

TEHNIČKO REŠENJE

Metoda za modelovanje signala struje u funkciji ugla provođenja sa primenom u analizi klase-F i inverzne klase-F pojačavača snage

**M-85: Prototip, nova metoda, softver, standardizovan ili atestiran instrument, nova
genetska proba, mikroorganizmi**

Autori:

Dr Anamarija Juhas, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu,

Dr Staniša Dautović, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu,

Dr Ladislav Novak, Indiana University, Computer Science Department, Bloomington, USA

Godina

2017

Podtip tehničkog rešenja:

Nova Metoda - M85

Korisnik:

Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, za potrebe daljih istraživanja

Projekat u okviru koga je realizovano tehničko rešenje:

Broj projekta: TR 32016 Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije

Program istraživanja u oblasti tehnološkog razvoja za period 2011-2017.

Tehnološka oblast: Elektronika, telekomunikacije i informacione tehnologije

Naziv projekta: Inovativne elektronske komponente i sistemi bazirani na neorganskim i organskim tehnologijama ugrađeni u robe i proizvode široke potrošnje

Rukovodilac projekta: dr Ljiljana Živanov, redovni profesor

Kako su rezultati verifikovani (od strane kog tela):

Verifikacija tehničkog rešenja je izvršena od strane:

Naučno-nastavnog veća Fakulteta tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu

1. Opis problema koji se rešava tehničkim rešenjem

Oblast na koju se tehničko rešenje odnosi

Teorija signala i sistema, teorija električnih kola, pojačavači snage

Problem koji se tehničkim rešenjem rešava

U ovom tehničkom rešenju analizirana je jedno-parametarska familija nenegativnih i neprekidnih signala struje za klasu-F i inverznu klasu-F pojačavača snage. U svakoj periodi signal struje jednak je nuli izvan intervala koji se naziva ugao provođenja. Furijeov razvoj ovih signala ima beskonačno mnogo harmonika, iako neki harmonici mogu biti jednaki nuli. Korišćena je uobičajena pretpostavka da je u signalu struje treći (drugi) harmonik jednak nuli za klasu-F (inverznu klasu-F) pojačavača snage. Prikazani su izrazi za parametre signala za obe klase pojačavača, kao i maksimalne efikasnosti u funkciji ugla provođenja. Osim optimalnih signala koji obezbeđuju maksimalnu efikasnost pojačavača, analizirani su i suboptimalni signali struje koji se mogu realizovati u tzv. ravni strujnog generatora tranzistora. Teorijski dobijeni modeli signala su korišćeni u simulacijama u dizajnu inverzne klase-F pojačavača snage sa CGH40010F HEMT. Kao praktična validacija predloženog pristupa, demonstrirano je izuzetno dobro slaganje teorijskih rezultata sa rezultatima dobijenim u simulacijama.

Zahvalnica

Zahvaljujemo se Cree Inc. na modelima GaN HEMT koji su korišćeni u simulacijama pojačavača snage. Takođe se zahvaljujemo Keysight Technologies Inc. na licenci za Advanced Design System (ADS) software.

2. Stanje rešenosti tog problema u svetu

Postoji kontinualan interes za pojačavače snage u klasi-F i njoj dualnoj inverznoj klasi-F [1]-[10]. Određivanje modela optimalnih i suboptimalnih nenegativnih signala za pojačavače snage je takođe od interesa u istraživanju i realizaciji pojačavača snage [5], [10]-[18] i predstavlja važnu kariku u dizajnu signala (eng. waveform engineering) [8], [17], [18].

U ovom tehničkom rešenju, posmatran je neprekidan nenegativan periodičan signal struje, koji je na osnovnoj periodi opisan izrazom

$$i_{(k)}(\tau) = \begin{cases} I_p [\cos \tau - \cos \tau_p - A_k (\cos k\tau - \cos k\tau_p)], & |\tau| \leq \tau_p, \\ 0, & \tau_p \leq |\tau| \leq 180^\circ, \end{cases} \quad (1)$$

gde τ označava ωt , $0 < 2\tau_p < 360^\circ$ je ugao provođenja, A_k je parametar, $I_p > 0$ je konstanta, i $k = 2$ ili $k = 3$. Signal tipa (1) je parna funkcija i njegov Fourijeov razvoj sadrži konstantu i kosinusne članove. Koeficijenti Furijeovog razvoja mogu se predstaviti u obliku:

$$I_{dc(k)} = \frac{I_p \tau_p}{\pi} \left\{ \text{sinc } \tau_p - \cos \tau_p - A_k [\text{sinc } k\tau_p - \cos k\tau_p] \right\}, \quad (2)$$

$$I_{1(k)} = \frac{I_p \tau_p}{\pi} \left\{ 1 - \text{sinc } 2\tau_p - k A_k [\text{sinc } (k-1)\tau_p - \text{sinc } (k+1)\tau_p] \right\}, \quad (3)$$

$$I_{n(k)} = \frac{I_p \tau_p}{n\pi} \left\{ \text{sinc } (n-1)\tau_p - \text{sinc } (n+1)\tau_p - k A_k [\text{sinc } (k-n)\tau_p - \text{sinc } (k+n)\tau_p] \right\}, \quad (4)$$

gde je $n \geq 1$, $\text{sinc } x = (\sin x)/x$ i $\text{sinc } (0) = 1$. Lako se vidi da promena parametra A_k menja ceo harmonijski sadržaj signala tipa (1).

Za pojačavače snage u klasi-F i inverznoj klasi-F, par signala čine signal struje tipa (1) i nenegativan signal napona koji sadrži jednosmernu komponentu, osnovni i n -ti harmonik:

$$v_{(n)}(\tau) = V_{dc} [1 - \gamma_{V(n)} (\cos \tau - a_n \cos n\tau)], \quad (5)$$

gde su $V_{dc} > 0$, $\gamma_{V(n)} > 0$ i $n = 2$ za inverznu klasu-F ili $n = 3$ za klasu-F pojačavača snage.

Signal struje tipa (1) uparen sa naponskim signalom tipa (5) sa $n = k$ pojavljuje se u tzv. biharmonijskom režimu rada pojačavača snage [19], [5]. U radu [10] je predložen dvo-parametarski

model nenegativnog signala struje za klasu-F i inverznu klasu-F pojačavača snage, koji je na osnovnoj periodi opisan izrazom:

$$i_{(k)DP}(\tau) = \begin{cases} I_p (A_{0(k)} + \cos \tau - A_k \cos k\tau), & |\tau| \leq \tau_p, \\ 0, & \tau_p < |\tau| \leq 180^\circ, \end{cases} \quad (6)$$

gde su $A_{0(k)}$ i A_k parametri, $I_p > 0$ konstanta, i $k = 2$ ili $k = 3$. Modelom (6) osim neprekidnih signala, obuhvaćeni su i signali sa prekidima u $\pm \tau_p$ koji su korišćeni u radu [3] u kontekstu klase-F i inverzne klase-F, a u radu [20] u kontekstu kontinualne klase-F pojačavača snage. Polazeći od (6), u [10] je pokazano da su signali struje koji obezbeđuju maksimalnu efikasnost neprekidni i da se mogu napisati u obliku (1). Model (1) se može dobiti iz modela (6) uvrštavanjem $A_{0(k)} = -\cos \tau_p + A_k \cos k\tau_p$.

Specijalan slučaj modela (1) je i model tzv. polusinusoidalnog signala struje koji se koristi za klasu-J (npr. [14]) i klasične klase pojačavača snage (npr. [5]),

$$i_{\text{classic}}(\tau) = \begin{cases} I_p (\cos \tau - \cos \tau_p), & |\tau| \leq \tau_p, \\ 0, & \tau_p \leq |\tau| \leq 180^\circ. \end{cases} \quad (7)$$

Signal tipa (7) može se dobiti direktno iz (1) uvrštavanjem $A_k = 0$.

Dvo-parametarski model neprekidnog signala struje pojačavača snage u biharmonijskom režimu rada sa $k = n = 2$ je analiziran u [21]. Taj model se takođe može dobiti iz (1) uvrštavanjem $k = 2$, $I_p = I_{\max} f(h_2, c)$, $\cos \tau_p - A_2 \cos 2\tau_p = -c/f(h_2, c)$ i $A_k = -h_2$.

U radovima [22], [23] je pokazano da amplituda i faza drugog harmonika na ulazu pojačavača snage ima značajan uticaj na ugao provođenja i samim tim performanse pojačavača. Na drugi harmonik se može uticati podešavanjem impedanse izvora ili injektovanjem drugog harmonika u ulaznom kolu pojačavača [22]-[27]. Signal struje analiziran u ovom tehničkom rešenju takođe se može koristiti u projektovanju pojačavača snage sa injektovanim drugim harmonikom, kao i u projektovanju pojačavača snage sa proizvoljnim impedansama u izlaznom kolu [13].

3. Detaljan opis tehničkog rešenja (uključujući i prateće ilustracije i tehničke crteže)

3.1. Optimalan signal struje

Prema definiciji klase-F i inverzne klase-F pojačavača snage, viši harmonici postoje u najviše jednom signalu strujno-naponskog para [1]. Za klasu-F pojačavača snage uobičajena pretpostavka je da je u signalu struje treći harmonik jednak nuli, $I_{3(k)} = 0$ (npr. [2], [3], [7]). Za klasu-F pojačavača naponski signal je tipa (5) sa $n = 3$. Za inverznu klasu-F pojačavača uobičajena pretpostavka je da je u signalu struje drugi harmonik jednak nuli, $I_{2(k)} = 0$ (npr. [2], [3]). Za inverznu klasu-F pojačavača naponski signal je tipa (5) sa $n = 2$. U nastavku teksta, strujni signal tipa (1) koji zadovoljava uslov $I_{n(k)} = 0$ označen je sa $i_{(k, I_n=0)}(\tau)$. S obzirom da $k \in \{2, 3\}$ i $n \in \{2, 3\}$, postoje četiri slučaja:

- (i) $n = k = 3$,
- (ii) $n = 3$ i $k = 2$,
- (iii) $n = k = 2$,
- (iv) $n = 2$ i $k = 3$.

Slučajevi (i) i (ii) odgovaraju klasi-F pojačavača, dok slučajevi (iii) i (iv) odgovaraju inverznoj klasi-F.

Furijeov koeficijent n -tog harmonika signala struje tipa (1) može se napisati u obliku (4). Parametar A_k signala tipa (1) koji zadovoljava i dodatni uslov $I_{n(k)} = 0$ u daljem tekstu je označen sa $A_{k(I_n=0)}$. Rešavanjem jednačine $I_{n(k)} = 0$ dobija se parametar A_k signala struje $i_{(k, I_n=0)}(\tau)$. Ovaj parametar je funkcija samo ugla provođenja:

$$A_{k(I_n=0)} = \frac{\text{sinc}(n-1)\tau_p - \text{sinc}(n+1)\tau_p}{k[\text{sinc}(k-n)\tau_p - \text{sinc}(k+n)\tau_p]}. \quad (8)$$

Slučaj (i), zamenom $n = 3$ i $k = 3$ u (8) nakon sređivanja dobija se

$$A_{3(I_3=0)} = \frac{4 \sin^3 \tau_p \cos \tau_p}{6 \tau_p - \sin 6 \tau_p}. \quad (9)$$

Slučaj (ii), zamenom $n = 3$ i $k = 2$ u (8) nakon sređivanja dobija se

$$A_{2(I_3=0)} = \frac{5 \cos \tau_p}{4(1 + 4 \cos^2 \tau_p)}. \quad (10)$$

Slučaj (iii), zamenom $n = 2$ i $k = 2$ u (8) nakon sređivanja dobija se

$$A_{2(I_2=0)} = \frac{8 \sin^3 \tau_p}{3(4 \tau_p - \sin 4 \tau_p)}. \quad (11)$$

Slučaj (iv), zamenom $n = 2$ i $k = 3$ u (8) nakon sređivanja dobija se

$$A_{3(I_2=0)} = \frac{5}{9(1 + 4 \cos^2 \tau_p)}. \quad (12)$$

Primetiti da se uvrštavanjem $A_k = A_{k(I_n=0)}$ u $i_{(k)}(\tau)$ dobija signal $i_{(k, I_n=0)}(\tau)$.

Analizom kritičnih tačaka signala tipa (1) sa $A_k = A_{k(I_n=0)}$ za sve kombinacije $k \in \{2, 3\}$ i $n \in \{2, 3\}$, dolazi se do zaključka da je signal struje tipa $i_{(k, I_n=0)}(\tau)$ nenegativan ako je $i_{(k, I_n=0)}(0) \geq 0$, tj. za

$$A_{k(I_n=0)} \leq \frac{1 - \cos \tau_p}{1 - \cos k \tau_p}. \quad (13)$$

Za $k = 2$ izraz (13) postaje

$$A_{2(I_n=0)} \leq \frac{1}{2(1 + \cos \tau_p)}, \quad (14)$$

dok se za $k = 3$ dobija

$$A_{3(I_n=0)} \leq \frac{1}{(1 + 2 \cos \tau_p)^2}. \quad (15)$$

Rešavanjem odgovarajućih nejednačina

$$\frac{4 \sin^3 \tau_p \cos \tau_p}{6 \tau_p - \sin 6 \tau_p} \leq \frac{1}{(1 + 2 \cos \tau_p)^2}, \quad (16)$$

u slučaju (i),

$$\frac{5 \cos \tau_p}{4(1 + 4 \cos^2 \tau_p)} \leq \frac{1}{2(1 + \cos \tau_p)}, \quad (17)$$

u slučaju (ii),

$$\frac{8 \sin^3 \tau_p}{3(4 \tau_p - \sin 4 \tau_p)} \leq \frac{1}{2(1 + \cos \tau_p)}, \quad (18)$$

u slučaju (iii),

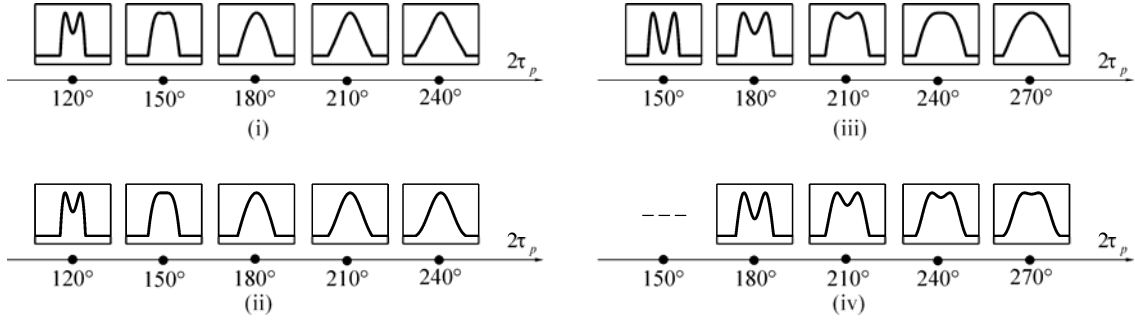
$$\frac{5}{9(1 + 4 \cos^2 \tau_p)} \leq \frac{1}{(1 + 2 \cos \tau_p)^2}, \quad (19)$$

u slučaju (iv), dobijaju se uglovi provođenja za koje je signal tipa $i_{(k, I_n=0)}(\tau)$ nenegativan, prikazani u tabeli 1. U sva četiri slučaja dobijeni uglovi provođenja uključuju sve uglove provođenja koji su od praktičnog interesa za klasu-F i inverznu klasu-F pojačavača snage (videti npr. [3]).

Tabela 1. Uglovi provođenja za koje je signal struje tipa $i_{(k, I_n=0)}(\tau)$ nenegativan.

slučaj	klasa pojačavača	n	k	Ugao provođenja $2\tau_p$
(i)	F	3	3	$2\tau_p \geq 97,4^\circ$
(ii)	F	3	2	$2\tau_p \geq 96,4^\circ$
(iii)	inverzna F	2	2	$2\tau_p \geq 146,4^\circ$
(iv)	inverzna F	2	3	$2\tau_p \geq 151,1^\circ$

Primeri strujnog signala tipa (1) koji zadovoljava dodatni uslov $I_{n(k)} = 0$ (optimalnih signala) prikazani su na slici 1. Primeri prikazani na slikama 1(i) i 1(ii) odgovaraju klasi-F pojačavača snage, dok primeri prikazani na slikama 1(iii) i 1(iv) odgovaraju inverznoj klasi-F pojačavača snage.



Slika 1. Primeri optimalnih signala struje za klasu-F i inverznu klasu-F pojačavača snage
(i) $n = 3, k = 3$, (ii) $n = 3, k = 2$, (iii) $n = 2, k = 2$, (iv) $n = 2, k = 3$.

3.2. Maksimalna efikasnost klase-F i inverzne klase-F pojačavača snage

U nastavku ovog tehničkog rešenja posmatraćemo samo nenegativne signale struje, odnosno ograničićemo se na uglove provođenja navedene u tabeli 1.

Efikasnost η pojačavača snage može se izračunati iz osnovnih parametara γ_I i γ_V strujnog i naponskog signala [1] na sledeći način

$$\eta = \frac{\gamma_I \gamma_V}{2}. \quad (20)$$

Na osnovu (2)-(3) osnovni parametar $\gamma_{I(k)} = I_{1(k)} / I_{dc(k)}$ signala struje $i_{(k)}(\tau)$ tipa (1) jednak je

$$\gamma_{I(k)} = \frac{1 - \text{sinc } 2\tau_p - kA_k [\text{sinc}(k-1)\tau_p - \text{sinc}(k+1)\tau_p]}{\text{sinc } \tau_p - \cos \tau_p - A_k [\text{sinc } k\tau_p - \cos k\tau_p]}. \quad (21)$$

Osnovni parametar optimalnog signala struje, tj. signala tipa $i_{(k, I_n=0)}(\tau)$, označićemo sa $\gamma_{I(k, I_n=0)}$. Ovaj parametar se lako dobija iz (21) uvrštavanjem $A_k = A_{k(I_n=0)}$,

$$\gamma_{I(k, I_n=0)} = \frac{1 - \text{sinc } 2\tau_p - kA_{k(I_n=0)} [\text{sinc}(k-1)\tau_p - \text{sinc}(k+1)\tau_p]}{\text{sinc } \tau_p - \cos \tau_p - A_{k(I_n=0)} [\text{sinc } k\tau_p - \cos k\tau_p]}. \quad (22)$$

Za zadat ugao provođenja vrednost parametra $A_{k(I_n=0)}$ može se izračunati iz (9), (10), (11) i (12) za $(n, k) = (3, 3)$, $(n, k) = (3, 2)$, $(n, k) = (2, 2)$ i $(n, k) = (2, 3)$, respektivno.

Maksimalna efikasnost klase-F i inverzne klase-F pojačavača snage dobija se kada su i naponski i strujni signal optimalni.

Za klasu-F pojačavača snage optimalan signal napona može se napisati u sledećem obliku [1]:

$$v_{(n=3)}(\tau) = V_{dc} \left[1 - \frac{2}{\sqrt{3}} \cos \tau + \frac{\sqrt{3}}{9} \cos 3\tau \right]. \quad (23)$$

Osnovni parametar γ_V ovog signala jednak je $\gamma_{V(n=3)} = 2/\sqrt{3}$. Na osnovu (20), efikasnost klase-F pojačavača snage sa optimalnim signalom napona (23) i optimalnim signalom struje $i_{(k, I_3=0)}(\tau)$ za $k \in \{2, 3\}$ (maksimalna efikasnost) jednaka je

$$\eta_{F(k)} = \gamma_{I(k, I_3=0)} / \sqrt{3}, \quad (24)$$

gde se $\gamma_{I(k, I_3=0)}$ može odrediti iz (22).

Za inverznu klasu-F pojačavača snage optimalan signal napona može se napisati u obliku [1]:

$$v_{(n=2)}(\tau) = V_{dc} \left[1 - \sqrt{2} \cos \tau + \frac{1}{2} \cos 2\tau \right]. \quad (25)$$

Osnovni parametar γ_V ovog signala jednak je $\gamma_{V(n=2)} = \sqrt{2}$. Na osnovu (20), efikasnost inverzne klase-F pojačavača snage sa optimalnim signalom napona (25) i optimalnim signalom struje $i_{(k, I_2=0)}(\tau)$ za

$k \in \{2, 3\}$ (maksimalna efikasnost) jednaka je

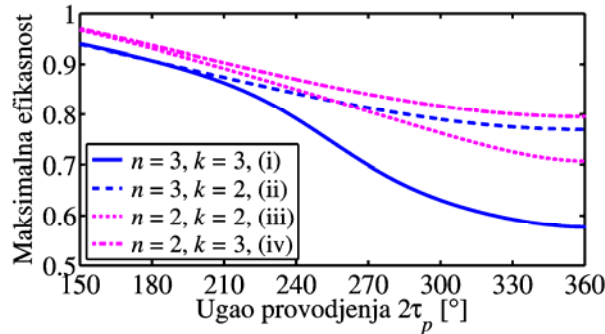
$$\eta_{\text{IF}(k)} = \gamma_{I(k, I_2=0)} / \sqrt{2}, \quad (26)$$

gde se $\gamma_{I(k, I_2=0)}$ može odrediti iz (22).

U tabeli 2 dat je pregled izraza za određivanja maksimalne efikasnosti klase-F i inverzne klase-F pojačavača snage u funkciji ugla provođenja. Maksimalne efikasnosti prikazane su na slici 2. Sa slike 2 se može uočiti da u sva četiri slučaja maksimalna efikasnost opada sa porastom ugla provođenja, kao i kod klasičnih klasa pojačavača snage.

Tabala 2. Maksimalna efikasnost klase-F i inverzne klase-F pojačavača snage.

Klasa-F, slučaj (i): $n = k = 3, 2\tau_p \geq 97,4^\circ$ $\eta_{\text{F}(k=3)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1 - \text{sinc } 2\tau_p - 3A_{3(I_3=0)} [\text{sinc } 2\tau_p - \text{sinc } 4\tau_p]}{\text{sinc } \tau_p - \cos \tau_p - A_{3(I_3=0)} [\text{sinc } 3\tau_p - \cos 3\tau_p]} \text{ gde je } A_{3(I_3=0)} = \frac{4 \sin^3 \tau_p \cos \tau_p}{6\tau_p - \sin 6\tau_p}$	
Klasa -F, slučaj (ii): $n = 3, k = 2, 2\tau_p \geq 96,4^\circ$ $\eta_{\text{F}(k=2)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1 - \text{sinc } 2\tau_p - 2A_{2(I_2=0)} [\text{sinc } \tau_p - \text{sinc } 3\tau_p]}{\text{sinc } \tau_p - \cos \tau_p - A_{2(I_2=0)} [\text{sinc } 2\tau_p - \cos 2\tau_p]} \text{ gde je } A_{2(I_2=0)} = \frac{5 \cos \tau_p}{4(1 + 4 \cos^2 \tau_p)}$	
Inverzna klasa-F, slučaj (iii): $n = k = 2, 2\tau_p \geq 146,4^\circ$ $\eta_{\text{IF}(k=2)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1 - \text{sinc } 2\tau_p - 2A_{2(I_2=0)} [\text{sinc } \tau_p - \text{sinc } 3\tau_p]}{\text{sinc } \tau_p - \cos \tau_p - A_{2(I_2=0)} [\text{sinc } 2\tau_p - \cos 2\tau_p]} \text{ gde je } A_{2(I_2=0)} = \frac{8 \sin^3 \tau_p}{3(4\tau_p - \sin 4\tau_p)}$	
Inverzna klasa-F, slučaj (iv): $n = 2, k = 3, 2\tau_p \geq 151,1^\circ$ $\eta_{\text{IF}(k=3)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1 - \text{sinc } 2\tau_p - 3A_{3(I_3=0)} [\text{sinc } 2\tau_p - \text{sinc } 4\tau_p]}{\text{sinc } \tau_p - \cos \tau_p - A_{3(I_3=0)} [\text{sinc } 3\tau_p - \cos 3\tau_p]} \text{ gde je } A_{3(I_3=0)} = \frac{5}{9(1 + 4 \cos^2 \tau_p)}$	



Slika 2. Maksimalna efikasnost klase-F i inverzne klase-F pojačavača snage.

3.3. Suboptimalni signal struje

Koeficijenti osnovnog i trećeg harmonika ($n=3$) optimalnog signala napona (23) za klasu-F pojačavača snage imaju suprotan predznak. Ako je izlazno kolo pojačavača snage pasivno, naponski signal (23) može biti uparen sa strujnim signalom tipa (1), samo ako je $I_{3(k)} \leq 0$.

Isto tako, koeficijenti osnovnog i drugog harmonika ($n=2$) optimalnog signala napona (25) za inverznu klasu-F imaju suprotan predznak. Ako je izlazno kolo pojačavača pasivno, naponski signal (25) može biti uparen sa strujnim signalom tipa (1) samo ako je $I_{2(k)} \leq 0$.

Pod suboptimalnim signalom struje podrazumeva se signali tipa (1), $k \in \{2, 3\}$, sa $I_{2(k)} \leq 0$ ili $I_{3(k)} \leq 0$ (za razliku od optimalnih signala kod kojih je $I_{2(k)} = 0$ ili $I_{3(k)} = 0$). U ovom odeljku analiza je proširena i na suboptimalne signale, koji su takođe od praktičnog interesa za klasu-F i inverznu klasu-F pojačavača snage.

Furijeov koeficijent n -tog harmonika signala struje tipa (1) može se odrediti iz (4). Lako je pokazati

da $\text{sinc}(k-n)\tau_p - \text{sinc}(k+n)\tau_p > 0$ za $2\tau_p \in (0, 360^\circ)$, $k \in \{2, 3\}$ i $n \in \{2, 3\}$. Prema tome, Furijeov koeficijent n -tog harmonika je ne-pozitivan, tj. ($I_{n(k)} \leq 0$), ako je

$$A_k \geq \frac{\text{sinc}(n-1)\tau_p - \text{sinc}(n+1)\tau_p}{k[\text{sinc}(k-n)\tau_p - \text{sinc}(k+n)\tau_p]}. \quad (27)$$

Vrednost parametra A_k za koju (27) prelazi u jednakost je $A_{k(I_n=0)}$ (izraz (8)). Sledi da se (27) može napisati u obliku

$$A_k \geq A_{k(I_n=0)}, \quad (28)$$

gde je $A_{k(I_n=0)}$ dato sa (9), (10), (11) i (12) za $(n, k) = (3, 3)$, $(n, k) = (3, 2)$, $(n, k) = (2, 2)$ i $(n, k) = (2, 3)$, respektivno.

Na osnovu (21), za zadat ugao provođenja osnovni parametar $\gamma_{I(k)}$ signala tipa (1) je funkcija samo od A_k . Prvi izvod od (21) po A_k može se izraziti u obliku

$$\frac{d\gamma_{I(k)}}{dA_k} = \frac{[1 - \text{sinc} 2\tau_p][\text{sinc} k\tau_p - \cos k\tau_p] - k[\text{sinc}(k-1)\tau_p - \text{sinc}(k+1)\tau_p][\text{sinc} \tau_p - \cos \tau_p]}{(\text{sinc} \tau_p - \cos \tau_p - A_k[\text{sinc} k\tau_p - \cos k\tau_p])^2}. \quad (29)$$

Znak (29) zavisi samo od znaka brojioca. Za $k=2$ brojilac je ne-pozitivan za sve uglove provođenja što pokazuje da se za $A_2 \geq A_{2(I_n=0)}$ dobija $\gamma_{I(2)} \leq \gamma_{I(2, I_n=0)}$ i samim tim odgovarajuća efikasnost je manja od maksimalne. Za $k=3$ brojilac je ne-pozitivan za $2\tau_p \leq 276,5^\circ$ što pokazuje da za $2\tau_p \leq 276,5^\circ$ iz $A_3 \geq A_{3(I_n=0)}$ sledi $\gamma_{I(3)} \leq \gamma_{I(3, I_n=0)}$ i odgovarajuća efikasnost je manja od maksimalne.

Sa druge strane, za $k=3$ i $2\tau_p \geq 277^\circ$ izvod (29) je pozitivan, što ukazuje na to da se za ove uglove provođenja mogu realizovati pojačavači snage čija je efikasnost veća od efikasnosti klase-F i inverzne klase-F pojačavača snage.

3.3.1. Električno kolo pojačavača snage

Posmatrajmo pojačavač snage prikazan na slici 3. Signali napona i struje u izlaznom kolu tranzistora mogu se napisati kao:

$$v(\tau) = V_{dc} + \sum_{m=1}^M V_m \cos(m\tau + \theta_m), \quad (30)$$

$$i(\tau) = I_{dc} + \sum_{m=1}^M I_m \cos(m\tau + \psi_m). \quad (31)$$

Pod uobičajenim pretpostavkama da se kondenzator C_b ponaša kao kratak spoj, a prigušnica L_{ch} kao otvorena veza na osnovnom i svim višim harmonicima, naponski i strujni signal na prijemniku su:

$$v_L(\tau) = \sum_{m=1}^M V_m \cos(m\tau + \theta_m),$$

$$i_L(\tau) = -\sum_{m=1}^M I_m \cos(m\tau + \psi_m).$$

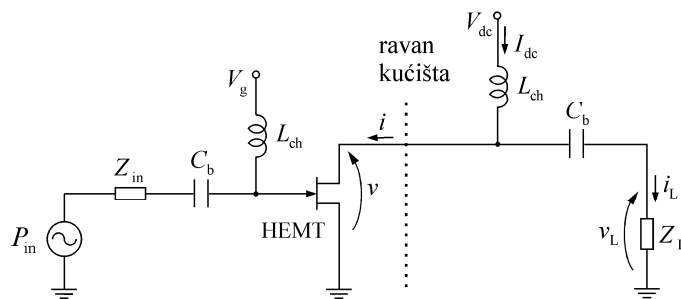
Impedansa prijemnika na m -tom harmoniku može se odrediti kao

$$\underline{Z}_{L,m} = -\frac{V_m e^{j\theta_m}}{I_m e^{j\psi_m}}. \quad (32)$$

Za pasivan prijemnik ($\text{Re}\{\underline{Z}_{L,m}\} \geq 0$) važi $\cos(\theta_m - \psi_m) \leq 0$. Efikasnost pojačavača snage sa signalima (30)-(31) može se odrediti kao (videti npr. [5]):

$$\eta = -\frac{\text{Re}\{V_1 e^{j\theta_1} \cdot I_1 e^{-j\psi_1}\}}{2V_{dc} I_{dc}} = -\frac{V_1 I_1}{2V_{dc} I_{dc}} \cos(\theta_1 - \psi_1), \quad (33)$$

gde je $P_1 = -(1/2) \text{Re}\{V_1 e^{j\theta_1} \cdot I_1 e^{-j\psi_1}\}$ snaga na osnovnom harmoniku, a $P_{dc} = V_{dc} I_{dc}$ snaga izvora u izlaznom kolu pojačavača snage.



Slika 3. Električna šema pojačavača snage.

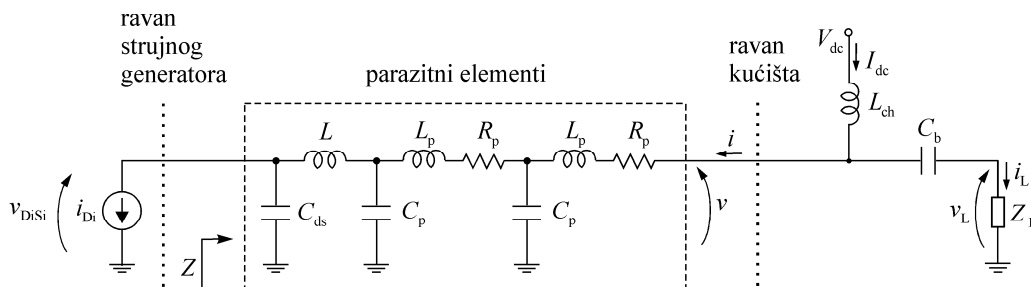
3.3.2. Simulacija pojačavača snage

Električno kolo pojačavača snage korišćeno u simulacijama prikazano je na slici 3. Za simulacije pojačavača snage korišćena je harmonijska balans analiza (eng. harmonic balance analysis) koja je podesna za analizu nelinearnih električnih kola. Simulacije su realizovane u programskom paketu Advanced Design System (ADS).

Dizajniran je pojačavač snage koji radi u inverznoj klasi-F. Odabrana je frekvencija $f_0 = 900\text{ MHz}$ ($\omega_0 = 2\pi f_0$) koja se koristi u mobilnoj telefoniji i ulazna snaga $P_{in} = 18\text{ dBm}$. Za napone napajanja u kolu drejna i gejta usvojeni su $V_{dc} = 28\text{ V}$ i $V_g = -1,95\text{ V}$, respektivno. Za kapacitivnost kondenzatora za blokiranje jednosmerne komponente usvojeno je $C_b = 1\text{ }\mu\text{F}$, a za induktivnost prigušnice $L_{ch} = 1\text{ }\mu\text{H}$.

U simulacijama je korišćen model za velike signale (eng. large signal model) tranzistora CGH40010F GaN HEMT dobijen od proizvođača Cree Inc. Ovaj model omogućava pristup virtuelnim krajevima koji su smešteni na samom aktivnom elementu [8]. Ti krajevi se naziva unutrašnji (eng. intrinsic) drejn i sors. Na taj način moguće je posmatrati unutrašnje signale v_{DiSi} i i_{Di} (slika 4), bez uticaja parazitnih elemenata [8]. Osim toga, kao važan deo dizajna signala, da bi se utvrdila klasa rada pojačavača snage, neophodno je analizirati unutrašnje signale u ravni strujnog generatora [8], [18]. Ovako napredan model tranzistora, omogućava da dizajneri tragaju za praktičnim oblicima signala koji aproksimiraju teorijski izvedene signale [8], [18].

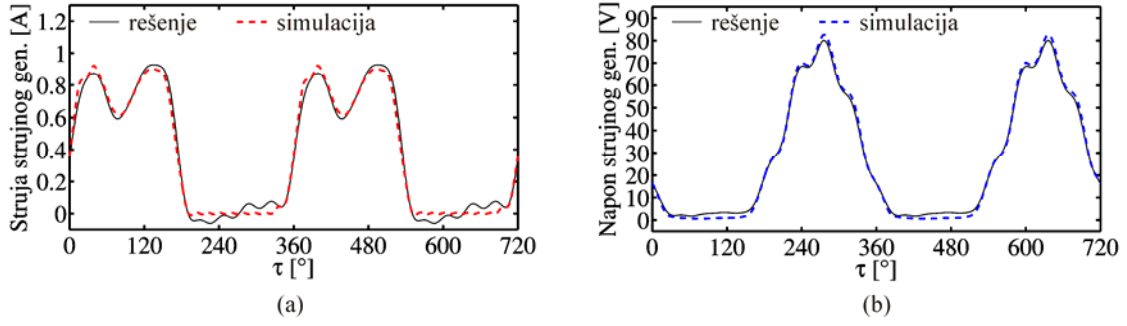
Aproksimativna ekvivalentna šema parazitnih elemenata CGH40010F prikazana na slici 4 predložena je u radu [18]. Vrednosti parazitnih elemenata su [18]: $C_{ds} = 1,22\text{ pF}$, $L = 0,55\text{ nH}$, $C_p = 0,25\text{ pF}$, $L_p = 0,1\text{ nH}$ i $R_p = 0,1\text{ }\Omega$.



Slika 4. Električna šema parazitnih elemenata CGH40010F [18]. Unutrašnja ravan (ravan strujnog generatora) i ravan kućišta označene su tačkastim linijama, v_{DiSi} i i_{Di} označavaju napon i struju strujnog generatora.

3.3.2.1. Analiza modela parazitnih elemenata CGH40010F

U cilju analize modela parazitnih elemenata tranzistora CGH40010F, u okviru ovog tehničkog rešenja realizovan je programski kod koji rešava električno kolo prikazano na slici 4. Za zadatu struju i (koja se može meriti jer se nalazi u ravni kućišta, slika 4) programski kod određuje unutrašnje signale: struju i napon strujnog generatora. Struja strujnog generatora dobijena u simulaciji (isprekidana crvena linija), kao i ona dobijena rešavanjem kola sa slike 4 (puna crna linija), prikazane su na slici 5a. Napon strujnog generatora dobijen u simulaciji (isprekidana plava linija), kao i napon dobijen rešavanjem kola sa slike 4 (puna crna linija), prikazani su na slici 5b. Ovi rezultati pokazuju da se ekvivalentno kolo prikazano na slici 4 može koristiti za određivanje inicijalnih vrednosti impedanse prijemnika na osnovnom, drugom i trećem harmoniku: $Z_{L,1}$, $Z_{L,2}$ i $Z_{L,3}$.



Slika 5. Signali dobijeni u simulaciji i rešavanjem električnog kola sa slike 4: (a) i_{Di} i (b) v_{DiSi} .

U simulacijama, kao početne vrednosti za impedansu koja se vidi iz ravni strujnog generatora (slika 4) na osnovnom, drugom i trećem harmoniku su izabrane vrednosti koje odgovaraju inverznoj klasi-F pojačavača snage. Izabrane početne vrednosti na osnovnom, drugom i trećem harmoniku su $Z_1 = 70\Omega$, $Z_2 = 700\Omega$ i $Z_3 = 0\Omega$. Polazeći od ovih vrednosti, određene su početne vrednosti za impedansu prijemnika na osnovnom i drugom harmoniku: $Z_{L,1} = (48,5 + j29)\Omega$ i $Z_{L,2} = (3,8 + j45,9)\Omega$. Na trećem harmoniku dobija se $Z_{L,3} = (-0,2 - j13,7)\Omega$. S obzirom da je impedansa prijemnika po pretpostavci pasivna (ima nenegativan realan deo), za početnu vrednost impedanse prijemnika na trećem harmoniku je izabrano $Z_{L,3} = -j13,7\Omega$.

Početna vrednost za impedansu Z_{in} (slika 3) na osnovnom harmoniku je izabrana korišćenjem S-parametara za male signale tranzistora CGH40010 date u [28]. Za CGH40010 sa $Z_{L,1} = (48,5 + j29)\Omega$ korišćenjem S-parametara za male signale (na 900 MHz i $I_{DQ} = 100\text{mA}$), dobija se da ulazna impedansa tranzistora iznosi $(1,1 - j10,6)\Omega$. Za početnu vrednost impedanse izvora na osnovnom harmoniku usvojena je konjugovano-kompleksna vrednost, tj. $Z_{in,1} = (1,1 + j10,6)\Omega$. Za početne vrednosti na drugom i trećem harmoniku usvojeno je $Z_{in,2} = 0,5\Omega$ i $Z_{in,3} = 50\Omega$.

3.3.3. Rezultati simulacije pojačavača snage baziranog na CGH40010F

Prema [18], teorijski oblici signala predstavljaju smernice za oblike signala pojačavača snage koji se mogu praktično realizovati. Pomenuti pristup smo primenili tokom simulacija: tragalili smo za parom signala u ravni strujnog generatora takvim da i_{Di} bude što sličnija sa signalom tipa (1), a v_{DiSi} što bliži optimalnom signalu (25) sa osnovnim i drugim harmonikom.

Kao rezultat, dizajniran je pojačavač snage u inverznoj klasi-F sa $\eta_{intrinsic}^{sim} = 0,8845$ unutrašnjom efikasnošću, $\eta^{sim} = 0,8682$ efikasnošću i $P_{out} = 39,69\text{dBm}$ izlaznom snagom na frekvenciji 900 MHz. Vrednosti impedanse prijemnika na osnovnom, drugom i trećem harmoniku su: $Z_{L,1} = (54,4 + j32,5)\Omega$, $Z_{L,2} = j65\Omega$ i $Z_{L,3} = -j15\Omega$. Vrednosti impedanse izvora na osnovnom, drugom i trećem harmoniku su: $Z_{in,1} = (2,8 + j13)\Omega$, $Z_{in,2} = 0,5\Omega$ i $Z_{in,3} = 50\Omega$.

Na osnovu rezultata simulacija uočeno je da vrednost $Z_{in,2}$ utiče na ugao provođenja, što je takođe primećeno i u [22]. Dizajn prezentovan u ovom tehničkom rešenju ima manji ugao provođenja u odnosu na rešenje prikazano u našem radu [10]. Kao rezultat toga pojačavač opisan u ovom tehničkom rešenju ima veću efikasnost, što takođe ilustruje trend prikazan na slici 2, tj. da se efikasnost smanjuje sa porastom ugla provođenja.

Simulirani unutrašnji signali v_{DiSi} i i_{Di} (signali u ravni strujnog generatora, slika 4) mogu se napisati u obliku

$$v_{DiSi}(\tau_s) = V_{0,DiSi} + \sum_{m=1}^M V_{m,DiSi} \cos(m\tau_s + \theta_{m,s}), \quad (34)$$

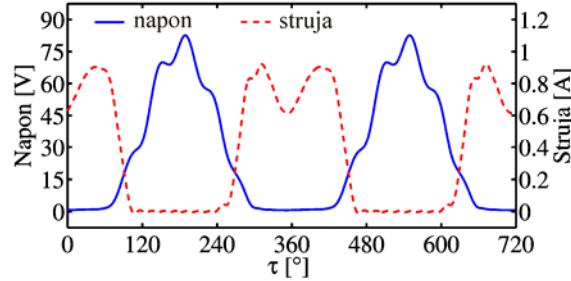
$$i_{Di}(\tau_s) = I_{0,Di} + \sum_{m=1}^M I_{m,Di} \cos(m\tau_s + \psi_{m,s}), \quad (35)$$

gde M označava red harmonijske balans analize. S obzirom da se kao rezultat simulacije dobija da je početna faza osnovnog harmonika $i_{Di}(\tau_s)$ različita od nule, napisan je programski kod za iščitavanje rezultata simulacija i transliranje signala u vremenu za $-\psi_{1,s}$. Zamenom promenljivih $\tau_s \rightarrow \tau - \psi_{1,s}$ signali (34)-(35) dobijaju oblik

$$v_{DiSi}(\tau) = V_{0,DiSi} + \sum_{m=1}^M V_{m,DiSi} \cos(m\tau + \theta_{m,sh}), \quad (36)$$

$$i_{Di}(\tau) = I_{0,Di} + \sum_{m=1}^M I_{m,Di} \cos(m\tau + \psi_{m,sh}), \quad (37)$$

gde je $\theta_{m,sh} = \theta_{m,s} - m\psi_{1,s}$ i $\psi_{m,sh} = \psi_{m,s} - m\psi_{1,s}$. Signali napona i struje strujnog generatora izraženi u obliku (36)-(37) su prikazani na slici 6. Njihove amplitude i početne faze za $m \leq 5$ date su u tabeli 3. Iz ovih podataka može se videti da signal napona ima izražen drugi harmonik, dok su viši harmonici ($m = 3, 4, 5$) mali. Razlika početnih faza osnovnog i drugog harmonika ($\theta_1 - \theta_2 \approx 184^\circ$) je bliska idealnoj razlici koja iznosi 180° i manifestuje se u zaravnjenju naponskog signala.



Slika 6. Unutrašnji signali tranzistora dobijeni u simulaciji: v_{DiSi} (puna plava linija) i i_{Di} (isprekidana crvena linija).

Tabela 3. Amplitude i početne faze harmonika signala prikazanih na slici 6.

m	$V_{m,DiSi}$ [V]	$\theta_{m,sh}$ [°]	$I_{m,Di}$ [A]	$\psi_{m,sh}$ [°]
0	27,743	0,000	0,383	0,000
1	38,492	177,235	0,489	0,000
2	11,840	-6,913	0,014	-103,157
3	0,158	32,448	0,198	-174,505
4	0,451	84,760	0,077	-171,647
5	0,625	-117,585	0,041	-12,518

Podaci dobijeni u simulaciji su iskorišćeni da se izračunaju vrednosti impedansi koje se vide iz ravni strujnog generatora (slika 3) na svakom od harmonika ($m \geq 1$) korišćenjem sledećeg izraza

$$\underline{Z}_m = -\frac{V_{m,DiSi} e^{j\theta_{m,sh}}}{I_{m,Di} e^{j\psi_{m,sh}}}. \quad (38)$$

Vrednosti $\underline{Z}_m$, njihovi moduli Z_m i argumenti φ_m za $m \leq 5$ prikazani su u tabeli 4. Impedansa koja se vidi iz ravni strujnog generatora na osnovnom harmoniku $\underline{Z}_1 = (78,691 - j3,800)\Omega$ ima mali imaginarni deo. Osim toga, $Z_2 > 10 \cdot Z_1$, $Z_3 < Z_1/10$ i $Z_4 < Z_1/10$. Ove relacije pokazuju da je moduo impedanse na drugom harmoniku velik, dok su moduli impedansi na trećem i četvrtom harmoniku mali. Moduo impedanse na petom harmoniku je $Z_5 \approx Z_1/5$. Ove vrednosti impedanse koja se vidi iz ravni strujnog generatora potvrđuju da simulirani pojačavač snage radi u inverznoj klasi-F.

Tabela 4. Impedanse koje se vide iz ravni strujnog generatora.

m	$\underline{Z}_m$ [Ω]	Z_m [Ω]	φ_m [°]
1	78,691-j3,800	78,782	-2,765
2	92,996-j849,952	855,024	-83,756
3	0,712+j0,362	0,799	26,953
4	1,377+j5,694	5,858	76,406
5	3,977+j14,774	15,300	74,933

Unutrašnji signali (36) i (37) u normalizovanom obliku mogu se napisati kao

$$v_{DiSi_norm}(\tau) = \frac{v_{DiSi}(\tau)}{V_{0,DiSi}} = 1 + \sum_{m=1}^M (a_{mv} \cos m\tau + b_{mv} \sin m\tau), \quad (39)$$

$$i_{Di_norm}(\tau) = \frac{i_{Di}(\tau)}{I_{0,Di}} = 1 + \sum_{m=1}^M (a_{mi} \cos m\tau + b_{mi} \sin m\tau). \quad (40)$$

Furijeovi koeficijenti normalizovanih signala $v_{DiSi_norm}(\tau)$ i $i_{Di_norm}(\tau)$ za $m \leq 5$ prikazani su u tabeli 5.

Tabela 5. Furijeovi koeficijenti normalizovanih signala.

m	a_{mv}	b_{mv}	a_{mi}	b_{mi}
0	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
1	-1,3858	-0,0669	1,2765	0,0000
2	0,4237	0,0514	-0,0082	0,0352
3	0,0048	-0,0031	-0,5144	0,0495
4	0,0015	-0,0162	-0,1988	0,0292
5	-0,0104	0,0200	0,1042	0,0231

Struja strujnog generatora dobijena u simulaciji je aproksimirana signalom tipa (1). Za aproksimaciju je korišćen normalizovan signal tipa (1) sa $k = 2$, $A_2 = 0,42$ i $\tau_p = 98^\circ$ (ugao provođenja $2\tau_p = 196^\circ$), koji glasi

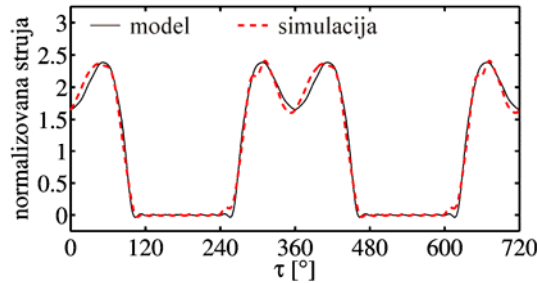
$$i^{\text{mod}}(\tau) = \begin{cases} 5,2742[\cos \tau - \cos 96^\circ - 0,42(\cos 2\tau - \cos 196^\circ)], & |\tau| \leq 98^\circ, \\ 0, & 98^\circ \leq |\tau| \leq 180^\circ. \end{cases} \quad (41)$$

Normalizovana struja strujnog generatora dobijena u simulaciji (isprekidana crvena linija) i $i^{\text{mod}}(\tau)$ (puna crna linija) prikazane su na slici 7. Sa slike se može uočiti dobro slaganje oblika ovih signala. Osim toga, osnovni parametar struje dobijene u simulaciji (tabela 5 $\gamma_I^{\text{sim}} = a_{li}$) i osnovni parametar signala $i^{\text{mod}}(\tau)$ (izračunat iz (21)) su

$$\gamma_I^{\text{sim}} = 1,2765, \quad (42)$$

$$\gamma_I^{\text{mod}} = 1,2770, \quad (43)$$

respektivno. Maksimalne vrednosti strujnih signala su takođe veoma bliske.



Slika 7. Normalizovana struja strujnog generatora dobijena u simulaciji (isprekidana crvena linija) i matematički model $i^{\text{mod}}(\tau)$ (puna crna linija).

Izračunaćemo sada maksimalnu efikasnost inverzne klase-F pojačavača snage sa optimalnim signalom tipa (1) za ugao provođenja $2\tau_p = 196^\circ$ i optimalnim signalom napona (25). Osnovni parametar optimalnog signala tipa (1) za ugao provođenja $2\tau_p = 196^\circ$ jednak je $\gamma_{I,\text{max}} = 1,2876$ (što odgovara vrednosti $A_{2(I_2=0)} = 0,4103$). Osnovni parametar optimalnog signala napona (25) je $\gamma_{V,\text{max}} = \sqrt{2}$. Maksimalna efikasnost inverzne klase-F pojačavača snage za $2\tau_p = 196^\circ$ jednaka je (videti tabelu 2)

$$\eta_{\text{max}} = \frac{1}{2} \gamma_{I,\text{max}} \gamma_{V,\text{max}} = \frac{1}{2} \cdot 1,2876 \cdot \sqrt{2} = 0,9105. \quad (44)$$

Uzimajući u obzir napon kolena (eng. knee voltage) HEMTa, koji smo na osnovu rezultata simulacija procenili na $V_{\text{knee}} \approx 0,5 \text{ V}$, najveća vrednost osnovnog parametra napona je manja i iznosi

$$\gamma_V^{\text{knee}} = \gamma_{V,\text{max}} \frac{V_{0,\text{DiSi}} - V_{\text{knee}}}{V_{0,\text{DiSi}}} = \gamma_{V,\text{max}} \cdot 0,982 = \sqrt{2} \cdot 0,982 = 1,3888. \quad (45)$$

Odgovarajuća najveća efikasnost je jednaka

$$\eta_{\text{max}}^{\text{knee}} = \frac{1}{2} \gamma_{I,\text{max}} \gamma_{V,\text{max}} \cdot 0,982 = \eta_{\text{max}} \cdot 0,982 = 0,8941. \quad (46)$$

U simulaciji je dobijeno da unutrašnja efikasnost pojačavača iznosi

$$\eta_{\text{intrinsic}}^{\text{sim}} = \frac{1}{2} \gamma_I^{\text{sim}} \gamma_V^{\text{sim}} = \frac{1}{2} \cdot 1,2765 \cdot 1,3858 = 0,8845, \quad (47)$$

(na osnovu tabele 5 je $\gamma_I^{\text{sim}} = a_{li} = 1,2765$ i $\gamma_V^{\text{sim}} = -a_{lv} = 1,3858$). Razlika između $\eta_{\text{max}}^{\text{knee}}$ i $\eta_{\text{intrinsic}}^{\text{sim}}$ se

pojaviła jer je $\gamma_I^{\text{sim}} \approx 0,99\gamma_{I,\text{max}}$. Sa druge strane, za efikasnost pojačavača sa strujnim signalom (41) i optimalnim signalom napona, uzimajući u obzir napon kolena, dobija se

$$\eta_{\text{mod}}^{\text{knee}} = \frac{1}{2}\gamma_I^{\text{mod}}\gamma_{V,\text{max}} \cdot 0,982 = \frac{1}{2} \cdot 1,2770 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,982 = 0,8867 \approx \eta_{\text{intrinsic}}^{\text{sim}}. \quad (48)$$

Prethodno razmatranje pokazuje da se signal tipa (1) može uspešno koristiti kao aproksimacija strujnog signala dobijenog u simulaciji. Da bi se dodatno kvantifikovao kvalitet aproksimacije, u tabeli 6 su prikazane vrednosti sledeća tri indikatora

- a) koeficijenta međusobne korelacije (označen sa XCORR u tabeli 6),
- b) koeficijenta determinacije (označen sa R2 u tabeli 6),
- c) srednja kvadratna devijacija (označena sa MSD u tabeli 6).

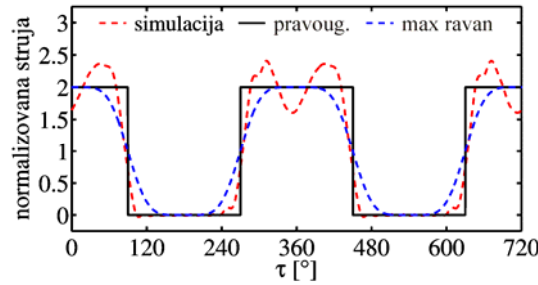
Opseg vrednosti za sva tri indikatora je interval [0,1]. Aproksimacija je bolja ako je: XCORR bliže 1, R2 bliže 1 i MSD bliže 0. Vrednosti sva tri indikatora, prikazane u tabeli 6, pokazuju da model (41) predstavlja dobru aproksimaciju strujnog signala dobijenog u simulaciji.

Tabela 6. Vrednosti indikatora za ocenu kvaliteta aproksimacije simuliranog signala struje sa signalom (41).

Skraćenice korišćene u tabeli su objašnjene u tekstu.

XCORR	R2	MSD
0,9966	0,9930	0,0069

U dostupnoj literaturi, kao modeli signala struje za inverznu klasu-F pojačavača snage pojavljuju se pravougaoni signal sa uglom provođenja $2\tau_p = 180^\circ$ (npr. [5]) i maksimalno zaravnjen signal sa osnovnim i trećim harmonikom, ili osnovnim, trećim i petim harmonikom (npr. [18]). Na slici 8 su prikazana ova dva signala zajedno sa signalom struje dobijenim u simulaciji. Sva tri signala su normalizovana tako da im je jednosmerna komponenta jednaka 1. Sa slika 7 i 8 se lako može zaključiti da model signala (41) razvijen u okviru ovog tehničkog rešenja predstavlja znatno bolju aproksimaciju u odnosu na druga dva korišćena modela.



Slika 8. Normalizovana struja strujnog generatora dobijena u simulaciji (isprekidana crvena linija), pravougaoni signal sa $2\tau_p = 180^\circ$ (puna crna linija) i maksimalno zaravnjen signal sa osnovnim, trećim i petim harmonikom (isprekidana plava linija).

3.4. Kako je realizovano tehničko rešenje i gde se primenjuje, odnosno koje su mogućnosti primene

Tehničko rešenje obuhvata analitičku metodu za određivanje optimalnih signala struje za klasu-F i inverznu klasu-F pojačavača snage u funkciji ugla provođenja. Osim optimalnih signala, koji se u praksi teško realizuju, analizirani su i suboptimalni signali koji se mogu dobiti u ravni strujnog generatora tranzistora. U okviru primene opisane metode, dizajniran je pojačavač snage u inverznoj klasi-F baziran na CGH40010F GaN HEMT, koji se nalazi u širokoj upotrebi u sistemima bežičnih telekomunikacija. Dizajn pojačavača opisan u ovom tehničkom rešenju pokazuje da se sa suboptimalnim signalom struje može dobiti efikasnost bliska maksimalnoj.

Predloženo tehničko rešenje koriste istraživači sa Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu u aktivnostima koje se odnose na analizu pojačavača snage, kao i za dalja istraživanja.

Predložena metoda za modelovanje signala može se koristiti i u nastavnom procesu, npr. za demonstracije na predavanjima ili vežbe na računaru. Primenom modela opisanog u ovom tehničkom rešenju moguće je ilustrovati dobro slaganje teorijskih rezultata i rezultata dobijenih simulacijom, čime je omogućeno da se na primerima demonstrira projektovanje pojačavača snage koje je bazirano na dizajnu signala.

4. Literatura

- [1] F. H. Raab, "Maximum efficiency and output of class-F power amplifiers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, no. 6, pp. 1162-1165, 2001.
- [2] Y. Y. Woo, Y. Yang, B. Kim, "Analysis and experiments for high-efficiency class-F and inverse class-F power amplifiers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 5, pp. 1969-1974, 2006.
- [3] J. H. Kim, G. D. Jo, J. H. Oh, Y. H. Kim, K. C. Lee and J. H. Jung, "Modeling and design methodology of high-efficiency class-F and class-F⁻¹ power amplifiers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 59, no. 1, pp. 153-165, 2011.
- [4] J. Moon, S. Jee, J. Kim, J. Kim and B. Kim, "Behaviors of class-F and class-F⁻¹ amplifiers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 60, no. 6, pp. 1937-1951, 2012.
- [5] A. Grebennikov, N. O. Sokal and M. J. Franco, *Switchmode RF Power Amplifiers*, Elsevier/Academic Press, San Diego, Calif, USA, 2nd edition, 2012.
- [6] A. Juhas and L. A. Novak, "Maximally flat waveforms with finite number of harmonics in class-F power amplifiers," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2013, Article ID 169590, 9 pages, 2013.
- [7] S. Iguchi S, A. Saito, K. Watanabe, T. Sakurai and M. Takamiya, "Design method of class-F power amplifier with output power of 20 dBm and efficient dual supply voltage transmitter," *IEEE Transaction on Circuits and Systems-I: Regular Papers*, vol. 61, no. 10, pp. 2978-2986, 2014.
- [8] R. S. Pengelly, W. Pribble, and T. Smith, "Inverse class-F design using dynamic loadline GaN HEMT models to help designers optimize PA efficiency (Application Note)," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 15, no. 6, pp. 134-147, 2014.
- [9] A. Juhas and L. A. Novak, "Closed form of optimal current waveform for class-F PA up to fourth harmonic," *Sadhana*, vol. 40, no. 2, pp. 425-436, 2015.
- [10] A. Juhas, S. Dautovic and L. A. Novak, "On optimal truncated biharmonic current waveforms for class-F and inverse class-F power amplifiers," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2017, Article ID 1390295, 19 pages, 2017.
- [11] F. H. Raab, "Class-E, class-C, and class-F power amplifiers based upon a finite number of harmonics," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, no. 8, pp. 1462-1468, 2001.
- [12] J. D. Rhodes, "Output universality in maximum efficiency linear power amplifiers," *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 31, no. 4, pp. 385-405, 2003.
- [13] M. Roberg and Z. Popović, "Analysis of high-efficiency power amplifiers with arbitrary output harmonic terminations," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 59, no. 8, pp. 2037-2048, 2011.
- [14] T. Canning, P. J. Tasker, and S. C. Cripps, "Continuous mode power amplifier design using harmonic clipping contours: theory and practice," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 62, no. 1, pp. 100-110, 2014.
- [15] A. Juhas and L. A. Novak, "General description of nonnegative waveforms up to second harmonic for power amplifier modelling," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2014, Article ID 709762, 18 pages, 2014.
- [16] A. Juhas and L. A. Novak, "Conflict set and waveform modelling for power amplifier design," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, Article ID 585962, 29 pages, 2015.
- [17] P. J. Tasker, "Practical waveform engineering," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 10, no. 7, pp. 65-76, 2009.
- [18] P. J. Tasker and J. Benedikt, "Waveform inspired models and the harmonic balance emulator," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 12, no. 2, pp. 38-54, 2011.
- [19] N. S. Fuzik, "Biharmonic modes of a tuned RF power amplifier," *Radiotekhnika*, vol. 25, no. 7, pp. 62-71, 1970 (Russian).
- [20] T. Sharma, R. Darraji, F. Ghannouchi and N. Dawar, "Generalized continuous class-F harmonic tuned power amplifiers," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 26, no. 3, pp. 213-215, 2016.
- [21] P. Colantonio, F. Giannini, G. Leuzzi and E. Limiti, "Theoretical facet and experimental results of harmonic tuned PAs," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 13, pp. 459-472, 2003.
- [22] A. Dani, Z. Popović, "PA efficiency and linearity enhancement using external harmonic injection," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 60, no. 12, pp. 4097-4106, 2012.
- [23] H. Jang, P. Roblin, and Z. Xie, "Model-based nonlinear embedding for power-amplifier design," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 62, no. 9, pp. 1986-2002, 2014.

- [24] A. AlMuhaisen, P. Wright, J. Lees, P. J. Tasker, S. C. Cripps, J. Benedikt, "Novel wide band high-efficiency active harmonic injection power amplifier concept," *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, 2010, pp. 664–667.
- [25] A. Ramadan, T. Reveyrand, A. Martin, J. M. Nebus, P. Bouysse, L. Lapierre, J. F. Villemazet, and S. Forestier, "Experimental study on effect of second-harmonic injection at input of classes F and F⁻¹ GaN power amplifiers prediction," *Electronics Letters*, vol. 46, no. 8, pp. 570–572, 2010.
- [26] A. Ramadan, T. Reveyrand, A. Martin, J. Nebus, P. Bouysse, L. Lapierre, J. Villemazet, and S. Forestier, "Two-stage GaN HEMT amplifier with gate-source voltage shaping for efficiency versus bandwidth enhancements," *Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 59, no. 3, pp. 699–706, 2011.
- [27] M. Haynes, S. C. Cripps, J. Benedikt, and P. J. Tasker, "PAE improvement using 2nd harmonic source injection at X-band," *Integr. Nonlinear Microw. Millim.-Wave Circuits Workshop*, 2012, pp. 1–3.
- [28] CGH40010 Rev 4.0, Data Sheet, Available: <http://www.wolfspeed.com/rf> [Posećeno 24. 01. 2017.].



УНИВЕРЗИТЕТ
У НОВОМ САДУ



ФАКУЛТЕТ
ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад, Република Србија
Деканат: 021 6350-413; 021 450-810; Централa: 021 485 2000
Рачуноводство: 021 458-220; Студентска служба: 021 6350-763
Телефакс: 021 458-133; e-mail: ftndeans@uns.ac.rs

ИНТЕГРИСАНИ
СИСТЕМ
МЕНАџМЕНТА
СЕРТИФИКОВАН ОД:



Ваш број: _____

Датум: 2017-04-12

ИЗВОД ИЗ ЗАПИСНИКА

Наставно-научног већа Факултета техничких наука у Новом Саду, на 33. редовној седници одржаној дана 29.03.2017. године, донело је следећу одлуку:

-непотребно изостављено-

Тачка 11.2. Верификација нових техничких решења и именовање рецензента

Тачка 15.2.2.: У циљу верификације новог техничког решења усвајају се рецензенти:

1. Доц. др Вељко Папић, Електротехнички факултет у Београду
2. Проф. др Татјана Грбић, ФТН Нови Сад

Назив техничког решења:

“МЕТОДА ЗА МОДЕЛОВАЊЕ СИГНАЛА СТРУЈЕ У ФУНКЦИЈИ УГЛА ПРОВОЂЕЊА СА ПРИМЕНОМ У АНАЛИЗИ КЛАСЕ-Ф И ИНВЕРЗНЕ КЛАСЕ-Ф ПОЈАЧИВАЧА СНАГЕ”

Аутори техничког решења: Анамарија Јухас, Станиша Даутовић, Ладислав Новак.

-непотребно изостављено-

Записник водила:

Јасмина Димић, дипл. правник

Тачност података оверава:
Секретар

Иван Нешковић, дипл. правник

Декан

Проф. др Раде Дорословачки

RECENZIJA TEHNIČKOG REŠENJA

"Metoda za modelovanje signala struje u funkciji ugla provođenja sa primenom u analizi klase-F i inverzne klase-F pojačavača snage"

autori: Anamarija Juhas, Staniša Dautović i Ladislav Novak
projekat: TR32016 Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja

Kratak prikaz razmatranog tehničkog rešenja

Razmatrano tehničko rešenje se bavi problemima iz oblasti dizajna signala za klasu-F i inverznu klasu-F pojačavača snage. Problem razmatran u tehničkom rešenju je modelovanje optimalnih neprekidnih signala struje u funkciji ugla provođenja (tzv. „odsečeni“ ili eng. „truncated“ signali, koji su u svakoj periodi jednaki nuli izvan intervala koji se naziva ugao provođenja). Problem određivanja optimalnih nenegativnih signala struje u funkciji ugla provođenja je u potpunosti rešen u analitičkom obliku, a zatim su na osnovu analitičkih rešenja određene maksimalne efikasnosti pojačavača snage u klasi-F i inverznoj klasi-F. Analiza je proširena i na suboptimalne signale, koji su takođe od praktičnog interesa pri projektovanju pojačavača snage u klasi-F i inverznoj klasi-F. Analitička rešenja su upoređena sa rezultatima simulacije rada pojačavača snage baziranog na tranzistoru CGH40010F GaN HEMT. Pojačavač je projektovan da radi u klasi F^{-1} na osnovnoj učestanosti 900MHz, koja se koristi u mobilnoj telefoniji. Sprovedena harmonijska balansna analiza, koja je odgovarajuća za analizu nelinearnih električnih kola, je pokazala kvantitativnu i kvalitativnu saglasnost teorijski modelovanih signala struje sa signalima struje dobijenim u simulaciji. Signal struje dobijen u simulaciji je dodatno upoređen sa drugim modelima (poput pravougaonog i maksimalno zaravnjenog) koji se često koriste u dizajnu pojačavača snage u klasi F^{-1} . Kvantitativni pokazatelji koji mere sličnost signala jasno pokazuju da je model signala struje razvijen u ovom tehničkom rešenju precizniji i bolji u odnosu na do sada korišćene modele.

Ocena tehničkog rešenja

Tehničko rešenje donosi niz originalnih rezultata autora. Problemi su razmatrani sa neophodnom matematičkom strogošću i sveobuhvatno rešeni u analitičkom obliku. Razvijeni modeli signala struje potpunije i tačnije opisuju signale dobijene u računarskoj simulaciji rada projektovanog pojačavača snage u inverznoj klasi-F, u poređenju sa modelima koji su do sada korišćeni u dostupnoj literaturi i inženjerskoj praksi. Sumirajući izneto, radi se o originalnom tehničkom rešenju koje će unaprediti stanje u oblasti dizajna signala pojačavača snage koji rade u klasama F i F^{-1} .

Značaj ostvarenih rezultata

Razmatrani problem je aktuelan i za njegovo rešavanje postoji inženjerski interes, o čemu svedoči niz članaka objavljenih u poslednjih nekoliko godina u vodećim naučno-istraživačkim časopisima. Osim za klase F i F^{-1} , razvijeni model signala struje se može koristiti i u slučaju režima rada sa injektovanim harmonikom, kao i u situacijama u kojima se pojavljuje neidealni polusinusoidalni signal struje (npr. u klasi-J ili klasičnim klasama pojačavača snage).

Zaključak

Kao recenzent ovog tehničkog rešenja, smatram da je ono originalno, primenjivo, svrsishodno i značajno u oblasti dizajna signala pojačavača snage. U tom smislu ga pozitivno ocenjujem i predlažem da se tehničko rešenje "Metoda za modelovanje signala struje u funkciji ugla provođenja sa primenom u analizi klase-F i inverzne klase-F pojačavača snage", čiji su autori Anamarija Juhas, Staniša Dautović i Ladislav Novak prihvati i klasifikuje kao rezultat "M85-nova metoda".

Beograd,
31. mart 2017.



Doc. dr Veljko Papić
Elektrotehnički fakultet
Univerzitet u Beogradu

РЕЦЕНЗИЈА ПРЕДЛОЖЕНОГ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

Предмет: Мишљење о испуњености критеријума за признавање техничког решења

Назив Техничког решења

Метода за моделовање сигнала струје у функцији угла провођења са применом у анализи класе-Ф и инверзне класе-Ф појачавача снаге

Аутори: Анамарија Јухас, Станиша Даутовић и Ладислав Новак

Техничко решење је развијено у оквиру пројекта технолошког развоја ТР-32016,
руководилац пројекта: проф. др Љиљана Живанов

Категорија Техничког решења: М85, подтип решења: нова метода

Образложење

У техничком решењу је приказана аналитичка метода за моделовање оптималних и субоптималних сигнала струје за класу-Ф и инверзну класу-Ф појачавача снаге. Сигнали струје су ненегативни и континуални, а добијају се одсецањем тзв. бихармонијских сигнала са основним и другим или трећим хармоником. Полазећи од Фуријеовог развоја анализираних сигнала струје, одређена је вредност параметра оптималног сигнала у функцији угла провођења, и на основу тога максималне ефикасности појачавача снаге у класи-Ф и инверзној класи-Ф.

Осим услова да су други односно трећи хармоник у сигналу струје једнаки нули, који су уобичајени за анализу класе-Ф и инверзне класе-Ф појачавача снаге, разматрани су и субоптимални сигнали, код којих је други односно трећи хармоник једнак или мањи од нуле.

У оквиру примене аналитичких описа сигнала дизајниран је појачавач снаге у инверзној класи-Ф. За симулацију рада дизајнираног појачавача снаге коришћен је савремен софтверски алат за анализу нелинеарних електричних кола. Сигнали добијени у симулацијама су упоређени са теоријски изведеним сигнаlima по неколико критеријума: слагање тзв. основног параметра сигнала, њиховог облика, максималних вредности, као и коришћењем квантитативних индикатора за оцену квалитета апроксимације. Ефикасност појачавача добијена у симулацији се веома добро слаже са ефикасношћу коју предвиђа развијени теоријски модел.

Приказани резултати представљају допринос у дизајну сигнала (waveform engineering) за појачаваче снаге. У техничком решењу је показано да се коришћењем математичког модела сигнала може дизајнирати појачавач снаге високе ефикасности.

Закључак

На основу свега наведеног, предлажем да се Техничко решење под називом „Метода за моделовање сигнала струје у функцији угла провођења са применом у анализи класе-Ф и инверзне класе-Ф појачавача снаге“ чији су аутори Анамарија Јухас, Станиша Даутовић и Ладислав Новак прихвати као ново техничко решење на пројекту ТР-32016 Министарства просвете, науке и технолошког развоја и класификује као резултат: **М85 – НОВА МЕТОДА.**

У Новом Саду,
03. 04. 2017. год.

Проф. др Татјана Грбић,
Универзитет у Новом Саду, ФТН





УНИВЕРЗИТЕТ
У НОВОМ САДУ



ФАКУЛТЕТ
ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад, Република Србија
Деканат: 021 6350-413; 021 450-810; Централa: 021 485 2000
Рачуноводство: 021 458-220; Студентска служба: 021 6350-763
Телефакс: 021 458-133; e-mail: ftndean@uns.ac.rs

ИНТЕГРИСАНИ
СИСТЕМ
МЕНАџМЕНТА
СЕРТИФИКОВАН ОД:



Наш број: 01.сл

Ваш број:

Датум: 2017-04-21

ИЗВОД ИЗ ЗАПИСНИКА

Наставно-научно веће Факултета техничких наука у Новом Саду, на 33. редовној седници одржаној дана 26.04.2017. године, донело је следећу одлуку:

-непотребно изостављено-

ТАЧКА 15. 2. Верификација нових техничких решења и именовање рецензената

Тачка 15.2.3.: На основу позитивног извештаја рецензената верификује се техничко решење (М85) под називом:

**“МЕТОДА ЗА МОДЕЛОВАЊЕ СИГНАЛА СТРУЈЕ У ФУНКЦИЈИ УГЛА
ПРОВОЂЕЊА СА ПРИМЕНОМ У АНАЛИЗИ КЛАСЕ-Ф И ИНВЕРЗНЕ
КЛАСЕ-Ф ПОЈАЧИВАЧА СНАГЕ”**

Аутори техничког решења: Анамарија Јухас, Станиша Даутовић, Ладислав Новак.

-непотребно изостављено-

Записник водила:

Јасмина Димић, дипл. правник

Тачност података оверава:
Секретар

Иван Нешковић, дипл. правник

Декан



Проф. др Раде Дорословачки