpojačala ugađa se potencijetrom R, pojačanje predpojačala opisuje:

$$A = \delta \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (10)$$

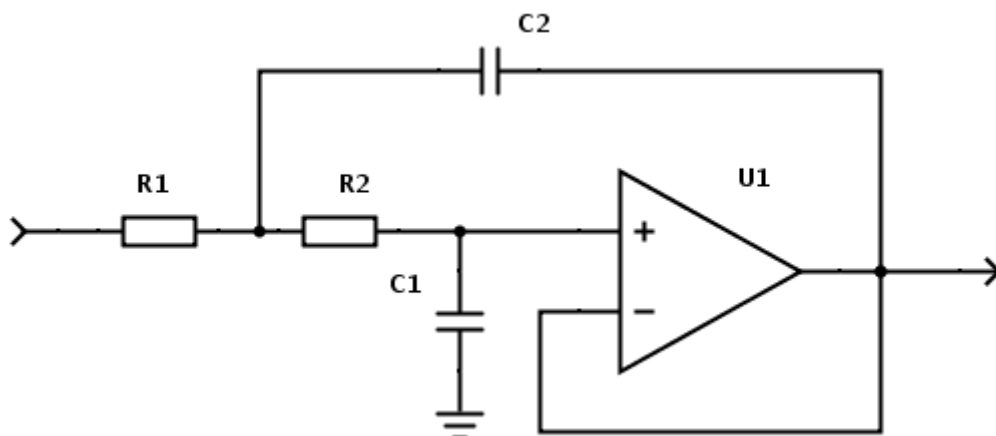
Gdje je  $R_2 = 10k\Omega$ ,  $R_1 = 1k\Omega$ , te parametar  $\delta$  koji predstavlja fizički pomak osovine potencijetra,  $\delta \in (0, 1)$  drugim riječima kada je pozicija klizača potencijetra na njegovom dnu (stezaljke 2 i 3 su u kratkom spoju) parametar  $\delta$  iznosi 0. Promotrimo obrnut slučaj, pozicija klizača potencijetra je na vrhu (stezaljke 1 i 2 su u kratkom spoju) parametar  $\delta$  iznosi 1.

Prema izrazu (10) pojačanje predpojačala poprima vrijednosti iz intervala (0,11).

## 3.2. Antialiasing filter

Analogne filtere nalazimo u skoro svakom električnom sklopu, video tehnici, audio tehnici, obradi signala itd... Sustavi za obradu analognih i digitalnih signala koriste razne filtere, jedan od važnijih filtera je antialiasing filter čiji je zadatak spriječiti pojavu lažnih signala nastalih upadanjem vanjskih smetnji. Drugim riječima antialiasing filter je niskopropusni filter čija je gornja granična frekvencija manja od polovice frekvencije uzorkovanja.

Inicijalni pristup je bio korištenje pasivnog niskopropusnog filtera 6. reda, no proračun i performanse takvog filtera jako su ovisile o ulaznim i izlaznim impedancijama krugova u koji su povezani. Također veliki problem je predstavljalo dobivanje zadovoljavajućeg faktora kvalitete filtera koristeći pasivne komponente. Da bi se olakšali zahtjevi na projektiranje filtera korišteni su aktivni filteri znatno boljih svojstava. Korištena topologija aktivnih filtera je Sallen-Key [9].



Slika 3.3 Topologija Sallen-Key aktivnog filtera

Sallen-Key topologija filtera prikazana na Slika 3.3 realizirana je oko operacijskog pojačala u neinvertirajućem spoju, uz korištenje dva otpornika i dva kondenzatora.

Prednost Sallen-Key topologije u odnosu na klasične pasivne filtere je višestruka:

- Vrlo visoka ulazna impedancija filtera
- Mala izlazna impedancija filtera
- Vrlo dobra stabilnost

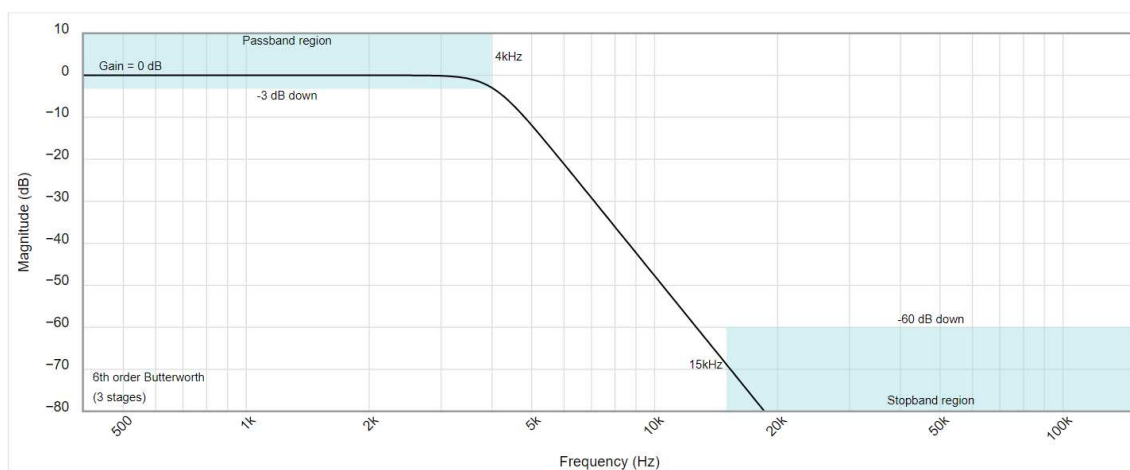
Također postoji par mana Sallen-Key topologije:

- Ukoliko je pojačanje veće od 3 sklop postaje nestabilan
- Postoje nadvišenja u prijenosnoj karakteristici blizu prelomne frekvencije (-3dB), nadvišenja postaju izraženija porastom reda filtera
- Potrebne su uske tolerancije pasivnih komponenti, tipično 1%

Projektiranje antialiasing filtera ostvareno je korištenjem alata Analog Filter Wizard[10].

Tehnički podatci filtera:

- Gornja granična frekvencija 4kHz
- Pojačanje 0dB
- Nagib karakteristike -120dB/dek
- Valovitost u propusnom području 0.1dB
- Butterworth topologija
- 6. red filtera



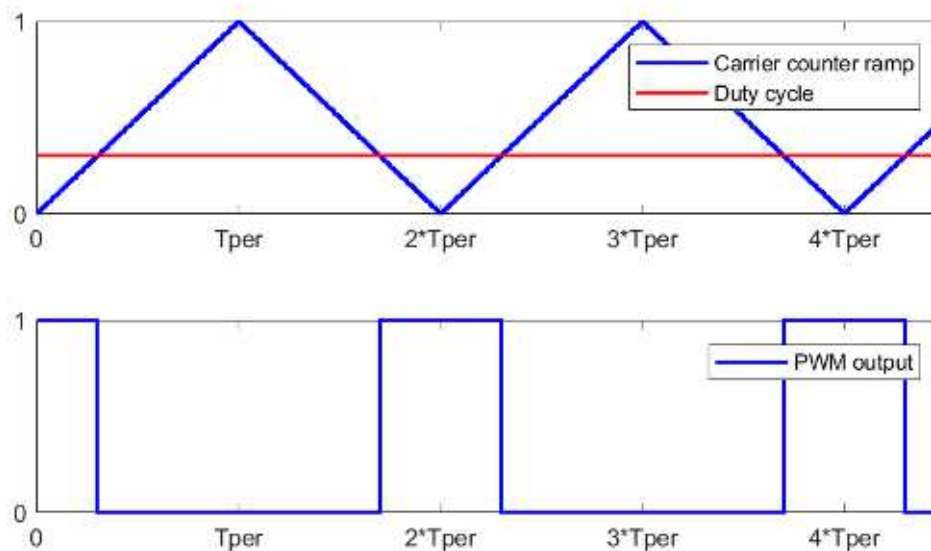
Slika 3.4 Simulirana prijenosna karakteristika antialiasing filtera

Izmjerena karakteristika filtera dovoljno dobro aproksimira simuliranu karakteristiku aktivnog filtera. Uočena su odstupanja prijenosne karakteristike filtera u obliku nadvišenja u blizini gornje granične frekvencije, nadvišenja su iznosa oko 1,3 dB.

### 3.3. PWM generator

PWM (engl. *Pulse Width Modulation*) odnosno pulsno-širinska modulacija je tehnika upravljanja signalom s ciljem manipulacije srednje vrijednosti signala. Postoje razni načini dobivanja pulsno-širinski moduliranog signala, a u obzir su uzete analogne i digitalne metode.

Promotrimo analognu varijantu generiranja pulsno-širinski moduliranog signala komparatorom i generatorom trokutastog signala.

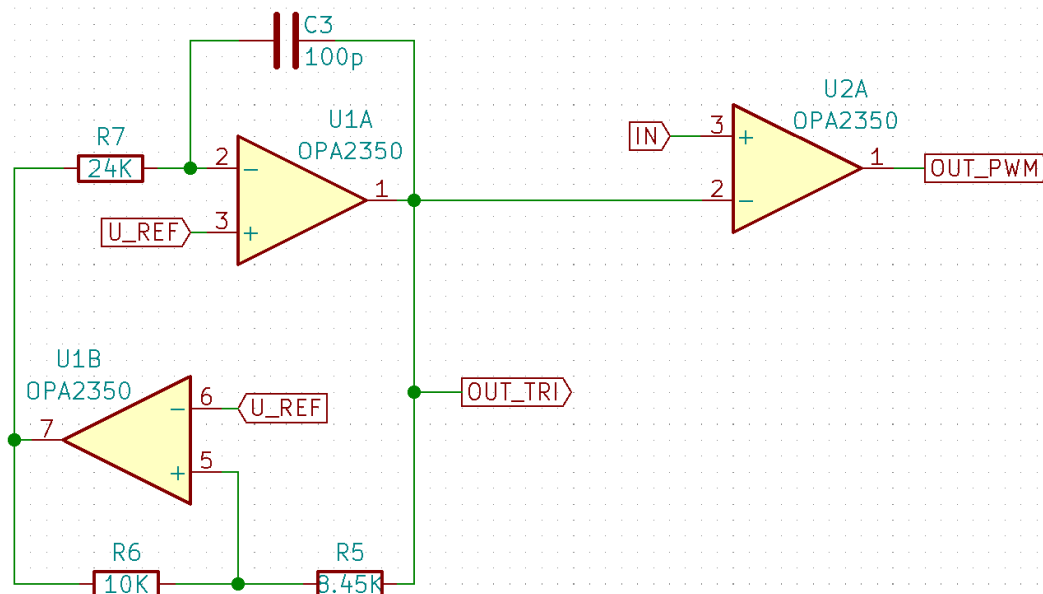


Slika 3.5 Grafički prikaz dobivanja PWM signala

Na Slika 3.5 grafički je prikazan postupak dobivanja pulsno-širinski moduliranog signala. Ideja generiranja je vrlo jednostavna, na invertirajuću stezaljku komparatora dovodimo signal iz generatora trokutastog signala te na neinvertirajuću stezaljku komparatora dovodimo ulazni odnosno referentni signal. U trenutku kada je referentni signal veće amplitude od trokutastog signala izlaz komparatora poprima visoku razinu, a u trenutku kada je referentni signal manje amplitude od trokutastog signala izlaz komparatora poprima nisku razinu.

Generator trokutastog signala realiziran je korištenjem dvostrukog operacijskog pojačala OPA2350.





Slika 3.6 Električna shema PWM generatora

Amplituda trokutastog signala definirana je izrazom:

$$U_{tri} = \frac{R5}{R6} U_{ref} \quad (11)$$

Odredimo iznos amplitude trokutastog signala na 2,1 V te vrijednost R6 postavljamo na 10kΩ, uvrštenjem u izraz (11) slijedi:

$$R5 = \frac{U_{tri} R6}{U_{ref}} = 8.42k\Omega \quad (12)$$

Budući da vrijednost otpora 8,45kΩ je najbliža dostupna, ona je odabrana za vrijednost R5. Frekvencija osciliranja trokutastog generatora signala iznosi 120 kHz, možemo napisati:

$$f = \frac{R6}{4 R7 R5 C3} \quad (13)$$

Uvrštenjem podataka u izraz (13) slijedi:

$$R7 = \frac{R6}{4 f R5 C3} = 24.21k\Omega \quad (14)$$

Koristimo vrijednost otpora 24kΩ budući da je ona najbliža dostupna.

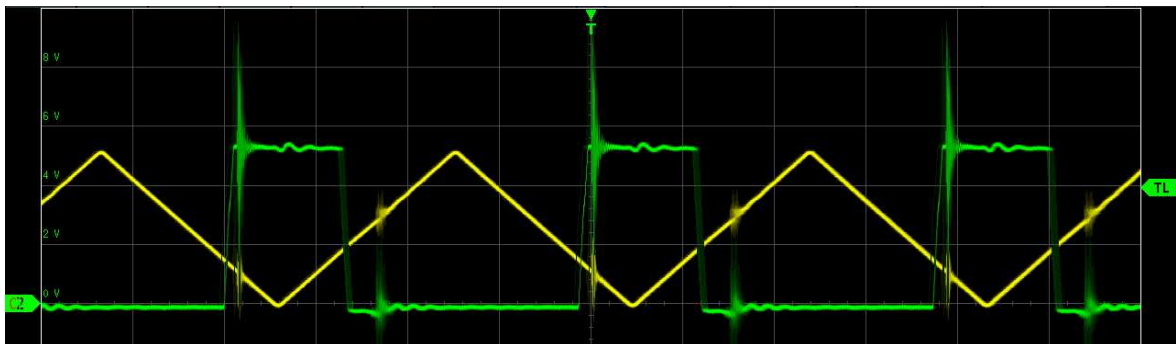
Promotrimo zahtjeve na brzinu rada operacijskih pojačala, definirajmo brzinu porasta napona na izlazu generatora trokutastog signala:

$$SR = 4 * U_{tri} * f = 4 * 2.1V * 120kHz = 1 V/\mu s \quad (15)$$

Operacijsko pojačalo sa brzinom porasta izlaznog napona znatno većeg od  $1 \text{ V}/\mu\text{s}$  mora biti korišteno u suprotnom dolazi do izobličenja trokutastog vala. Trokutasti valni oblik sastoji se od beskonačne sume neparnih harmonika, koristeći pravilo da je za dovoljno dobru aproksimaciju trokutastog valnog oblika potrebno obuhvatiti 10 neparnih harmonika osnovne frekvencije trokuta slijedi zahtjev na GBW (engl. *Gain Bandwith Product*) operacijskog pojačala:

$$GBW = 19 f = 19 * 120\text{kHz} = 2.28 \text{ MHz} \quad (16)$$

Operacijsko pojačalo OPA2350 u potpunosti zadovoljava tehničke uvjete za ispravan rad generatora trokuta.

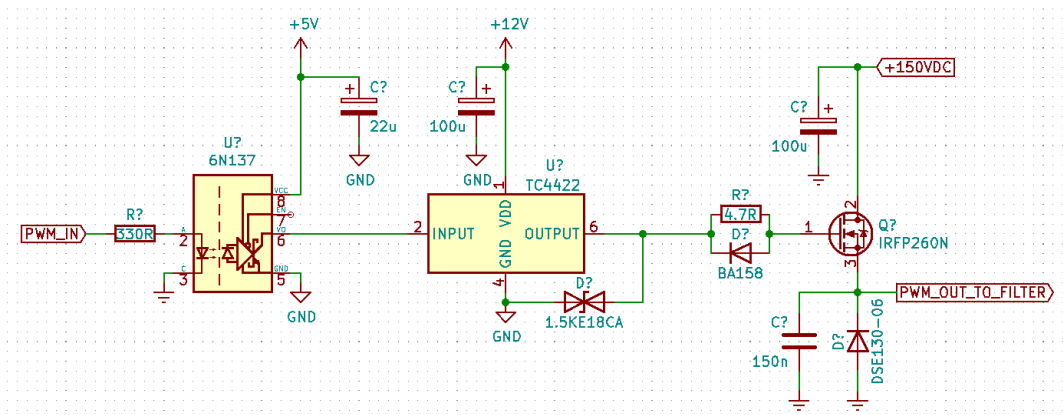


Slika 3.7 Valni oblik generatora trokuta i PWM signala

### 3.4. Izlazna mreža + DC izolacija kruga upravljačke elektrode

Na Sliku 3.8 prikazana je arhitektura izlazne mreže modulatora, izlaznu mrežu dijelimo na tri funkcionalne cjeline:

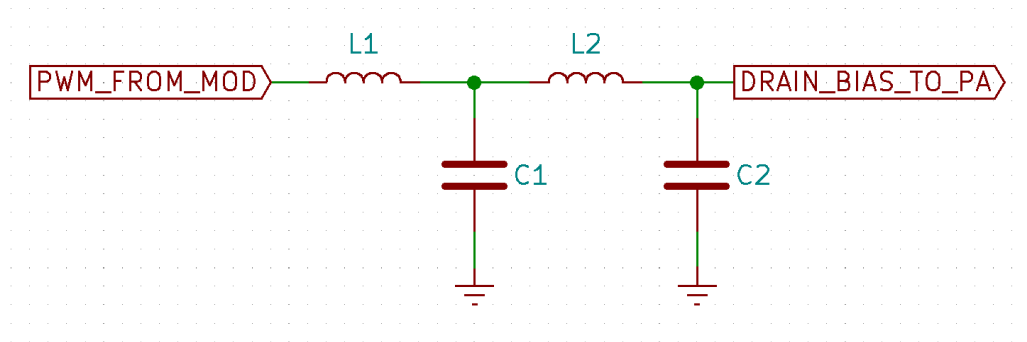
- **DC odvajanje.** Važno je odvojiti izlazni dio gdje je prisutan visoki napon od ulaznog gdje su niski naponi i obrada signala. Najbolji način odvajanja je galvansko odvajanje koje postižemo opto-izolatorom 6N137. 6N137 opto-izolator optimiziran je za velike brzine prijenosa informacija (1MBit/s).
- **Upravljanje upravljačkom elektrodom MOSFET tranzistora.** Jedan od težih zadataka je upravljanje upravljačkom elektrodom MOSFET-a, glavni problem upravljanja tranzistora snage je njihov velik ulazni kapacitet. Tipičan MOSFET snage ima 1 do 2 nF ulazni kapacitet što predstavlja veliki izazov za brzo pritezanje na napon napajanja ili masu, kao što je potrebno za PWM način rada. U tu svrhu odabran je upravljački modul TC4422CAT koji omogućuje rad na 12V i upravljačku struju do 9A! Čime rješavamo problem brzog punjenja i pražnjenja kapaciteta pri relativno velikim frekvencijama i smanjujemo gubitke u preklapanju tranzistora.
- **Ulogu sklopnog elementa preuzima N kanalni MOSFET snage IRFP260N.** Pri uklapanju i isklapanju u seriju sa upravljačkom elektrodom dodana je paralelna kombinacija otpornika i diode. Otpornik usporava vrijeme uključivanja, dok dioda ubrzava vrijeme gašenja na način da kroz sebe preuzme svu struju, odnosno naboj.



Slika 3.8 Izlazni mreža modulatora( DCodvajanje, upravljanje upravljačkom elektrodom)

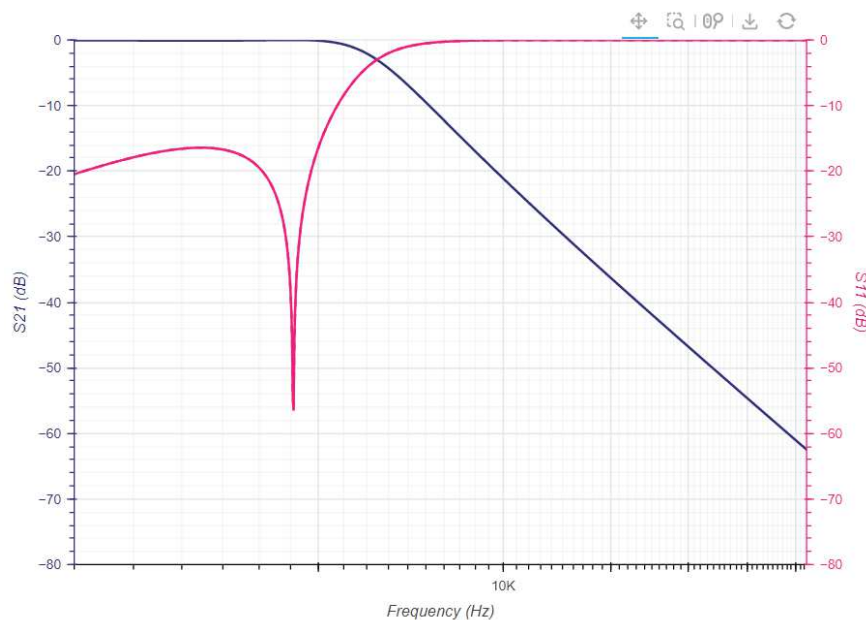
### 3.5. Izlazni PWM filter

Nakon izlazne mreže MOSFET tranzistora spojen je izlazni PWM (engl. *Pulse Width Modulation*) filter. Njegov zadatak je izdvajanje osnovnih harmonika iz pulсно širinski moduliranog signala bogatog neparnim harmonicima. Nakon filtera signal ovojnice vraćen je u izvorni valni oblik, no njegova amplituda je veća.



Slika 3.9 Izlazni PWM filter

Na Slika 3.9 prikazana je električna shema izlaznog PWM filtera, filter je projektiran uz pomoć programskog paketa ELSIE. Minimalne zahtjeve filtriranja zadovoljava filter 4. reda.



Slika 3.10 Simulirana karakteristika filtera

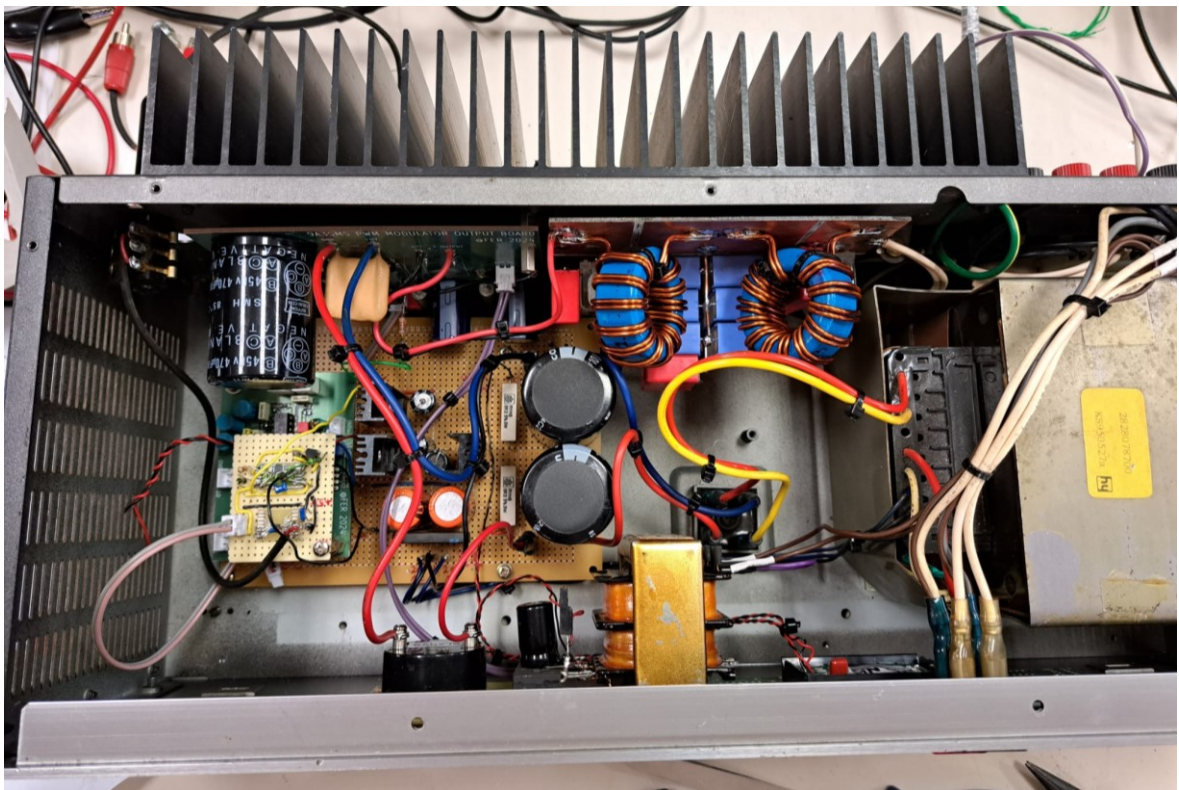
Odabrana gornja granična frekvencija filtera je 4kHz, vrijednosti komponenti:  $L_1 = 148\mu\text{H}$ ,  $L_2 = 228,3\mu\text{H}$ ,  $C_1 = 9,13\mu\text{F}$  i  $C_2 = 5,9\mu\text{F}$

### 3.6. Serijski PWM modulator – zaključak

Pokazali smo da je moguće napraviti zadovoljavajuću izvedbu serijskog PWM modulatora bez korištenja mikroprocesora, drugim riječima moguće je napraviti kvalitetnu izvedbu koristeći analogne komponente. Pri izradi modulatora javili su se razni problemi:

- Nadvišenja u prijenosnoj karakteristici antialiasing filtera
- Nelinearno upravljanje PWM generatorom izvedenim s LTC3703
- Pregaranje optoizolatora 6N137
- Nedovoljno potiskivanje harmonika na izlazu modulatora
- Stabilnost PWM generatora

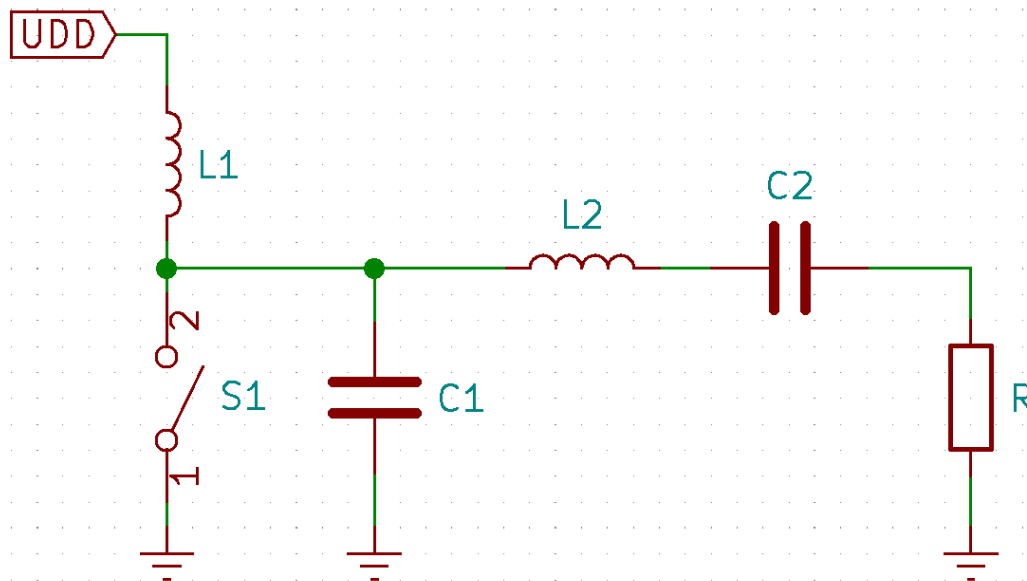
Navedeni problemi su otklonjeni te modulator radi zadovoljavajuće.



Slika 3.11 Izvedba serijskog PWM modulatora

## 4. Izlazno pojačalo klase E

Izlazni stupanj pojačala u klasi E razvili su Nathan i Alan Sokal 1975. [13], pojačalo je u teoriji moglo ostvariti stupanj iskorištenja 100%. Pojačalo klase E spada u nelinearna pojačala snage, električna shema prikazana je na Slika 4.1 i ima 2 neuobičajena dodatka.



Slika 4.1 Osnovna shema pojačala klase E

Prvi je namjerno dodani kapacitet  $C1$  paralelno spojen aktivnom elementu pri čemu se većina iznosa kapaciteta dobiva iz parazitnog kapaciteta aktivnog elementa. Drugi dodatak je titrajna mreža u obliku serijskog titrajnog kruga  $C2 - L2$  čija se rezonancija nalazi malo ispod frekvencije pobudnog signala pojačala. Stoga se na krajevima mreže vidi induktivna reaktancija. Drugim riječima rezultat ovog namjernog namještanja je rad sa maksimalnim stupnjem iskorištenja umjesto rada sa maksimalnom izlaznom snagom. Spajanjem komponenti potrebnih vrijednosti osiguran je napon  $0V$  na aktivnom elementu u trenutku uključanja, pa nema nepotrebnih izbijanja kapaciteta. Zato brzina porasta odnosno brzina uključanja aktivnog elementa ne mora biti velika za ispravan rad pojačala.

Općenita analiza električnog kruga uz idealizirane osnovne pretpostavke pri projektiranju pojačala klase E:

- Aktivni element (tranzistor) razmatramo kao idealnu sklopku
- Sklopka S prebacuje stanja s radnim omjerom 0,5(50% perioda isključeno, 50% perioda uključeno) na pobudnoj frekvenciji
- Sklopka S može izdržati struju pri uključenju, također sklopka može izdržati napon pri isključenju
- L1 je dovoljno velikog induktiviteta pa možemo reći da kroz L1 samo teče istosmjerna struja
- Faktor dobrote Q serijskog titrajnog kruga L2 - C2 je dovoljno velik, pa će struja tereta biti isključivo sinusnog valnog oblika

Možemo reći da je struja napajanja isključivo istosmjerna zbog vrlo velike reaktancije L1 na pobudnoj frekvenciji pojačala. Također pretpostavimo li faktor  $Q = \infty$  titrajnog kruga L2-C2, drugim riječima samo osnovni harmonik struje teče kroz trošilo R.

Izraz za struju trošila uz pretpostavku  $\theta = \omega t$  je:

$$i(\theta) = I_1 \sin(\theta + \varphi) \quad (17)$$

Gdje  $I_1$  označava amplitudu struje trošila te  $\varphi$  fazni kut struje trošila.

U stanju isključene sklopke S odnosno aktivnog elementa struje koje teku kroz sklopku S i kondenzator C1 su određene izrazima:

$$i_{sw}(\theta) = 0 \quad (18)$$

$$i_c(\theta) = I_{DC} - I_1 \sin(\theta + \varphi) \quad (19)$$

Struja  $i_c(\theta)$  navedena u izrazu (19) puni odnosno prazni kapacitet C1, možemo pretpostaviti da tokom uključenog stanja sklopke S pad napona na sklopki S je 0, napon na kapacitetu C1 u tokom stanja isključene sklopke S određen je izrazom:

$$u_c(\theta) = \frac{1}{\omega C_1} \int_0^\theta i_c(\theta) d\theta \quad (20)$$

Uvrštavanjem izraza (19) u izraz (20) te integracijom dobivamo izraz za napon na kapacitetu C1 u tokom stanja isključene sklopke S, slijedi:

$$u_c(\theta) = \frac{1}{\omega C_1} [I_{DC} \theta + I_1 \cos(\theta + \varphi) - I_1 \cos \varphi] \quad (21)$$

Jedinstveno svojstvo pojačala klase E u odnosu na druge klase pojačala je tzv meko uklapanja eng. *Soft Switching*, drugim riječima sklopka S se uključi točno u onom trenutku kad je kondenzator C1 prazan.

Da bi postigli uvjet mekog uklapanja, pri uključenju moramo definirati granične slučajeve, prema N. Sokal [13] slijedi:

$$u_C(\theta = \pi) = 0 \quad (22)$$

$$\left. \frac{du_C(\theta)}{d\theta} \right| = 0 \text{ uz uvjet } \theta = \pi \quad (23)$$

Nakon izračuna dolazimo do sljedećih izraza za vrijednosti komponenti:

$$C_1 \omega R = \frac{8}{\pi(\pi^2+4)} \quad (24)$$

$$R_{DC} = R \frac{\pi^2+4}{8} \quad (25)$$

$$P_{DC} = P_{out} = \frac{U_{DC}^2}{R} \frac{8}{\pi^2+4} \quad (26)$$

$P_{DC}$  i  $R_{DC}$  su snaga i otpor koje vidi izvor istosmjernog napona. Budući da je ovo idealizirani model pojačala stupanj iskorištenja je 100%, u stvarnosti stupanj iskorištenja pojačala klase E biti će manji od teoretskog maksimuma jer se ne mogu ostvariti postavljeni rubni uvjeti te uvijek su prisutni gubitci u realnim komponentama.

Na kapacitetu C1 maksimalni napon se pojavljuje u trenutku kada struja padne na 0, slijedi:

$$i_C(\theta_m) = 0 \quad (27)$$

Iz izraza (19) slijedi:

$$I_{DC} - I_1 \sin(\theta_m + \varphi) = 0 \quad (28)$$

Korištenjem uvjeta za pojačalo klase E i uvrstimo li izraze (22) i (23) u (21) slijedi:

$$I_{DC} = \frac{2}{\pi} \cos(\varphi) I_1 \quad (29)$$

$$I_{DC} = \sin(\varphi) I_1 \quad (30)$$

Usporedimo li izraze (29) i (30) te pretpostavimo radni omjer 0.5 slijedi:

$$\varphi = \tan^{-1}(-2/\pi) = 0.563 \text{ rad} \quad (31)$$

Uvrštavanjem izraza (30) u (28) slijedi:

$$\sin(\theta_m + \varphi) + \sin \varphi = 0 \quad (32)$$



Koristeći trigonometrijske identitete dobivamo:

$$\theta_m = -2\varphi \quad (33)$$

Napokon dobivamo izraze za vršne vrijednosti struje i napona aktivnog elementa:

$$U_{max} = U_C(\theta_m) = 2\pi\varphi U_{DC} = 3.562U_{DC} \quad (34)$$

$$I_{max} = I_{DC} + I_1 = I_{DC} - \frac{I_{DC}}{\sin\varphi} = 2.8621I_{DC} \quad (35)$$

Pri radu napon na aktivnom elementu premašuje napon napajanja više od 3 puta.

Slijede izrazi za izračun konačnih vrijednosti komponenti:

$$R = 0.576 \frac{(U_{DC} - U_{out})^2}{P_{out}} \left[ 1.001245 - \frac{0.451769}{Q_L} - \frac{0.402444}{Q_L^2} \right] \quad (36)$$

$$C_1 = \frac{0.1836}{\omega R} \left[ 0.99866 + \frac{0.91424}{Q_L} - \frac{1.03175}{Q_L^2} \right] \quad (37)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega R} \left[ \frac{1}{Q_L - 0.104823} \right] \left[ 1.00121 + \frac{1.01468}{Q_L - 1.7879} \right] \quad (38)$$

$$L_2 = \frac{Q_L R}{\omega} \quad (39)$$

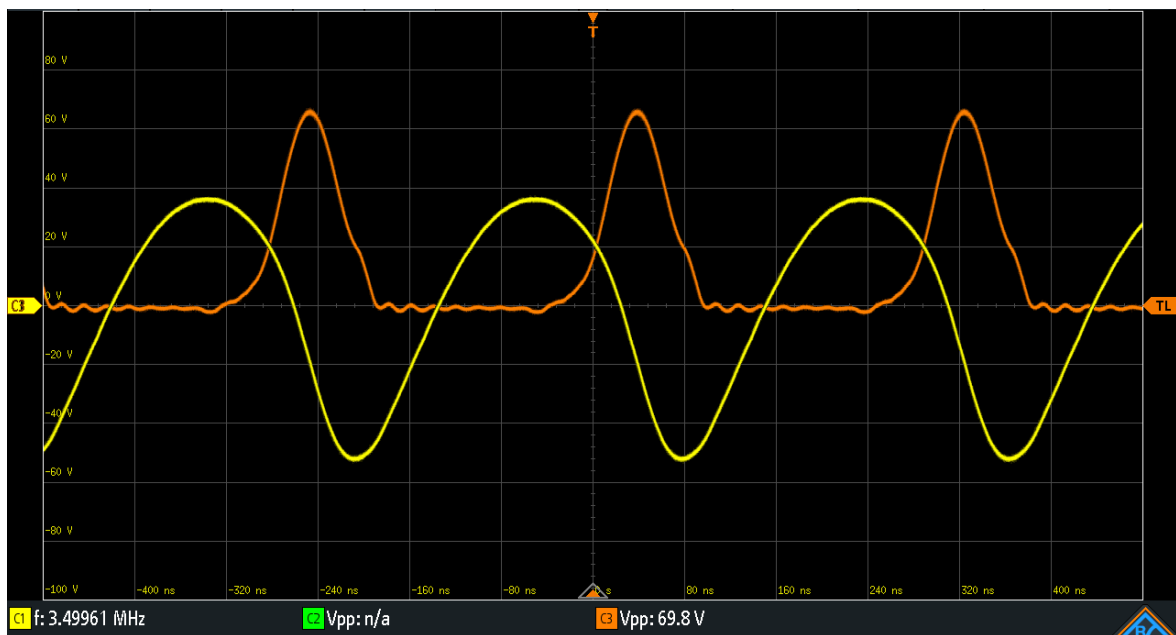
$$\omega L_1 > 10 \frac{1}{\omega C_1} \quad (40)$$

## 4.1. Mjerni rezultati izvedbe sustava

Ispitivanje sustava izvršeno je osciloskopom proizvođača Rode & Schwartz tip RTB2004 širine pojasa kanala od 70 MHz. Važno je spomenuti:

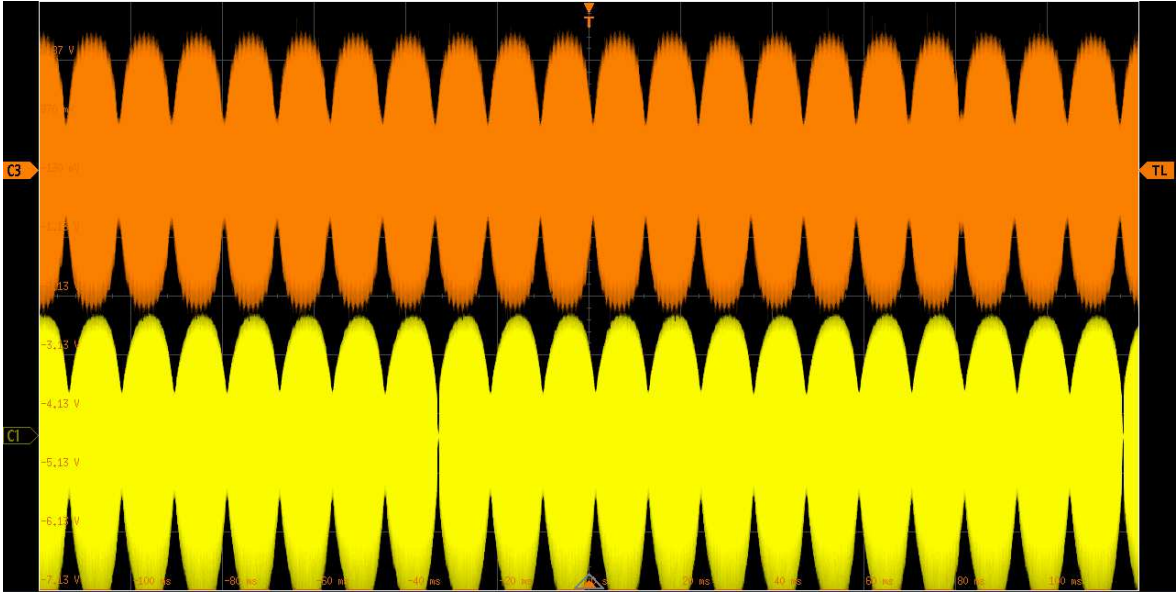
- Vršna vrijednost napona napajanja pojačala je 15V
- Trošilo je lažna antena impedancije  $50\Omega$
- Pobudni uređaj je radiostanica YAESU FT1000MP MKV
- Korištene modulacije SSB, CW, FSK
- Ispitivanje linearnosti 2-tonskim testom

Izlazna snaga izmjerena je osciloskopom i iznosi 28W, ukupna utrošena vršna snaga je 30W. Postignut stupanj iskorištenja iznosi 92%. Linearnost sustava izmjerena je osciloskopom tokom 2-tonskog testa, prikazano na Slika 4.3.

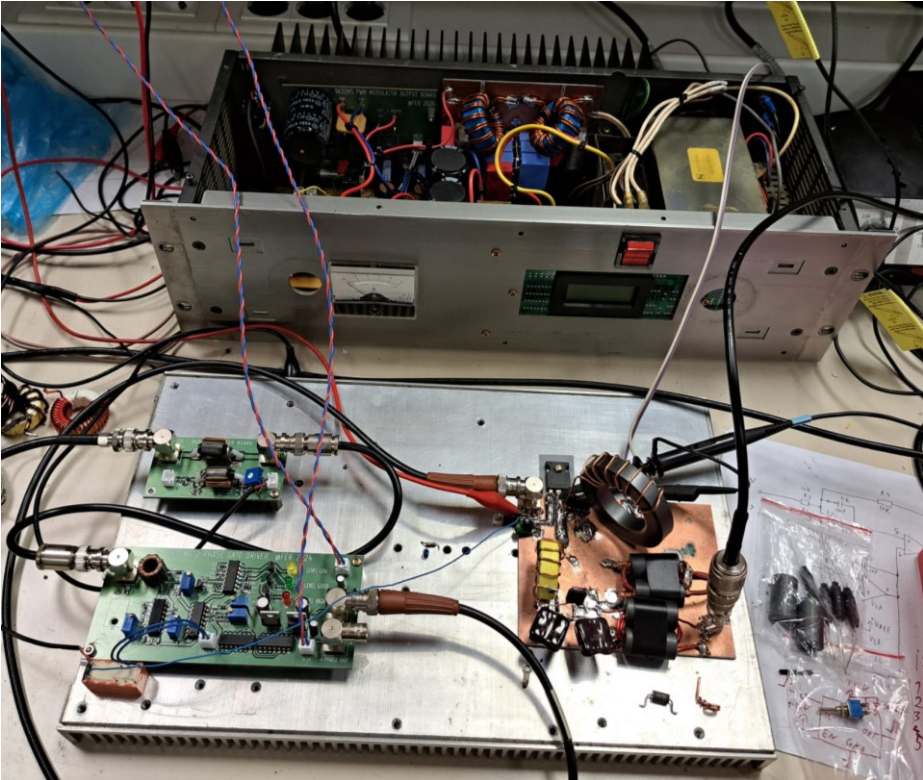


Slika 4.2 Valni oblici napona na aktivnom elementu(narančasto) i trošilu(žuto)

Utvrđen je fazni pomak između ulaznog signala u sustav pojačala i izlaznog signala iz sustava pojačala. Također provjerena je ispravnost valnih oblika pojačala klase E, postignut je valni oblik napona koji potvrđuje ZVS(*Zero Voltage Switching*) rad, prikazano na Slika 4.2



Slika 4.3 Oscilogram 2-tonskog testa, ulazni signal(narančasto), izlazni signal(žuto)



Slika 4.4 Pojačalo koje koristi tehniku uklanjanja i obnavljanja ovojnice signala

## Zaključak

U ovom radu provedena je diskusija i analiza pojačala odnosno sustava koji implementira tehniku uklanjanja i obnavljanja ovojnice signala. Postignut je zadovoljavajući stupanj linearnosti sustava. Važno je napomenuti da je cijeli sustav realiziran isključivo korištenjem analognih komponenti. Ostvaren je stupanj iskorištenja sustava od 90%. Pokazana je ovisnost stupnja iskorištenja pojačala klase E o vrijednostima elemenata izlazne mreže. Utvrđeni su nedostaci kod detektiranja ovojnice signala, od kojih je dominantan način ispravljanja signala na FWD prilazu usmjernog sprežnika. Utvrđena je pojava drugog i trećeg harmonika u izlaznom signalu, pa je za postizanje veće spektralne čistoće potrebno ugraditi harmonički filter. Također uočena je pojava izobličenja na izlazu serijskog PWM modulatora pri radu sa malim ulaznim signalima. Potrebno je više istraživanja u budućnosti za potpuno otklanjanje uočenih pojava.

## Literatura

- [1] L. R. Kahn, "*Single sideband transmission by envelope elimination and restoration*", Proc. IRE, vol. 40, pp. 803-806, July 1952.
- [2] I. Kim, Y. Y. Woo, S. Hong, and B. Kim, "*High efficiency hybrid EER transmitter for WCDMA application using optimized power amplifier,*" in Proc. IEEE European Microw. Conf., Munich, Germany, Oct. 2007, pp. 182–185.
- [3] Sontheimer, C & Frederick, *Broadband directional coupler*. US Patent 3,426,298.RE. Apr 1966.
- [4] Silver, H Ward *The ARRL handbook for radio communications*. 2011 ed. Newington: ARRL.
- [5] Grebenkemper, J. *The tandem match – an accurate directional wattmeter In QST*. Jan 1987.
- [6] Elliott, M. M. *Single sideband transmission by envelope elimination and restoration*. Master Thesis. United States Naval Postgraduate School, 1953.
- [7] Bonnie C. Baker, *Anti-Aliasing, Analog Filters for Data Acquisition Systems* 2002.
- [8] Analog Devices, Filter Basics: Anti-Aliasing, Analog (Siječanj 2002), Poveznica: <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/guide-to-antialiasing-filter-basics.html>; pristupljeno 18. lipnja 2024.
- [9] Texas Instruments, *Analysis of the Sallen-Key Architecture*, July 1999.
- [10] Analog Devices Inc. *Analog Filter Wizard*, poveznica: <https://tools.analog.com/en/filterwizard/>; pristupljeno 10. travnja 2024.
- [11] John Caldwell, *Analog Pulse Width Modulation*, Texas Instruments internal documentation, June 2013.
- [12] Arturo Mediano, *Class – E Amplifiers and Applications at MF, HF and VHF: Exmples and Applications*, (siječanj 2018) poveznica: [https://oa.upm.es/54834/1/INVE\\_MEM\\_2018\\_297638.pdf](https://oa.upm.es/54834/1/INVE_MEM_2018_297638.pdf); pristupljeno 17. Travnja 2024.

- [13] N. O. Sokal and A. D. Sokal, “*Class E: A new class of high-efficiency tuned single-ended switching power amplifiers*,” *IEEE J. SolidState Circuits*, vol. SC-10, no. 3, pp. 168–176, June 1975
- [14] Dec. 1977. [3] N. O. Sokal, “*Class-E high-efficiency RF/Microwave power amplifiers: Principles of operation, design procedures, and experimental verification*,” in *Analog Circuit Design: Scalable Analog Circuit Design, High-Speed D/A Converters, RF Power Amplifiers*, J. Huijsing, M. Steyaert, and A. van Roermund Dordrecht, Eds. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2002, pp. 269–301
- [15] A. Grebennikov, N. O. Sokal, and M. J. Franco, *Switch Mode RF and Microwave Power Amplifiers*, 2nd ed. New York: Academic, pp. 262, 272–276, 646–648.
- [16] David Paul Kimber, *Class E Amplifiers and their Modulation Behaviour*. Doctor thesis. The University of Birmingham, 2005.
- [17] Heising, R. A., “Modulation in Radio Telephony,” *Proceedings of the IRE*, Vol. 9, no.3, pg. 305, June 1921.
- [18] Borivoj Modlic, Ivan Modlic, *Modulacije i modulatori: serija Visokofrekvencijskaelektronika, Školska knjiga Zagreb, 1995.*
- [19] Rec. ITU-R SM.328-11, Spectra and bandwidth of emissions

## Sažetak

U poglavlju 1 opisan je početak razvoja tehnologije pojačala snage u radio frekvencijskom spektru. 1907. godine otkriven je novi elektronički element, vakuumska elektronska cijev zvana trioda, dolazi do ubrzanog razvoja novih grana elektronike i elektroničke industrije, a među njima i radiodifuzije na području dugog, srednjeg i kratkog vala. Pojedini sklopovi odašiljača koji su bili izvedeni u tehnologiji elektronskih cijevi postaju postupno zamijenjeni sa poluvodičkim komponentama otkrićem tranzistora 1947. godine. Tako je do 1980. godine, kroz svoju uporabu, tranzistor kao aktivni element istisnuo sve elektronske cijevi u pojedinim sklopovima RF odašiljača velike snage osim u izlaznom stupnju. Tu se do danas elektronska cijev zadržala kao element koji je nenadmašiv i robustan u primjeni za konstrukciju izlaznih stupnjeva odašiljača velike snage. Također u poglavlju 1 dan je kratki opis klasa pojačala snage, zastupljenost visoko efikasnih modulacija zahtjeva amplitudnu i faznu modulaciju signala. Glavna mana takvih postupaka modulacije odnosno signala je veliki omjer vršne i srednje snage signala što povlači zahtjev za korištenjem linearnih pojačala koja su izrazito energetska neučinkovita. Prikladnim tehnikama linearizacije signala i namjernim ograničavanjem signala uz odgovarajuće filtriranje moguće je korištenje nelinearnih pojačala visokog stupnja iskorištenja za pojačanje takvih signala.

U poglavlju 2 opisana je arhitektura pojačala koja koriste tehniku uklanjanja i obnavljanja ovojnice. Opisan je postupak i princip razdvajanja signala na amplitudnu i faznu komponentu kroz tehniku polarnog pristupa pojačanju. Opisani su sklopovi za detekciju ovojnice signala te sklopovi za oblikovanje pobudnih impulsa pojačala klase D, E. Sklop za detekciju ovojnice signala izveden je kao diodni detektor spojen na izlaz usmjernog spreznika. Sklop za oblikovanje pobudnih impulsa izveden je korištenjem TTL logičkih sklopova.

U poglavlju 3 opisana je arhitektura serijskog PWM modulatora kao pojačala signala ovojnice s visokim stupnjem iskorištenja. Ulazni stupanj modulatora čini predpojačalo izvedeno nisko šumnim operacijskim pojačalom. Nakon predpojačala spojen je aktivni antialiasing filter izveden korištenjem Sallen-Key topologije. Filtrirani signal ulazi u PWM generator kao referentna veličina, PWM generator izveden je korištenjem operacijskih pojačala u spoju generatora trokutastog signala i komparatora. Budući da je frekvencija

ovojnice signala niske frekvencije dovoljno je koristiti serijski pristup modulaciji napona. Aktivni element spojen je u seriju sa pozitivnom granom istosmjernog napajanja, konstruirana je DC izolacijska mreža korištenjem plivajućeg napajanja, optoizolatora i MOSFET drivera. Konačno izlazni signal filtriran je od svih visokofrekvencijskih smetnji nisko propusnim filterom 4. reda.

U poglavlju 4 opisan je princip rada, uvjeti i formule nelinearnog pojačala klase E. Provedena je analiza pojačala klase E u idealiziranim uvjetima. Realna izvedba posjeduje nešto lošije performanse zbog svojstava realnih komponenti.



# Summary

Chapter 1 describes the beginning of the development of power amplifier technology in the radio frequency spectrum. In 1907, a new electronic element was discovered, a vacuum electron tube called a triode, and there was an accelerated development of new branches of electronics and the electronic industry, including radio broadcasting in the field of long, medium and short waves. Certain transmitter assemblies that were made in electron tube technology were gradually replaced with semiconductor components by the discovery of the transistor in 1947. Thus, until 1980, through its use, the transistor as an active element displaced all electronic tubes in certain circuits of high-power RF transmitters, except in the output stage. Until today, the electron tube has remained there as an element that is unsurpassed and robust in application for the construction of output stages of high-power transmitters. Also in chapter 1, a brief description of power amplifier classes is given, now days representation of highly efficient modulations requires amplitude and phase modulation of the signal. The main disadvantage of such modulation and signal procedures is the large ratio of peak to average signal power, which forces us to use linear amplifiers that are extremely energy inefficient. With appropriate signal linearization techniques and intentional signal limiting with appropriate filtering, it is possible to use high efficiency nonlinear amplifiers to amplify such signals.

Chapter 2 describes the architecture of amplifiers using the envelope elimination and restoration technique. The procedure and principle of signal separation are into amplitude and phase components through the technique of polar approach are described. Circuits for detecting the signal envelope and circuits for shaping excitation pulses of class D, E amplifiers are described. The circuit for detecting the signal envelope is designed around directional coupler with diode detector on its output. The circuit for shaping excitation pulses is made using TTL logic circuits.

Chapter 3 describes the architecture of the serial PWM modulator as high efficiency envelope signal amplifier. The modulator input stage is preamplifier derived from a low-noise operational amplifier. After the preamplifier, an active Sallen-Key topology

antialiasing filter follows. Filtered signal enters the PWM generator as a modulating input, PWM generator circuitry is made using operational amplifiers. It consists of triangular signal generator and the comparator. Since the envelope frequency of the signal is low, it is sufficient to use a series approach to voltage modulation. The active element is connected in series with the positive branch of the DC power supply, a DC isolation network is constructed using a floating power supply, an optocoupler and a MOSFET driver. Finally, the output signal is filtered from all high-frequency interference with a 4th-order low-pass filter.

Chapter 4 describes the working principle, conditions and formulas of the class E nonlinear amplifier. The analysis of class E amplifier is carried out in idealized conditions. The real world version has slightly worse performance due to the properties of the non-ideal components.

## Skraćenice

AM	<i>Amplitude Modulation</i>	amplitudna modulacija
APSK	<i>Amplitude and Phase Shift Keying</i>	amplitudno-fazno pomaknuta modulacija
CW	<i>Continous Wave</i>	neprekinuti signal
EER	<i>Envelope Elimination and Restoration</i>	uklanjanje u obnavljanje ovojnice
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>	modulacija frekventnim posmakom
GBW	<i>Gain Bandwidth Product</i>	umnožak frekventnog opsega i pojačanja
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>	metal oksidni poluvodički tranzistor s efektom polja
OFDM	<i>Ortogonal Frequency Division Multiplex</i>	ortogonalno frekventno multipleksiranje
PAE	<i>Power Added Efficiency</i>	poboljšana učinkovitost
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>	fazno sinkronizirana petlja
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>	pulsno širinska modulacija
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>	kvadrantna amplitudna modulacija
RF	<i>Radio Frequency</i>	radio frekvencija
SR	<i>Slew Rate</i>	brzina porasta izlaznog napona
SSB	<i>Single Side Band</i>	jednostruki bočni pojas
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>	ukupna harmonička izobličenja
TTL	<i>Transistor To Transistor Logic</i>	logika tranzistor-tranzistor