

# Izračun vrtničnih tokov in joulskih izgub v Roebelovih palicah statorskega navitja sinhronskega generatorja

Darinko Stich, Anton Hamler

Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Smetanova ul. 17, Maribor  
E-pošta: anton.hamler@uni-mb.si

**Povzetek.** Delo obravnava izriv toka v statorskem navitju sinhronskega generatorja. S pomočjo numerične analize je izračunana porazdelitev tokovne gostote in joulske izgube v Roebelovih palicah, kjer so delni vodniki med seboj prepleteni za  $180^\circ$  oz.  $360^\circ$ . Izračun harmonično časovno spremenljivega elektromagnetnega polja je bil izveden na 3D-modelu s pomočjo metode končnih elementov.

**Ključne besede:** sinhronski generator, statorsko navitje, vrtnični tokovi, Roebelova palica, numerična analiza

## Calculation of eddy currents and joule losses in Roebel bars of the stator winding of the synchronous generator

**Extended abstract.** The work addresses the skin effect issue taking place in stator windings of the synchronous generator. The current distribution is calculated with a numerical analysis. Calculation of the current density and joule losses in Roebel bars is presented for cases with partial conductors mutually interweaved for  $180^\circ$  and  $360^\circ$ . Time-dependent harmonic analysis of the electromagnetic field was made with a 3D-model with the finite-element method (Vector Fields Opera 3D software). Figure 6 shows the current density distribution in a  $180^\circ$  interweaved stator bar and Figure 10 the current density distribution in a  $360^\circ$  interweaved Roebel bar. The calculation reveals three-times bigger joule losses in copper in the generator with a  $180^\circ$  interweaved bar than in the generator with a  $360^\circ$  interweaved Roebel bar. The analysis shows that the Roebel  $180^\circ$  interweaved bar is unsuitable.

**Key words:** synchronous generator, stator winding, eddy currents, Roebel bar, numerical analysis

preizkusu popolne obremenitve oz. segrevanja je bilo ugotovljeno čezmerno segrevanje statorskega navitja. Pozneje je bilo ugotovljeno, da je izdelovalec generatorjev pri tretjem generatorju spremenil način prepletanja delnih vodnikov v statorskih palicah. Namesto Roebelovih palic, kjer so delni vodniki prepleteni za  $360^\circ$ , je uporabil palice s prepletanjem za  $180^\circ$ .

Pri trifaznem sinhronskem generatorju tečejo po statorskem navitju poleg bremenskega toka tudi parazitni vrtnični tokovi, ki povzročajo dodatne joulske izgube. Da se ta pojav zmanjša, so pri v velikih generatorjih namesto masivnih vodnikov uporabljene palice, ki so sestavljene iz medsebojno izoliranih delnih vodnikov, prepletenih po sistemu Roebel. Roeblovo prepletanje ima nalogo zagotoviti enakomerno porazdelitev toka na vse delne vodnike. To je doseženo le, če je omenjeno prepletanje izvedeno pravilno. Pri nepravilnem prepletanju, se to kaže navzven kot čezmerno segrevanje navitja.

## 1 Uvod

Pri Dravskih elektrarnah Maribor je na elektrarni Vuhred potekala prenova. Zamenjani so bili vsi trije generatorji, ki naj bi bili enaki, saj so bili izdelani po istih zahtevah. Prva dva generatorja sta uspešno prestala vse zagonske preizkuse in za zdaj dobro delujeta. Pri zagonskih preizkusih tretjega generatorja pa so nastali problemi. Pri meritvi karakteristike kratkega stika in

## 2 Sinhronski generator

Obravnavani stroj je počasi tekoči 48-polni hidrogenerator srednje moči. Generator ima na rotorju izražene pole s koncentriranim navitjem in palično dušilno kletko. Rotorsko navitje je napajano z enosmernim tokom prek dveh drsnih obročev in oglenih ščetk. Na statorju je trifazno dvoplastno zankasto navitje, ki je razporejeno v 306 utorov. Posamezne palice so izdelane iz delnih vodnikov in prepletene po sistemu Roebel. Osnovni podatki generatorja so podani v naslednji tabeli.

|                            |                       |
|----------------------------|-----------------------|
| Vrsta                      | 3-fazni sinhronski    |
| Tip                        | S6907-48              |
| Nazivna moč ( $S$ )        | 30 MVA                |
| Nazivna napetost ( $U_n$ ) | 10,5 kV               |
| Nazivni tok ( $I_n$ )      | 1650 A                |
| Nazivni vrtiljaji ( $n$ )  | 125 min <sup>-1</sup> |

Tabela 1: Osnovni podatki generatorja  
Table 1: Generator main data

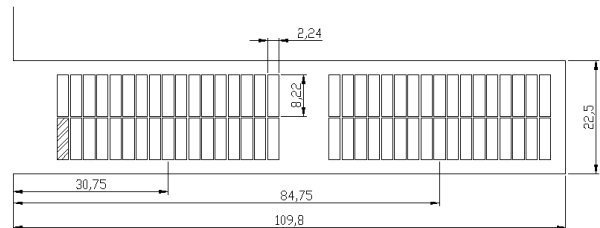
Tuljave statorskega navitja so sestavljene iz dveh palic in dveh glav. Ker je navitje dvoplastno, sta v vsakem utoru nameščeni dve palice. V nekaterih utorih pripadata obe palici isti fazi, v drugih pa pripadata različnima fazama. V tej analizi sta obravnavana oba primera.

### 3 Roebelova palica

Če se masivna palica statorskega navitja nahaja v utoru feromagnetnega jedra, ki je na vrhu odprt, se magnetno polje razporedi nesimetrično glede na simetralo palice, saj se polje zaključuje po poti najmanjšega magnetnega upora. Zato pri izmeničnem toku v palici zaradi lastne indukcije nastane neenakomerna porazdelitev električnega polja, s tem pa tudi tokovne gostote.

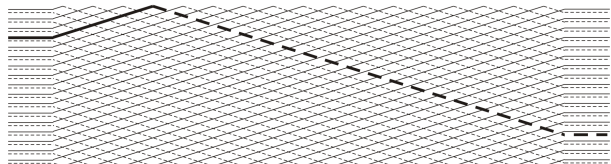
Del palice, ki se nahaja na dnu utora, ima večji magnetni sklep s poljem razsipanega fluksa kot del, ki je bližje vrhu utora. Zaradi izmeničnega toka je reaktanca spodnjega dela palice večja, zato pride do neenakomerne porazdelitve tokovne gostote. Tok se preseli v zgornji del palice, kjer je reaktanca manjša. Ko sta v utoru feromagnetnega jedra dve palici druga nad drugo, v katerih teče isti tok, bo magnetno polje spodnje palice vplivalo na zgornjo palico, kar povzroči v zgornji palici še večje vrtilne tokove in še večje izgube. Zato so v večjih strojih namesto masivnih vodnikov uporabljene palice, ki so razdeljene na več medsebojno izoliranih delnih vodnikov. Ker so ti delni vodniki na koncih palice spojeni, morajo vsi imeti enako impedanco, kar dosežemo z njihovim prepletanjem.

Prvi, ki je namesto masivne palice v velikem stroju uporabil palico s prepletenimi delnimi vodniki, je bil Ludwig Roebel. Svoj izum je patentiral marca leta 1912. Vloga prepletanja delnih vodnikov je v zagotovitvi enakomerne porazdelitve toka na vse vzporedno vezane delne vodnike. To je doseženo tako, da prepletajoči se vodniki zavzamejo vzdolž statorskega utora vse mogoče položaje, torej se zavrtijo za 360°. V tem primeru imajo vsi delni vodniki enako impedanco, kar zagotavlja, da po vsakem teče enak tok. Na sliki 1 je prikazano, kako je pri obravnavanem generatorju zapolnjen utor.

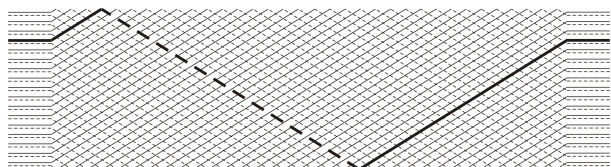


Slika 1: Polnjenje statorskega utora  
Figure 1: Stator slot filling

Na gornji sliki vidimo, da je palica sestavljena iz 2×17 delnih vodnikov. Generator v HE Vuhred je imel prvotno vgrajene palice, pri katerih so bili delni vodniki prepleteni le za 180°, vendar jih je bilo treba zaradi pregrevanja zamenjati z Roeblovimi palicami, ki so prepletene za 360°. Izvedbo prepletanja delnih vodnikov obeh vrst palic shematsko prikazujeta sliki 2 in 3.



Slika 2: Prepletanje delnih vodnikov palice za 180°  
Figure 2. The partly conductor on 180° interweaved bar

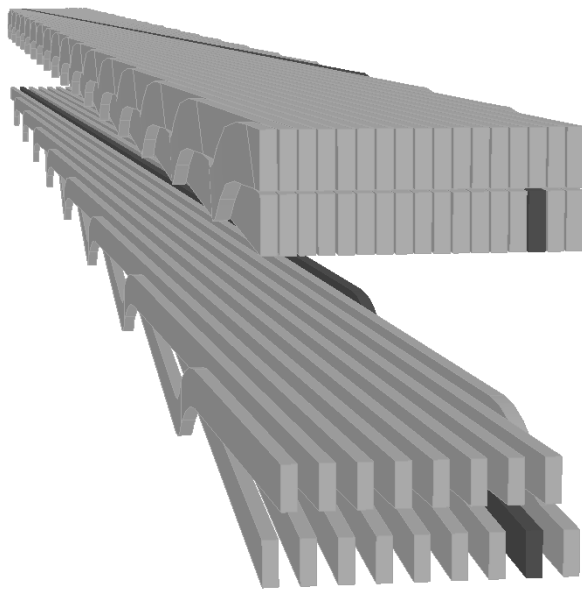


Slika 3: Roebelova palica (prepletanje za 360°)  
Figure 3: Roebel bar (360° interweaved)

Vrtilni tokovi v statorskih palicah so odvisni od magnetnega polja v utoru, ki je v glavnem posledica razsipanega polja samih statorskih palic. S predhodno analizo statičnega magnetnega polja v obremenjenem generatorju smo ugotovili, da rotor in rotorsko vzbujanje le malo vplivata na magnetno polje v utoru. Zaradi razsipanosti je v statorskem utoru prisotna tangencialna komponenta polja. Ko pa se pred utorom statorja nahaja polov čevelj z rotorskim vzbujanjem, na vrhu utora nastane tudi majhen delež radialne komponente polja [1]. V trenutku se amplituda gostote magnetnega pretoka v utoru nekoliko zmanjša.

Ker je omenjeni vpliv rotorja na vrtilne tokove v statorskih palicah zelo majhen, rotor pri harmoničnem izračunu porazdelitve tokovne gostote v statorskih palicah ne bo modeliran in upoštevan. Torej bo model sestavljal izsek statorja, v katerem je en utor z dvema prepletenima palicama in okoliški zrak oz. izolacija.

Vendar tudi pri takšnem modelu ne bo šlo brez poenostavitve, namreč Roebelova palica je sestavljena iz medsebojno izoliranih delnih vodnikov, med katerimi je v primerjavi z dolžino palice zelo tanek sloj izolacije. Statorski paket je dolg 1200 mm, izolacija med delnimi vodniki pa je debela le od 0,25 do 0,4 mm. Takšnega modela nam zaradi prevelikih geometrijskih nesorazmerij ni uspelo diskretizirati s končnimi elementi, saj bi število elementov prekoračilo zmogljivost računalnika. Zato smo se odločili za poenostavitev, ki je razvidna s slike 4. Vidimo, da je pri poenostavljenem modelu izpuščen vsak drugi delni vodnik, povečana pa je tudi vertikalna izolacija med delnimi vodniki. Tako se celotni presek palice zmanjša na tretjino, fizikalna slika problema pa se ohrani. Z izračunom na takšnem modelu ne bomo dobili dejanskih izgub v palici, točno pa bo ostalo razmerje med izgubami pri enakomerni in neenakomerni porazdelitvi toka oz. izračunani faktor navideznega povečanja ohmske upornosti. Jasna bo tudi razlika med prepletanjem za 180° in 360°.



Slika 4: Dejanski in poenostavljeni model palice s 180°-skim prepletanjem

Figure 4: Real and simplified model of a 180° interweaved bar

Pri neenakomerni porazdelitvi tokovne gostote po preseku palice se palici spremeni impedanca. Spremeni se tako realni del (ohmska upornost) kot tudi imaginarni del (induktivna upornost). Vendar s stališča jouskih izgub v palici sprememba induktivne upornosti ni zanimiva. Ker tok ne more popolnoma izkoristiti vsega preseka palice, se palici navidezno poveča ohmska upornost, s tem pa tudi jouske izgube. Zato si bomo podrobneje ogledali le spremembo ohmske upornosti.

Jouske izgube, ki nastajajo v palici, lahko izračunamo z naslednjim integralom po volumnu palice:

$$P_{Cu} = \frac{1}{2} \int_V \frac{|J|^2}{\gamma} dV = I^2 R_{\approx} \quad (1)$$

Jouske izgube v palici so enake tudi  $I^2 R_{\approx}$ , kjer je  $R_{\approx}$  izmenična upornost in  $I$  efektivna vrednost toka, ki teče po palici.  $J$  je kompleksna vrednost tokovne gostote v palici,  $\gamma$  pa je specifična električna prevodnost bakra.

Če bi bila porazdelitev tokovne gostote v palici enakomerna (enosmerni tok), bi bile izgube v njej enake:

$$P_{Cu} = \int_V \frac{J_{sr}^2}{\gamma} dV = I^2 R_{=}, \quad (2)$$

kjer je  $R_{=}$  enosmerna upornost in  $J_{sr}$  srednja efektivna vrednost tokovne gostote.

Če zdaj tvorimo razmerje med izmenično in enosmerno upornostjo, dobimo faktor, ki pove, za kolikokrat se je povečala ohmska upornost palice zaradi neenakomerne porazdelitve toka. Ta faktor pove tudi, kolikokrat so se zaradi izriva toka povečale jouske izgube.

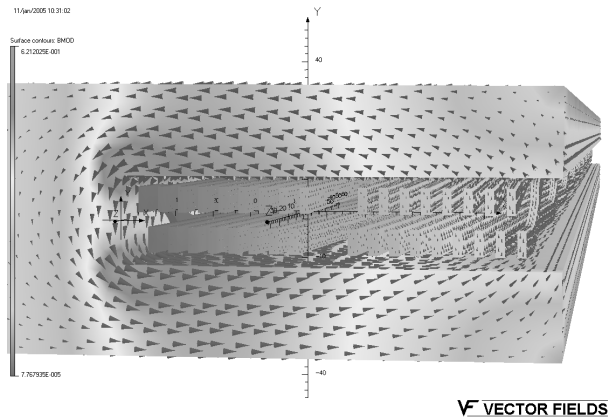
$$\frac{R_{\approx}}{R_{=}} = \frac{\frac{1}{2} \int_V \frac{|J|^2}{\gamma} dV}{\int_V \frac{J_{sr}^2}{\gamma} dV} \quad (3)$$

#### 4 Rezultati numerične analize

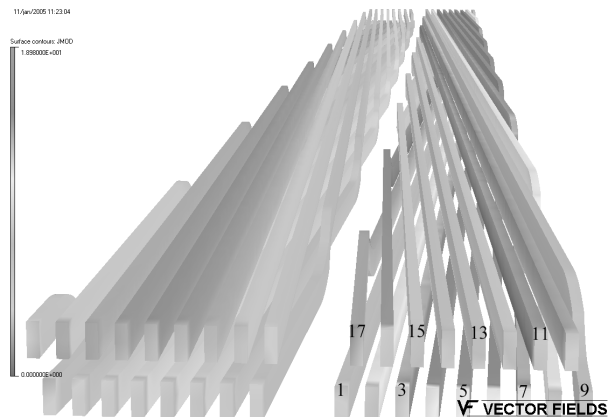
Na sliki 5 je prikaz gostote magnetnega pretoka v izseku statorja, v katerem je utor z dvema palicama, ki sta prepleteni za 180°. Obe palici pripadata isti fazi, torej po obeh teče enak tok v isto smer. Na sliki je prikazano polje za trenutek, ko imata tokova amplitudno vrednost. Takšno magnetno polje povzroči v palicah tokovno gostoto, ki je prikazana na sliki 6. Na sliki je leva palica tista, ki leži zgoraj, desna pa leži spodaj, torej globlje v utoru. Vidimo, da so večje težave z vrtilnimi tokovi v zgornji palici. Največji tok teče po tistem delnem vodniku, ki po celotni dolžini palice leži najbližje odprtini utora. V zgornji palici je to vodnik, označen s številko "5".

Za delne vodnike zgornje palice, ki so na sliki 6 oštevilčeni, so na sliki 7 prikazani časovni poteki tokov. Amplituda vsiljenega toka, ki teče po celotni palici, znaša pri tem izračunu 1500 A. Pri enakomerni porazdelitvi toka po palici bi amplituda toka delnih vodnikov znašala 88 A. Na diagramu na sliki 7 vidimo, da so zaradi vrtilnih tokov, ki tečejo po palici, amplitude tokov veliko večje. Vidimo lahko, da znaša amplituda toka v delnem vodniku, označenem s "5", kar

339 A. Zanimivo pa je tudi, da v nobenem od delnih vodnikov amplituda toka ni manjša od 88 A. Da je vsota tokov vseh delnih vodnikov enaka vsiljenemu toku, so tokovi fazno premaknjeni.



Slika 5: Prikaz gostote magnetnega pretoka v izseku statorja z dvema palicama iste faze  
Figure 5: Magnetic-flux density in a stator section with two bars in the same phase

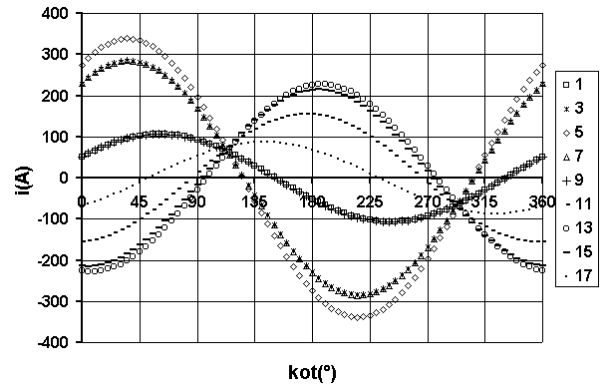


Slika 6: Prikaz trenutne porazdelitve tokovne gostote v palicah, prepletelih za 180°  
Figure 6: Current-density momentary distribution in a 180° interleaved bar

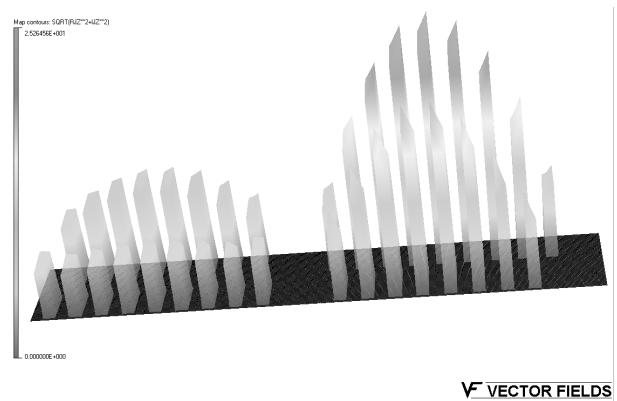
Na sliki 8 so v obliki histograma prikazane amplitudne vrednosti tokovnih gostot delnih vodnikov, prepletelih za 180° za primer, ko pripadata palici v utoru isti fazi. Prikazane razmere na sliki ustrezajo začetku palic, kot jih vidimo na sliki 6. Podoben prikaz je tudi na sliki 9, kjer palici pripadata različnima fazama.

Takšna neenakomerna porazdelitev toka v palicah se pri generatorju kaže kot povečanje toplotnih izgub v navitju oz. kot navidezno povečanje ohmske upornosti. V tabeli 2 in 3 so prikazani izračunani faktorji povečanja upornosti za spodnjo in zgornjo palico. Ob predpostavki, da izračunani faktor povečanja upornosti

velja tudi za nepoenostavljeni model, so v tej tabeli prikazane vrednosti jouskih izgub, ki bi jih palice imele pri toku 1350 A (ker je moč turbine manjša od nazivne moči generatorja, generator v ugodnih vodnih razmerah najpogosteje obratuje pri toku 1350 A).

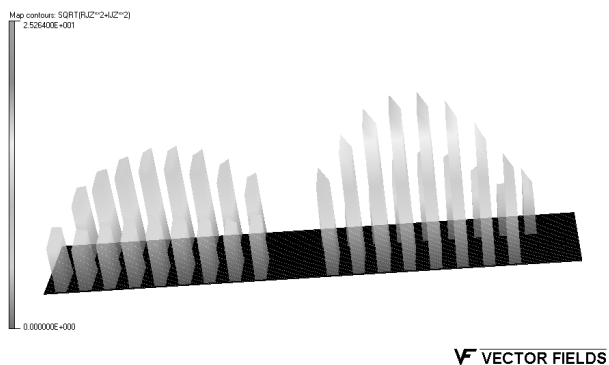


Slika 7: Časovni poteki tokov, ki tečejo po delnih vodnikih zgornje palice, ki je prepletena za 180°  
Figure 7: Time curve of currents in partial conductors in a 180° interleaved upper bar



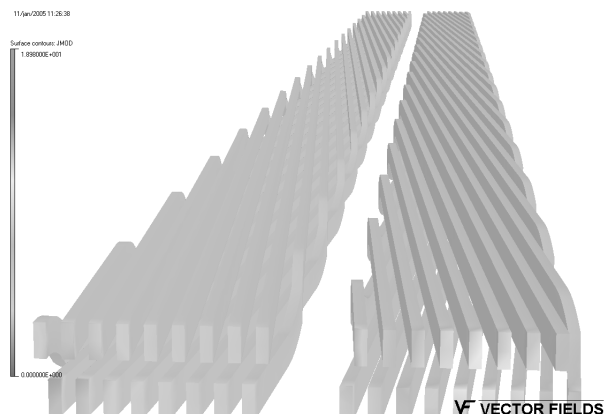
Slika 8: Histogram amplitudnih vrednosti tokovne gostote v delnih vodnikih palice, prepletene za 180° (spodnja in zgornja palica pripadata isti fazi)  
Figure 8: Histogrammic presentation of the current-density amplitude value in a 180° interleaved partial conductor (the upper and bottom bar belongs to the same phase)

Pri Roebelovi palici, ki pa je prepletena za 360°, zavzamejo vsi delni vodniki vzdolž palice vse mogoče položaje (slika 3). Tako za nobenega od delnih vodnikov v palici ne moremo reči, da leži bliže vrhu utora kot neki drugi. Vsi delni vodniki se vsiljenemu električnemu toku zoperstavljajo z enako impedanco, zato se ta porazdeli enakomerno. To dokazujeta tudi rezultata na slikah 10 in 11.



Slika 9: Histogram amplitudnih vrednosti tokovne gostote v delnih vodnikih palice, prepletene za 180° (palici pripadata različnima fazama)

Figure 9: Histogrammic presentation of the current-density amplitude value in partial conductor with a 180° interleaved bars of a different phase



Slika 10: Prikaz trenutne porazdelitve tokovne gostote v Roebelovih palicah 360°

Figure 10: Current-density momentary distribution in a 360° interleaved Roebel bar

|                | jouske izgube<br>$P_{Cu}$ (W) | faktor povečanja<br>upornosti |
|----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| spodnja palica | 103                           | 1,68                          |
| zgornja palica | 421                           | 6,87                          |

Tabela 2: Rezultati izračuna za palici 180°, ki pripadata isti fazi

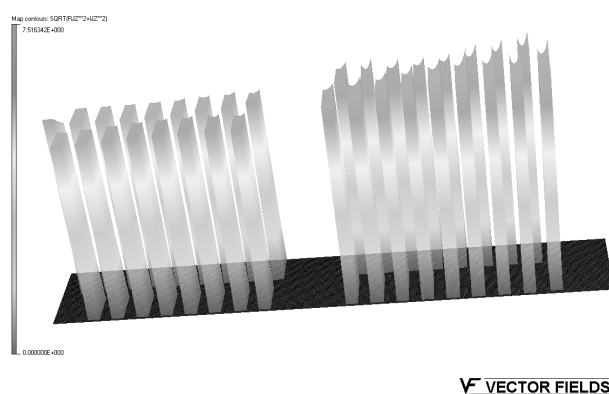
Table 2: Calculation results for a 180° interleaved bar of the same phase

|                | jouske izgube<br>$P_{Cu}$ (W) | faktor povečanja<br>upornosti |
|----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| spodnja palica | 103                           | 1,68                          |
| zgornja palica | 193                           | 3,15                          |

Tabela 3: Rezultati izračuna za palici 180°, ki pripadata različnima fazama

Table 3: Calculation results for a 180° interleaved bar of a different phase

Na sliki 11 je prikazana amplitudna vrednost tokovne gostote. Na spodnjih vodnikih spodnje palice vidimo, da je tokovna gostota enakomerno porazdeljena tudi v posameznih delnih vodnikih. V delnih vodnikih, ki ležijo višje v utoru, pa nastane neenakomerna porazdelitev tokovne gostote v posameznih delnih vodnikih. Torej tudi po Roebelovi palici, ki je prepletena za 360°, tečejo vrtnični tokovi, ki pa so veliko manjši kot pri prepletanju za 180°. Potemtakem se tudi pri takšni palici malo navidezno poveča ohmska upornost. V tabelah 4 in 5 so prikazani izračunani faktorji povečanja upornosti in izgube.



Slika 11: Histogram amplitudnih vrednosti tokovne gostote v Roebelovi palici 360° (palici pripada isti fazi)

Figure 11: Histogrammic presentation of the current-density amplitude value in a 360° interleaved Roebel bar (same phase)

|                | jouske izgube<br>$P_{Cu}$ (W) | faktor povečanja<br>upornosti |
|----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| spodnja palica | 61,8                          | 1,008                         |
| zgornja palica | 62,8                          | 1,024                         |

Tabela 4: Rezultati izračuna za Roebelovi palici 360°, ki pripadata isti fazi

Table 4: Calculation results for a 360° interleaved Roebel bar of the same phase

|                | jouske izgube<br>$P_{Cu}$ (W) | faktor povečanja<br>upornosti |
|----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| spodnja palica | 61,8                          | 1,009                         |
| zgornja palica | 61,5                          | 1,003                         |

Tabela 5: Rezultati izračuna za Roebelovi palici 360°, ki pripadata različnima fazama

Table 5: Calculation results for a 360° interleaved Roebel bar of a different phase

## 5 Sklep

Z analizo smo ugotovili, da so vrtnični tokovi v palicah statorskega navitja odvisni le od razsipanega polja v utoru, ki ga povzroči statorski tok. Rotor le malo vpliva na razsipano polje v utoru statorja. Zato smo lahko vrtnične tokove v prepletelih palicah računali brez vpliva rotorja.

S harmoničnim izračunom na modelu z Roebelovim prepletanjem, kjer so izolirani delni vodniki med seboj prepleteni za  $360^\circ$ , smo ugotovili, da izriva toka skoraj ni, saj je bil izračunani faktor navideznega povečanja ohmske upornosti le malo večji od ena. Z izračunom tokovne porazdelitve na modelu s palicami, ki so prepletene le za  $180^\circ$ , pa smo ugotovili, da so imele spodnje palice generatorja 1,68-krat večje izgube in zgornje palice 3,15- oz. celo 6,87-krat večje izgube.

Obravnavani generator ima 306 utorov, od tega je 108 utorov takšnih, ki imajo po dve palici, ki pripadajo isti fazi, in 198 takšnih, kjer palici pripadata različnima fazama. S kratkim izračunom lahko hitro pridemo do ocene, da je imel generator s palicami, prepletenimi za  $180^\circ$ , trikrat večje jouske izgube v palicah statorskega navitja, kot jih ima generator z Roebelovimi palicami ( $(1,68 \cdot 306 + 6,87 \cdot 108 + 3,15 \cdot 198) / 612 \approx 3$ ).

Večje jouske izgube v navitju pa pomenijo večje segrevanje, kar se je v elektrarni Vuhred tudi dejansko izkazalo, saj je temperatura navitja pri toku 1400 A naglo naraščala še tudi potem, ko je že dosegla  $120^\circ\text{C}$ , kar je zgornja dovoljena temperatura. Nato je bil preizkus prekinjen. Pri enakem generatorju, ki ima vgrajene Roebelove palice, ki so prepletene za  $360^\circ$ , pa doseže temperatura navitja pri normalnem obratovanju največ do  $80^\circ\text{C}$ .

Z raziskavo smo se prepričali o neustreznosti prepletanja delnih vodnikov za  $180^\circ$  in o kakovosti Roebelovega prepletanja za  $360^\circ$ .

## 6 Literatura

- [1] D. Stich, Izračun vrtničnih tokov in izgub v statorskem navitju sinhronskega generatorja, Diplomsko delo, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, 2005.
- [2] J. Haldemann, Transpositions in stator bars of large turbogenerators, IEEE Transactions on energy conversion, vol. 19, no. 3, september 2004.
- [3] M. Željczov, Osnove teorije elektromagnetnega polja, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 1991.
- [4] J. Surutka. Elektromagnetika, Građevinska knjiga, Beograd, 1965.
- [5] I. Zagradišnik, B. Slemnik, Električni rotacijski stroji, Maribor, 2002.
- [6] Opera 3D reference manual, Opera 3D user guide, New features in opera V10.0, VF-02-04-B2, Vector Fields Limited, 24 Bankside Kidlington, Oxford OX5 1JE, England.

**Darinko Stich** je leta 2005 diplomiral na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru. Od takrat je zaposlen pri Dravskih elektrarnah Maribor.

**Anton Hamler** je redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru. Je član Inštituta za močnostno elektrotehniko in raziskuje v okviru Laboratorija za aplikativno elektromagnetiko na področjih karakterizacij elektromagnetnih lastnosti materialov, numeričnih metod reševanja polj in načrtovanja elektromagnetnih naprav.