

## IZRADA STATORSKOG NAMOTA HIDROGENERATORA AUTOMATIZIRANIM PROCESIMA

### PRODUCTION OF STATOR WINDING OF HYDROGENERATOR USING AUTOMATED PROCESSES

Krešimir Šegović<sup>1</sup>, Ivor Marković<sup>2</sup>, Tomislav Đuran<sup>2</sup>, Tomislav Novak<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Končar – Generatori i motori, d.d., Zagreb, Hrvatska

<sup>2</sup>Tehničko veleučilište u Zagrebu, Vrbik 8, Zagreb, Hrvatska

#### Sažetak

Ovaj rad usredotočen je na izradu statorskog namota hidrogenatora kao najvažnijeg dijela jedne hidroelektrane i dijela u kojem se stvara električna energija koju hidroelektrana proizvodi. U radu smo se osvrnuli na sinkrone generatore u čiju skupinu spada i hidrogenator kao dio postrojenja, ukratko smo objasnili razlike između hidrogenatora i turbogeneratora, te vrste statorskog namota hidrogenatora. Najviše pažnje u radu smo pridodali na izradu statorskog namota hidrogenatora koja je automatizirana i koja se odvija u više automatiziranih procesa. Svaki ciklus izrade namota odvija se u posebnom automatiziranom postrojenju i kad jedan završi, namot se vadi i premješta u iduće postrojenje za nastavak procesa izrade. Po završetku izrade namota vrši se dorada izolacije nakon čega slijedi nanošenje zaštitnog i funkcijskog laka i na kraju slijede električna ispitivanja kvalitete izolacije i samog namota prema tvorničkom protokolu.

**Ključne riječi:** *statorski namot, štapovi, hidrogenator, automatizirani procesi*

#### Abstract

This paper is focused on the production of a stator windings of hydrogenerator as the most important part of a hydroelectric power plant and the part that produces the electricity produced by hydroelectric power plant. The paper discusses the synchronous generator in which group the hydrogenerator also belongs as part of the plant, the difference between hydrogenerator and turbogenerator and the type of hydrogenerator stator winding.

The greatest effort is focused on creating a stator winding of a hydrogenerator so that production process can be automated and takes place in several steps. Each sequence of manufacture is performed in separate automated process and when one is completed the winding bars are moved to the next automated process to continue the production process. After finishing the winding insulation is handled with abrasive paper and protective and functional varnish is applied. Last process follows the electrical winding and insulation tests according to the factory protocol.

**Keywords:** *stator winding, bars, hydrogenerator, automated processes*

#### 1. Uvod

##### 1. Introduction

Električna energija dobiva se pretvaranjem mehaničke u električnu pomoću generatora, a za njegov pogon koriste se parne turbine, vodne turbine, plinske turbine ili energija vjetra preko elisa vjetroelektrane.

Ovisno o prirodnim uvjetima vodotoka ili akumuliranoj energiji vodenih tokova, za pogon hidrogenatora koriste se Peltonove, Francisove ili Kaplanove turbine. Najviše zaslugom Nikole Tesle, u Hrvatskoj je na slapovima Krke izgrađena prva hidroelektrana u Europi i puštena u pogon 1895. godine, samo dva dana poslije puštanja u pogon hidroelektrane na slapovima Niagare. Tada je do Šibenika postavljen i dalekovod dužine 11.5 km te je time postao prvi grad na svijetu koji je počeo koristiti izmjeničnu električnu energiju.

Kako su brzine vrtnje pogonskih turbina hidrogenatora različite, frekvencija izlaznog napona generatora se regulira brojem pari polova na rotoru.

Sama izrada statorskog namota hidrogenatora u ovom radu prikazana je u više proizvodnih faza koje se provode kroz automatizirane procese izrade.

## 2. Sinkroni generator

### 2. *Synchronous generator*

Sinkroni generator je električni stroj koji pretvara mehaničku energiju u električnu. Brzina vrtnje rotora jednaka je brzini okretnog magnetskog polja pa se zato i naziva sinkroni. Stator sinkronog generatora ima oblik šupljeg valjka od laminiranog željeza koji sadrži utore u koje se ugrađuje armaturni namot u kojem se inducira napon. Rotor hidrogenatora ima veći broj polova i veći promjer i koristi se za manje brzine vrtnje. Za razliku od njega rotor turbogeneratora je izduženog oblika i manjeg promjera i koristi se za veće brzine vrtnje.

## 3. Vrste statorskog namota hidrogenatora

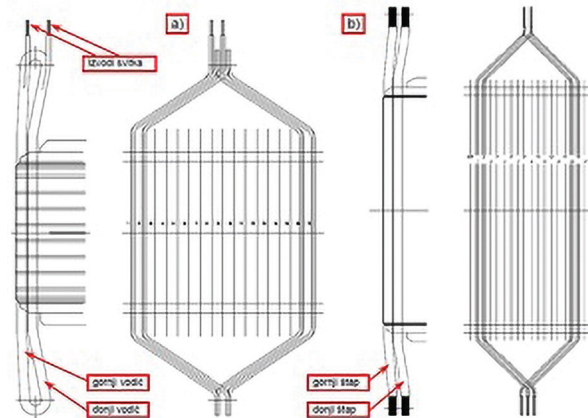
### 3. *Type of stator winding of a hydrogenerator*

Statorski ili armaturni namot najvažniji je dio generatora i postavljen je kružno u utore u obliku štapova međusobno izoliranih i spojenih na odgovarajući način, pravilno fazno raspoređeni i međusobno pomaknuti za  $120^\circ$  kako bi inducirani napon u svim fazama bio jednak i iste frekvencije. Da bi se postigla konstantna frekvencija inducirano napona rotor se mora okretati konstantnom brzinom. Statorski namot može se podijeliti na dva osnovna tipa: petljasti i valoviti namot.

#### **Petljasti namot (svitci ili štapovi)**

Naziv je dobio prema načinu na koji je namot izveden, gdje vodiči čine zatvorenu petlju koja je uložena u utore statorskog paketa. Na slici 1 prikazan je petljasti tip namatanja gdje se donji vodič nalazi u desnom utoru, a gornji u lijevom i vidljiv je međusobni razmak (korak svitka) između gornjeg i donjeg vodiča jednog svitka.

Vodič jednog svitka dolazi u donji sloj, a vodič nekog drugog svitka u gornji sloj istog utora. Kod generatora sa visinom statorskog paketa do 1500 mm statorski se namot izvodi u obliku petljastog namota sa svitcima, dok se za veće visine koriste štapovi jer je teško proizvesti dugačke svitke.

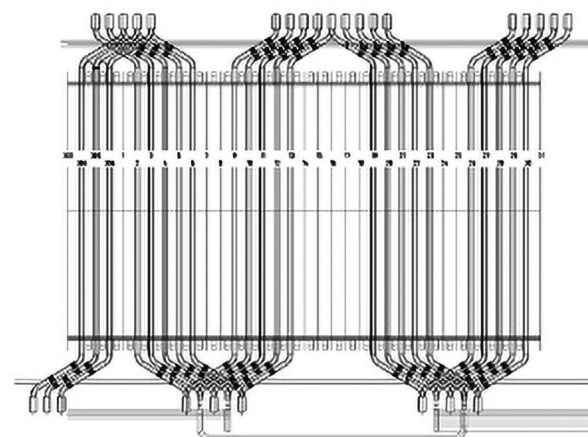


Slika 1 Petljasti namot hidrogenatora a) svitak b) štap [4]

Figure 1 Hydrogenerator loop type winding a) coil b) bar [4]

#### **Valoviti namot (štapovi)**

Ova vrsta namota koristi se kod generatora velikih dimenzija sa visinom utorskog paketa od 800 do 2500 mm. Statorski se namot izvodi u obliku valovitog namota sa štapovima. Štapovi valovitog namota mogu biti gornji ili donji (prema položaju u utoru statorskog paketa) i spajaju se donji štap sa gornjim i međusobno su razmaknuti za nekoliko utora.



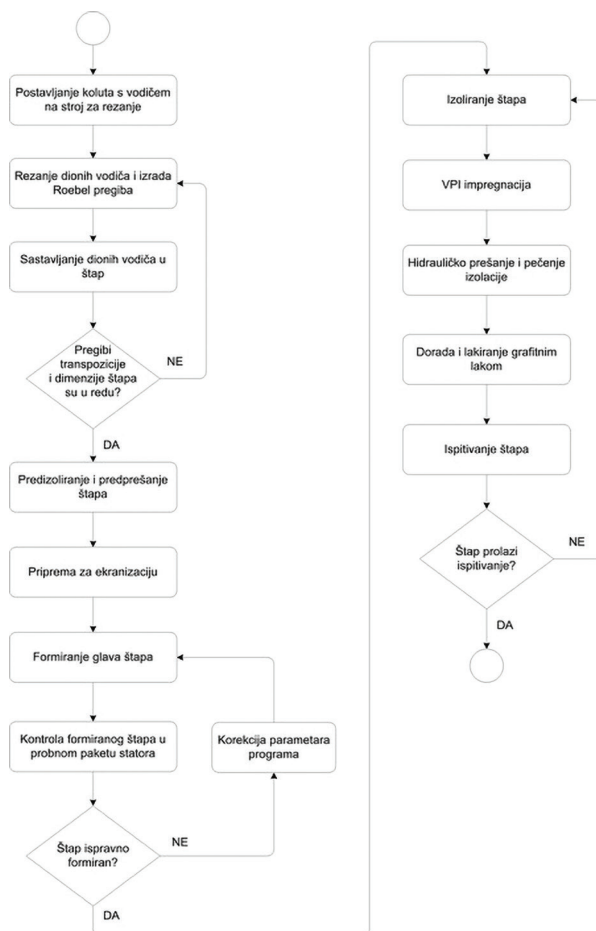
Slika 2 Valoviti namot hidrogenatora [4]

Figure 2 Hydrogenerator wave type winding [4]

## 4. Proces izrade namota statora hidrogenatora

### 4. Production process of a hydrogenerator winding

Postupak izrade statorskih štapova je kompliciran i zahtjevan te je neophodno da bude izveden na najvišoj razini kvalitete. Prvo se izrađuje probna serija koja se ispituje, kalibrira i kontrolira prema projektnoj dokumentaciji i po potrebi se vrše korekcije da bi se nakon toga krenulo sa normalnom proizvodnjom.



**Slika 3** Proces izrade namota statora hidrogenatora

**Figure 3** Hydrogenerator stator winding production process

Prema proračunima iz projektne dokumentacije započinje proces izrade statorskih štapova rezanjem dionih vodiča na točnu mjeru. Na izvodima dionih vodiča skida se izolacija i prešanjem se izrađuju pregibi potrebni za Roebel transpoziciju. Kod Roebel izvedbe dioni vodiči unutar jednog štapa isprepleteni su po dužini štapa pod kutem od 360°.

Rezanje vodiča vrši automatizirani stroj koji istovremeno skida izolaciju i izrađuje pregibe.

Važna je detaljna kontrola formiranih vodiča radi mogućih oštećenja izolacije na mjestima pregiba jer takvi ne mogu zadovoljiti kriterije ispravnosti. Pripremljeni vodiči sa pregibima nižu se jedan do drugoga i formira se polu-štap, a dva polu-štapa se sastavljaju u štap s time da se između njih umeće vertikalni uložak, tj. separator. Sastavljeni štap se poravnava i povezuje trakom kako se vodiči štapa ne bi raslojili. Sastavljenom štapu provjeravaju se dimenzije, transpozicije i pregibi, te broj vodiča koji je točno određen konstrukcijskim crtežom. Idući korak je predizoliranje štapova.



**Slika 4** Rezanje, čišćenje izvoda te izrada pregiba dionih vodiča

**Figure 4** Slicing, removing of the isolation and making the Roebel transposition



**Slika 5** Štap sa Roebel transpozicijom [5]

**Figure 5** Bar with Roebel transposition [5]

Kod predizoliranja priprema se podloga prepleta i ispunja prepleta da se dodatno osigura pouzdana izolacija u slučaju da je izolacija dionih vodiča na mjestima prepleta mehanički oštećena uslijed savijanja. Između dionih vodiča umeće se podloga prepleta u šupljine na uglovima štapa na utorskom dijelu. Time se dobiva kompaktan pravokutan oblik.

Utorski dio omotava se trakom da bi se učvrstio štap. Slijedi kompaktizacija koja se odnosi na predprešanje utorskog dijela štapa na konstrukcijski točno određenu mjeru. Štapovi se postavljaju u dio preše za prešanje gdje se međusobno odjeljuju setom graničnika i nakon toga slijedi kompaktizacija na temperaturi određenoj prema proizvodnom procesu. Nakon završetka kompaktizacije štapovi se hlade i skidaju s preše te se doraduju oštri bridovi i kontroliraju dimenzije utorskog dijela štapa.



*Slika 6 Predprešanje statorskog namota*

*Figure 6 Stator winding pre-pressing*

Formiranje glava i izvoda štapa je idući korak proizvodnog procesa koji se odnosi na bočno savijanje štapa koji će tvoriti glavu i uvijanje po cijeloj njegovoj dužini. To formiranje glava je nužno da bi se nakon ulaganja štapova u statorski paket, glave gornjih i donjih štapova mogle pravilno ugraditi i da bi se omogućilo povezivanje njihovih izvoda. Svaki štap ima dvije glave koje se formiraju prema konstrukcijskoj dokumentaciji. Formiranje glava vrši se na automatiziranom stroju koji prema programiranim koordinatama štapa vrši formiranje glava.

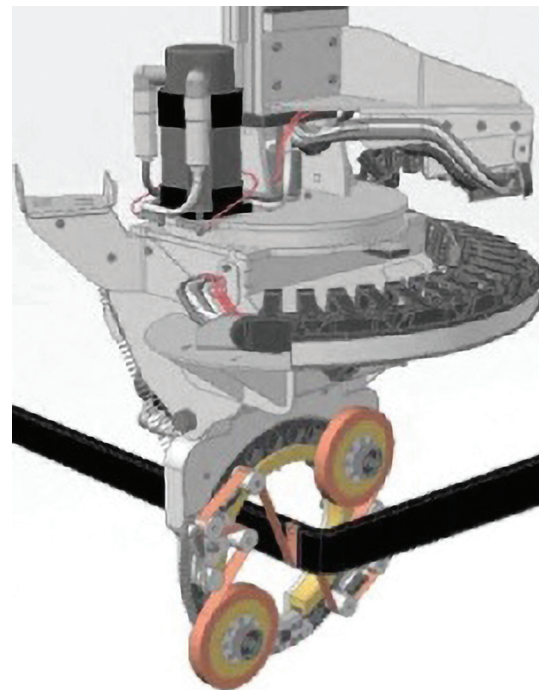


*Slika 7 Formiranje statorskog namota*

*Figure 7 Forming of stator windings*

Nakon formiranja glava, štap se postavlja u probni paket koji simulira statorski paket s utorima radi kontrole svih relevantnih dimenzija sa uračunatom tolerancijom kako bi se zadovoljili svi parametri konstrukcijskog proračuna.

U idućem koraku proizvodnog procesa vrši se izoliranje štapa pomoću automatske namatalice trake koja prema unešenom programu vrši automatsko namatanje glavne izolacijske trake na štap koji je postavljen na stroj i učvršćen od pomicanja.



*Slika 8 Izoliranje namota [6]*

*Figure 8 Winding insulation [6]*

Kada se završi proces namatanja izolacije radi se provjera dimenzija štapa na utorskom dijelu te se evidentiraju izmjereni podatci.

U idućem koraku štap se priprema za VPI impregnaciju koja se vrši u vakuumsko-tlačnoj komori. Prije samog procesa impregnacije štapovi se suše u posebnoj komori na temperaturi određenoj tehnološkim procesom. Nakon toga štapovi se postavljaju u posebnu kadu koja je smještena u vakuumsko-tlačnoj komori. Zagrijana impregnacijska smola se nakon vakuumiranja komore tlači pod visokim tlakom da bi se umetnuti štapovi u komori impregnirali već prema unaprijed definiranim i programiranim parametrima. Nakon završetka procesa impregnirani štapovi se vade iz komore i odstranjuje se višak impregnacijske smole.

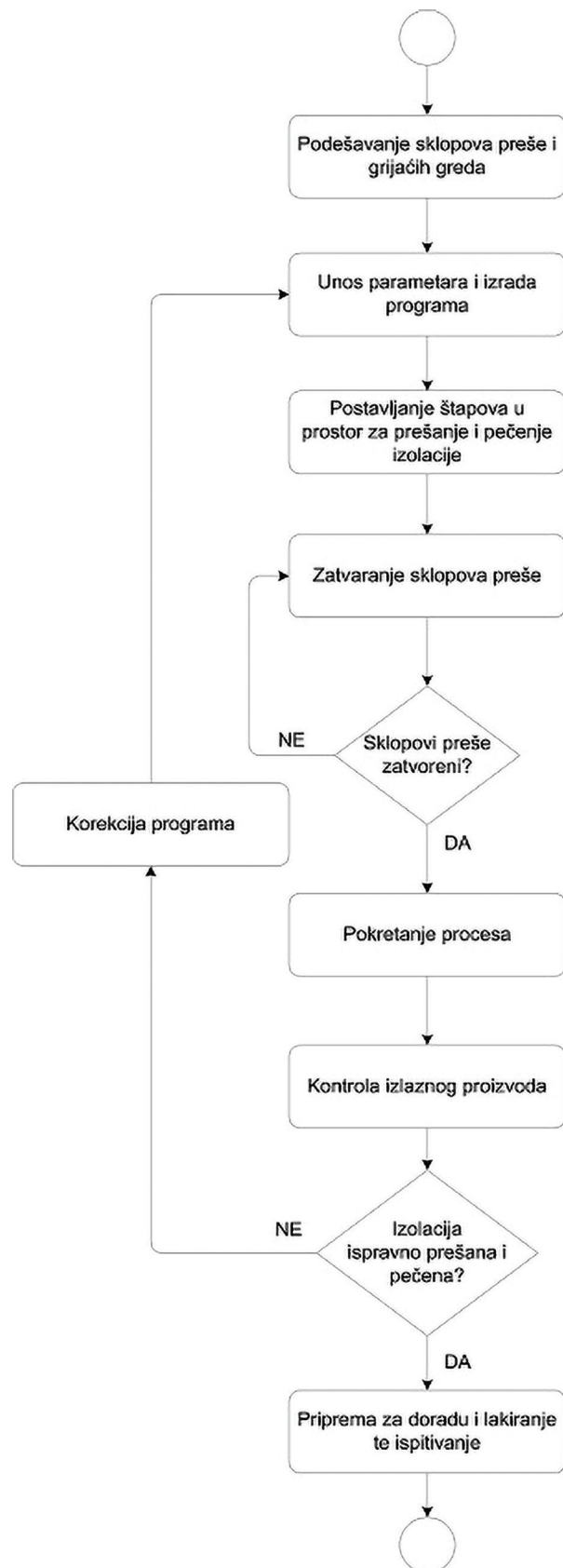


*Slika 9 Komora za vakuumsko-tlačnu impregnaciju*

*Figure 9 Vacuum-pressure impregnation chamber*

Prije samog postupka hidrauličkog prešanja i pečenja izolacije potrebno je prešu mehanički pripremiti prema dimenziji i obliku štapa. Nakon zagrijavanja i postupka prešanja slijedi dodatno zagrijavanje i postupak pečenja izolacije štapa nakon čega se štapovi vade i kontrolira kvaliteta, dimenzije i izgled zapečenog sloja izolacije.

U završne radove dorade i ispitivanje štapova spada ručno obrađivanje površine izolacije štapa brusnim papirom visoke granulacije, kontrola dimenzije utorskog dijela pomoću mjernih čeljusti i provjera oblika i dimenzija štapova umetanjem u probni paket. Slijedi nanošenje vodljivog sloja grafitnog laka dok se glave premazuju poluvodljivim lakom i preko toga zaštitnim izolacijskim lakom.



*Slika 10 Proces prešanja i pečenja izolacije namota*

*Figure 10 The process of pressing and baking of the winding insulation*

Nakon što je izrada statorskih štapova u potpunosti završena slijedi završna kontrola dimenzija i oblika štapa te ispitivanje električnih svojstava štapova i njihove izolacije u što spada visoko-naponsko ispitivanje, mjerenje otpora vodljivog sloja, mjerenje kuta gubitaka  $\text{tg}\delta$  i mjerenje parcijalnih pražnjenja.

Kada su sva ispitivanja i testiranja završena dobiveni rezultati se obrađuju i unose u ispitnu dokumentaciju te su sastavni dio kompletne tehničke dokumentacije generatora.

## 5. Zaključak

### 5. Conclusion

U radu smo opisali proces izrade statorskog namota hidrogeneratora pomoću automatiziranih procesa. U svemu tome bitno je izraditi kvalitetne proračune parametara programa koji upravljaju tim procesima. Važno je slijediti redoslijed postupaka tijekom izrade i formiranja namota hidrogeneratora, te nakon završetka jedne faze procesa izrade nastaviti sa drugom. Kako bi kvaliteta izrađenog namota zadovoljavala tehničke kriterije unutar tolerancija koje su zadane da namotaj bude kvalitetan i siguran u budućem radu generatora bitna je ljudska prisutnost nadgledanja svih procesa izrade.

## 6. REFERENCE

### 6. REFERENCES

- [1.] Hidroelektrana Jaruga; [https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana\\_Jaruga](https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana_Jaruga)
- [2.] Marković Ivor; Električne energetske pretvorbe – Sinkroni strojevi; Tehničko veleučilište u Zagrebu; str. 8-10
- [3.] Mandić I.; Tomljenović V.; Pužar M.; Sinkroni i asinkroni električni strojevi; Tehničko veleučilište u Zagrebu; ISBN 978-953-7048-25-9; pp. 9-11; Zagreb, 2012.
- [4.] Tomerlin Damir; Konstrukcija hidrauličke naprave za prešanje izolacije štapova hidrogeneratora; Veleučilište u Karlovcu; 2014.; str. 17-19, 25-29
- [5.] Partzsch; <https://en.partzsch.de/roebel-bars>
- [6.] CNC uređaj za automatsko namatanje izolacije ANT300/ANT400 – Uputa za održavanje; Končar - Generatori i motori, d.d.; Zagreb; 2011.; str. 9
- [7.] Krešimir Šegović; Izrada statorskog namota hidrogeneratora automatiziranim procesima / diplomski rad; Zagreb; Tehničko veleučilište u Zagrebu; 2019.

## AUTORI · AUTHORS



### Krešimir Šegović -

Rođen je 06.09.1982. godine u Varaždinu. Osnovnu školu pohađao je u Novom Marofu, a srednju u Varaždinu na Elektrostrojarskoj školi.

Preddiplomski studij

elektrotehnike završio je na Veleučilištu u Varaždinu (danas Sveučilište sjever). Politehnički specijalistički diplomski stručni studij elektrotehnike završio je na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu. Zaposlen je u Končar – Generatori i motori gdje radi u odjelu tehnologije.

### Korespondencija

kresimir.segovic@tvz.hr



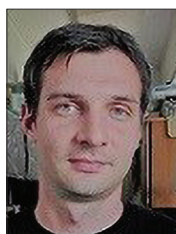
### Ivor Marković -

Rođen je 18.10.1988. godine u Zagrebu. Osnovnu i srednju školu pohađao je u Zagrebu. Preddiplomski i diplomski studij završio je 2012. godine na Fakultetu elektrotehnike i

računarstva, smjer Elektroenergetika. Trenutno radi kao predavač na Elektrotehničkom odjelu Tehničkog veleučilišta u Zagrebu. Također, trenutno radi na doktorskom radu iz područja Električnih strojeva i tehnologija na fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu.

### Korespondencija

ivor.markovic@tvz.hr

**Tomislav Đuran -**

Rođen je u Zagrebu 2.12.1985. godine. U Zagrebu završava OŠ Luka i XV. gimnaziju (nekad MIOC). Upisuje 2004. godine Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilišta

u Zagrebu. Diplomirao je 2009.godine. U Končar MES-u je radio u periodu 2010-2017 godine kao projektant elektromotora i kasnije voditelj poslova Projekta, Elektrotehnologije i Elektromotornih pogona. Na TVZ-u je zaposlen kao asistent od 2017.godine. Izvodi laboratorijske i auditorne vježbe iz kolegija: Električni strojevi 1 i 2, Transformatori, Elektromotorni pogoni, Transformatori i električni strojevi.

**Korespondencija**

tomislav.duran@tvz.hr

**Tomislav Novak -**

Rođen je u Zagrebu 22.07.1985. godine. Osnovnu i srednu školu pohađao u Zagrebu. Preddiplomski i diplomski studij završio na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u

Zagrebu 2010. godine, smjer Telekomunikacije i informatika. Radi kao predavač na Tehničkom veleučilišu u Zagrebu od 2011. godine. Od 2012. godine honorarno radi kao instruktor objektno orijentiranog programiranja i Jave na NetAkademiji.

**Korespondencija**

tomislav.novak@tvz.hr