

УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ  
ЕЛЕКТРОНСКИ ФАКУЛТЕТ

Александра Медведева 14 · Поштански фах 73  
18000 Ниш · Србија  
Телефон 018 529 105 · Телефакс 018 588 399  
E-mail: [efinfo@elfak.ni.ac.rs](mailto:efinfo@elfak.ni.ac.rs); <http://www.elfak.ni.ac.rs>  
Текући рачун: 840-1721666-89; ПИБ: 100232259



UNIVERSITY OF NIŠ  
FACULTY OF ELECTRONIC ENGINEERING

Aleksandra Medvedeva 14 · P.O. Box 73  
18000 Niš - Serbia  
Phone +381 18 529 105 · Fax +381 18 588 399  
E-mail: [efinfo@elfak.ni.ac.rs](mailto:efinfo@elfak.ni.ac.rs)  
<http://www.elfak.ni.ac.rs>

ДЕКАН  
13.08.2014.

О Б А В Е Ш Т Е Њ Е  
НАСТАВНИЦИМА И САРАДНИЦИМА ЕЛЕКТРОНСКОГ ФАКУЛТЕТА

Докторска дисертација кандидата **мр Александра Атанасковића** под насловом «Прилог побољшању линеарности микроталасних појачавача снаге» и Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације налазе се у Библиотеци Електронског факултета у Нишу и могу се погледати до **28.08.2014. године**.

Примедбе на наведени извештај достављају се декану Факултета у напред наведеном року.

ЕЛЕКТРОНСКИ ФАКУЛТЕТ У НИШУ  
Декан



*Проф. др. Драган Јанковић*



Примљено 13.08.2014

Број

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ЕЛЕКТРОНСКОГ ФАКУЛТЕТА У НИШУ

07/03-028/14-004

**Predmet:** Izveštaj Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata mr Aleksandra Atanaskovića

Na sednici Nastavno-naučnog veća Elektronskog fakulteta u Nišu od 03.07.2014. godine, po odluci broj 07/03-028/14-003, imenovana je Komisija za ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata mr Aleksandra Atanaskovića, pod naslovom

**“PRILOG POBOLJŠANJU LINEARNOSTI MIKROTALASNIH POJAČAVAČA SNAGE”**

u sastavu:

1. dr Bratislav Milovanović, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
2. dr Nataša Maleš-Ilić, vanredni profesor, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
3. dr Vera Marković, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet
4. dr Branka Jokanović, naučni savetnik, Univerzitet u Beogradu, Institut za fiziku
5. dr Olivera Pronić-Rančić, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet

Nakon pregleda navedene doktorske disertacije, Komisija podnosi Nastavno-naučnom veću Elektronskog fakulteta u Nišu sledeći

**IZVEŠTAJ**

Doktorska disertacija kandidata mr Aleksandra Atanaskovića napisana je u skladu sa Odlukom o dostavljanju doktorskih disertacija za repozitorijum Univerziteta u Nišu, SNU broj 8/16-01-006/13-007 od 05.07.2013. godine. Disertacija je napisana na 219 strana i sadrži 149 slika i 11 tabela. Disertacija je podeljena u osam glava: 1. Uvod; 2. Pojačavači snage; 3. Tehnike za poboljšanje efikasnosti pojačavača snage; 4. Nelinearnosti pojačavača snage i metode za linearizaciju; 5. Verifikacija predložene linearizacione metode kroz postupak simulacije; 6. Eksperimentalna verifikacija predložene linearizacione metode; 7. Zaključak i 8. Literatura.

U savremenim bežičnim komunikacionim sistemima, (WCDMA, CDMA-2000, 3G, 3.5G, LTE, 4G, ...) pri prenosu signala maksimalni nivo snage u odnosu na srednji nivo snage (PAR) je veoma visok, pa je potrebno da pojačavači snage u baznim stanicama ispunjavaju uslov što veće linearnosti kako bi se signali sa velikim PAR pojačavali sa malom distorzijom. U cilju zadovoljenja linearnosti, pojačavači snage se napajaju u klasi A ili AB i rade u oblasti daleko niže snage u odnosu na maksimalni nivo. Sa druge strane, potrebno je da pojačavači snage u baznim stanicama imaju veliku efikasnost. Pošto pojačavači snage rade u oblasti ispod maksimalnog nivoa snage da bi se zadovoljila linearnost, efikasnost u toj oblasti je mala. Stoga se velika pažnja poklanja razvoju metoda za povećanje efikasnosti i linearnosti pojačavača snage.

Istraživanja na polju linearizacije RF i mikrotalasnih pojačavač snage su trenutno veoma aktuelna u svetu i postavljaju pred istraživače nove izazove vezane za poboljšanje linearnosti i efikasnosti pojačavača snage kako bi se obezbedio jeftiniji i pouzdaniji rad savremenih bežičnih komunikacionih sistema. Stalne inovacije i poboljšanja na polju bežičnih komunikacionih sistema, kao i uvođenje sistema novih generacija koji rade na sve višim frekvencijskim i sa sve širim propusnim opsezima dodatno naglašavaju potrebu za razvojem novih i poboljšanjem već postojećih linearizacionih metoda.

U okviru ove doktorske disertacije razmatrani su efekti linearizacije mikrotalasnih pojačavača snage primenom metode koja koristi druge harmonike osnovnog signala (IM2) i nelinearnosti četvrtog reda koji se nalaze u opsegu frekvencija drugih harmonika (IM4) u cilju



smanjenja intermodulacionih produkata trećeg i petog reda. Istraživanje pomenute metode za linearizaciju omogućava razvoj tehnike koja može dostići i poboljšati efekte linearizacije mikrotalasnih pojačavača snage u odnosu na neke od postojećih linearizacionih metoda (*feedback, feedforward, predistorsion, digital predistortion,...*).

U uvodnom delu disertacije istaknut je značaj predložene teme, definisani su osnovni ciljevi i izložena je organizacija disertacije.

U drugoj glavi prikazane su osnovne karakteristike RF i mikrotalasnih pojačavača snage kao i opis i najznačajnije osobine različitih klasa pojačavača snage – klase A, AB, B, C, F, J, inverzno F, E, D i S.

U trećoj glavi opisane su najznačajnije tehnike koje se koriste za poboljšanje efikasnosti pojačavača snage, pri čemu je posebna pažnja posvećena *Doherty* pojačavačima kojima se može značajno povećati efikasnost pojačavača kada se kao ulazni signal koristi signal sa visokim PAR odnosom. Osim klasične *two-way Doherty* konfiguracije, prikazani su i osnovni principi projektovanja asimetričnog *two-way Doherty* pojačavača, *N-way* i *three-stage Doherty* pojačavača.

U okviru četvrte glave disertacije dat je uvod u nelinearni režim rada pojačavača, pregled nelinearnih efekata koji se javljaju prilikom rada pojačavača, kao i veličine kojim se definiše mera nelinearnosti pojačavača. Takođe, u okviru ove glave disertacije dat je kratak pregled postojećih metoda za linearizaciju, a potom je izvršena teorijska razrada metode za linearizaciju mikrotalasnih pojačavača snage koja koristi druge harmonike osnovnog signala i nelinearnosti četvrtog reda koji se nalaze u opsegu frekvencija drugih harmonika u cilju smanjenja intermodulacionih produkata trećeg i petog reda.

Glavni deo disertacije predstavlja verifikacija razmatrane linearizacione metode. Verifikacija je izvršena kroz proces simulacije i eksperimentalnim putem. Rezultati procesa simulacije prikazani su u petoj glavi disertacije. Razmatrani su višekanalni pojačavači snage (jednostepeni pojačavač i višestepeni kaskadni pojačavač), kao i veći broj *Doherty* pojačavačkih struktura, kako bi se pokazalo da razmatrana linearizaciona metoda daje dobre rezultate na različitim tipovima pojačavača. Prilikom linearizacije jednostepenog pojačavača korišćeni su dodatni generatori IM2 i IM4 signala potrebnih za linearizaciju, koji se posle obrade (podešavanje amplitude i faze) vode na ulaz i na izlaz pojačavača. Kod trostepenog kaskadnog pojačavača, kao generatori signala za linearizaciju iskorišćeni su pojedini stepeni pojačavača (prvi i drugi), a potom je linearizacioni signal nakon podešavanja amplitude i faze vođen, u jednom slučaju na ulaz u treći pojačavač u kaskadi, a u drugom slučaju na njegov izlaz.

*Doherty* pojačavači su se nametnuli kao izuzetno pogodne konfiguracije za linearizaciju razmatranom linearizacionom metodom. Naime, *Doherty* pojačavači se sastoje od jednog *carrier* pojačavača i jednog ili većeg broja *peaking* pojačavača. Kako *peaking* pojačavači rade u nelinearnoj oblasti, oni su iskorišćeni kao generatori linearizacionih signala. Kod *two-way* pojačavača, *peaking* pojačavač je iskorišćen kao generator linearizacionih signala, koji su se izdvajali sa njegovog izlaza, prolazili kroz delitelj snage i potom se obrađivali kroz dve nezavisne linearizacione grane. Nakon obrade, ovi signali su vođeni na ulaz i/ili izlaz *carrier* pojačavača kako bi se izvršila linearizacija celog *Doherty* pojačavača. Kod trostepenih *Doherty* struktura, koje imaju dva *peaking* pojačavača, linearizacioni signali su izdvajani sa izlaza oba *peaking* pojačavača, obrađivani kroz dve nezavisne linearizacione grane i potom vođeni na ulaz i izlaz *carrier* pojačavača. Da bi se omogućilo odvođenje linearizacionih signala sa izlaza *peaking* pojačavača i njihovo vođenje na ulaz i izlaz *carrier* pojačavača, bilo je neophodno modifikovati dobro poznate *Doherty* pojačavačke strukture ubacivanjem odgovarajućih dipleksera u kolo pojačavača, što je uspešno urađeno i predstavljeno u disertaciji. U disertaciji su predstavljeni rezultati linearizacije za klasičan *two-way Doherty* pojačavač, kao i za *three-way* i *three-stage Doherty* pojačavače. *Three-stage* pojačavači su projektovani sa tranzistorima iste i tranzistorima različite periferije. Dalje poboljšanje efikasnosti *three-stage Doherty* pojačavača urađeno je uvođenjem kola za kontrolu harmonika, a potom se pristupilo i proširenju frekvencijskog opsega tako projektovane *three-stage Doherty* konfiguracije,



što je ostvareno ubacivanjem odgovarajućih kondenzatora na ulaz i izlaz tranzistora u svim pojačavačkim stepenima *Doherty* konfiguracije. Na sve pomenute strukture je sa uspehom primenjena razmatrana linearizaciona metoda, kako za prostoperiodične signale, tako i za različite tipove digitalno moduliranih signala. Dobijeni rezultati potiskivanja intermodulacionih produkata na razmatranim pojačavačima snage prikazani su u disertaciji.

U cilju eksperimentalne verifikacije, projektovani su i realizovani jednostepeni pojačavač, *two-way Doherty* pojačavač i asimetričan *two-way Doherty* pojačavač. Rezultati eksperimentalne verifikacije razmatrane linearizacione metode predstavljeni su u glavi šest. Jednostepeni i *two-way Doherty* pojačavač su testirani i linearizovani za slučaj dva prostoperiodična signala bliskih frekvencija na ulazu (*two-tone* test), dok je na asimetričnom *two-way Doherty* pojačavaču linearizacija izvršena i za veći broj različitih digitalno moduliranih signala (64QAM signali sa različitom širinom spektra od 1 MHz do 10 MHz, WCDMA signal). Dobijeni eksperimentalni rezultati potiskivanja intermodulacionih produkata trećeg i petog reda u slučaju linearizacije za *two-tone* test, kao i rezultati poboljšanja ACPR i EVM za digitalno modulirane signale prikazani su u disertaciji. Takođe, za neke tipove digitalno moduliranih signala prikazani su konstelacioni dijagram i spektar signala na izlazu pojačavača pre i posle primenjene linearizacione metode, kako bi se uočio efekat koji primena predložene linearizacione metode ima na karakteristike signala.

U glavi sedam disertacije je dat zaključak, a potom i spisak korišćene literature u glavi osam.

Po oceni članova Komisije, glavni doprinos ove doktorske disertacije ogleda se u razvoju i implementaciji linearizacione metode koja koristi IM2 i IM4 signale u cilju poboljšanja linearnosti mikrotalasnih pojačavača snage. Komisija posebno ističe sledeće doprinose disertacije:

- razvoj linearizacione metode koja koristi IM2 i IM4 signale u cilju poboljšanja IM3 i IM5 produkata, koja se uspešno može primeniti u velikom opsegu snage osnovnih signala sve do blizu 1-dB tačke kompresije mikrotalasnih pojačavača snage;
- uvođenje obrade linearizacionog signala na frekvencijama duplo većim od frekvencije osnovnog signala, čime se minimizira uticaj linearizacionog signala na osnovni signal;
- primena i verifikacija razmatrane linearizacione metode na veliki broj različitih tipova pojačavača snage, pre svega na različite tipove *Doherty* pojačavačkih konfiguracija;
- modifikacija *Doherty* pojačavačkih struktura kojim se obezbeđuje da se *peaking* pojačavači koriste kao generatori linearizacionog signala;
- eksperimentalna primena razvijene linearizacione metode prilikom linearizacije realizovanih *two-way Doherty* pojačavača za analogne (*two-tone* test) i različite oblike digitalno moduliranih signala.

Disertacija je zasnovana na originalnim rezultatima naučno istraživačkog rada kandidata, koji su publikovani i prihvaćeni od strane stručne javnosti. Deo rezultata predstavljenih u doktorskoj disertaciji publikovan je u većem broju radova objavljenih u međunarodnim naučnim časopisima i izloženim na međunarodnim i nacionalnim skupovima. Jedan rad iz oblasti disertacije objavljen je u međunarodnom časopisu sa impakt faktorom (*Microwave and Optical Technology Letters, John Wiley & Sons, 2013, DOI: 10.1002/mop.27294*).

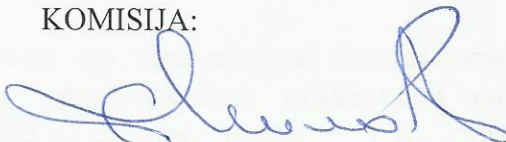


## ZAKLJUČAK

Na osnovu izvršenog uvida u doktorsku disertaciju mr Aleksandra Atanaskovića, Komisija smatra da disertacija sadrži niz originalnih naučnih doprinosa koji se odnose na linearizaciju mikrotalasnih pojačavača snage. Rezultati istraživanja su od značaja kako sa naučnog stanovišta, tako i sa stanovišta praktične primene. Kandidat je u okviru disertacije predstavio veći broj realizovanih pojačavačkih struktura na kojima je uspešno izvršio eksperimentalnu verifikaciju razvijene linearizacione metode. Jedan deo prikazanih rezultata je publikovan u internacionalnim časopisima i saopšten na naučnim skupovima u zemlji i inostranstvu.

Imajući u vidu aktuelnost obrađene problematike i ostvarene naučne rezultate kandidata, članovi Komisije predlažu Naučno-nastavnom veću Elektronskog fakulteta u Nišu da se doktorska disertacija pod naslovom **"Prilog poboljšanju linearnosti mikrotalasnih pojačavača snage"** prihvati i da se kandidatu mr Aleksandru Atanaskoviću odobri usmena odbrana ove disertacije.

KOMISIJA:



1. dr Bratislav Milovanović, redovni profesor  
Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet



2. dr Nataša Maleš-Ilić, vanredni profesor  
Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet



3. dr Vera Marković, redovni profesor  
Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet



4. dr Branka Jokanović, naučni savetnik  
Univerzitet u Beogradu, Institut za fiziku



5. dr Olivera Pronić-Rančić, redovni profesor  
Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet