

LOKALNO NAPAJANJE MERNIH SENZORA TEMPERATURE ENERGETSKIH KABLOVA

Žarko Janda, Milutin Sredojević
Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd

Sadržaj: U radu je prikazana realizacija sistema za lokalno napajanje mernih senzora temperature energetskog kabla. Potrebna energija se ekstrahuje iz elektromagnetnog polja energetskog kabla putem sprežnog strujnog transformatora, a zatim se procesira kroz kratkospajajući konvertor koji na nedisipativni način vrši regulaciju napona na svom izlazu. Prikazani su eksperimentalni snimci napona i struja u kolu kratkospajajućeg konvertora za razne vrednosti struje obuhvaćene sprežnim strujnim transformatorom, demonstriran je odgovarajući rad kratkospajajućeg konvertora i dato je uprošćeno objašnjenje njegovog rada. Takođe je prikazana i statička karakteristika ovog konvertora.

Cljučne reči: nadzor kablova, napajanje senzora, kratkospajajući konvertor, AC/DC konverzija

1 UVOD

U distributivnoj mreži kablova 35 kV i 110 kV postoji potreba za stalnim nadzorom temperature plašta energetskog kabla da bi se izbeglo lokalno pregrevanje kabla, i lokalno ubrzano starenje izolacije kabla. Mesta na kojima može doći do lokalnog pregrevanja energetskog kabla su poznata kao „kritična mesta“ [1] i vezana su za ukrštanje sa drugim grupno položenim kablovima ili sa toplovodom. Da bi se napojili izolovani merni senzori temperature, koji su distribuirani duž kablovske trase, neophodno je ekstrahovati potrebnu električnu energiju iz samoga kabla i to putem elektromagnetne sprege, pošto izolacija kabla ne sme biti narušena. Srednjenaponski kablovi se realizuju kao grupe jednožilnih kablova, gde svaka žila ima svoje slojeve izolacije i zaštitni bakarni plašt, u vidu spiralne trake, tako da se sa obuhvatnim strujnim transformatorom može ostvariti potrebna elektromagnetna sprega. Problem nastaje kad treba obezbediti stabilno napajanje senzora i drajverskih dioda za optičku komunikaciju putem fibera, a pri različitim intenzitetima struje kabla. Pri tome treba imati u vidu da struja kroz plašt nije zanemariva, i da je potrebno da ovaj način napajanja funkcioniše i u odnosu promene struje kroz kabl cca 1:10, u slučaju dobro izrađenog unakrsnog spajanja (transpozicije) provodnika i metalnih plašteva.

2 OPIS MERNOG SISTEMA

2.1. Opšti opis primenjenog akvizicionog sistema

Seriya modula i ploča 6B, proizvodnje Analog Device, obezbeđuje sav potreban hardver za implementaciju fleksibilnog i distribuiranog sistema za monitoring i upravljanje. Izborom potrebnih modula iz serije 6B, neophodnih interfejsa i povezivanjem svih modula preko veze RS-485, može se postići optimalna strategija akvizicije podataka ili upravljanja procesom, uz optimalan izbor ulaza i izlaza sa

minimalni brojem senzora. Modularnost i konfigurabilnost modula iz serije 6B ih čini i vrlo jeftinim rešenjem. Šema unutrašnjih električnih kola je prikazana na slici 1.

Serijski merni moduli 6B i odgovarajuće elektronske ploče (koje služe za povezivanje modula) se izrađuju u dva stepena naponske izolacije: za 1500 V rms i za 2500 V rms. Moduli 6B11, 6B12, 6B13 i 6B21 imaju stepen izolacije između mernog i komunikacionog dela 1500 V rms kontinualno. Za zahtevnije aplikacije se koriste moduli 6B11HV, 6B12HV i 6B13HV koji imaju kontinualni izolacioni napon od 2500 V rms. U svim drugim aspektima moduli obe familije su identični.

Analogni ulazno/izlazni moduli serije 6B predstavljaju kompletno „senzor-na-RS 485” rešenje. Svaki modul ima funkciju kondicioniranja signala, izolacije, podešavanja mernog opsega, A/D ili D/A konverzije i podržava digitalnu komunikaciju. Senzori koje moduli podržavaju mogu biti termoparovi (kao što je slučaj u primeni koja se opisuje), platinski otpornici, milivolti ili volti i standardni strujni signali. Svi kalibracioni podaci, adrese i parametri za linearizaciju se nalaze u EEPROM-u.

Budući da su projektovani za industrijsku primenu, merni moduli iz serije 6B sadrže izolaciju signala i internog napajanja na bazi transformatora. Svi delovi u modulu su automatski assemblirani i povezani kao komponente za površinsku montažu, čime se dalje povećava pouzdanost uz prihvatljivu cenu. Moduli serije 6B su deklarirani za upotrebu u kompletnom industrijskom opsegu temperatura od -25°C do $+85^{\circ}\text{C}$. Ovi kompaktni moduli se mogu priključiti na 16-to kanalnu zadnju ploču, radi povećanja gustine montaže i daljinsku akviziciju i kontrolu.

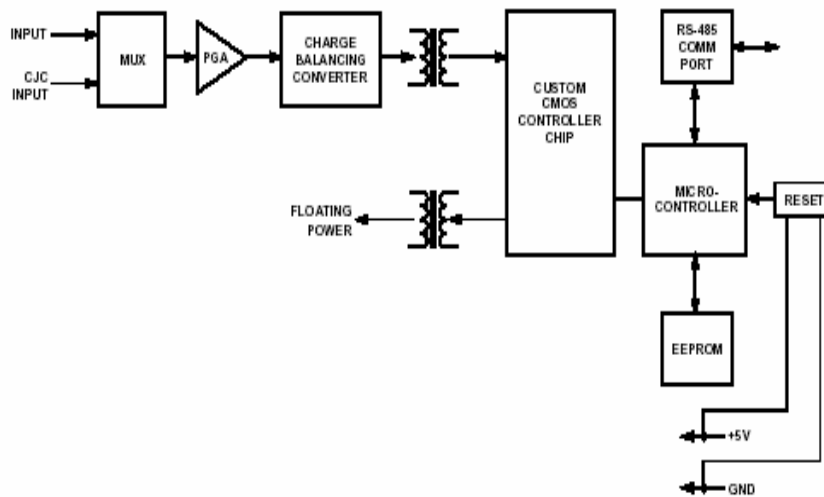
Za razliku od konvencionalnih sistema za kondicioniranje signala, svaki 6B modul je kompletan mikrokompjuterski akvizicioni sistem. Glavna prednost mikrokompjutera u modulu je mogućnost rekonfiguracije modula za razne tipove senzora i opsege merenja. Tako se redukuje broj različitih modula koji moraju biti upotrebljeni u datoj aplikaciji. Distribuirajući procesiranje merenih signala do nivoa mernog senzora, glavni nadzorni kompjuter je rasterećen za bolju implementaciju programa za superviziju i kontrolne funkcije višeg nivoa.

Međusobno povezivanje modula je ostvareno putem bidirekcionog RS-485 standardne serijske veze (koristi se RTS signal u komunikaciji). Komunikacija između modula je u formi razmene ASCII karaktera. Brzina komuniciranja je programabilna i može se izabrati do 19,2 Kboda.

2.2. Osnovne karakteristike akvizicionog sistema

Moduli serije 6B pokrivaju opseg ulaznih signala od ± 15 mV do ± 50 V i sve tipove termoparova i otporničkih senzora temperature. Ulazni signal je kondicioniran i skaliran pomoću pojačavača sa programiranim (promenljivim) pojačanjem i digitalizovan pomoću 16 bitnog A/D konvertora pod kontrolom lokalnog mikroprocesora. Brzina konverzije iznosi 9 uzoraka po sekundi, što daje Nikvistov frekventni opseg od 4,5 Hz.

Digitalizovana vrednost merene veličine se serijski transmituje kroz magnetski izolovanu barijeru (1500 V rms do 2500 V rms) i signal je taktovan pomoću specijalno urađenog intergisanog kola. Mikrokontroler na pločici modula konvertuje izmerene podatke u inženjerske jedinice, kao što je određeno parametrima mernog kanala, tj. kada merni signal dolazi sa termopara, otpornog senzora temperature ili od strane struje iz procesa. Između konverzija mikrokontroler vrši autopodešavanje nule merenja i podešava pojačanje osmatranjem temperature modula i drifta referentnog napona. Na ovom stepenu obrade signala se takođe vrši kompenzacija hladnog spoja (bitna pri merenju temperature pomoću termopara).



Slika 1 - Blok šema unutrašnjeg kola modula 6B

2.2.1. Konfigurabilnost

Svaki modul iz serije 6B je konfigurabilan putem softvera za veliki broj parametara, uključujući tip senzora, format izlaznog digitalnog signala, brzinu komuniciranja preko RS-485 veze (bod rejti) i čeksom status. To može biti veoma upotrebljivo u laboratoriji i ispitnom postrojenju gde temperaturni opsezi i upotrebljeni senzori ne moraju biti unapred poznati. Dodatna beneficija je da se redukuje broj modula koje treba držati u rezervi, jer manji broj modula različitog tipa potreban za konkretnu aplikaciju.

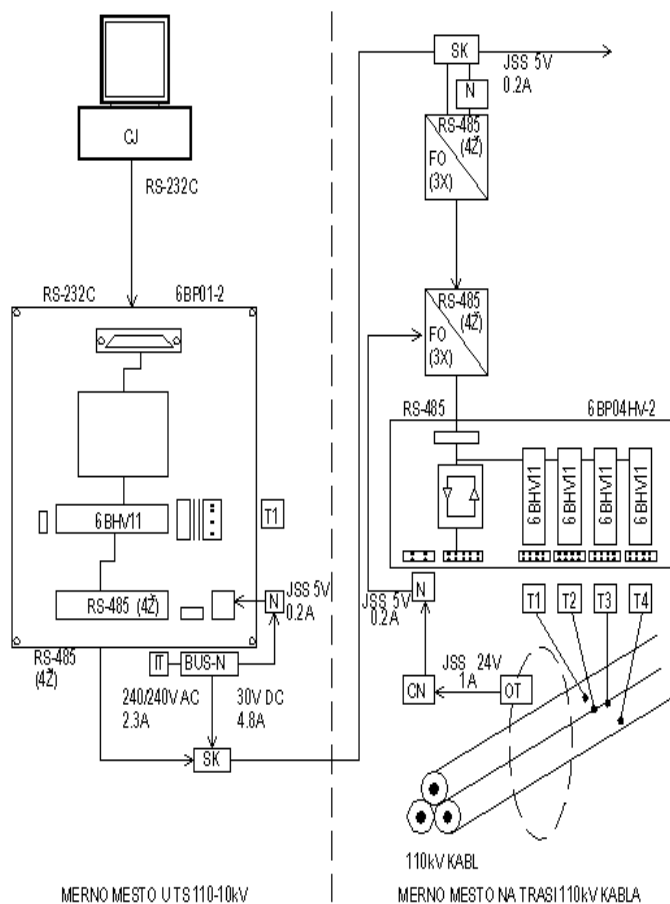
2.2.2. Visoke performanse

Visokokvalitetno procesiranje signala, kombinovano sa preciznim A/D (ili D/A) konvertorom, omogućuje postizanje tačnosti od $\pm 0,05\%$ opsega merenja u celokupnom opsegu radne temperature. Kod ulaznih (mernih) modula korišćenje mogućnosti automatskog podešenja nule omogućava veoma nizak drift nule merenja i dugoročnu stabilnost mernog sistema u vremenu.

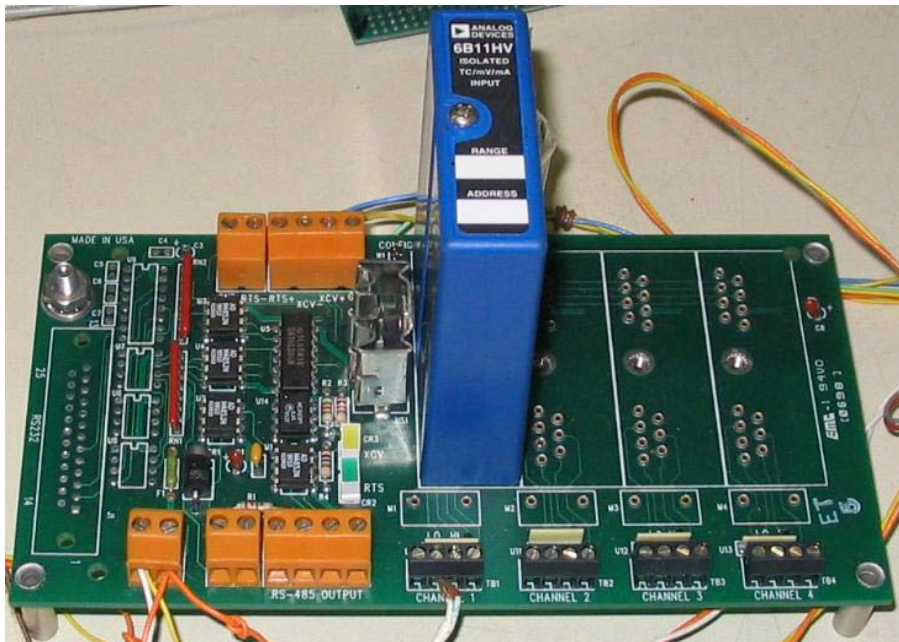
2.2.3. Visoki nivo potiskivanja šuma

Serijski moduli 6B su dizajnirani da tačno procesiraju signale niskog nivoa u teškom industrijskom okruženju, obezbeđujući do 2500 V rms neprekidnu izolaciju pomoću transformatora. To eliminiše zatvorene petlje signalnih puteva kroz uzemljenje, štiti merne senzore i računarsko-upravljačku opremu od tranzijentnih prenapona i rešava (otklanja) probleme vezane za različite nivoe zajedničkog napona (common mode voltage problems). Ulazni (merni) moduli serije 6B obezbeđuju potiskivanje common mode šuma do nivoa od 160dB i 50dB potiskivanja normal mode šuma (postoje ugrađeni programabilni digitalni filteri za potiskivanje šuma na frekvenciji od 50 Hz, odnosno 60 Hz).

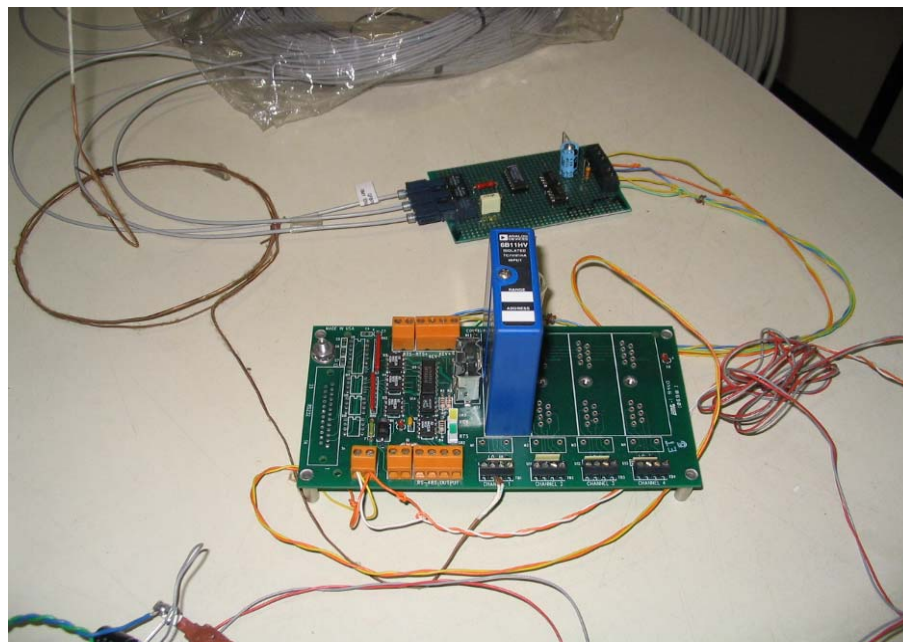
Na slici 2 je data šema veza primenjena za merenje temperature plašta kabla na izolovan način (preko fiber optičke veze) sa modulima 6B11HV i odgovarajući sistemi napajanja. Sam merni senzor i konvertor veze RS-485 na fiber optiku se moraju lokalno napajati, na izolovan način. Tako se sprečava prodiranje tranzijentnih prenapona u nadređeni računarski merno-regulacioni sistem, odnosno signalni kabl (SK na slici 2), što je veoma važno u eksploataciji.



Slika 2 - Primer upotrebe mernih modula 6B, u konfiguraciji za merenje temperature plašta kabla, sa lokalnim samonapajanjem. Računar koji upravlja akvizicijom i konvertor RS-232 na RS-485 kao i konvertor RS-485 na fiber optiku se posebno napajaju, sa zajedničkih sabirnica 24V, preko odgovarajućih konvertora.



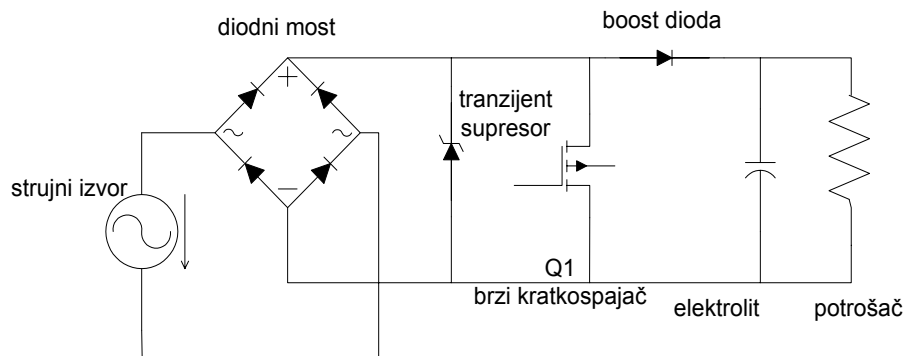
Slika 3 - Modul 6B11HV ugrađen na noseću ploču, sa temperaturnom kompenzacijom hladnog spoja



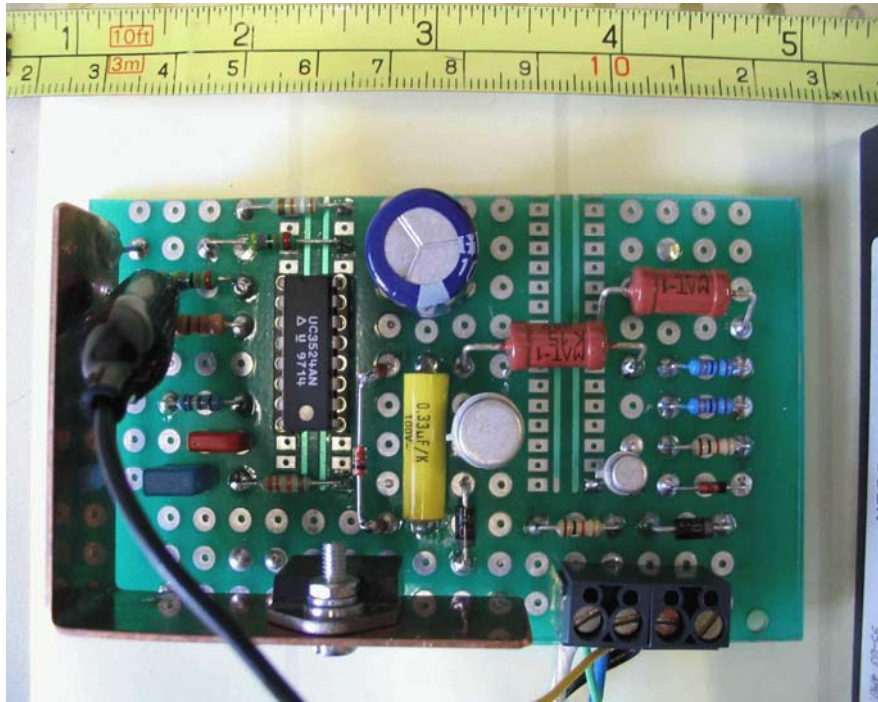
Slika 4 - Noseća ploča sa modulom 6B11HV, povezana sa konvertorom žičane RS-485 veze na fiber optičku vezu. Vide se tri plastična fibera, za prijem, predaju i RTS signal

Na slikama 3 i 4 se vide primeri fizički realizovanih delova distribuiranog mernog sistema, i to oni koji se moraju lokalno napajati.

Energija se ekstahuje iz elektromagnetnog polja energetskog kabla putem obuhvatnog strujnog transformatora koji ima rasklopivo jezgro, učvršćeno metalnom trakom. Na tom rasklopivom jezgri se nalazi kalem sa potrebnim brojem navojaka (u realizovanom slučaju $N=500$). Tako realizovan strujni transformator se ponaša približno kao idealan strujni izvor, dok se odstupanje od idealnih karakteristika strujnog izvora dešava pri nešto višem izlaznom naponu, pošto onda počinje da se delimično zasićuje rasklopivo jezgro. Pri tome je važna činjenica da strujni transformator radi u približno kratkom spoju. Koncept konvertora je prikazan na Slici 5. Ulazna naizmenična struja se ispravlja i tako ispravljena struja se ili kratko spaja pomoću prekidača Q1 ili se pušta kroz boost diodu u paralelnu vezu potrošača i elektrolitičkog kondenzatora. Slični principi rada konvertora su opisani u [2]. Regulacioni sistem je tako podešen i realizovan da se održava zadata vrednost napona na izlazu, a to se postiže promenom relativnog trajanja kratkog spoja prekidača Q1. Primenjena frekvencija prekidanja je 2 kHz a upravljanje je izvedeno pomoću integrisanog kola 3524. Postoji i tranzijent supresor dioda, koja služi da zaštiti konvertor od uništenja u trenucima kada se dešava kratak spoj na energetskom kabl, i ima funkciju da u trenutku kad se kabl priključuje ograniči ulazni napon dok ne proradi kratkospajajući konvertor. Opisani konvertor je realizovan i postignut je željeni opseg radne struje (na ispitnom setu konvertor je uspešno radio pri struji kabla od 60 do 600 A naizmenične struje). Postoji mogućnost da se iz ovakvog konvertora napaja i mala akumulatorska baterija, radi postizanja rada napajanih senzora temperature i kad kabl ne radi, mada je osnovni smisao da senzori rade (budu napojeni) kada radi i energetski kabl.



Slika 5 - Principijelna šema konvertora



Slika 6 - Fizički izgled realizovanog konvertora

3 PRINCIP REGULACIJE NAPONA

Princip rada ovog konvertora se zasniva na propuštanju određene količine naelektrisanja u izlazni kondenzator, tačno onoliko koliko je potrebno da se nadoknadi pad napona zbog struje koju uzima potrošač. Gruba analiza se može izvesti ako se smatra da je na ulazu u konvertor priključen strujni izvor čija je srednja struja jednaka srednjoj vrednosti usmerene struje (na izlazu iz diodnog ispravljačkog mosta). Tada je izlazna struja konvertora prikazana jednačinom (1)

$$I_{g,AV} * (1 - d_{AV}) = I_{out} \quad (1)$$

gde je $I_{g,AV}$ srednja vrednost struje ekvivalentnog strujnog generatora, d_{AV} srednja vrednost relativnog trajanja uključenog stanja tranzistora Q1 i I_{out} srednja vrednost izlazne struje.

Pri tome je struja koju uzima potrošač definisana izrazom (2)

$$U_{out} / R_{out} = I_{out} \quad (2)$$

U principu, tranzistor kratkospajač, Q1 trajanjem uključenog stanja u toku periode prekidanja (0,5 ms) reguliše srednju vrednost izlazne struje, odnosno održava napon na izlazu konvertora. Nažalost, jednačine (1) i (2) opisuju veoma uprošćen model pojave.

U realnom slučaju, struja strujnog izvora, koga kratko spaja tranzistor Q1 nije konstantna nego ima talasni oblik ispravljene sinusoide (3)

$$i_g(t) = I_g |\sin(\omega \cdot t)|, \quad (3)$$

gde je I_g amplituda ulazne struje a ω kružna frekvencija mreže.

Ako je prekidačka frekvencija regulatora dovoljno velika, ima smisla posmatrati promenu srednje vrednosti relativnog trajanja uključenog stanja tranzistora Q1 u toku trajanja jedne poluperiode fundamentala (10 ms). Neka je komplement relativnog trajanja uključenja tranzistora Q1 definisan sa (4)

$$d'_{AV} = 1 - d_{AV} \quad (4)$$

Regulacioni uslov je dat izrazom (5)

$$i_g(t) * d'_{AV}(t) = I_{out} \quad (5)$$

odakle sledi da je (6)

$$d'_{AV}(t) = \frac{I_{out}}{|I_g * \sin(\omega \cdot t)|} \quad (6)$$

Brzi PI regulator napona koji upravlja ovim konvertorom može da održava izlazni napon samo ako može da se ubrizga potrebna struja I_{out} u potporni kondenzator. Pošto vrednost komplementa relativnog trajanja uključenja tranzistora Q1 mora biti manja ili jednaka 1, to znači da postoje intervali vremena u toku poluperiode fundamentala gde PI regulator ne može da reguliše količinu ubrizganog naelektrisanja u potporni kondenzator na izlazu, nego je tranzistor Q1 stalno blokiran. Trenutak kada počinje da radi regulator napona u toku poluperiode fundamentala, t_1 , se može približno odrediti iz izraza (7)

$$\omega \cdot t_1 = \arcsin\left(\frac{I_{out}}{I_g}\right) \quad (7)$$

Približnost se ogleda u tome da u periodima gde regulator ne može da održava trenutnu vrednost izlaznog napona, izlazni napon na potpornom kondenzatoru pada ispod ciljane izlazne vrednosti U_{out} i potrebno je određeno vreme za postizanje te vrednosti napona, što dovodi do dodatnog kašnjenja u odnosu na vreme t_1 , određeno prema (7).

4 EKSPERIMENTALNI REZULTATI

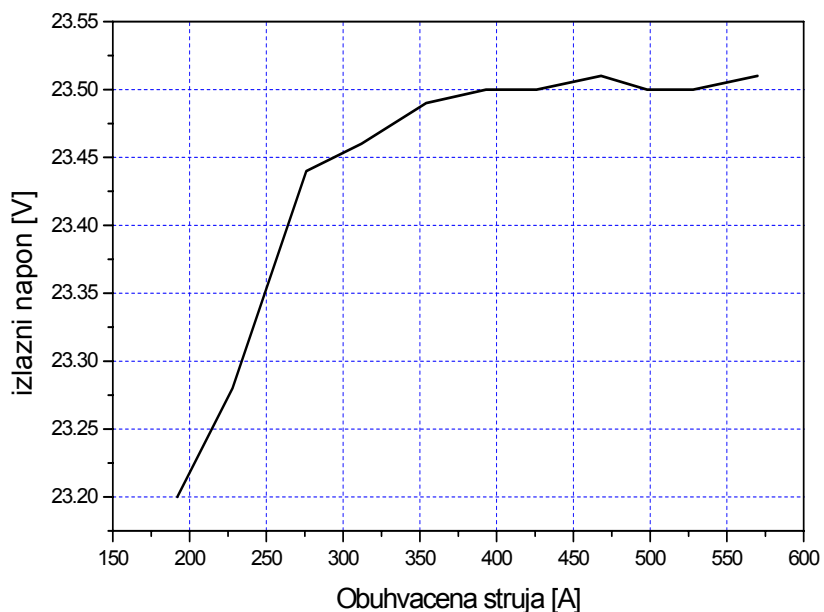
Na slici 6 je prikazan fizički izgled realizovanog konvertora. Konvertor je napojen sa naizmeničnom strujom koja se ispravlja pomoću monofaznog diodnog ispravljača.

Taj diodni ispravljač je spojen sa obuhvatnim strujnim transformatorom. Kroz provodnik obuhvaćen strujnim transformatorom se može menjati naizmjenična struja u opsegu od 0 do 600 A. Opterećenje na izlazu konvertora je simulirano sa otpornikom otpornosti 120Ω a potporni kondenzator na izlazu ima kapacitet od $470 \mu\text{F}$.

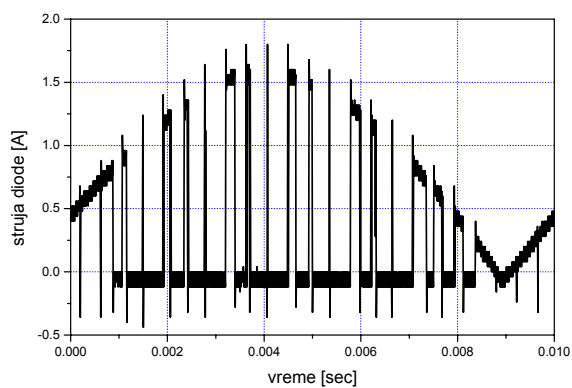
Regulisani napon na izlazu ovog konvertora slabo zavisi od promene ulazne naizmjenične struje u širokom opsegu. Karakteristična zavisnost je prikazana na slici 7. Srednji regulisani nivo napona na izlazu konvertora je $23,5 \text{ V}$. Na slikama 8, 9 i 10 prikazani su snimljeni talasni oblici struje koja teče kroz diodu za ubrizgavanje struje (boost dioda, BYT 12 PI 600), pri strujama obuhvaćenog provodnika od 600A , 300A i 200A , respektivno.

Jasno se uočava da sa porastom struje kroz obuhvaćeni provodnik zona regulacije postaje šira. Na slikama 11 i 12 su prikazani talasni oblici napona između kolektora i emitora kratkospajajućeg tranzistora Q1. Na slikama se vidi kako se menja širina propuštenog impulsa struje u zavisnosti od trenutne vrednosti ulazne struje.

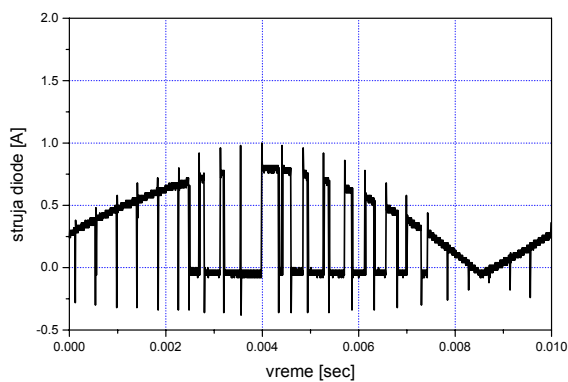
Pikovi napona koji se vide odmah po isključenju tranzistora potiču od tranzijentnog pada napona na diodi za ubrizgavanje struje, dok ona ne pređe potpuno u provodno stanje. Potrebna snaga za napajanje svih mernih senzora iznosi (u punoj konfiguraciji) oko $4,8\text{W}$, što odgovara opterećenju sa kojim je vršeno testiranje ovog konvertora. To opterećenje je u toku rada sistema za merenje temperature konstantno.



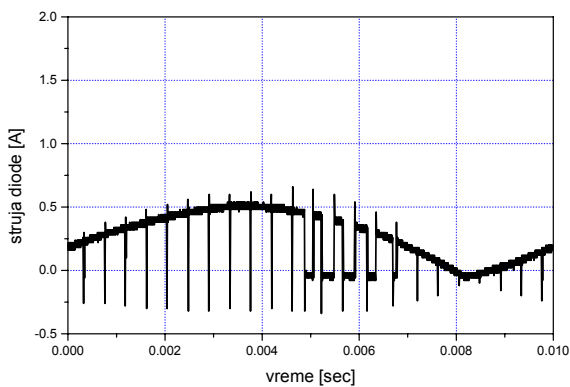
Slika 7 - Izlazni napon u funkciji obuhvaćene struje, teret 120Ω .



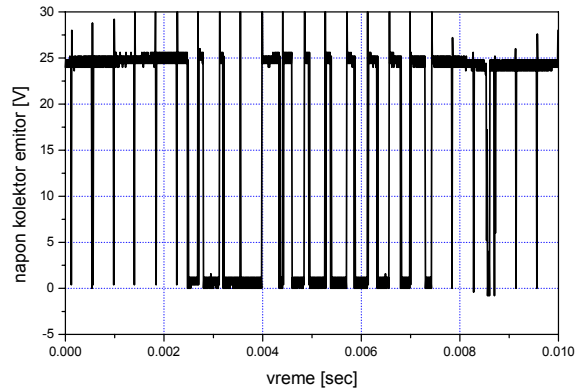
Slika 8 - Struja kroz diodu za ubrizgavanje, obuhvaćena struja 600A.



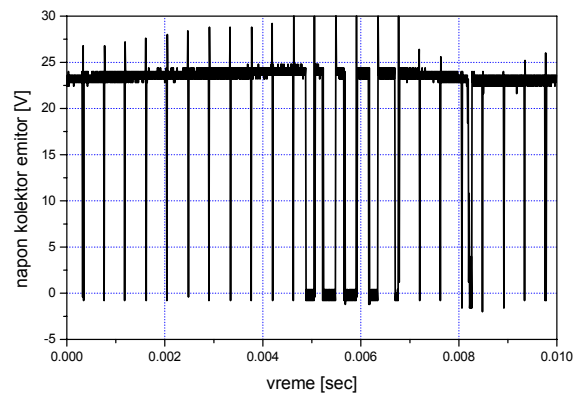
Slika 9 - Struja kroz diodu za ubrizgavanje, obuhvaćena struja 300A



Slika 10 - Struja kroz diodu za ubrizgavanje, obuhvaćena struja 200A



Slika 11 - Napon između kolektora i emitora, obuhvaćena struja 300A



Slika 12 - Napon između kolektora i emitora, obuhvaćena struja 200A

5 ZAKLJUČAK

Na osnovu prikazane konstrukcije, principa rada i statičkih karakteristika kao i eksperimentalnih rezultata, može se zaključiti da kratkospajajući konvertor predstavlja visokokvalitetan i praktičan sistem za lokalno napajanje mernih senzora temperature energetskih kablova. Prikazani sistem lokalnog napajanja mernih senzora i modula za kondicioniranje i digitalizovanje izmerenih temperatura je pogodan za merenje i nadzor radnih temperatura u eksploataciji kabla 110 kV.

LITERATURA

- [1] Studija 359705, "Uticaj toplote na prenosnu energetska moć kablovskih vodova 110 kv na području Beograda", Grupa saradnika Elektrotehničkog instituta "Nikola Tesla", urađeno za EPS, 1998.
- [2] B.D. Bedford, R.G. Hoft, "Principles of Inverter Circuits", Wiley, New York 1964.

Abstract: This paper presents an AC-DC converter utilizing short circuits at its input, dedicated for power supply of power cable temperature monitoring units. The needed power is extracted from the power cable electromagnetic field via current transformer, and then processed through the proposed converter. On such way, the output voltage is controlled on a non dissipative way. The experimental records of voltage and current in some characteristic parts of the proposed converter are shown, under different current ratings through the current transformer. Also, the simplified explanation of operation principle is given and the static characteristic of the converter is shown.

Keywords: *power cable monitoring, sensor power supply, AC-DC conversion*

LOCAL POWER SUPPLY OF THE POWER CABLE TEMPERATURE MONITORING SYSTEM

Žarko Janda, Milutin Sredojević