

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET U BEOGRADU
KATEDRA ZA ELEKTRONIKU

ENERGETSKA ELEKTRONIKA
LABORATORIJSKE VEŽBE

VEŽBA BROJ 5:
UPRAVLJANJE BUCK KONVERTOROM:
PROGRAMIRANJE STRUJE

Autori: Predrag Pejović i Vladan Božović

A. OPIS VEŽBE

Vežba obuhvata niz merenja na maketi buck konvertora kod koga je ostvarena regulacija izlaznog napona primenom tehnike programiranja struje (CMC, *current mode control*). U vežbi se analiziraju dva načina programiranja struje: zadavanjem minimalne i maksimalne vrednosti struje kalema (*hysteresis window* ili *bang-bang control*) i zadavanjem maksimalne vrednosti struje prekidača (*peak-limitting control*), pri čemu se prekidač uključuje sa konstantnom prekidačkom frekvencijom.

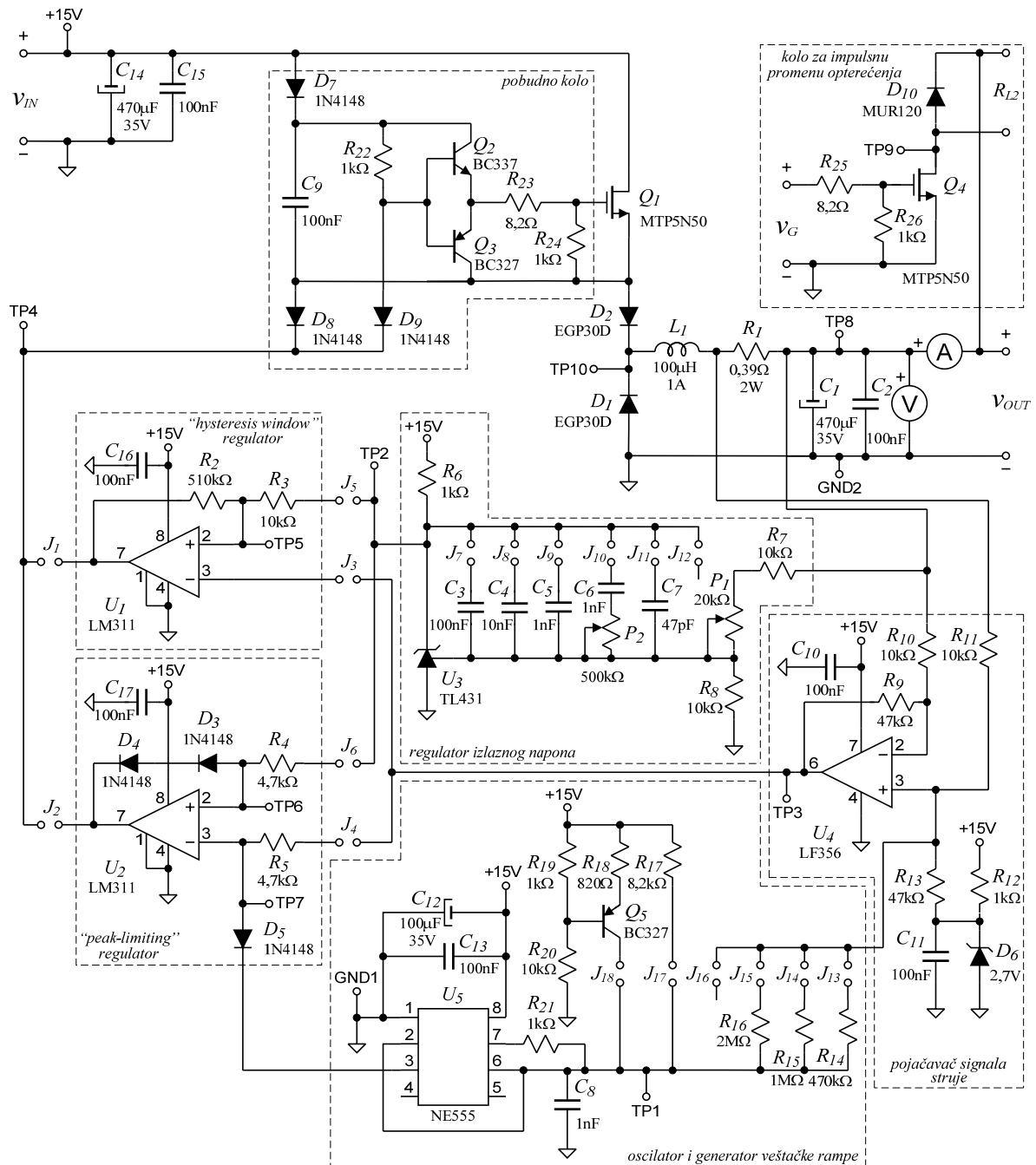
U ovoj vežbi studenti treba da se upozanju sa nizom raznorodnih efekata i povežu znanja stečena u više drugih predmeta. Stoga je od velikog značaja da studenti pre dolaska u laboratoriju dobro prouče način rada kola realizovanog na maketi za ovu vežbu. Za to je potrebno i da se poznaje rad integrisanog 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 CMC regulatorom i kolom za impulsnu promenu opterećenja
2. signal generator
3. izvor jednosmernog napona 15 V
4. ampermetar
5. voltmetar
6. osciloskop
7. otpornici za impulsnu promenu opterećenja 8,2 Ω / 4,5 W, 16,5 Ω / 9 W (2x33 Ω / 4,5 W), 47 Ω / 3 W i 470 Ω / 3 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 100 Ω

C. OPIS MAKETE

Šema veze makete buck konvertora sa upravljanjem primenom programiranja struje prikazana je na slici 5.1. Maketa sadrži buck konvertor, kolo za pobudu prekidačkog tranzistora, regulator izlaznog napona, pojačavač signala struje i oscilator sa generatorom pomoćnog testerastog napona, kao i mogućnost izbora jednog od dva tipa regulatora struje. Poseban podsistem, koji nije deo samog konvertora, čini kolo za impulsnu promenu opterećenja, koje je realizovano na isti način kao i u vežbi 4. Buck konvertor i kolo za pobudu prekidačkog tranzistora su realizovani na isti način kao i u vežbi 2.



Slika 5.1. Maketa buck konvertora sa upravljanjem primenom programiranja struje

Regulator izlaznog napona je realizovan primenom integrisanog kola TL431, koje sadrži izvor referentnog napona i pojačavač greške. Predviđena je mogućnost izbora integralnog ili proporcionalno-integralnog tipa regulatora izlaznog napona, slično kao i u vežbi 5, ali ne i proporcionalnog. Regulator izlaznog napona zadaje kolu za programiranje struje struju koju treba realizovati. Predviđeno je da se tokom vežbe ispituju dva načina programiranja struje: zadavanjem minimalne i maksimalne vrednosti struje kalema (*hysteresis window* metod) i zadavanjem maksimalne vrednosti struje prekidača (*peak-limitting* metod). Za svaki od ova dva metoda realizovan je poseban regulator struje, kako je označeno na slici 6.1. Oba regulatora koriste komparator LM311 kao osnovnu komponentu. Za potrebe *peak-limitting* načina programiranja struje, realizovan je oscilator i generator pomoćnog testerastog signala (*artificial ramp*, „veštačka rampa“) primenom integrisanog kola NE555. Oba načina programiranja struje zahtevaju podatak o trenutnoj vrednosti struje kalema, što se postiže primenom kola za merenje struje, slično kao i u vežbi 4.

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 višeobrtna potenciometra, P1 i P2. Potenciometrom P1 reguliše se izlazni napon konvertora, dok se potenciometrom P2 podešava konstanta proporcionalnog dejstva proporcionalno-integralnog regulatora. Pre uključjenja konvertora klizač potenciometra P1 postaviti u smeru strelice na maketi u krajnji položaj kome odgovara minimalna otpornost, odnosno izlazni napon od 5 V.

Na maketi se nalazi pet grupa pozicija za džampere. Prvu grupu čine pozicije za izbor tipa i parametara regulatora izlaznog napona i označene su sa J7 do J10. Džamper koji se može postaviti u poziciju J11 ili J12 omogućava priključenje dodatnog kondenzatora koji se koristi za suzbijanje subharmonijskih oscilacija kod proporcionalno-integralnog regulatora izlaznog napona. Ako nije drugačije naglašeno, smatra se da se džamper nalazi na poziciji J7, koja odgovara integralnom regulatoru izlaznog napona sa kondenzatorom kapacitivnosti 100 nF, i J12, kada nije priključen dodatni kondenzator.

Izbor načina programiranja struje se vrši postavljanjem uvek po tri džampere u jednoj od sledeće dve grupe pozicija za džampere, prema tabeli 5.1:

Tabela 5.1. Raspored džampere za izbor načina programiranja struje

<i>hysteresis window</i>	J1	J3	J5
<i>peak limitting</i>	J2	J4	J6

Četvrtu grupu čine pozicije za izbor oblika testerastog napona i označene su sa J17 i J18. Postavljanjem džampere na poziciju J18, oscilator na jednom segmentu generiše linearni napon, dok je za džamper u poziciji J17 generisani napon na oba segmenta eksponencijalnog oblika. Džamper mora biti uvek postavljen u tačno jednu od pozicija J17 ili J18. Ako nije drugačije naglašeno, smatra se da se džamper nalazi u poziciji J18.

Petu grupu čine pozicije za dodavanje pomoćnog testerastog signala na signal merene struje i označene su sa J13 do J16. Ako je džamper u poziciji J16, ne dodaje se pomoćni testerasti signal na signal merene struje i to je podrazumevani položaj džampere. U preostale tri moguće pozicije za ovaj džamper dodaje se pomoćni signal i to najjači u poziciji J13, a najslabiji u poziciji J15.

D. ZADATAK

Povezati ampermetar i voltmetar na mesta na maketi označena sa A, odnosno V. Povezati izvor jednosmernog napona od 15 V na mesto na maketi označeno sa VIN. Pre uključenja pozvati dežurnog asistenta da proverí 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, $v_{TP3} = V_0 + R_X i_L$, gde treba odrediti V_0 i R_X .

D.1. Diskontinualni režim rada sa *hysteresis window* regulatorom

Postaviti tri džampera prema tabeli 5.1, tako da struju kalema reguliše *hysteresis window* regulator. Postaviti džamper za izbor regulatora izlaznog napona u poziciju J7. Proveriti da li su ostali džamperi postavljeni u pozicije J12, J16 i J18. Proveriti da li je klizač potencijometra P1 u položaju koji odgovara izlaznom naponu od 5 V. Postaviti otpornik otpornosti 470 Ω na mesto na maketi označeno sa VOUT. Kanala 1 osciloskopa povezati na TP3, tako da se posmatra vremenski dijagram struje kalema. Kanala 2 povezati na TP8, tako da se posmatra naizmenična komponenta izlaznog napona (spregu na kanalu 2 podesiti na AC). Uključiti *Band Width Limit*. Obezbediti sinhronizaciju osciloskopa. Snimiti vremenske dijagrame struje kalema (slika 5.2) i naizmenične komponente izlaznog napona (slika 5.3).

Izmeriti frekvenciju subharmonijskih oscilacija u kolu (frekvencija osnovnog harmonika talasnosti izlaznog napona) i *peak-to-peak ripple* izlaznog napona. Podatke uneti u tabelu 5.2. Premestiti džamper za izbor regulatora izlaznog napona sa J7 na J8 i ponoviti merenja. Premestiti džamper za izbor regulatora izlaznog napona sa J8 na J9 i ponoviti merenja.

D.2. Zavisnost frekvencije prekidanja od izlaznog napona, *hysteresis window* regulator

Postaviti džamper za izbor regulatora izlaznog napona u poziciju J7. Postaviti otpornik otpornosti 16,5 Ω na izlaz konvertora. Sonde osciloskopa povezati na TP10 i TP3, tako da se posmatra napon na diodi konvertora i struja kalema. Sinhronizovati osciloskop na napon na diodi konvertora. U donjem desnom uglu ekrana osciloskopa prikazana je vrednost osnovne frekvencije sinhronizujućeg signala. Promenom otpornosti potencijometra P1 menjati izlazni napon od 5 V do 10 V u koracima po 1 V. Popuniti tabelu 5.3. Po završenom merenju vratiti klizač potencijometra P1 u početni položaj.

D.3. Dinamički odziv konvertora, *hysteresis window* regulator

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.

D.3.1. Integralni regulator sa 100 nF. Postaviti džamper za izbor tipa regulatora izlaznog napona u poziciju J7. Postaviti otpornik otpornosti 16,5 Ω kao osnovni potrošač na mesto na maketi označeno sa VOUT, a otpornik otpornosti 8,2 Ω kao pomoćni potrošač na mesto na maketi označeno sa RL2. Podesiti frekvenciju generatora signala na 10 Hz. Posmatrati vremenske dijagrame struje kalema (TP3) i naizmenične komponente izlaznog napona (TP8).

Snimiti dobijene vremenske dijagrame (slike 5.4 i 5.5) i izmeriti *peak-to-peak ripple* izlaznog napona.

Umesto otpornika otpornosti $16,5\ \Omega$ na izlaz konvertora postaviti otpornik otpornosti $47\ \Omega$. Snimiti dobijene vremenske dijagrame (slike 5.6 i 5.7) i izmeriti *peak-to-peak ripple* izlaznog napona.

D.3.2. Integralni regulator sa $10\ \text{nF}$. Premestiti džamper za izbor tipa regulatora izlaznog napon sa J7 na J8. Podesiti frekvenciju generatora signala na 40 Hz. Postaviti otpornik otpornosti $16,5\ \Omega$ kao osnovni potrošač, a otpornik otpornosti $8,2\ \Omega$ kao pomoćni potrošač. Snimiti dobijene vremenske dijagrame (slike 5.8 i 5.9) i izmeriti *peak-to-peak ripple* izlaznog napona.

Umesto otpornika otpornosti $16,5\ \Omega$ na izlaz konvertora postaviti otpornik otpornosti $47\ \Omega$. Snimiti dobijene vremenske dijagrame (slike 5.10 i 5.11) i izmeriti *peak-to-peak ripple* izlaznog napona.

D.3.3. Integralni regulator sa $1\ \text{nF}$. Premestiti džamper za izbor tipa regulatora izlaznog napon sa J8 na J9. Podesiti frekvenciju generatora signala na 200 Hz. Podesiti *Acquisition Mode* osciloskopa na *Sample*. Postaviti otpornik otpornosti $16,5\ \Omega$ kao osnovni potrošač, a otpornik otpornosti $8,2\ \Omega$ kao pomoćni potrošač. Snimiti dobijene vremenske dijagrame (slike 5.12 i 5.13) i izmeriti *peak-to-peak ripple* izlaznog napona.

Umesto otpornika otpornosti $16,5\ \Omega$ na izlaz konvertora postaviti otpornik otpornosti $47\ \Omega$. Snimiti dobijene vremenske dijagrame (slike 5.14 i 5.15) i izmeriti *peak-to-peak ripple* izlaznog napona.

D.4. Proporcionalno-integralni regulator, *hysteresis window* regulator

D.4.1. Dinamički odziv konvertora. Premestiti džamper za izbor tipa regulatora izlaznog napon sa J9 na J10. Vratiti otpornik otpornosti $16,5\ \Omega$ na izlaz konvertora, a sve ostale parametre ostaviti u iste kao u prethodnoj tački. Otpornost potencijometra P2 dovesti na minimalnu vrednost okretanjem klizača u smeru koji pokazuje strelica na maketi. Posmatrati odziv konvertora na ekranu osciloskopa i postepeno povećavati otpornost potencijometra P2. Podesiti otpornost potencijometra P2 na vrednost za koju je odziv kola najbrži, a *peak-to-peak ripple* izlaznog napona najmanji. U tom slučaju snimiti vremenski dijagram sa ekrana osciloskopa (slike 5.16 i 5.17) i izmeriti *peak-to-peak ripple* izlaznog napona.

Umesto otpornika otpornosti $16,5\ \Omega$ na izlaz konvertora postaviti otpornik otpornosti $47\ \Omega$. Snimiti dobijene vremenske dijagrame (slike 5.18 i 5.19) i izmeriti *peak-to-peak ripple* izlaznog napona.

Podesiti frekvenciju generatora signala na 5 kHz, kako bi se videli detalji prelaznog procesa. Snimiti dobijene vremenske dijagrame (slike 5.20-5.23) za otpornike otpornosti $16,5\ \Omega$ i $47\ \Omega$ na izlazu konvertora.

D.4.2. Zavisnost frekvencije prekidanja od konstante proporcionalnog dejstva. Vratiti klizač potencijometra P2 u početnu poziciju u kojoj potencijometar P2 ima najmanju otpornost. Isključiti izlazni napon generator signala. Postaviti otpornik otpornosti $16,5\ \Omega$ na izlaz konvertora. Posmatrati struju kalema i napon na izlazu regulatora (TP2). Obezbediti sinhronizaciju osciloskopa. Pomerati klizač potencijometra P2 u smeru suprotnom od smera koji pokazuje strelica na maketi, odnosno u smeru povećanja njegove otpornosti. Na svaka tri

puna kruga obrtanja klizača potencijometra P2 izmeriti frekvenciju oscilovanja. Popuniti tabelu 5.4. Pri minimalnoj i pri maksimalnoj otpornosti potencijometra P2 snimiti vremenske dijagrame sa osciloskopa (slike 5.24-5.27).

D.5. Stabilnost strujne petlje, *peak limiting* regulator

Postaviti tri džampera prema tabeli 6.1, tako da struju kalema reguliše *peak limiting* regulator. Postaviti džemper za izbor regulatora izlaznog napona u poziciju J7. Proveriti da li su ostali džemper i postavljeni u pozicije J12, J16 i J18. Proveriti da li je klizač potencijometra P1 u položaju koji odgovara izlaznom naponu od 5 V.

D.5.1. Stabilnost strujne petlje u diskontinualnom režimu. Povezati reostat otpornosti 100 Ω na izlaz konvertora i postaviti klizač na maksimalnu vrednost otpornosti. Posmatrati napon na diodi konvertora (TP10) i struju kalema (TP3). Potencijetrom P1 menjati izlazni napon u opsegu od 5 V do 10 V. Izmeriti pri kom izlaznom naponu i pri kom faktoru ispunjenosti pobudnih impulsa prekidača dolazi do pojave subharmonijskih oscilacija. Po završetku merenja vratiti klizač potencijometra P1 u početni položaj koji odgovara izlaznom naponu od 5 V. Zaključak uneti u izveštaj.

D.5.2. Stabilnost strujne petlje u kontinualnom režimu. Povezati otpornik otpornosti 16,5 Ω na izlaz konvertora. Posmatrati napon na diodi konvertora (TP10) i struju kalema (TP3). Potencijetrom P1 menjati izlazni napon u opsegu od 5 V do 10 V. Izmeriti pri kom izlaznom naponu i pri kom faktoru ispunjenosti pobudnih impulsa prekidača dolazi do pojave subharmonijskih oscilacija. Snimiti vremenske dijagrame sa ekrana osciloskopa pri izlaznom naponu od 5 V, 8 V i 10 V (slike 5.28-5.33). Po završetku merenja vratiti klizač potencijometra P1 u početni položaj koji odgovara izlaznom naponu od 5 V.

D.6. Dinamički odziv konvertora, *peak limiting* regulator

D.6.1. Integralni regulator sa 100 nF. Postaviti džemper za izbor tipa regulatora izlaznog napona u poziciju J7. Postaviti otpornik otpornosti 16,5 Ω kao osnovni potrošač, a otpornik otpornosti 8,2 Ω kao pomoćni potrošač. Podesiti frekvenciju generatora signala na 10 Hz. Sinhronizaciju osciloskopa postaviti na *External*. Posmatrati vremenske dijagrame struje kalema (TP3) i naizmenične komponente izlaznog napona (TP8). Snimiti dobijene vremenske dijagrame (slike 5.34 i 5.35) i izmeriti *peak-to-peak ripple* izlaznog napona.

Umesto otpornika otpornosti 16,5 Ω na izlaz konvertora postaviti otpornik otpornosti 47 Ω . Snimiti dobijene vremenske dijagrame (slike 5.36 i 5.37) i izmeriti *peak-to-peak ripple* izlaznog napona.

D.6.2. Integralni regulator sa 10 nF. Premestiti džemper za izbor tipa regulatora izlaznog napon sa J7 na J8. Postaviti otpornik otpornosti 16,5 Ω kao osnovni potrošač, a otpornik otpornosti 8,2 Ω kao pomoćni potrošač. Podesiti frekvenciju generatora signala na 40 Hz. Snimiti dobijene vremenske dijagrame (slike 5.38 i 5.39) i izmeriti *peak-to-peak ripple* izlaznog napona.

Umesto otpornika otpornosti 16,5 Ω na izlaz konvertora postaviti otpornik otpornosti 47 Ω . Snimiti dobijene vremenske dijagrame (slike 5.40 i 5.41) i izmeriti *peak-to-peak ripple* izlaznog napona.

D.6.3. Integralni regulator sa 1 nF. Premestiti džemper za izbor tipa regulatora izlaznog napon sa J8 na J9. Postaviti otpornik otpornosti 16,5 Ω kao osnovni potrošač, a otpornik

otpornosti $8,2\ \Omega$ kao pomoćni potrošač. Podesiti frekvenciju generatora signala na 200 Hz. Podesiti *Acquisition Mode* osciloskopa na *Sample*. Snimiti dobijene vremenske dijagrame (slike 5.42 i 5.43) i izmeriti *peak-to-peak ripple* izlaznog napona.

Umesto otpornika otpornosti $16,5\ \Omega$ na izlaz konvertora postaviti otpornik otpornosti $47\ \Omega$. Snimiti dobijene vremenske dijagrame (slike 5.44 i 5.45) i izmeriti *peak-to-peak ripple* izlaznog napona.

D.7. Proporcionalno-integralni regulator, *peak limiting* regulator

Premestiti džamper za izbor regulatora izlaznog napona sa J9 na J10. Otpornost potencijometra P2 dovesti na minimalnu vrednost okretanjem klizača u smeru koji pokazuje strelica na maketi.

D.7.1. Subharmonijske oscilacije sa proporcionalno-integralnim regulatorom. Postaviti otpornik otpornosti $16,5\ \Omega$ na izlaz konvertora. Posmatrati napon na izlazu regulatora izlaznog napona (TP2) i struju kalema (TP3). Osciloskop sinhronizovati prema struji kalema. Uključiti konvertor i snimiti vremenske dijagrame sa ekrana osciloskopa (slike 5.46 i 5.47). Postepeno povećavati otpornost potencijometra P2. Kada se u kolu pojave subharmonijske oscilacije, snimiti vremenski dijagram sa ekrana osciloskopa (slike 5.48 i 5.49). Nastaviti sa povećavanjem otpornosti potencijometra P2. Kada se na ekranu jasno vidi fenomen *period doubling*, odnosno kada se frekvencija osnovnog harmonika struje kalema prepolovi, snimiti vremenske dijagrame sa ekrana osciloskopa (slike 5.50 i 5.51). Povećati otpornost potencijometra P2 do najveće vrednosti. Snimiti vremenske dijagrame i u ovom slučaju (slike 5.52 i 5.53).

D.7.2. Eliminacija subharmonijskih oscilacija kod proporcionalno-integralnog regulatora uvođenjem dodatnog pola. Vratiti klizač potencijometra P2 u početnu poziciju kojoj odgovara minimalna otpornost. Premestiti džamper za uvođenje dodatnog pola sa J12 na J11. Postepeno povećavati otpornost potencijometra P2 i proveriti da li se u kolu pojavljuju subharmonijske oscilacije. Zaključak uneti u izveštaj.

D.7.3. Dinamički odziv konvertora. Vratiti klizač potencijometra P2 u početnu poziciju kojoj odgovara minimalna otpornost. Postaviti otpornik otpornosti $16,5\ \Omega$ kao osnovni potrošač, a otpornik otpornosti $8,2\ \Omega$ kao pomoćni potrošač. Podesiti frekvenciju generatora signala na 200 Hz. Sinhronizaciju osciloskopa podesiti na *External*. Posmatrati struju kalema i naizmeničnu komponentu izlaznog napona. Postepeno povećavati otpornost potencijometra P2 i posmatrati odziv konvertora. Podesiti otpornost potencijometra P2 tako da odziv kola bude najbrži, a *peak-to-peak ripple* izlaznog napona najmanji. U tom slučaju snimiti vremenske dijagrame sa ekrana osciloskopa (slike 5.54 i 5.55) i izmeriti *peak-to-peak ripple* izlaznog napona.

Umesto otpornika otpornosti $16,5\ \Omega$ na izlaz konvertora postaviti otpornik otpornosti $47\ \Omega$. Snimiti dobijene vremenske dijagrame (slike 5.56 i 5.57) i izmeriti *peak-to-peak ripple* izlaznog napona.

Podesiti frekvenciju generatora signala na 2 kHz, kako bi se videli detalji prelaznog procesa. Snimiti dobijene vremenske dijagrame za otpornike otpornosti $16,5\ \Omega$ i $47\ \Omega$ na izlazu konvertora (slike 5.58-5.61).

Da li u prelaznom procesu dolazi od pojave subharmonijskih oscilacija? Zaključak uneti u izveštaj.