

MODERNIZACIJA PROIZVODNE LINIJE ZA SUŠENJE DISTRIBUCIJSKIH TRANSFORMATORA

MODERNIZATION OF THE PROCESS LINE FOR DISTRIBUTION TRANSFORMERS' DRYING

Ivan Šulekić¹, Srđan Jelčić², Boris Peša²

¹Tehničko Veleučilište u Zagrebu – Elektrotehnički odjel, Zagreb, Hrvatska

²Average Solutions d.o.o., Zagreb, Hrvatska

SAŽETAK

Opisana je modernizacija proizvodne linije. Izvedena je na način da je zamijenjeno relejno upravljanje, te razvijeno potpuno novo upravljanje na bazi PLC uređaja i modernih pretvarača. Tehničko rješenje obuhvaća odabir frekvencijskih pretvarača, sklopne opreme, PLC opreme, senzora i njihove karakteristike. Prema odabranoj opremi nacrtana je električna shema, naveden princip rada pojedinih dijelova sheme te izveden upravljački razdjelnik. Prema izvedenom stanju elektro upravljačkog razdjelnika i tehničko tehnološkom opisu napravljen je upravljački program i proizvodna linija puštena u pogon. Tehničko rješenje prilagođeno je LFH procesu. Korištenjem novije tehnologije smanjeno je vrijeme trajanja procesa i potrošnje energije, te je povećan kapacitet broja transformatora koji se istovremeno suše.

Ključne riječi: modernizacija, proizvodna linija, PLC sustav, frekvencijski pretvarači, LFH proces

ABSTRACT

This paper describes modernization of production line. Relay control is replaced with PLC control system and new power converters. Novel solution comprises of new frequency converters, switching devices, PLC equipment and sensors. According to a new equipment new electrical and control design was created. New control design was implemented, and production line was commissioned. Technical design is adapted to LFH process. With this modernization duration of process and power consumption is reduced and capacity of transformers is increased.

Keywords: modernization, production line, PLC system, frequency converter, low frequency heating

1. UVOD

1. INTRODUCTION

Glavni razlog modernizacije je povećanje kapaciteta i kvalitete proizvodnje. Starije proizvodne linije izvedene su starijom tehnologijom koja ima znatno manji kapacitet i kvalitetu proizvodnje. Zahtjevi tržišta traže da se kapacitet i kvaliteta zagrijavanja (sušenja) izolacije znatno poveća. Starija proizvodna linija troši puno više energije za manji broj transformatora, potrebno je duže vrijeme sušenja i lošije se raspoređuje toplinu. Time je nemoguće s takvom starijom tehnologijom povećati kapacitet proizvodnje pogona da bi zadovoljili potrebe tržišta.

2. OPIS RADA LINIJE

2. PROCES LINE DESCRIPTION

Proizvodna linija (slika 1) ima ulazni prostor, zvono za zagrijavanje (sušenje) i izlazni prostor. Cijelim procesom upravlja upravljački sustav zasnovan na PLC-u tvrtke Siemens S7-1200 i reguliranim pretvaračima tvrtke HGH VOLT. Osam transformatora se doprema do ulaznog prostora. Diže se zvono za zagrijavanje (sušenje) (komora za zagrijavanje (sušenje)). Transformatori se postavljaju unutar komore. Na njih se priključuju ispitivački kabeli. Nakon toga zatvara se komora i upravljački sustav počinje proces sušenja izolacije.

Nakon što se proces sušenja završi upravljački sustav diže komoru, s transformatora se miču ispitivački kabeli i transformatori se miču na izlazni prostor.



Slika 1 Proizvodna linija[3]

Figure 1 Production line[3]

3. TEHNIČKO RJEŠENJE

3. TECHNICAL SOLUTION

A. Zvono za sušenje

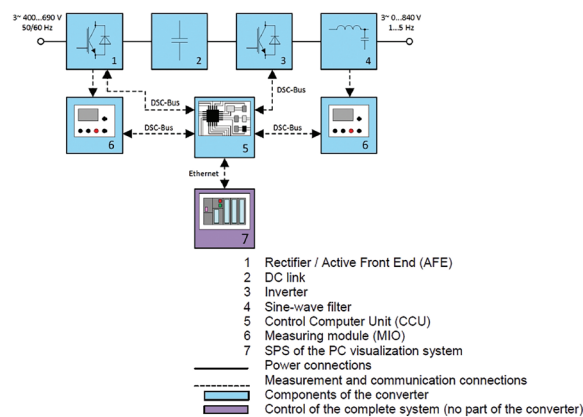
Zvono za sušenje (vakuumska komora) se sastoji od metalne konstrukcije koja se podiže pomoću elektromotora. Unutar metalne konstrukcije nalazi se osam stanica s ispitivačkim kabelima. Ispitivački kabeli se spajaju na transformatore. Nakon njihova spajanja upravljački sustav spušta zvono i počinje process sušenja izolacije. Nadzor rada cijelog sustava obavlja PLC tvrtke Siemens S7-1200. Potrebna struja za sušenje izolacije dobiva se iz pretvarača tvrtke HIGH VOLT[1].

B. Pretvarači

Sustav za sušenje se napaja preko četiri pretvarača. Pretvarači generiraju struju frekvencije 1 do 5 Hz željene amplitude kojom se onda suše transformatori. Svaki pretvarač se napaja zasebno iz ormara LFH-3. Svaka faza pretvarača štice na je prekidačem koji je u stanju prekinuti maksimalnu efektivnu vrijednost struje koja može prolaziti kroz pretvarač u normalnom radu. Na izlazu iz pretvarača generira se struja vrlo niske frekvencije (oko 1Hz) uz minimalni iznos napona na izlazu. Struja se predaje ispitivačkim kabelima.

U LFH procesu namoti se zagrijavaju strujama niske frekvencije pri sniženom tlaku. Transformatori se napajaju s višenaponske strane, a kratko spajaju s niženaponske. Nakon toga se vakuumiraju i pune uljem. Niska frekvencija (oko 1 Hz), a time i niske vrijednosti reaktancija kratkog spoja, omogućavaju postizanje odgovarajućih struja sušenja uz što niži napon, a da se pri tome zadrži transformatorski efekt. Zbog kontroliranog vakuuma i niskih napona, nema opasnosti od proboja pri niskom tlaku. Sami pretvarač se sastoji od klasičnih dijelova: ispravljača, istosmjernog međukruga, izmjenjivača, filtera, upravljačke jedinice i mjernog modula (slika 2). Posebni dio pretvarača je aktivni filter koji filtrira sve visokofrekvencijske komponente izlazne struje i napona tako da se na izlazu dobije čisti sinusni signal. Ispravljač i izmjenjivač se sastoji od IGBT modula, koji imaju temperaturne senzore, prenaponsku zaštitu i zaštitu od kratkog spoja. Mjerni modul mjeri ulazne napone i izlaznu frekvenciju, a onda upravljački modul upravlja uklapanjima i isklapanjima IGBT modula, radom aktivnog filtera, hlađenjem IGBT modula, izlazima ispravljača i izmjenjivača, te komunicira s nadzornim PLC uređajem.

Parametre pretvarača moguće je konfigurirati pomoću konfiguracijske datoteke SETTINGS.TXT koja se nalazi na memorijskoj SD kartici. Upravljački modul za vrijeme cijelog procesa sušenja izolacije transformatora računa trenutnu vrijednost otpora svakog namota. Ta informacija je potrebna da bi proces sušenja bio optimalan.

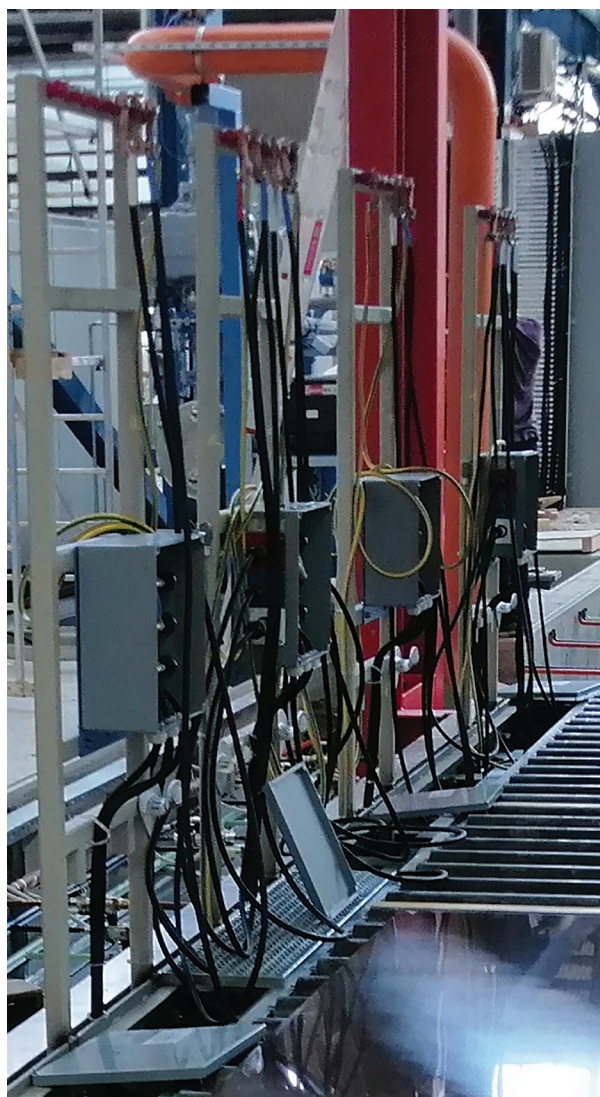


Slika 2 Dijelovi pretvarača[1]

Figure 2 Components of frequency converter[1]

C. Ispitni kabeli

Ispitnim kabelima dovodimo potrebni ispitni napon i struju na transformatore. Ispitna struja ima efektivnu vrijednost oko 200 A, tako da kabeli i njihov razvod moraju imati odgovarajući presjek kabela (70 mm²). Završeci ispitnih kabela imaju kuke koje se kvače na VN izvode transformatora. Kada se transformatori ne ispituju završeci ispitnih kabela se odlažu na panele (slika 3).



Slika 3 Pultovi za ispitne kablove
Figure 3 Panels for testing cables

D. Sustav dobave ulja

Transformatori nakon sušenja izolacije se pune uljem pod vakuumom unutar zvona. Spremnici s uljem su sastavni dio sustava.

Transformatori se pune uljem iz spremnika putem pumpi. Postoje četiri spremnika (slika 4). Nakon postizanja finog vakuuma transformatori se automatski pune uljem. Komora (zvono) se za vrijeme punjenja cijelo vrijeme vakuumira. Proces punjenja se zaustavlja kad sonda smještena na vrhu otvora za nadolijevanje ulja, detektira ulje.



Slika 4 Spremnik za ulje
Figure 4 Oil container

E. Upravljački sustav

Cijelim procesom upravlja upravljački sustav zasnovan na PLC-u tvrtke Siemens S7-1200 i reguliranim pretvaračima tvrtke HGH VOLT. Siemens PLC 1200 je industrijski upravljački sustav sa analognim i digitalnim ulaznim i izlaznim modulima. Svi procesi se vizualiziraju i kontroliraju pomoći HMI (engl. Human-machine interface) sustava. Temperatura se očitava putem PT100 senzora. Preopterećenja motora se čitaju s mirnih (NC) i radnih (NO) kontakata motornih zaštitnih sklopki. Svi signali potrebni za upravljanje procesom dobiju se putem elektromagnetskih ventila i kontakata. Motori u sustavu se upravljaju putem običnih elektromagnetskih ventila, frekvencijskih pretvarača ili posebnih elektroničkih sklopova za upravljanje. Vrsta upravljanja ovisi o funkciji motora.

4. OPIS RADA SUSTAVA I UPRAVLJAČKOG ALGORITMA

4. CONTROL AND ELECTRICAL SYSTEM DESCRIPTION

Sustav ima ekonomičniju i bržu metodu sušenja distribucijskih transformatora strujama niske frekvencije (eng. *LFH* - *low frequency heating*). Za vrijeme sušenja, transformator se nalazi u pokusu kratkog spoja. Toplina se razvija točno tamo gdje treba, dakle u namotima, budući da se kod tih transformatora najveći dio krute izolacije nalazi upravo u namotu. To je posebno izraženo kod novijih tipova distribucijskih transformatora kod kojih se praktički sva izolacija nalazi u namotu, a koju najvećim dijelom čini dijamentni papir. Sušenje se zapravo svodi na izvlačenje vlage iz papira budući da se 99 % vlage kod distribucijskih transformatora nalazi upravo u papiru [2].

A. LFH proces

Proces sušenja strujama niske frekvencije (u daljnjem tekstu: LFH proces) je u širem smislu integrirani proces u kojem se određeni broj potpuno montiranih transformatora istovremeno suši strujama niske frekvencije te na kraju puni uljem pod vakuumom. Za vrijeme procesa transformatori se nalaze unutar vakuumske komore (slika 5).



Slika 5 Vakumska komora
Figure 5 Vacuum chamber

B. Osnovni princip LFH metode sušenja

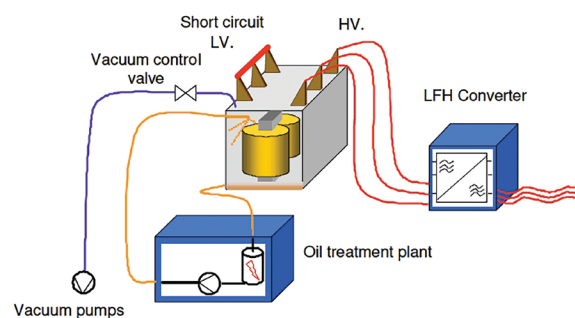
Princip sušenja u postrojenju za sušenje strujama niske frekvencije (u daljnjem tekstu LFH postrojenju) je u osnovi sličan klasičnom procesu i svodi se na nekoliko ciklusa zagrijavanja namota i vakuumiranja. Za razliku od klasičnog procesa u kojem se suši samo aktivni dio, u LFH procesu se u vakuumskoj komori nalazi potpuno montirani transformator.

Namoti se zagrijavaju strujama niske frekvencije. Niženaponski (u daljnjem tekstu NN) priključni transformatora su kratko spojeni, a na višenaponske (u daljnjem tekstu VN) priključke se dovodi napon sa frekvencijskih pretvarača. Regulacijom tog napona i frekvencije, regulira se struja kroz namote, obično u rasponu 60-100 % nazivne vrijednosti, tako da porast temperature namota bude približno 1°C po minuti.

Za razliku od klasičnog procesa sušenja u kojem se grijanje odvija pri atmosferskom tlaku, a tek prestankom grijanja slijedi vakuumiranje, u LFH procesu se namoti zagrijavaju pri sniženom tlaku čime se povećava efikasnost sušenja. Niska frekvencija (oko 1 Hz) gotovo eliminira induktivnu komponentu impedancije čime se odgovarajuća struja sušenja postiže uz najmanji mogući napon, a gotovo sva dovedena energija se troši na grijanje namota. Zbog malih napona (reda veličine U_r), nema opasnosti od proboja pri sniženom tlaku.

Da se spriječi kondenzacija vodene pare na jezgri i unutrašnjim stijenkama kotla, s donje strane kotla se u transformator povremeno se upuhuje suhi vrući zrak za vrijeme zagrijavanja namota.

Osnovni dijelovi LFH postrojenja prikazani su na slici 6.



Slika 6 Osnovni dijelovi LFH postrojenja[3]
Figure 6 Basic parts of LFH plant[3]

C. Detaljni opis LFH procesa

Potpuno montirani transformatori se najprije transportiraju u vakuumsku komoru (Zvono za sušenje). Broj transformatora koji ulaze u proces ovisi o njihovoj veličini i kreće se od 1 do 12. Na transformatore se spajaju zračni, uljni i naponski priključci (slika 7), a NN provodnici se kratko spajaju. Nakon unosa potrebnih parametara sušenja u program i kontrole ispravnosti priključaka, započinje proces spuštanjem gornjeg dijela vakuumske komore.

Proces se sastoji od sljedećih faza:

- mjerenje (M),
- zagrijavanje (H),
- fino vakuumiranje (FV),
- punjenje ulja (F),
- upuštanje zraka (E)



Slika 7 Priključci transformatora unutar vakuumske komore
Figure 7 Transformers terminals in vacuum chamber

1) Mjerenje - M

Na početku procesa mjere se omski otpori namota U-I metodom kako bi se dobile referentne vrijednosti otpora budući se temperatura namota u nastavku procesa određuje iz promjene otpora.

2) Zagrijavanje - H

U fazi zagrijavanja, namoti se griju strujama niske frekvencije pri sniženom tlaku (cca 5 % atmosferske vrijednosti) dok se ne dostigne temperatura 110 °C (u pravilu je to temperatura polimerizacije dijamanog papira). Nakon toga se tlak povećava na cca 50 % atmosferske vrijednosti. U nastavku procesa postignuta

temperatura se održava izmjenom nekoliko ciklusa zagrijavanja namota i vakuumiranja. U tom se dijelu procesa odvija i polimerizacija dijamanog papira. Prilikom vakuumiranja, namoti se ne griju. Proces zagrijavanja traje 2,5 – 3,5 sata ovisno o količini izolacije. Za vrijeme grijanja namota, povremeno se upuhuje vrući zrak kako bi se spriječila kondenzacija na hladnijim dijelovima transformatora.

3) Fino vakuumiranje - FV

Ova faza započinje istovremenim zagrijavanjem namota do 120 °C i snižavanjem tlaka u vakuumske komori. Postignuta temperatura se tada održava izmjenom 3 - 4 ciklusa zagrijavanja i vakuumiranja s tim da je vrijeme vakuumiranja znatno duže, nego što je to bilo kod identičnog procesa u fazi zagrijavanja (H). Za vrijeme grijanja se također povremeno upuhuje vrući zrak. Nakon toga grijanje namota se zaustavlja, a komora se vakuumira sve dok se tlak ne smanji na 0,7 milibara.

Sadržaj vlage u celuloznoj izolaciji nakon sušenja može se grubo procijeniti pomoću Piperova dijagrama. Piperov dijagram prikazuje ovisnost parcijalnog tlaka vodene pare o temperaturi za različite udjele vlage[4]. Parcijalni tlak vodene pare je dio ukupnog tlaka u vakuumske komori. Ukupni tlak se mjeri tzv. Pirani sondom, a tlak suhog zraka tzv. Kammererom. Mjerenja pokazuju da tlak suhog zraka prosječno iznosi 0,2 milibara što znači da parcijalni tlak vodene pare nakon sušenja ima vrijednost oko 0,5 milibara. Procjenjuje se da je temperatura smjese zraka u transformatoru na kraju procesa finog vakuumiranja oko 50°C, čemu prema Piperovom dijagramu odgovara sadržaj vlage od 0,3 %.

Sadržaj vlage se može procijeniti analitički prema sljedećoj formuli[4]:

$$C = 2,126 \times 10^{-7} \times p^{0,6685} \times e^{\frac{4725,6}{T}}$$

gdje je:

C – sadržaj vlage u papiru u %

P – parcijalni tlak vodene pare u mbar

T – apsolutna temperatura u K (K=°C+273,15)

Za temperaturu od 50 °C, tj. $T=323.15$ K, i parcijalni tlak vodene pare $P=0.5$ mbar, sadržaj vlage je:

$$C = 2,126 \times 10^{-7} \times 0,5^{0,6685} \times e^{\frac{4725,6}{323,15}} = 0,3\text{mbar}.$$

4) Punjenje ulja - F

Nakon postizanja finog vakuuma, transformatori se automatski pune uljem. Vakuumska komora se za vrijeme punjenja cijelo vrijeme vakuumira. Proces punjenja se zaustavlja kad sonda, smještena na vrhu otvora za nadolijevanje ulja, detektira ulje.

5) Upuštanje zraka - E

Nakon završetka punjenja ulja otvara se ventil za upuštanje zraka kako bi se izjednačio tlak u komori s atmosferskim tlakom.

Nakon toga se diže gornji dio vakuumske komore, povlači višak ulja, odspajaju priključci te se transformatori transportiraju do ispitne stanice.

6) Usporedba trajanja procesa i potrošnje energije

Trajanje procesa i potrošnja energije je smanjena. Isto tako i kapacitet procesa se povećao. Trajanje procesa (vrijeme sušenja, vakuumiranja i punjenja ulja) se smanjilo za 30% po transformatoru. Potrošnja energije se smanjila za 20%. Sam kapacitet se povećao s 8 na 12 mjesta.

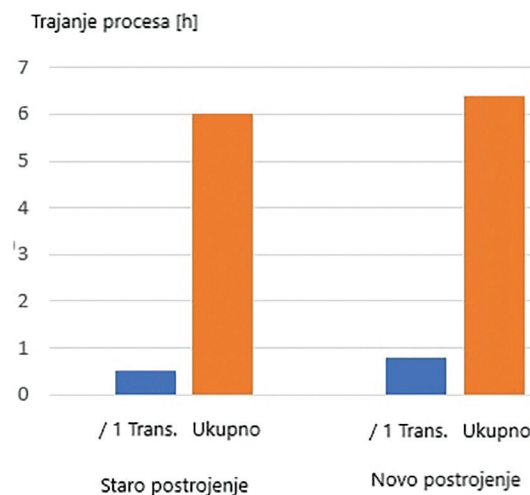
5. ZAKLJUČAK

5. CONCLUSION

Modernizacijom procesa sušenja transformatora uz korištenje novije tehnologije smanjeno je vrijeme trajanja procesa, a time i potrošnje energije. Istovremeno je povećan i kapacitet sušenja, odnosno broj transformatora koji se nalaze u procesu sušenja.

Tehnologija sušenja strujama niske frekvencije koristila se i u starom procesu. Njenom primjenom povećala se efikasnost sušenja, jer se sva dovedena energija troši na grijanje namota uz odgovarajuću struju sušenja pri najmanjem mogućem naponu.

Daljnjom modernizacijom mogli bi se implementirati pretvarači većih snaga koji bi omogućili još brže sušenje izolacije transformatora.



Slika 8 Usporedba trajanja procesa na novoj i staroj proizvodnoj liniji

Figure 8 Comparison of process duration on new and old production line

6. REFERENCE

6. REFERENCES

- [1.] HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH; User's Manual Low-Frequency Converter For Drying of Transformers
- [2.] S. Gazivoda, A. Mikleucy, "Dijagnostika distribucijskih transformatora", CIRED 1. Savjetovanje, Šibenik, svibanj 2008., SO1-13 ISBN: 978-953-55194-1-6
- [3.] <https://www.hitachiabb-powergrids.com/>
- [4.] [4] Z.T.Yao, T.K. Saha, "Voltage Response Measurements for Power Transformer Moisture and Ageing Condition Assessment", Proceedings of the IEE/PES Transmission and distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, vol. 1, page 307-312, Yokohama, Japan, DOI: 10.1109/TDC.2002.1178338

AUTORI · AUTHORS**• Ivan Šulekić**

Rođen je 08.09.1983 godine u Zagrebu. U Zagrebu završava osnovnu školu i Srednju školu Sesvete (Elektrotehničku) gdje stječe zvanje tehničar za računalstvo. Po završetku srednje škole 2002. godine upisuje Fakultet elektrotehnike i računalstva, Sveučilišta u Zagrebu. Studij završava 2008 godine s temom diplomskog rada Modernizacija postrojenja Elektrolize tvornice Aluminij u Mostaru pod mentorstvom dr.sc. Gorislava Ercega. Primarni interesi rada su upravljanje, regulacija, nadzor i projektiranje elektroinstalaterskih radova u građevinarstvu i industriji. Aktivno se koristi računalom za gotovo sve svrhe. U svome radu se aktivno koristi engleskim jezikom. Nakon studija radi u raznim privatnim tvrtkama kao inženjer za puštanje u pogon, razvojni inženjer. servisni inženjer, ispitivač električnih instalacija i stručnjak zaštite na radu. Na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu izvodi nastavu iz Automatskog Upravljanja, Elemenata automatizacije i Sustava automatizacije. Tijekom rada na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu sudjeluje u nadzoru i projektiranju raznih elektroinstalaterskih radova u građevinarstvu i industriji. 2020 godine objavljuje stručni članak Decision tree algorithm for control of compressor multiset in refrigeration industry koji je objavljen u časopisu MIPRO 2020.

Korespondencija · Correspondence

ivan.sulekic@tvz.hr

• Srđan Jelčić

Rođen je 18. 10. 1981 godine u Puli. Nakon završene Opće gimnazije Pula upisuje i završava Fakultet elektrotehnike i računarstva u Zagrebu. Nakon završenog fakulteta 2010 godine zapošljava se u brodogradilištu Uljanik d.d. U početku radi kao ispitivač električnih uređaja, a zatim kao konstruktor projektant. Nakon zatvaranja brodogradilišta Uljanik završava tečaj za AutoCad specijalistu u Alegbri. U HEP grupi 2019 godine radi na priključcima kao inženjer u terenskoj jedinici. Na Tehničkom veleučilištu Zagreb započinje s radom u prosincu 2020 godine

Korespondencija · Correspondence

srđan.jelcic@gmail.com

• Boris Peša

Rođen u Travniku 08.05.1988 godine. Nakon završetka osnovne i srednje škole u Travniku (KŠC Petar Barbarić) seli se u Zagreb gdje i danas živi te upisuje studij elektrotehnike na Tehničkom Veleučilištu u Zagrebu 2008. godine. Prvo završava prediplomski studij 2011. godine gdje pod mentorstvom mr.sc. Milivoja Puzaka piše Završni rad s temom Projekt i izvedba reguliranog pogona s asinkronim motorom, a kasnije 2015-godine završava i Specijalistički diplomski stručni studij Politehnika na Tehničkom Veleučilištu u Zagrebu s temom diplomskog rada Upravljanje procesima u stambenom objektu pomoću bežične senzorske mreže pod mentorstvom dipl. ing. Tomislava Špoljarića. Tijekom studiranja 2013. godine, zapošljava se u tvrtki Tomting 2010 d.o.o. u kojoj ostaje do kraja 2019. godine, gdje radi na poslovima provođenje energetske pregleda zgrada s složenim tehničkim sustavima, izradama i kontrolama energetske certifikata kao i energetske-investicijskih studija, izradama i verifikacijama projekata energetske obnove kao i nadzor za elektrotehničke radove na raznim projektima, od kojih se ističe nadzor na INA-inim postrojenjima u Rijeci. 2017. godine zapošljava se kao stručni suradnik na Tehničkom Veleučilištu u Zagrebu na kojem radi i danas kao asistent na predmetu Automatizacija postrojenja. 2020. godine zapošljava se u tvrtki Average Solutions d.o.o. koja je specijalizirana za automatizaciju postrojenja. U tvrtki radi kao inženjer za puštanje u pogon i razvojni programski inženjer.

Korespondencija · Correspondence

boris.pesa@average-solutions.hr