

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET U BEOGRADU
KATEDRA ZA ELEKTRONIKU
ENERGETSKA ELEKTRONIKA
LABORATORIJSKE VEŽBE

VEŽBA BROJ 4:
UPRAVLJANJE BUCK KONVERTOROM:
IMPULSNO-ŠIRINSKA MODULACIJA

Autori: Predrag Pejović i Vladan Božović

A. OPIS VEŽBE

Vežba obuhvata niz merenja na maketi buck konvertora kod koga je regulacija izlaznog napona ostvarena primenom impulsno-širinske modulacije (*PWM, pulse width modulation*) pobudnih impulsa prekidačkog tranzistora. Cilj vežbe je upoznavanje sa načinom rada impulsno-širinskog modulatora i snimanje njegove karakteristike. Drugi cilj vežbe je upoznavanje sa stabilnim i nestabilnim radom regulatora i uočavanje efekata nestabilnosti. Treći cilj je upoznavanje sa uticajem tipa regulatora i njegovih parametara na dinamički odziv konvertora pri impulsnoj promeni opterećenja.

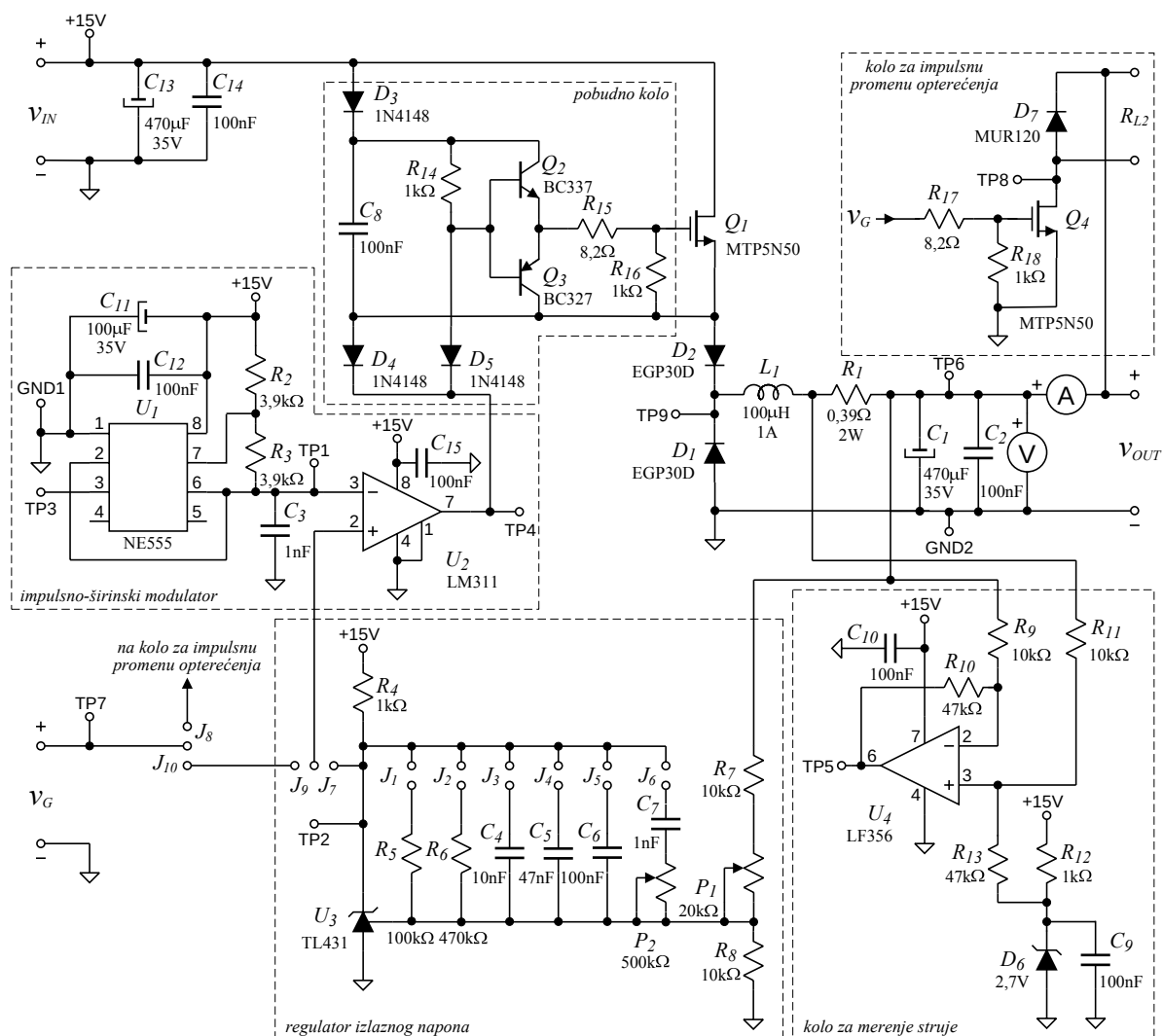
Pre vežbe treba proučiti materijal sa predavanja koji se odnosi na dinamički model buck konvertora i tehniku upravljanja konvertorom primenom impulsno-širinske modulacije. Osim toga, potrebno je da se poznaje rad integrisanog kola NE555 u funkciji astabilnog multivibratora, što je obrađeno u predmetu Analogni elektronika, kao i da se prouče karakteristike i način primene za integrisana kola TL431 i LM311, kako bi se razumela njihova funkcija u kolu. Podaci za korišćena integrisana kola se mogu pronaći na internetu. Korisno je da studenti poznaju osnove korišćenja programa Matlab i MS Excel, što će ubrzati izračunavanja i uštedeti vreme.

B. POTREBAN PRIBOR I INSTRUMENTI

1. maketa buck konvertora sa PWM regulatorom i kolom za impulsnu promenu opterećenja
2. generator signala
3. izvor jednosmernog napona 15 V
4. ampermetar
5. voltmetar
6. osciloskop
7. otpornici za impulsnu promenu opterećenja $8,2 \Omega / 4,5 \text{ W}$, $16,5 \Omega / 9 \text{ W}$ ($2 \times 33 \Omega / 4,5 \text{ W}$) i $47 \Omega / 3 \text{ W}$
8. računar na kome je instaliran potreban softver (OpenChoice Desktop, Excel, Matlab, Word)
9. BNC/BNC kabl za sinhronizaciju
10. RS232 kabl za povezivanje osciloskopa i računara
11. reostat 100Ω

C. OPIS MAKETE

Šema veze makete buck konvertora sa impulsno-širinskom modulacijom prikazana je na slici 4.1. Maketa sadrži buck konvertor, kolo za pobudu prekidačkog tranzistora, impulsno-širinski modulator, regulator izlaznog napona, kao i dva podsistema koji nisu deo samog konvertora, a to su kolo za merenje struje kalema i kolo za impulsnu promenu opterećenja. Buck konvertor i kolo za pobudu prekidačkog tranzistora su realizovani na isti način kao u vežbi 2.



Slika 4.1. Maketa buck konvertora sa impulsno-širinskom modulacijom

Regulator izlaznog napona je realizovan primenom integrisanog kola TL431, koje sadrži izvor referentnog napona i pojačavač greške. Predviđena je mogućnost izbora proporcionalnog, integralnog ili proporcionalno-integralnog tipa regulatora izlaznog napona.

Impulsno-širinski modulator se sastoji od oscilatora sa integrisanim kolom NE555 i komparatora LM311. Teorijski, oscilator trebao da generiše trougaoni napon, međutim primenjeni oscilator generiše naponske segmente eksponencijalne zavisnosti od vremena.

Kolo za impulsnu promenu opterećenja je uvedeno kako bi se ispitivao dinamički odziv konvertora. Na kolo za impulsnu promenu opterećenja se povezuje pomoćni potrošač R_{L2} , koji kolo za impulsnu promenu opterećenja naizmenično uključuje i isključuje, prema signalu koji dobija iz generatora signala.

Na maketi se nalaze dva višeostrtna potencijometra, P1 i P2. Potencijometrom P1 reguliše se izlazni napon konvertora, dok se potencijometrom P2 podešava konstanta proporcionalnog dejstva proporcionalno-integralnog regulatora. Pre uključenja konvertora klizač potencijometra P1 postaviti u smeru strelice na maketi u krajnji položaj kome odgovara minimalna otpornost, odnosno izlazni napon od 5 V.

Na maketi se nalaze tri grupe pozicija za džampere, od kojih u svakoj grupi uvek treba da se nalazi postavljen tačno jedan džemper. Prvu grupu čine pozicije za izbor tipa i parametara regulatora izlaznog napona, označene sa J1 do J6. Ako drugačije nije naglašeno, smatra se da se džemper nalazi na poziciji J5, koja odgovara integralnom regulatoru izlaznog napona sa kondenzatorom kapacitivnosti 100 nF.

Drugu grupu pozicija za džampere čine pozicije J7 i J9. Ako je džemper u poziciji J7 izlazni napon je regulisan pomoću integrisanog kola TL431 i to je podrazumevana pozicija džampera. U poziciji J9 spolja dovedeni napon se dovodi na impulsno-širinski modulator i reguliše rad konvertora.

Treću grupu pozicija za džampere čine pozicije J8 i J10. Džemper na poziciji J8 vodi signal sa generatora signala na kolo za impulsnu promenu opterećenja i to je podrazumevani položaj džampera. U položaju J10 signal sa generatora signala se vodi na impulsno-širinski modulator. Džamperi J7 i J8, odnosno J9 i J10 uvek se postavljaju u paru.

D. ZADATAK

Povezati ampermetar i voltmetar na mesta na maketi označena sa A, odnosno V. Povezati reostat otpornosti 100 Ω kao potrošač na mesto na maketi označeno sa VOUT. Postaviti klizač reostata na maksimalnu vrednost otpornosti.

Povezati izvor jednosmernog napona od 15 V na mesto na maketi označeno sa VIN. Pre uključenja pozvati dežurnog asistenta da proveri veze i odobri uključenje.

Pre svake promene konfiguracije isključiti redom izlazni napon generatora signala (kada se koristi) i izvor jednosmernog napona. Osciloskop i merni instrumenti se ne isključuju. Posle promene konfiguracije i podešavanja parametara prema uslovima zadatka, uključiti izvor jednosmernog napona i izlazni napon generatora signala.

Analizirati rad kola za merenje struje i izvesti vezu između napona na izlazu kola za merenje struje i struje kalema, $v_{TP5} = V_0 + R_X i_L$, gde treba odrediti V_0 i R_X .

D.1. Snimanje karakteristike impulsno-širinskog modulatora, $D(v_{TP2})$

Proveriti da li se džamperi nalaze u pozicijama J5, J7 i J8. Proveriti da li je klizač potencijometra P1 u položaju koji odgovara izlaznom naponu od 5 V. Kanal 1 osciloskopa povezati na plus ulaz komparatora, TP2, a kanal 2 osciloskopa povezati na izlaz komparatora, TP4. Sinhronizovati osciloskop prema signalu sa kanala 2. Podesiti osciloskop tako da meri srednju vrednost napona na prvom kanalu, kao i period signala T_S i trajanje „pozitivnog intervala“ (*positive width*) T_{POS} na drugom kanalu. Potencijometrom P1 menjati izlazni napon od 5 V do 10 V u koracima po 0,5 V. Kada se dostigne izlazni napon od 10 V, smanjiti otpornost reostata tako da izlazna struja bude 1 A i izvršiti tražena merenja i za tu tačku. Popuniti tabelu 4.1. Izračunati faktor ispunjenosti pobudnih impulsa D i prikazati zavisnost $D(v_{TP2})$ (slika 4.2).

D.2. Integralni regulator

D.2.1. Integralni regulator sa 10 nF. Vratiti klizač potencimetra P1 u položaj koji odgovara izlaznom naponu od 5 V. Premestiti džamper sa J5 na J3. Podesiti otpornost reostata na 100 Ω . Kanal 1 osciloskopa povezati na TP5, tako da se posmatra signal srazmeran struji kalema. Kanal 2 povezati na izlaz regulatora, na TP2. Podesiti sinhronizaciju osciloskopa na kanal 1. Podelu naponske ose podesiti na 2,5 $\mu\text{s}/\text{div}$. Snimiti vremenske dijagrame struje kalema (slika 4.3) i izlaznog napona regulatora (slika 4.4).

Smanjivati otpornosti potrošača i izmeriti struju pri kojoj konvertor postaje nestabilan.

Umesto reostata povezati otpornik otpornosti 16,5 Ω . Sinhronizaciju sa kanala 1 prebaciti na kanal 2 i podesiti podelu vremenske ose tako da se na ekranu osciloskopa vide bar dve periode oscilovanja. Snimiti vremenske dijagrame struje kalema (slika 4.5), izlaznog napona regulatora (slika 4.6) i izlaznog napona konvertora (slika 4.7). Izmeriti *peak-to-peak ripple* izlaznog napona.

D.2.2. Integralni regulator sa 47 nF. Premestiti džamper sa J3 na J4 i ponoviti merenja iz prethodne tačke (slike 4.8-4.12).

D.2.3. Integralni regulator sa 100 nF. Premestiti džamper sa J4 na J5. Povezati reostat kao potrošač. Smanjivanjem otpornosti reostata povećavati struju potrošača od nule do maksimalne vrednosti od 1 A u koracima po 100 mA. Posmatranjem vremenskih dijagrama struje kalema i izlaznog napona regulatora utvrditi da li je konvertor stabilan ili nestabilan. Meriti jednosmernu komponentu izlaznog napona i popuniti tabelu 4.2. Nacrtati dijagram zavisnosti $V_{OUT}(I_{OUT})$ (slika 4.13). Na osnovu rezultata merenja izvesti zaključak u kom režimu je konvertor nestabilan i pri kojim kapacitivnostima kondenzatora u integralnom regulatoru izlaznog napona. Zaključak uneti u izveštaj.

D.3. Proporcionalni regulator

D.3.1. Proporcionalni regulator sa 100 k Ω . Premestiti džamper sa J5 na J1. Kanala 1 povezati na TP2, tako da prikazuje izlazni napon regulatora. Kanala 2 povezati na TP5, tako da prikazuje vremenski dijagram struje kalema. Obezbediti sinhronizaciju osciloskopa. Promenom otpornosti reostata menjati struju potrošača od nule do maksimalne vrednosti od 1 A u koracima po 100 mA. Popuniti tabelu 4.3. i nacrtati dijagram zavisnosti $V_{OUT}(I_{OUT})$. (slika 4.14).

D.3.2. Proporcionalni regulator sa 470 k Ω . Premestiti džamper sa J1 na J2. Ponoviti merenja iz prethodne tačke. Popuniti tabelu 4.4. i nacrtati dijagram zavisnosti $V_{OUT}(I_{OUT})$. (slika 4.15). Pri $I_{OUT} = 500 \text{ mA}$ snimiti vremenske dijagrame struje kalema (slika 4.16), izlaznog napona regulatora (slika 4.17) i naizmenične komponente izlaznog napona konvertora (slika 4.18). Objasniti pojavu talasnosti napona na izlazu regulatora i uporediti je sa talasnošću u slučaju integralnog regulatora. Objasniti razliku. Zaključak uneti u izveštaj.

D.4. Proporcionalno-integralni regulator

Povezati otpornik otpornosti 16,5 Ω kao potrošač. Premestiti džamper sa J2 na J6. Potencijometar P2 podesiti na minimalnu vrednost otpornosti okretanjem klizača u smeru strelice. Kanala 1 osciloskopa povezati na TP5, tako da se posmatra vremenski dijagram struje kalema. Kanala 2 povezati na TP2, tako da se posmatra izlazni napon regulatora.

Sinhronizaciju osciloskopa podesiti na kanal 2. Snimiti vremenske dijagrame struje kalema (slika 4.19) i izlaznog napona regulatora (slika 4.20). Premestiti sondu kanala 2 sa TP2 na TP6 i snimiti vremenski dijagram naizmenične komponente izlaznog napona konvertora (slika 4.21).

Povećavanjem otpornosti potencijometra P2, što je ekvivalentno povećanju proporcionalnog dejstva regulatora izlaznog napona, dovesti konvertor na granicu stabilnosti. Snimiti vremenske dijagrame struje kalema (slika 4.22), izlaznog napona regulatora (slika 4.23) i izlaznog napona konvertora (slika 4.24).

Umesto otpornika otpornosti $16,5\ \Omega$ povezati reostat kao potrošač. Promenom otpornosti reostata proveriti da li je konvertor stabilan za $0 < I_{OUT} < 1\text{ A}$. Ukoliko je potrebno, podesiti otpornost potencijometra P2 tako da pri $0 < I_{OUT} < 1\text{ A}$ konvertor bude stabilan.

D5. Dinamički odziv konvertora

Uključiti generator signala i isključiti njegov izlazni napon. Izabrati tip signala *Square*. Podesiti visoki naponski nivo impulsa na 10 V i niski naponski nivo impulsa na 0 V. Faktor ispunjenosti pobudnih impulsa *D* podesiti na 0,5. Povezati generator signala na mesto na maketi označeno sa VG.

Pomoću posebnog kabla povezati *trigger output (Sync)* generatora signala sa ulazom *External Trigger* na osciloskopu. Sinhronizaciju osciloskopa postaviti na *External*. Kanala 1 priključiti na TP5, tako da prikazuje vremenski dijagram struje kalema. Kanala 2 priključiti na TP6, tako da prikazuje vremenski dijagram izlaznog napona konvertora. Spregu na kanalu 2 postaviti na *AC*.

D.5.1. Proporcionalni regulator sa 100 k Ω . Premestiti džamper sa J6 na J1. Postaviti otpornik otpornosti $16,5\ \Omega$ kao osnovni potrošač na mesto na maketi označeno sa VOUT, a otpornik otpornosti $8,2\ \Omega$ kao pomoćni potrošač na mesto na maketi označeno sa RL2. Podesiti frekvenciju generatora signala na 2 kHz. Snimiti dijagrame struje kalema (slika 4.25) i naizmenične komponente izlaznog napona (slika 4.26). Premestiti sonde na TP1 i TP2 i proveriti da li impulsno-širinski modulator tokom prelaznog procesa ide u zasićenje. Zameniti osnovni potrošač otpornikom od $47\ \Omega$ i ponoviti merenja (slike 4.27 i 4.28). Zaključke uneti u izveštaj.

D.5.2. Proporcionalni regulator sa 470 k Ω . Premestiti džamper sa J1 na J2 i ponoviti merenja iz prethodne tačke (slike 4.29-4.32).

D.5.3. Integralni regulator sa 100 nF. Premestiti džamper sa J2 na J5. Povezati otpornik otpornosti $16,5\ \Omega$ kao osnovni potrošač, a otpornik otpornosti $8,2\ \Omega$ kao pomoćni potrošač. Podesiti frekvenciju generatora signala na 100 Hz. Snimiti dijagrame struje kalema (slika 4.33) i naizmenične komponente izlaznog napona (slika 4.34). Premestiti sonde na TP1 i TP2 i proveriti da li impulsno-širinski modulator tokom prelaznog procesa ide u zasićenje. Zameniti osnovni potrošač otpornikom od $47\ \Omega$. Smanjiti frekvenciju generatora signala na 10 Hz. Ponoviti merenja (slike 4.35 i 4.36). Zaključke uneti u izveštaj.

D.5.4. Proporcionalno-integralni regulator. Premestiti džamper sa J5 na J6. Sonde osciloskopa priključiti na TP5 i TP6, kako bi se posmatrali vremenski dijagrami struje kalema i naizmenične komponente izlaznog napona. Povezati otpornik otpornosti $16,5\ \Omega$ kao osnovni potrošač, a otpornik otpornosti $8,2\ \Omega$ kao pomoćni potrošač. Frekvenciju generatora signala podesiti na 200 Hz. Snimiti vremenske dijagrame struje kalema (slika 4.37) i naizmenične

komponente izlaznog napona (slika 4.38) pri zatečenoj poziciji potencijometra P2. Menjati otpornost potencijometra P2 i podesiti je na vrednost za koju se dobija najmanja amplituda talasnosti izlaznog napona. Snimiti dijagrame u tom slučaju (slike 4.39 i 4.40) i proveriti da li impulsno-širinski modulator ide u zasićenje. Povećati frekvenciju generatora signala na 2 kHz i snimiti dijagrame koji se dobijaju u tom slučaju (slike 4.41 i 4.42). Zameniti osnovni potrošač otpornikom od 47 Ω , snimiti dijagrame i u ovom slučaju (slike 4.43-4.48) i proveriti da li modulator ide u zasićenje. Zaključke uneti u izveštaj.

D.6. Prenosna karakteristika konvertora i kružno pojačanje

Isključiti izlazni napon generator signala. Ukloniti pomoćni potrošač za impulsnu promenu opterećenja. Postaviti otpornik otpornosti 16,5 Ω kao osnovni potrošač. Premestiti džemper sa J6 na J5. Pomoću osciloskopa izmeriti jednosmernu komponentu napona na TP2:

Isključiti izvor jednosmernog napona. Premestiti džemper sa J7 na J9, odnosno sa J8 na J10. Na generatoru signala izabrati tip signala *Sine*. Podesiti frekvenciju generatora signala na 10 Hz. Podesiti amplitudu signala na 100 mV (200 mV *peak-to-peak*) i *DC offset* na prethodno izmerenu vrednost V_{TP2} .

Uključiti izlazni napon generatora signala i **tek tada uključiti napajanje konvertora**. Ukoliko izlazni napon konvertora nije 5 V, izvršiti fino podešavanje *DC offset*-a generatora signala. Sinhronizaciju osciloskopa podesiti na *External*.

D.6.1. Prenosna karakteristika konvertora. Sondu sa kanala 1 povezati na TP7, a sondu sa kanala 2 na TP6. Spregu na oba kanala postaviti na *AC*. U rasponu frekvencije od 10 Hz do 10 kHz u 20 tačaka snimiti amplitudsku i faznu karakteristiku prenosne funkcije $H_1(s) = V_{out}(s)/V_g(s)$. Popuniti tabelu 4.5. i nacrtati amplitudsku i faznu karakteristiku za $H_1(s)$ (slike 4.49 i 4.50).

D.6.2. Kružno pojačanje. Sondu sa kanala 1 povezati na TP7, a sondu sa kanala 2 na TP2. Spregu na oba kanala postaviti na *AC*. U rasponu frekvencije od 10 Hz do 10 kHz u 20 tačaka snimiti amplitudsku i faznu karakteristiku prenosne funkcije $H_2(s) = V_{TP2}(s)/V_g(s)$. Popuniti tabelu 4.6. i nacrtati amplitudsku i faznu karakteristiku za $H_2(s)$ (slike 4.51 i 4.52).