

DIZAJN, RAZVOJ I IMPLEMENTACIJA SENZORSKOG SISTEMA ZA MJERENJE PRITISKA U MODELU VISOKONAPONSKOG PREKIDAČA

DESIGN, DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A PRESSURE MEASUREMENT SENSORY SYSTEM FOR A HIGH VOLTAGE CIRCUIT BREAKER MODEL

Emir Sokić¹, Vedad Bečirović¹, Amer Smajkić², Dejan Bešlija²,
Mahir Muratović², Belma Bosović², Mirsad Kapetanović²

Sažetak: U radu je opisan cijelokupan postupak dizajna, razvoja i implementacije namjenski razvijenog pretvarača pritiska kao sastavnog dijela mjernog sistema za eksperimentalno ispitivanje i simulaciju modela visokonaponskog prekidača. U radu je uz kraći pregled konkurenčnih komercijalnih mjernih sistema za mjerjenje pritiska detaljno objašnjen postupak sinteze vlastitog pretvarača pritiska - od ideje do konačne implementacije. Eksperimentalni rezultati pokazuju da razvijeni pretvarač u potpunosti zadovoljava zadane specifikacije i posjeduje dodatni niz prednosti u odnosu na postojeća komercijalna rješenja.

Ključne riječi: mjerni sistem, pritisak, senzor, pretvarač, visokonaponski prekidač

Abstract: This paper describes the complete process of design, development and implementation of a specifically developed pressure transducer, installed as a part of a measurement system developed for experimental testing and simulation of high voltage circuit breaker model. The synthesis of the custom-made pressure transducer - from the initial idea to the final implementation is presented in the paper, alongside with a brief survey of competitive commercial measurement solutions. The experimental results suggest that the developed pressure transducer completely fulfils the specified technical requirements. Moreover, the proposed transducer has many additional advantages over existing commercial solutions.

Keywords: measurement system, pressure, sensor, transducer, high voltage circuit breaker

UVOD

U današnje vrijeme računarske simulacije su postale neizbjeglan alat u procesu dizajniranja i optimizacije visokonaponskih (VN) SF₆ prekidača [1]. Takve simulacije su zasnovane na matematskom modeliranju mnoštva različitih procesa i njihovih međusobnih interakcija unutar prekidača tokom operacija uklopa i isklopa. Naravno, eksperimentalni rad i istraživanja na modelima i prototipovima VN SF₆ prekidača su također neophodni, te predstavljaju jako moćan alat u procesima dizajniranja i optimizacije VN prekidača [2].

Prednost korištenja simulacije je veća fleksibilnost, jednostavniji uvid u pojedine simulirane parametre visokonaponskog prekidača i niska cijena u eksploataciji. S druge strane, upitno je tvrditi da su simulacijom obuhvaćeni svi parametri stvarnog prekidača i skoro je nemogu-

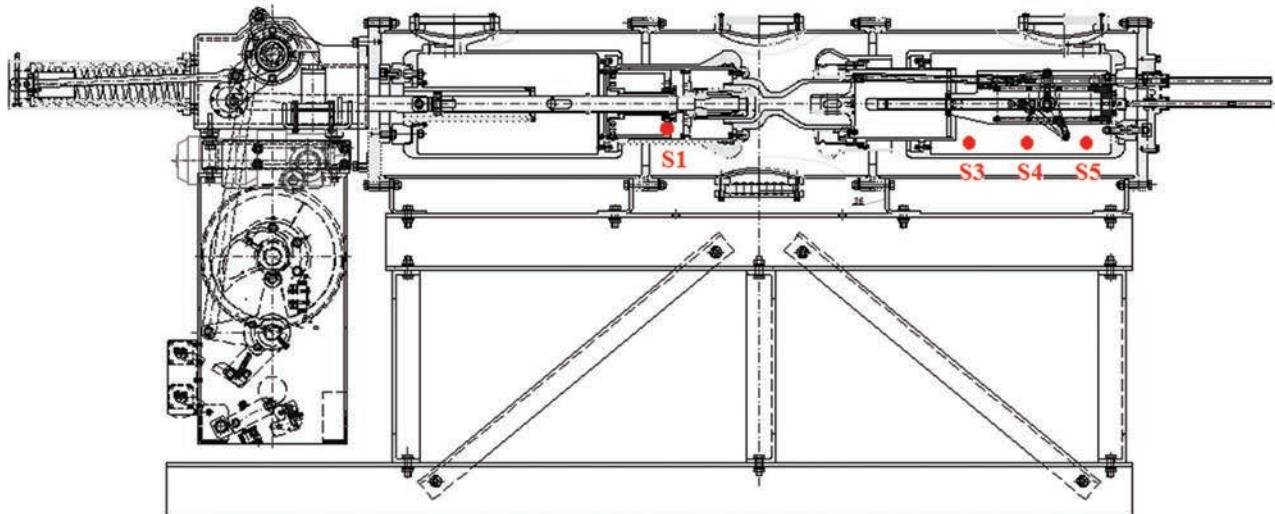
će kompletno ocijeniti njihov uticaj na elektromehaničke, hemijske i fizičke procese u njegovom radu, ili predvidjeti njegovo ponašanje.

Nedostaci simulacije se prevazilaze razvojem prototipa/ modela i direktnim mjeranjem važnih veličina kao što su: nazivna vremena prekidača, hodogrami i brzina kretanja kontakata, oscilacije pojedinih elemenata u kinematskom lancu, trošenje kontakata i mlaznica, itd. Korištenje prototipa i pratećeg mjernog sistema kao nedostatak imaju visoku cijenu proizvodnje i održavanja, ali s druge strane ovaj pristup pruža neuporedivo važnije i pouzdanoje informacije o stvarnim parametrima u sistemu.

Kao posljedica odličnih osobina tokom gašenja luka električne struje i svojih dielektričkih karakteristika, gas SF₆ je kao medij najzastupljeniji u VN prekidačima [3]. Analiza porasta pritiska SF₆ gasa u određenim volumenima i njegovog toka unutar sklopog elementa, određenih prvenstveno ponašanjem prekidača tokom i nakon gašenja električnog luka, je od posebnog interesa za konstruktore ovih aparatova.

¹ Elektrotehnički fakultet u Sarajevu, Bosna i Hercegovina
esokic@ef.unsa.ba

² EnergoBos ILJIN doo, Bosna i Hercegovina
Rad dostavljen: avgust 2016. Rad prihvaćen: oktobar 2016.



Slika 1: Shematski prikaz modela VN prekidača s oznakom tačaka od interesa (S1, S3, S4 i S5) u kojima se želi analizirati pritisak (prva dispozicija senzora)

Dinamičke promjene pritiska poželjno je analizirati na nekoliko lokacija u VN prekidaču [4], tipično u kompresionom volumenu (eng. *compression chamber - CC*), termalnom volumenu (eng. *heating chamber – HC*) i u volumenima za hlađenje gasa, kao što je to prikazano na Slici 1. Važno je napomenuti da je oznaka S2 na Slici namjerno izostavljena, kako bi se u nastavku rada mjerama mesta jednoznačno povezala s korištenim senzorima.

U ovom radu bit će opisan postupak dizajna, razvoja i implementacije pretvarača pritiska (eng. *transducer*) koji je razvijen za potrebe mjerena pritiska u modelu VN prekidača, i to isključivo za ispitivanje modela VN prekidača u beznaponskom stanju. Pretvarači pritiska su osmišljeni i proizvedeni u saradnji s investitorom EnergoBos ILJIN d.o.o., te Mašinskim i Elektrotehničkim fakultetom u Sarajevu. Nakon testiranja, pretvarači su ugrađeni u postojeći merni sistem [5] modela VN prekidača u EnergoBos laboratoriji za eksperimentalna istraživanja na modelima i prototipovima visokonaponskih SF₆ prekidača (EB LAB) pri Mašinskom fakultetu u Sarajevu.

Rad se sastoji iz nekoliko cjelina: definiranja projektnog zadatka, analize postojećih i konkurentnih rješenja, opisa dizajna predloženog pretvarača pritiska, kalibracije i snimanja statičkih i dinamičkih karakteristika pretvarača, opisa implementacije u okviru mernog sistema, te diskusije dobivenih eksperimentalnih rezultata. Na kraju rada dat je zaključak i postavljene smjernice za budući rad.

1. PROJEKTNI ZADATAK

Zadatak definiran od strane EB LAB bio je identifikacija i nabavka pretvarača pritiska koji zadovoljava sljedeću specifikaciju:

- mogućnost mjerena pritiska u rasponu 0-20 (bar) apsolutno,
- mogućnost rada u vakuumu (trajno opterećenje),
- vrijeme odziva minimalno 4 (bar/ms),

- tačnost bolja od od 0.05-0.1 (bar),
- medij: zrak/SF₆ gas,
- radna temperatura do 50 (°C),
- ekonomski opravdano rješenje,
- mogućnost trajne montaže i ispravnog rada pretvarača unutar modela koji se nalazi pod nominalnim apsolutnim pritiskom od 7 (bar).

Od svih parametara najvažniji su bili brzina odziva i prihvativljiva cijena. Mjerenje pritiska u rasponu 0-20 (bar) nije bilo obavezujuće jer su se očekivana mjerena kretala u opsegu 5-12 (bar), ali je bilo važno da senzor može bez oštećenja izdržati uslove pod vakuumom, koji se javljuju prilikom punjenja VN prekidača SF₆ gasom. Osim toga, za razliku od većine komercijalnih rješenja, pretvarač mora imati mogućnost mjerena pritiska čak i kada se cijelokupan nalazi u komori pod pritiskom.

2. ANALIZA DOSTUPNIH RJEŠENJA

Mjerenje pritiska u industrijskom okruženju obavlja se prvenstveno korištenjem tzv. transmitera i transdusera pritiska. To su komponente koje osim senzora pritiska (elektroničke komponente koja pritisak pretvara u neku pomoćnu električnu veličinu) sadrže i elektronički sklop koji vrši konverziju pomoćne električne veličine (otpora, struje, napon, električnog naboja) u industrijski standardiziranu električnu veličinu (napon 0-10 V, struja 4-20 mA i sl.). Ove komponente veoma često imaju linearnu skalu na cijelom opsegu, temperaturnu kompenzaciju i garantiju proizvođača na brzinu odziva i tačnost. Sve ove prednosti dolaze i uz dva nedostatka - višu cijenu, i nerijetko veće dimenzije koje mogu predstavljati problem prilikom montaže unutar VN prekidača. U Tabeli I predstavljeno je nekoliko reprezentativnih komercijalnih rješenja dostupnih u Bosni i Hercegovini.

Kao što se vidi iz Tabele I, komercijalna rješenja po pravilu imaju nekoliko nedostataka. Najčešće je to preširok

Tabela I: Pregled konkurentnih pretvarača za mjerjenje pritiska

Proizvođač	Zadano	Sick	Jumo	Gems	V-OHM Eurosensor	Schneider
Radni opseg (bar)	0-20	0-25	0-25	0-16	0-25	0-25
Tip mjerena	Aps.	Aps.	Aps./Rel.	Aps./Rel.	Rel.	Rel.
Tačnost (bar)	0.05-0.1	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125
Brzina odziva (bar/ms)	4	20	4-10	4	20	4
Maks.temperatura (°C)	50	100	100	100	100	100
Tip medija	Zrak/SF6	Teč./Gas	Teč./Gas	Teč./Gas	Teč./Gas	Teč./Gas
Cijena (Eur)	što manja	500	320	150-220	150-220	150-220

ili preuzak mjerni opseg, manja tačnost mjerena i po pravilu znatno viša cijena. Ukoliko se uzme u obzir potreba za istovremenim mjerjenjem pritiska u modelu VN prekidača u više od 5 tačaka, onda cijena cjelokupnog sistema značajno raste. Ipak, osnovni razlog zbog kojeg se odstupilo od instalacije gotovih rješenja je taj što proizvođači uglavnom garantuju ispravan rad pretvarača isključivo ukoliko se kućište pretvarača (tzv. električna strana) nalazi na atmosferskom pritisku.

Skuplja, namjenska komercijalna rješenja koja se mogu koristiti za mjerjenje pritiska u VN prekidaču su prikazana na Slici 2. Kompanije kao što su Kistler i Dytran proizvode namjenske senzore pritiska koji na osnovu piezoelektričnog efekta pretvaraju pritisak u električni naboј, a potom korištenjem namjenskog pojačala kao što je CM 5015A pretvaraju mjerjenje naboja u standardne industrijske signale. Naravno, ova su rješenja pogodna za trajne instalacije ili za verifikaciju rezultata, ali ekstremno visoka cijena ulaganja u takve senzore u nepredvidljivim uslovi-

ma u kojima radi prototip (mogućnost oštećenja/eksplozije modela prilikom testiranja i sl.) nisu ekonomski opravданa, niti isplativa.

Posljednje moguće rješenje je korištenje samo senzora pritiska, bez pripadajućeg elektronskog sklopa koji obavlja konverziju mjerene veličine. Karakteristični predstavnici ovakvih rješenja dati su u Tabeli II.

Prednost korištenja senzora pritiska je prvenstveno u niskoj cijeni i malim dimenzijama, ali i fleksibilnosti pri razvoju senzora. Nedostaci se ogledaju u izostanku dokumentacije, garancije proizvođača, mogućim odstupanjima između pojedinih uzoraka senzora (različite električne i fizičke karakteristike), te nepostojanje pratećeg elektronskog sklopa za pretvaranje signala.

Analizirajući sve moguće pristupe navedene u ovoj sekciji, i uzimajući u obzir specifikacije zadatka i problem koji je bilo potrebno riješiti, odlučeno je da se pristupi razvoju vlastitog pretvarača pritiska koji će detaljnije biti opisan u nastavku rada.

3. DIZAJN PRETVARAČA PRITISKA

Kao osnovni element za razvoj predloženog pretvarača pritiska odabran je Smartec SPD300ABto05 senzor pritiska. Osnovni razlog izbora ovog senzora je niska cijena, male dimenzije i specifičnost principa rada (mogućnost rada u sredini pod pritiskom). Ovaj senzor je prvenstveno razvijen za mjerjenje pritiska tečnog gasa (LPG). Za razliku od drugih senzora kod kojih bi pucanje mjerne membrane moglo uzrokovati curenje gase iz komore u kojoj se taj pritisak mjeri, odabrani senzor svoje mjerjenje referira u odnosu na interni vakuum, tako da čak i u slučaju pucanja membrane neće doći do curenja. Ova izvedbena karakteristika (mjerjenje u odnosu na interni vakuum) omogućava dizajniranje pretvarača čije kućište može izdržati pritiske koji nisu atmosferski, bez utjecaja na njegovu funkcionalnost.

Osnovne specifikacije Smartec SPD300ABto05 senzora su date su u Tabeli III, a ostali podaci kao što je fizički izgled, raspored pinova i princip funkcioniranja dati su na Slici 3 (preuzeto iz [6]).

Kao što je ilustrovano na Slici 3, korišteni senzor radi na principu otpornog mjernog mosta. Rezistivni mjerni most je fizički zalipljen na mjeru membranu. Jedna strana

Tabela II: Pregled konkurentnih senzora za mjerjenje pritiska

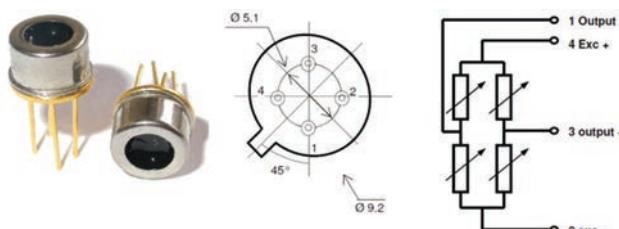
Proizvođač	Zadano	B&B TT	Smartec
Radni opseg (bar)	0-20	0-20	0-20
Tip mjerena	Aps.	Aps.	Aps./Rel.
Tačnost (bar)	0.05-0.1	0.08	-
Brzina odziva (bar/ms)	4	-	-
Maks.temp.(°C)	50	80-105	85
Tip medija	Zrak/SF6	Teč./Gas	Teč./Gas
Cijena (EUR)	<<	40	10



Slika 2: Kistler i Dytran piezoelektrični senzori pritiska (Type 601A odnosno 2200C4) s pripadajućim pojačalom (Charge meter Type 5015A)

Tabela III: Osnovni tehnički parametri korištenog senzora

Parametar	Min.	Tip.	Maks.
Pobudni napon (V)	0	5	10
Pobudna struja (mA)	-	1.5	
Raspont (FS) 300 psi	130	220	275
Ofset (mV)	-30	0	30
Rasp. temp. koef. (%FS/100°C)	-15	-19	-23
Ofs. temp. koef. (%FS/100°C)	-7		+7
Otpornost mosta (kOhm)	2.7	3.3	4.0
Preopterećenje pritiska (FS)			2x
Radna temperatura	-20		85
Temp. skladištenja	-40		150

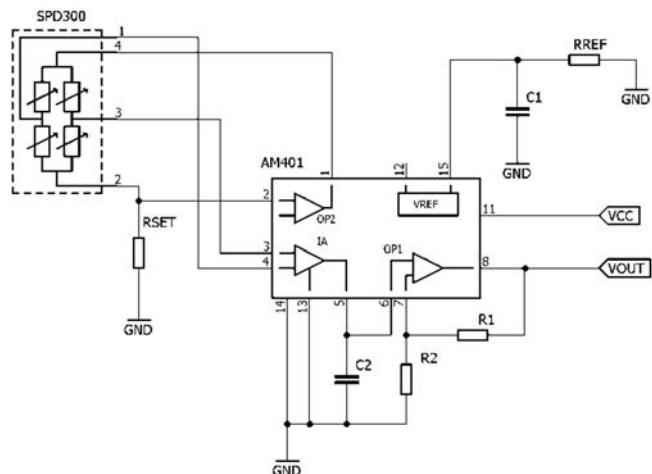


Slika 3: Smartec SPD300ABto05 senzor pritiska (izgled, raspored pinova, princip rada)

mjerne membrane zaptiva minijaturnu komoru u kojoj se nalazi vakuum, a na drugu stranu membrane se dovodi medij čiji se pritisak mjeri. Djelovanje pritiska ugiba membranu i remeti ravnotežu mjernog mosta, pa se promjena otpornosti u funkciji od pritiska može registrirati. Jedan od nedostataka izbora ovakvog senzora je što se uz pripadajući mjerni most mora dizajnirati i odgovarajuće pojačalo i konvertor električnih veličina.

Potreba za sintezom vlastitog pojačala sa sobom nosi i određenu prednost. Dizajniranje vlastitog električnog sklopa omogućava utjecanje na konačne dimenzije pretvarača i njegova električka svojstva, pa se na taj način dizajn pretvarača može prilagoditi korisniku. U slučaju mjerjenja pritiska u VN prekidaču ovo može biti jako važno. Naime, veće dimenzije pretvarača mogu smetati pokretnim dijelovima prekidača, ili remetiti uobičajena strujanja SF6 gase u modelu i na taj način negativno utjecati na mjerjenje.

Da bi se promjena otpornosti konvertovala u napon pogodan za mjerjenje u mjernom sistemu a istovremeno minimizirao broj dodatno potrebnih električnih komponenti, odabранo je visoko-integrirano industrijsko naponsko pojačalo Analog Microelectronics AM401 [7]. Na Slici 4 data je projektovana shema spajanja. Važno je napomenuti da ovakva struktura pojačala omogućava linearno pojačanje ulaznog signala (koje se bira otpornicima R1 i R2), a na izlazu se dobiva signal koji se kreće u intervalu (Vprag, Vcc-5) gdje je Vprag donji prag operacionog pojačala, a Vcc napon napajanja sklopa. S obzirom da je zahtjev na reduciranje dimenzije sklopa imao veći prioritet nego omogućavanje mjerjenja pritisaka do



Slika 4: Shema predloženog pretvarača pritiska. Proizvodna cijena ovakvog pretvarača pritiska je svega 40 EUR

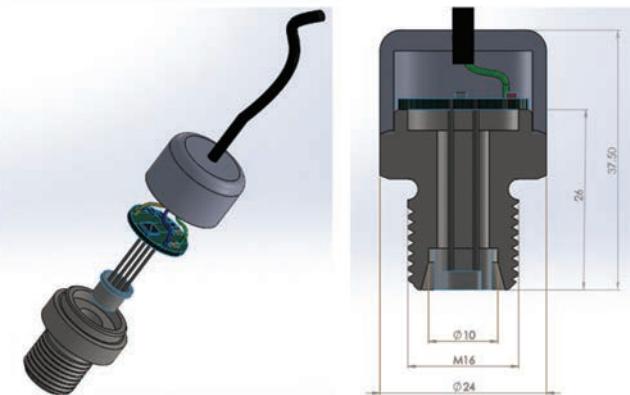
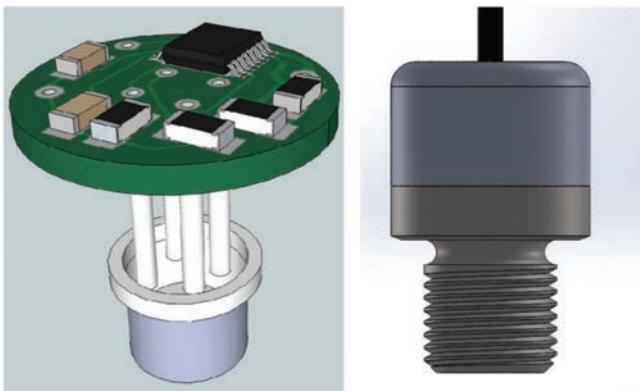
nivoa vakuuma (što bi zahtijevalo par dodatnih komponenti), ovakvim sklopom nije moguće mjeriti pritiske ispod 1.4 (bar). Također, važno je napomenuti da je prema dokumentaciji za ispravan rad AM401 integrisanog kruga izlazne pinove potrebno zatvoriti određenom impedansom (tip. 8.2 (kOhm)).

Prije konačne proizvodnje pretvarača, bilo je potrebno analizirati njegove statičke i dinamičke karakteristike, pa je prvo napravljen jedan prototip s tzv. "eksternim pojačalom" – u kojem su senzor i pojačalo povezani kablom dužine 50 cm. Nakon što su eksperimentima potvrđena željena svojstva pretvarača pritiska (o čemu će više detalja biti dato u narednoj sekciji), pristupilo se dizajniranju i izradi kućišta, te specijalno dizajnirane električke štampane pločice (PCB). Naime, kako bi se reducirali šumovi mjerjenja važno je da pojačalo bude što je moguće bliže mjernom mostu. Kako bi se zadovoljile specifikacije odlučeno je da se cijelokupan senzor i električni sklop smjesti u vijak M16 odnosno M20 (OK24). Odgovarajući tehnički crteži i 3D modeli su prikazani na Slici 5, a konačna realizacija na Slici 6. Pripadajuća elektronika i senzor zaliveni su plastičnom zaptivnom masom, koja služi kao izolator, zaštitu od korozije, te zaštitu od povišenog pritiska na električnoj strani senzora. Na ovaj način se osiguralo da pretvarač radi ispravno i u uslovima kada se kućište senzora nalazi pod povišenim pritiskom.

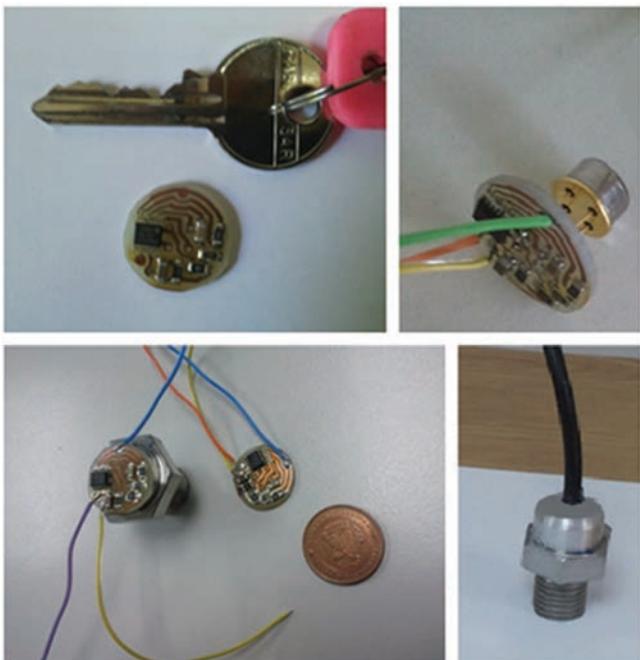
Ukupno je asemblirano pet pretvarača pritiska, od čega 3 s vertikalnim ulazom, a 2 s bočnim ulazom kabla (u nastavku teksta označeni oznakama S1 do S5).

4. KALIBRACIJA I SNIMANJE STATIČKE I DINAMIČKE KARAKTERISTIKE

Da bi se dizajnirani pretvarač pritiska mogao pustiti u rad bilo je potrebno snimiti njegovu zavisnost napona od pritiska $U = f(p)$, te provjeriti da li se senzor i pripadajući električni sklop može koristiti za mjerjenje brzih promjena (skokova) pritiska koji su karakteristični za eksperimete uklopa/isklopa na modelu VN prekidača.



Slika 5: Poprečni presjek i 3D model razvijenog pretvarača pritiska



Slika 6: Postupak izrade vlastitog pretvarača pritiska

Kalibracija razvijenih pretvarača pritiska je obavljena na Mašinskom fakultetu u Sarajevu. Korišten je manometar WIKA klase tačnosti 0.1 (tačnost 0.05 (bar) na opsegu 25 (bar)) spojen na posebno dizajniranu regulacionu komoru za kalibraciju mjerača pritiska.

Kalibracija je istovremeno vršena na svih pet razvijenih pretvarača. Snimanje izlaznih mjernih signala je obavlje-



Slika 7: Postavka instrumenta za kalibraciju pretvarača pritiska

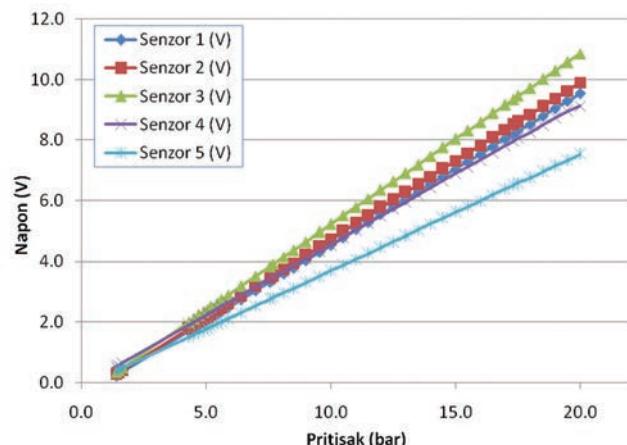
Tabela IV: Prenosne funkcije razvijenih senzora

Oznaka senzora	Funkcija $p=p(U)$	Standardna devijacija
Senzor S1	$p=1.9983U+0.9381$	0.0118
Senzor S2	$p=1.9345U+0.863$	0.0116
Senzor S3	$p=1.7708U+0.774$	0.0116
Senzor S4	$p=2.1508U+0.2141$	0.0325
Senzor S5	$p=2.6033U+0.4003$	0.0129

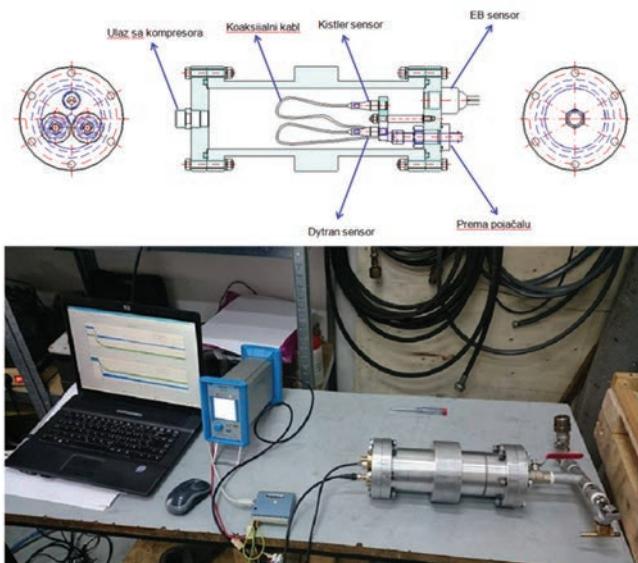
no mjerno-akvizicijskom karticom USB-1408FS-Plus 14bit snimano u diferencijalnom modu. Na Slici 7 prikazana je postavka sistema za izvođenje eksperimenata, dok su na Slici 8 prikazane snimljene karakteristike.

Kao što se vidi na Slici 8, veza između napona i pritiska je uvijek linearna funkcija, samo je nagib krive različit za svaki pojedinačni senzor. Ova odstupanja su prisutna prvenstveno zbog razlike među senzorima, pojačalima i nesavršenosti komponenti. Da bi se normirali izlazni signali sa senzora, moguće je koristiti eksterni hardver (pojačalo i/ili naponske djelitelje). Međutim, jednostavnije i pouzdanije je prenosnu funkciju $p = f(U) = f_2(R)$ direktno implementirati u softver sistema kojim će se raditi mjerenje. Rješenje je jeftinije, jednostavnije i omogućava izmjenu prenosne funkcije nakon određenog vremena ukoliko to bude potrebno (npr. uslijed starenja senzora).

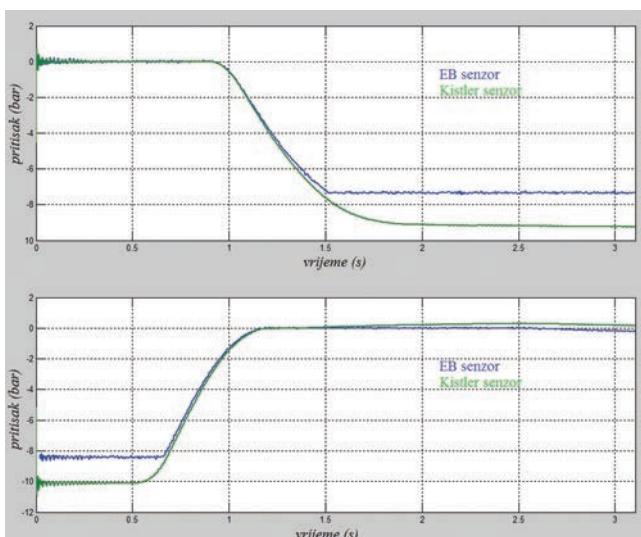
Nakon što je okončan postupak kalibracije pretvarača pritiska, te određena njegova prenosna funkcija linearnom interpolacijom, bilo je potrebno izvršiti validaciju pre-



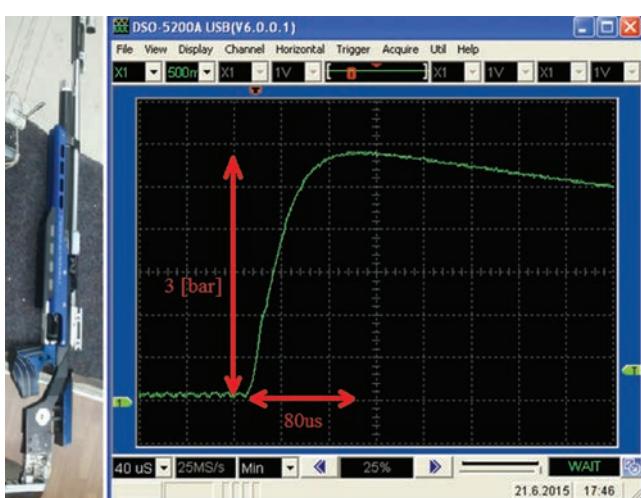
Slika 8: Snimljene karakteristike pretvarača



Slika 9: Usporedni test Kistler, Dytran i razvijenih pretvarača pritiska - eksperimentalna postavka



Slika 10: Usporedni test Kistler pretvarača i razvijenih pretvarača pritiska - rezultati mjerjenja. Napomena: mjerena je prikazana relativno u odnosu na referentni radni pritisak



Slika 11: Dinamička karakteristika razvijenih pretvarača pritiska

tvarača pritiska. U tu svrhu su korišteni komercijalni mjeri sistemi proizvođača Kistler i Dytran (datih na Slici 2).

Na Slici 9 prikazan je način montiranja senzora na komoru za kalibraciju senzora, dok su na Slici 10 dati usporedni rezultati mjerjenja sa Kistler i Dytran senzorima. Na osnovu dijagrama na Slici 10 jasno se vidi da na razvijenim senzorima postoji tzv. "mrtva zona", koja onemogućava mjerjenje pritiska ispod 1.4 (bar) apsolutno. Međutim, s obzirom da se očekivana mjerena mjerena pritiska kreću u intervalu od 3-12 (bar), to ne predstavlja ozbiljan nedostatak razvijenih pretvarača.

Veoma važna osobina razvijenog senzora je mogućnost mjerjenja brzih tranzijenata signala pritiska. Kako bi se provjerilo da li korišteni senzor i pripadajuće pojačalo mogu izmjeriti brze tranzijente, bilo je neophodno prije ugradnje ispitati mogućnost registracije nagle promjene pritiska.

Za razvijene pretvarače se morala obezbijediti garantija da mogu mjeriti željene promjene pritiska (minimalno 4 (bar/ms)) u modelu VN prekidača. Važno je napomenuti da se ovakve promjene pritiska u modelu VN prekidača dešavaju pri uobičajenim beznaponskim operacijama uklopa/isklopa, ali u kontroliranim i strogo projektovanim uvjetima. Nažalost, niti jedna certificirana laboratorijska u Bosni i Hercegovini nema mogućnost dinamičkog ispitivanja razvijenih senzora. Usprkos tome, u saradnji sa Streličkim klubom "Visoko" osmišljeno je alternativno ispitivanje senzora upotrebom takmičarskih vazdušnih puški. Puške su korištene kao izvor brzih promjena pritiska i omogućile su snimanje odziva projektovanih pretvarača (Slika 11). Na osnovu snimljenih dijagrama s prototipskim pretvaračem izveden je zaključak da je predloženi pretvarač u mogućnosti mjeriti tranzijente najmanje do 37.5 (bar/ms), te da projektovani pretvarači u potpunosti zadovoljavaju projektnе specifikacije zadatka.

5. INSTALACIJA PRETVARAČA PRITISKA U MJERNI SISTEM

Jedan od dodatnih izazova pri projektovanju mjernog sistema je bio način prenosa električnog signala izvan modela VN prekidača, budući da se pretvarači kao i električni kablovi nalaze u njegovoj unutrašnjosti pod nominalnim pritiskom od 7 (bar).

Tipično se u tu svrhu kod boca pod pritiskom koriste tzv. izvodnice/uvodnice. Međutim, s obzirom da razvijeni pretvarač zahtijeva 3 vodiča (dva za napajanje i jedan za merni signal), veći broj senzora bi zahtijevao veći broj izvodnica.

Nadalje, zbog ograničenih dimenzija unutar VN prekidača, bilo je potrebno reducirati i dimenzije električnog konektora pretvarača, pri tome ne narušavajući njegova elektromehanička svojstva.

Važno je napomenuti da se u trenutku isklopa/uklopa u VN prekidaču (čak i u beznaponskom stanju - bez pojave



Slika 12: Prilagođenje višekontaktnе epoksidne ploče za prenos električnih signala sa pretvarača iz modela VN prekidača



Slika 13: Mjerni sistem

električnog luka) pojavljuju značajne turbulencije SF₆ gasa pod pritiskom, brza mehanička kretanja i sile značajnih intenziteta. To može uzrokovati vibracije kontakata konektora, oštećenje konektora ili senzora, te eventualni prekid signala - što se mora uzeti u obzir. U konačnici, treba imati na umu da se model VN prekidača često demontira, te se iz tog razloga trebao osmislišti što jednostavniji način uspostave i prekida veze sa pretvaračima.

Kao osnova za rješenje odabранa je epoksidna ploča s izvedenim kontaktima (CT Terminal) koja se uobičajeno

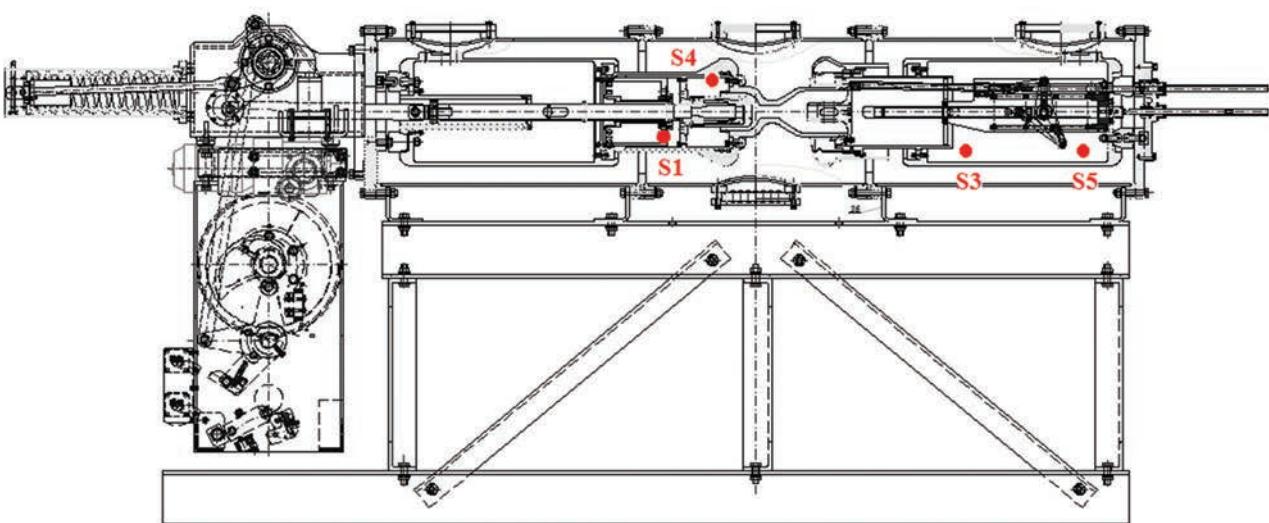
koristi za priključivanje na sekundarne izlaze strujnih mjernih transformatora. Na osnovu toga, razvijene su prilagodbene štampane i zaštitne aluminijске ploče na unutrašnjoj i vanjskoj strani epoksidne ploče, koje omogućavaju jednostavno priključenje senzora DIN konektorima s unutrašnje strane, a tzv. "Heavy-Duty" (konektor teške izvedbe) konektorom s vanjske strane. Na taj način je uspostavljena veza između pretvarača pritiska s jedne strane i laboratorijskog mjernog sistema s druge strane.

6. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Nakon što su predloženi pretvarači sistemično dizajnirani, razvijeni, kalibrirani i testirani izvršeno je njihovo priključivanje na mjerni sistem stvarnog modela VN prekidača. Mjerenja su obavljena korištenjem mjernog sistema detaljnije prezentiranog u [5] datog na Slici 13 i softvera HV CB Simulation [8].

Za potrebe ovog rada analizirane su dvije karakteristične situacije: mjerenje pritiska na nepokretnim dijelovima (dispozicija senzora kao na Slici 1) i mjerenje pritiska na pokretnim dijelovima (dispozicija senzora kao na Slici 14, senzor S4 premješten na pokretni dio modela).

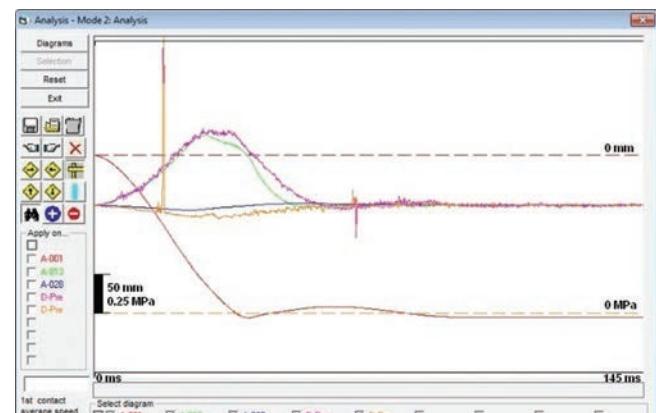
Kao što se vidi sa dijagrama na Slikama 15 i 16 (konfiguracija senzora kao na Slici 1), pretvarači pritiska su u potpunosti obavili postavljeni zadatok. Dijagrami na Slici 15 omogućili su istraživačima da pouzdano zaključe da ne postoji značajno odstupanje u mjerenu pritisku u tačkama S3, S4 i S5, odnosno da u izlaznom volumenu za hlađenje gase ne postoje značajne lokalne promjene pritiska. Osim toga, na osnovu dijagrama sa Slike 16 uočeno je i korigovano odstupanje u parametrima simulacije za kompresioni volumen. Dijagrami dobiveni nakon korekcije parametara simulacije su prikazani na Slici 17, na kojoj se jasno vidi bolje poklapanje mjerjenja i simulacije.



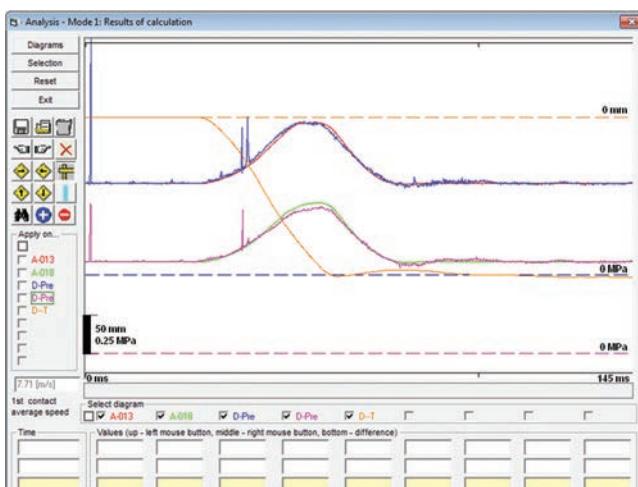
Slika 14: Shematski prikaz VN prekidača s oznakom tačaka od interesa (S1, S3, S4 i S5) u kojima se želi analizirati pritisak (druga dispozicija senzora)



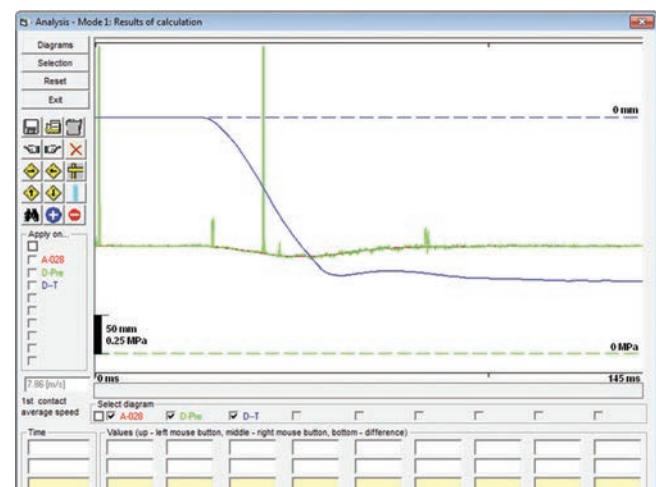
Slika 15: Rezultati mjerjenja na modelu VN prekidača. Osim mjerjenja pritiska prikazani su i hodogrami kretanja kontaktata i struja špule isklopa (Dispozicija senzora kao na Slici 1)



Slika 16: Usporedba rezultata mjerjenja pritiska u modelu VN prekidača i rezultata simulacije. Osim pritiska prikazani su i hodogrami kretanja kontaktata i struja špule isklopa (dispozicija senzora kao na Slici 1)



Slika 17: Usporedba rezultata mjerjenja i simulacije pritiska u kompresionom (CC) i termalnom (HC) volumenu (dispozicija senzora kao na Slici 14)



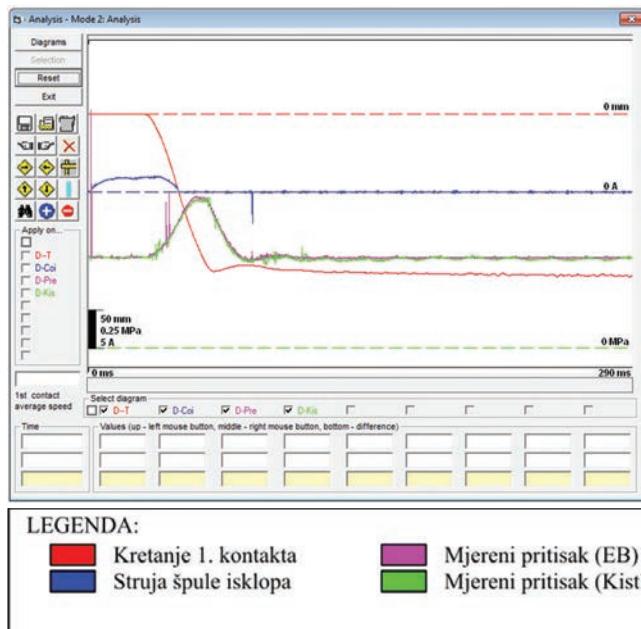
Slika 18: Usporedba rezultata mjerjenja i simulacije pritiska u drugom kompresionom volumenu (nominalni pritisak punjenja 0.7MPa i brzinom otvaranja 7 m/s) (dispozicija senzora kao na Slici 14)

Karakteristična mjerjenja na modelu VN prekidača za konfiguraciju sa Slike 14 data su na Slikama 17-19. Za razliku od prethodnog slučaja, jedan senzor je postavljen na pokretni dio modela VN prekidača. Osim što je razvijeni pretvarač uspješno izvršio mjerjenja, postiže se i odlično podudaranje mjerene pritiska s mjerenjem komercijalnih senzora (Kistler), koji su s ciljem validacije mjerjenja instalirani u model neposredno pored senzora S1.

7. DISKUSIJA I SMJERNICE ZA BUDUĆI RAD

U radu je pokazano da su razvijeni pretvarači cjenovno prihvatljivi, odgovarajućih performansi i dimenzija, prilagodljivi i jednostavni za korištenje.

Međutim uočeno je nekoliko nedostataka koji se planiraju ispraviti i/ili ispitati u narednim izvedbama pretvarača:



Slika 19: Rezultati mjeranja na modelu VN prekidača, usporedba predloženog pretvarača pritiska s Kistler pretvaračem (dispozicija senzora kao na Slici 14)

- ukidanje mrtve zone - izmjenom sheme pojačala kako bi se omogućilo i mjerjenje pritiska manjeg od 1.4 (bar),
- eliminacija šuma - kao i većina elektroničkih komponenti s unipolarnim izlazom, ovi senzori su osjetljivi na šumove (npr. uzrokovano strujom špule uklopa/isklopa, nestabilnim naponom napajanja i sl.). Trenutno se implementira softverska eliminacija šumova (digitalni filteri), dok je planirana i hardverska redukcija šumova,
- poluautomatska kalibracija - potrebno je razviti poluautomatiziran sistem koji omogućava samostalnu kalibraciju senzora u odnosu na poznat etalonski pretvarač pritiska,
- ispitati temperaturni utjecaj - iako senzori rade uglavnom na sobnim temperaturama, još nije detaljno ispitati utjecaj temperature na mjerjenje pretvarača.

Osim navedenih aktivnosti, planirano je raditi na razvoju pretvarača pritiska koji bi se mogao ugraditi u komponente VN prekidača npr. u njegovu mlaznicu. Ovakav pristup omogućava dodatnu redukciju dimenzija pretvarača, i smanjuje utjecaj pretvarača na kretanje SF6 gasa i ostalih pokretnih komponenti.

8. ZAKLJUČAK

U radu je prezentiran postupak dizajna, razvoja, testiranja i implementacije pretvarača pritiska za rad u modelu VN prekidača. Može se zaključiti da proces razvoja vlastitog pretvarača nosi niz prednosti ali i nedostataka. U određenim aplikacijama, kao što su mjerena u modelu VN prekidača, razvoj vlastitog pretvarača pritiska doprinosi fleksibilnosti, mogućnosti utjecaja na dimenzije senzora i pretvarača, te mogućnosti utjecaja na oblik, opseg i tip izlaznog signala (napon, struja, itd.).

S druge strane, nedostatak leži u činjenici da je potrebno obezbijediti uslove za vlastitu proizvodnju, kalibraciju i testiranje. Osim toga moguća su i odstupanja u tehničkim karakteristikama među senzorima i pojačalima, pa je svakom pretvaraču potrebno pristupiti pojedinačno, što može biti otežavajući faktor ukoliko se proizvode veće serije pretvarača.

LITERATURA

- [1] A. Ahmethodžić, M. Kapetanović, Z. Gajić, "Computer Simulation of High Voltage SF6 Circuit Breakers: Approach to modeling and Application Results", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 18, No. 4, pp. 1314-1322, August 2011.
- [2] A. Smajkić, M. H. Kim, M. Muratović, A. Hajdarović, R. Gačanović, "Mehanička ispitivanja pouzdanosti mehanizma za dvostruko kretanje kontaktata VN prekidača", Bosanskohercegovačka elektrotehnika, broj 9, 2015.
- [3] Y. Guan, G. Yue, J.X. He, W. Liu, J. Wu, J. Wu, "Pressure Measurement and Characteristic Analysis on a 252 kV Puffer Type SF6 Circuit Breaker", IEEE PES Transactions on Power Delivery, Vol. 28, No. 4, pp 2616-2622, 2013.
- [4] M. Kapetanović, M. Muratović, B. Bosović, D. Bešlija, "Pressure measurement testing of 420 kV GCB with no-load", EnergoBos ILJIN d.o.o. Sarajevo – interni stručni rad (neobjavljeno), Februar 2016.
- [5] V. Becirović, D. Beslija, A. Smajkic, E. Sokic and M. Kapetanovic. "System for simultaneous measurement of multiple travel records in a high voltage circuit breaker kinematic chain", 12. Savjetovanje Bosanskohercegovackog komiteta CIGRE, Neum, Bosnia and Herzegovina, October 2015.
- [6] SPD300ABto05 Datasheet, Smartec BV, http://www.soselectronic.com/a_info/resource/c/SPD300ABto05.pdf datum pristupa: 20.05.2016.
- [7] AM401 Datasheet, Analog Microelectronics GmbH, http://www.analogmicro.de/_pages/ics/am401/am401_data_sheet.pdf datum pristupa: 20.05.2016.
- [8] M. Kapetanović, A. Ahmethodžić, "The computer program for SF6 HV circuit breaker operation's simulation", Conf. Bosnian Committee of CIGRE Neum, in Bosnian, Paper R13.01, 1999.

BIOGRAFIJA

Emir Sokić rođen je u Visokom 1985. godine. Diplomirao, magistrirao i doktorirao je na Odsjeku za automatiku i elektrotehniku Elektrotehničkog fakulteta, Univerziteta u Sarajevu 2008., 2011. i 2015. godine, respektivno. Trenutno je zaposlen kao docent na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu, te kao konzultant u kompaniji EnergoBos ILJIN d.o.o. Njegova su interesovanja vezana za mjerjenje, akviziciju i obradu signala, ugradbene sisteme i elektroničke strukture.

Vedad Bećirović rođen je u Sarajevu 1983. godine. Diplomirao je 2008., a magistrirao 2011. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Sarajevu. Trenutno je student doktorskoga studija fakulteta Elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu. Od 2008. godine zaposlen je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Sarajevu u zvanje asistenta, a od 2011. u zvanju višeg asistenta na Odsjeku za elektroenergetiku. Oblasti interesa su mu elektroenergetski sistemi, kvaliteta električne energije, automatizirana mjerjenja i upravljanja u industriji. Autor je niza stručnih i naučnih radova u prethodno navedenim

oblastima. Aktivan je član IEEE od 2012. godine i trenutno obavlja funkciju sekretara IEEE BH sekcije.

Amer Smajkić rođen je 1990. godine u Mostaru. Prvi ciklus studija završio je 2011. godine, a drugi ciklus (master studij) 2013. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu. Trenutno je student doktorskog studija na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu. Zaposlen je u EnergoBos ILJIN d.o.o. Sarajevo, gdje aktivno radi na projektima razvoja VN prekidača naponskih nivoa 145 kV, 245 kV i 420 kV. Područja interesovanja su mu razvoj softvera za simulaciju rada VN prekidača, modelovanje i razvoj VN prekidača. Od 2013. godine član je BH K CIGRÉ.

Dejan Bešlija rođen je 1989. godine u Zenici. Prvi ciklus studija na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Sarajevu je završio 2011., a drugi ciklus - master studij 2013. godine. Trenutno je doktorant na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu. Od 2013. godine je član BH K CIGRÉ, a od 2016. član IEEE. Područja interesovanja su mu računarsko modeliranje i razvoj VN prekidača.

Mahir Muratović rođen je 1987. godine u Sarajevu. Prvi ciklus studija na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu završio je 2009. godine, a 2011. godine drugi ciklus studija, master studij. Student je doktorskog studija na istom fakultetu. Od 2011. godine zaposlen je u EnergoBos ILJIN d.o.o. Sarajevo i aktivno je angažiran na projektima razvoja VN prekidača naponskih nivoa 145 kV, 245 kV i 420 kV.

Belma Bosović rođena je 1991. u Sarajevu, u Bosni i Hercegovini. Prvi ciklus studija na Mašinskom fakultetu u Sarajevu završila je 2013. godine, a 2015. godine drugi ciklus studija, Smjer energetika (2015). Od 2016. godine zaposlena je u kompaniji EnergoBos ILJIN d.o.o. Sarajevo, kao mladi inženjer za istraživanje i razvoj. Područje profesionalne orientacije je razvoj VN prekidača uz CFD i naponsku analizu.

Mirsad Kapetanović rođen je u Visokom 1953. godine. Diplomirao je 1976., magistrirao 1993., a doktorirao 1997. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Sarajevu. Trenutno je zaposlen kao nastavnik u stalnom radnom odnosu s 50% radnog vremena u zvanju redovnog profesora na ETF u Sarajevu na Odsjeku za elektroenergetiku. S preostalih 50% radnog vremena zaposlen je u firmi EnergoBos ILJIN d.o.o. Sarajevo gdje radi kao prokurist, konsultant i glavni inženjer na projektima istraživanja i razvoja u oblasti VN prekidača. Zasluzni (Distinguished member) je član medjunarodne CIGRÉ, punopravni član CIGRÉ SC A3 (High Voltage Equipment), (2002-2008.), punopravni član CIGRÉ SC 13 (Switching Equipment), (1996-2002.), član CIGRÉ WG 13.01 (Practical application of Arc Physics in Circuit Breakers) od 1990. Dugo-godišnji je predsjednik Studijskog komiteta A3 (Visokonaponska oprema) Bosanskohercegovačkog komiteta CIGRÉ. Član je IEEE od 2001. godine.