

## STUDIJSKI ODBOR A1 – Rotacijski strojevi

Predsjednik: Mario Brčić, dipl. ing.  
Tajnik: dr. sc. Stjepan Tvorčić, dipl. ing.

Stručni izvjestitelji: Prof. dr. sc. Drago Ban  
Prof. dr. sc. Damir Žarko  
Prof. dr. sc. Dragan Pustaić  
Prof. dr. sc. Mario Vražić

## IZVJEŠĆE STRUČNIH IZVJESTITELJA

Zagreb, 20. 07. 2021.

Prof. dr. sc. Drago Ban  
Prof. dr. sc. Damir Žarko  
Prof. dr. sc. Dragan Pustačić  
Prof. dr. sc. Mario Vražić

## IZVJEŠĆE STRUČNIH IZVJESTITELJA

### UVOD

Studijski odbor A1 je za 15. Savjetovanje HRO CIGRÉ, Šibenik, 07. – 10. studenoga 2021. usvojio pet preferencijalnih tema:

- 1. Preferencijalna tema: Postignuća u razvoju, dizajniranju, proizvodnji i instaliranju novih rotacijskih električnih strojeva za elektroenergetski sustav, usklađivanje sa zahtjevima zaštite okoliša**
- 2. Preferencijalna tema: Revitalizacije i zamjene zastarjelih generatora, motora i uzбудnih sustava, s naglaskom na pouzdanost, ekonomske parametre, mrežna pravila i zaštitu okoliša**
- 3. Preferencijalna tema: Monitoring, dijagnostika i analiza stanja rotacijskih električnih strojeva u pogonskim uvjetima hidroelektrana, termoelektrana i vjetroelektrana**
- 4. Preferencijalna tema: Primjena novih znanja, materijala i tehnologija u dizajnu, proizvodnji i eksploataciji električnih strojeva i elektroničkih pretvarača za sustave distribuiranih izvora električne energije**
- 5. Preferencijalna tema. Uzбудni sustavi sinkronih strojeva**

U traženom roku prijavljeno je 28 sažetaka , a prihvaćene su prijave 25 sažetaka radova, od kojih je 23 rada primljeno u konačnom obliku i dostavljeno na ocjenjivanje recenzentima.

U pisanju referata sudjelovalo je ukupno 68 autora i suautora, iz neposredne proizvodnje elektrostrojarske opreme (Končar-elektroindustrija d. d.), akademske zajednice, HEP-a, elektrotehničkih instituta, te manjih specijaliziranih trgovačkih društava za monitoring i dijagnostiku agregata.

Na osnovu mišljenja i prijedloga recenzenata prihvaćena su 22 rada za prezentaciju na savjetovanju, a jedan rad nije dobio pozitivnu recenziju. U procesu recenziranja sudjelovalo je 22 recenzenta, zaposlenih na fakultetima, u industriji, institutima, elektroprivredi i manjim trgovačkim društvima. Recenzenti su za diskusiju predložili 56 pitanja, što je u skladu s preporukom organizatora Savjetovanja (jedno do tri 3 pitanja po jednom radu).

Stručni izvjestitelji su, u skladu s usvojenim preferencijalnim temama, željama autora i suautora, mišljenjima i prijedlozima recenzenata za poboljšanja konačne strukture prihvaćenih radova, razvrstali 23 rada po temama kako slijedi:

1. Preferencijalna tema: Nema odabranih radova za ovu temu
2. Preferencijalna tema: Odabrano je 7 radova, označenih šiframa od **A1-01** do **A1-07**
3. Preferencijalna tema Odabrano je 9 radova, označenih šiframa od **A1-08** do **A1-16**
4. Preferencijalna tema: Odabrano je 6 radova, označenih šiframa od **A1-17** do **A1-22**
5. Preferencijalna tema: Nema odabranih radova za ovu temu

## SAŽETA IZVJEŠĆA ZA SVAKI RAD POJEDINAČNO

Preferencijalna tema 2: **Revitalizacije i zamjene zastarjelih generatora, motora i uzбудnih sustava, s naglaskom na pouzdanost, ekonomske parametre, mrežna pravila i zaštitu okoliša**

Odabrano je 7 radova, označenih šiframa od **A1-01** do **A1-07**

**A1-01** Ivica Marušić, Lino Staničić, Anto Marić i Igor Bartulović

### NOVI SUSTAV UZBUDE SINKRONIH GENERATORA HE ZAKUČAC

U fokusu ovoga rada je zamjena sustava uzbude četiriju sinkronih generatora u HE Zakučac (4 x 160 MVA) u projektu zamjene i obnove cjelokupnog postrojenja navedene elektrane. Prikazana je koncepcija novog Končarevog sustava uzbude s digitalnim regulatorom napona, električko kočenje te funkcije novog sustava. Novi sustav uzbude generatora A je u pogonu od 2014. godine, a četvrtog zadnjeg u nizu generatora D, od 2017. godine. Autori navode da sustavi uzbude rade besprijeckorno što doprinosi pouzdanosti i raspoloživosti cijele hidroelektrane.

#### Pitanja za diskusiju

1. Zašto je odabran samouzbudni tip regulacije uzbude sinkronih generatora u HE Zakučac?
2. Navedite zahtjeve EES-a na sustav uzbude sinkronih generatora HE Zakučac?
3. Koji tip PSS-a je implementiran u digitalni sustav uzbude, odnosno je li izbor tipa PSS-a rezultat analize poremećaja u EES-u?

**A1-02** Antun Tonc, Dario Kraljević i Mario Vukšić

### ANALIZA UZROKA, REPARACIJA I PREVENCIJA ZAMORNIH PUKOTINA U GORNJEM NOSAČU HIDROGENERATORA

Autori se u radu bave analizom uzroka koji dovode do pojave zamornih pukotina u zavarima gornjega nosača hidrogenatora i zaključuju da se pukotine u zavarima pojavljuju kao posljedica stalnih aksijalnih vibracija hidroagregata, a one se javljaju kao posljedica promjenljivih dinamičkih sila koje djeluju na turbinsko kolo i to, kako ističu, radom turbine na malim izlaznim snagama. Konstrukcijskim zahvatima na gornjem nosaču smanjena je koncentracija naprezanja u području pukotina. Primjenom metode konačnih elemenata određena su kritična mjesta na kojima se javljaju maksimalna naprezanja i na kojima započinje inicijacija pukotina. Predloženo je novo konstrukcijsko rješenje kako bi se smanjila maksimalna vlačna naprezanja na spoju rebra ruke gornjega nosača s ležajnim loncem. U svakom slučaju, rješenje se čini logično, jer smanjuje krutost gornjega nosača u području oko zavara, a povećava njegovu podatljivost, čime su stvoreni preduvjeti za sporiju inicijaciju zamornih pukotina.

#### Pitanja za diskusiju

1. Je li se predloženim konstrukcijskim rješenjem zaista riješio problem pojave zamornih pukotina u zoni zavara i spoju rebra ruke gornjega nosača s loncem za ulje?
2. Kakvo je ponašanje revitaliziranoga generatora u pogonu, nakon sanacije uočenih oštećenja? Je li usporena inicijacija novih pukotina i usporeno njihovo širenje?
3. Postoji li stalni monitoring na saniranom gornjem nosaču revitaliziranoga hidrogenatora?

**A1-03** Joško Frančeski, Dario Kraljević, Filip Bonačić i Danijel Grbić

### **PRORAČUN ELASTIČNIH MEĐUPOLNIH VEZA SA UTJECAJEM TOPLINSKOG ŠIRENJA NAMOTA POLA**

Autori su u radu istaknuli da je na krutim međupolnim vezama česta pojava oštećenja uslijed spriječenog slobodnog toplinskog širenja polnog namota, ali i međupolnih veza. U radu je prikazana prednost korištenja elastičnih međupolnih veza u odnosu na krute međupolne veze, tamo gdje je to tehnološki moguće izvesti. Usporedba je prikazana na osnovu rezultata proračuna do kojih se došlo provedenim numeričkim proračunima elastične i krute međupolne veze. Rezultati prikazuju značajno smanjenje naprezanja u međupolnim vezama kod elastičnih međupolnih veza. Elastične međupolne veze samom svojom geometrijom, oblik lire, dopuštaju toplinsko širenje polnog namota i samih međupolnih veza na način da se naprezanja mogu smanjiti na najmanju moguću mjeru, vodeći računa da naprezanja uslijed centrifugalne sile ne porastu iznad dopuštenih vrijednosti.

#### **Pitanja za diskusiju**

1. Pojasniti svrhu provedenog eksperimentalnog ispitivanja i primjenu njegovih rezultata kod numeričkih proračuna. Osvrnuti se na činjenicu da je ispitivanje rađeno na ispitnim epruvetama izrađenih od lameliranih bakrenih limova dok je numerički proračun rađen na punom bakrenom limu debljine 5 mm.
2. Daje li direktna usporedba ekvivalentnih naprezanja elastične i krute međupolne veze jasne odgovore, s obzirom da se kod krutih međupolnih veza primarno radi o tlačnim napreznjima, a kod elastičnih spojnicu su dominantna naprezanja na savijanje?
3. Jesu li autori razmatrali prednosti korištenja lameliranih međupolnih veza kod opterećenja na savijanje, a time i kod naprezanja na savijanje, u odnosu na slučaj kada međupolne veze nisu lamelirane?

**A1-04** Ivan Jurić i Šime Šimurina

### **SANACIJA OŠTEĆENJA STATORSKOG NAMOTA HIDROGENERATORA UZROKOVANO POJAVOM KORONE**

U radu su prikazane posljedice djelovanja korone na statorski namot, te oštećenja izolacije što vodi do električnog proboja statorskog namota uslijed rada, te kvara koji uzrokuje višemjesečni zastoje u radu. Prikazan je postupak sanacije statorskog namota motor-generatora, ispitivanje samog namota prema definiranim normama te puštanje u pogon. Nakon sanacije vršeno je praćenje i analiza samog namota. Analizirane su fizikalne i električne vrijednosti dobivene stalnim praćenjem stanja izolacije namota te dobivene prednosti i mane upotrebe novih tehnologija sa stajališta vijeka trajanja te raspoloživosti pogona.

#### **Pitanja za diskusiju**

1. Kakva je procjena autora, koliko je ovom akcijom produljen vijek trajanja statorskog namota?
2. Koliko je reduciran rizik iznenadnog električnog proboja na statorskom namotu?

**A1-05** Goran Mileković, Mario Filipašić i Mislav Šufalj

### **SMANJENJE RAZINE BUKE HIDROGENERATORA UGRADNJOM MAGNETSKIH KLINOVA I SKOŠENJEM POLOVA ROTORA – PRIMJER IZ PRAKSE**

Autori na relativno jednostavan način prezentiraju primijenjena tehničko-tehnološkijska rješenja u svrhu smanjenja razina magnetske buke već izrađenih i na mjesto montaže instaliranih hidrogenatora vertikalne izvedbe. Primjenom teoretski poznatih metoda za smanjenje razina magnetske buke električnih strojeva, ugradnjom utorskih magnetskih klinova umjesto klasičnih i skošenjem polova rotora, uspjelo se smanjiti razinu dominantno magnetske buke generatora za desetak decibela na frekvencijama spektra u području neugodnom za ljudsko uho. Posebnost ovog rada su zanimljivi rezultati mjerenja, konstrukcijski detalji kao i fotografije stvarnog rotora sa skošenim polovima.

#### **Pitanja za diskusiju**

1. Koliko se razlikuju rezultati mjerenja buke u praznom hodu i pod teretom generatora s ugrađenim magnetskim klinovima?
2. Kako skošenje polova rotora utječe na ključne karakteristike generatora?

#### **A1-06 Tomislav Pintarić, Miljenko Brezovec i Hrvoje Medvedović**

### **PROJEKTNI IZAZOVI REKONSTRUKCIJE MALOG CIJEVNOG HIDROGENERATORA**

Autori su u referatu prezentirali zanimljiv slučaj izvedbe, eksploatacije i rekonstrukcije agregata hidroelektrane u kojoj je primijenjen asinkroni generator. Radi se o agregatu C biološkog minimuma na lokaciji brane HE Čakovec puštenom u pogon 1982. godine. Agregat je cijevne izvedbe, a turbina pogoni trofazni asinkroni generator snage 1,1 MW priključen na postrojenje vlastite potrošnje brane. Već tijekom prve godine rada, pojavljuju se problemi pregrijavanja i kvara kombiniranog generatorskog ležaja kojeg proizvođač turbine mijenja u garantnom roku, te doručuje i poboljšava pojedine pozicije konstrukcije ležaja. Projektom i izvedbom poboljšanja u 2020. godini, na postojećem hidrogenatoru je povećana snaga najmanje za 250 kW, odnosno za 50% uz smanjenje vibracija i stabilni rad, a preostaju izazovi u odabiru novog hidrogenatora u predstojećoj planiranoj zamjeni.

#### **Pitanja za diskusiju**

1. Kod ponovne rekonstrukcije, bi li se iz nekog razloga preferirao sinkroni generator pred asinkronim?
2. Postoje li neke specifičnosti kod upravljanja agregatom i kako se vrši postupak sinkronizacije na mrežu i postoje li neki izazovi i problematika vezani uz te režime.
3. Jesu li mjereni klizanje, korisnost i temperature generatora?

#### **A1-07 Stipan Kaleb i Jadranko Sudarević**

### **REVITALIZACIJA JEDNE OD NAJVEĆIH HE U KENIJI - HE KAMBURU**

Autori opisuju iskustva stečena opsežnom revitalizacijom HE Kamburu (3 x 37 MVA) u Keniji u razdoblju od 2017. do 2020. godine. U HE Kamburu, jednu od najvećih i najvažnijih HE u Keniji, je KONČAR 70-ih godina prošlog stoljeća isporučio svoje generatore čiji je stabilan i siguran rad od iznimne važnosti za pripadajući elektroenergetski sustav. U radu se također opisuju glavni postupci ispitivanja tijekom revitalizacije te daju rezultati ispitivanja koji pokazuju poboljšane karakteristike generatora nakon provedene revitalizacije.

#### **Pitanja za diskusiju**

1. Ima li bitnih razlika između tri agregata (generatora) nakon revitalizacije?
2. Koji je najveći doprinos revitalizacije generatora?

Preferencijalna tema 3: **Monitoring, dijagnostika i analiza stanja rotacijskih električnih strojeva u pogonskim uvjetima hidroelektrana, termoelektrana i vjetroelektrana**

Odabrano je 9 radova, označenih šiframa od A1-08 do A1-16

**A1-08** Tihomir Tonković, Davor Bojić, Šime Šimurina i Franjo Tonković

**UTJECAJ POREMEĆAJA FREKVENCIJE MREŽE, 08.01.2021., NA VIBRACIJSKI I ELEKTROMAGNETSKI ODZIV HIDROAGREGATA U RH**

Autori opisuju poremećaj frekvencije elektroenergetske mreže koji je nastupio na području Republike Hrvatske 08.01.2021., zbog kojega je na sjeverozapadnom dijelu mreže došlo do pada, a na jugoistočnom do porasta frekvencije. Kompletan poremećaj te vibracijski i elektromagnetski odziv agregata zabilježen je u više hidroelektrana u kojima je instaliran sustav trajnog monitoringa. Agregati u sjeverozapadnom dijelu ostali su na mreži tijekom i nakon poremećaja. U RHE Velebit, HE Dubrovnik, HE Peruća zabilježen je izražajan odziv na vibracijama generatorskih ležajeva, kao i na električnim parametrima (struje i naponi generatora, kut opterećenja, magnetska indukcija). Posebno je interesantan odziv AG1 u RHE Velebit, koji je u trenutku nastupa poremećaja radio u generatorskom režimu rada na maksimalnoj snazi i koji je nekoliko minuta nakon poremećaja automatski zaustavljen proradom zaštite.

**Pitanja za diskusiju**

1. Koja je korelacija vibracija i stabilnosti (kut opterećenja) u minutnoj vremenskoj skali?

**A1-09** Ozren Husnjak, Ozren Orešković i Emil Haček

**DIJAGNOSTIKA I RJEŠENJE PROBLEMA REZONANCIJE NA VERTIKALNIM FRANCIS HIDRO-AGREGATIMA**

Autori analiziraju probleme povećanih vibracija uočene tijekom puštanja u pogon dva nova identična agregata radne snage 5 MW ( $750 \text{ min}^{-1}$ ) pogonjena Francis turbinom. U radu je opisano kako je potvrđena rezonantna frekvencija ispod nazivne frekvencije vrtnje. Glavni zaključak mjerenja je bio da temeljenje spirale i difuzora nije primjereno izvedeno što je dozvolilo rezonantni odziv na 10 Hz. Opisano je kojim tehničkim zahvatima je rezonantna frekvencija podignuta iznad nazivne frekvencije vrtnje da agregat ne mora prolaziti kroz rezonantno područje tijekom svakog pokretanja.

**Pitanja za diskusiju**

1. Je li se razmatralo da se četiri ukrute koje ukrućuju turbinsko postolje zamijene većima te da se učvršćenje izvede na generatoru kako bi se dobio veći efekt ukrućivanja?
2. Zašto autori smatraju da su vibracije u Z smjeru od 1 mm/s velike na prirubnici turbinskog postolja koje je u zraku?
3. Da li se agregat nakon dorade kod odbacivanja tereta samo približava rezonanciji ili prolazi kroz nju?

**A1-10** Kristijan Kubik, Dario Kraljević i Petar Romac

**RAZMATRANJE UTJECAJA MAGNETSKOG POLJA I KRUTOSTI KONSTRUKCIJE NA DINAMIKU ROTORA VERTIKALNOG HIDROGENERATORA**

U radu je kratko opisana problematika te je prikazan postupak provođenja analize neprigušenih fleksijskih kritičnih brzina i formi vibriranja, sa, i bez djelovanja sile jednostranog magnetskog

privlačenja za razmatrani vertikalni hidrogenerator. Prikazani su rezultati analiza prije i poslije provedenih konstrukcijskih zahvata. Iako ni s povećanjem zračnog raspora uzбудnika nisu u potpunosti zadovoljeni traženi uvjeti za analizu s djelovanjem magnetskog polja, ukratko su opisana moguća daljnja rješenja i sklonosti kupca.

#### **Pitanja za diskusiju**

1. U odjeljku 2.3 naveli ste da je uključen žiroskopski efekt u analizi kritičnih brzina. Kako procjenjujete taj utjecaj kod razmatranog hidrogeneratorsa?
2. Pokazali ste da je kod razmatranog hidrogeneratorsa upitno zadovoljiti zahtjev na kritičnu brzinu i u zaključku navodite:"... na temelju dosadašnjeg iskustva s radom generatora zaključeno je da generator može nastaviti rad s postojećim dizajnom jer postoji dodatna rezerva sigurnosti u prigušenju uljnog filma koja nije uključena u izračunima". Kako objašnjavate tu dodatnu rezervu sigurnosti?
3. Je li moguće intervencijama na ležajevima utjecati na kritičnu brzinu?

#### **A1-11 Tihomir Tonković, Ivan Strnad, Franjo Tonković i Ivan Višić**

### **MJERENJE KUTA OPTEREĆENJA U REALNOM VREMENU I MOGUĆNOSTI PRIMJENE**

U radu je prikazan sustav za mjerenje kuta opterećenja sinkronog generatora u stvarnom vremenu korištenjem senzora za mjerenje zračnog raspora i faznog napona generatora. Dan je opis samog sustava, dijelova za akviziciju i obradu signala, te je opisan postupak kalibracije sustava u praznom hodu generatora. Uzorkovanje ulaznih signala provodi se frekvencijom 10 kHz, a kut opterećenja se određuje svakih 20 ms. Primjer primjene sustava dan je na sinkronom generatoru u HE Dubrava. U prikazu rezultata uočljivo je osciliranje veličine kuta opterećenja. Autori su, uz pretpostavku da su oscilacije uzrokovane isključivo geometrijskom nesavršenošću rotora, uveli korekciju (kompenzaciju) kojom se one smanjuju. U radu je također dan prikaz određivanja kuta opterećenja za različita opterećenja generatora. U navedenom primjeru, oscilacije su korekcijom smanjene s +/- 8% na +/- 2%.

#### **Pitanja za diskusiju**

1. Što utječe na točnost određivanja kuta opterećenja primjenom ovog sustava? Koliki je utjecaj dimenzija generatora (unutarnji promjer, zračni raspor), a koliki frekvencije uzorkovanja signala?
2. Je li metoda korekcije (kompenzacije) provjerena za više okretaja rotora generatora i za različita opterećenja?
3. Kako je u algoritmu premoštena razlika u frekvenciji dva ključna signala, veličine zračnog raspora (100 Hz) i faznog napona (50 Hz)?

#### **A1-12 Ozren Orešković, Jurica Puškarić i Ivan Poljak**

### **ANALIZA DINAMIČKOG ODZIVA HIDRO AGREGATA U HE GOJAK NA VANJSKE POREMEĆAJE**

U radu je opisan primjer dijagnostike i analize utjecaja vanjskih dinamičkih poremećaja na odziv agregata u HE Gojak. Nakon revitalizacije, na sva tri agregata u HE Gojak instaliran je on line monitoring sustav, konfiguriran da mjeri dinamiku rotora i statora agregata, zračni raspor i magnetsku indukciju, te električne veličine generatora. Tijekom probnog rada sustav monitoringa zabilježio je dva značajna, ali bitno različita vanjska poremećaja, koji su nastupili u relativno kratkom vremenskom razdoblju. Prvi zabilježeni događaj je potres u Petrinji 29.12.2020.godine koji je izazvao velike amplitude vibracija sva tri agregata i alarm na AG1. Nedugo zatim nastupio je raspad europske električne mreže, 08.01.2021., koji je uzrokovao pad frekvencije u sjeverozapadnom dijelu Europe, a rast u jugoistočnom dijelu, što je također zabilježeno sustavom monitoringa.

### **Pitanja za diskusiju**

1. Što bi još trebalo mjeriti na agregatima i kako poboljšati sustave praćenja poremećaja te zaštite agregata da se i u nestandardnim slučajevima kao što su potresi poboljša zaključivanje o opasnosti stanja i potrebi isključivanja agregata na vrijeme?
2. Koje bi još veličine trebalo prikazati da se mogu protumačiti promjene veličina prikazanih na slici 7 (napon uzbuđene i vibracije paketa) pri promjeni brzine vrtnje koja se događala pri poremećaju frekvencije mreže?

### **A1-13 Božidar Pavlović, Andrijana Kapović i Eduard Doujak**

#### **ON-LINE MJERENJE TORZIJE VRATILA NA HIDROAGREGATU U HE WALGAUWERK**

Autori prezentiraju mjerenje torzijskog momenta mjerenjem kutne deformacije rotirajućeg vratila sustavom Končar ST&P. Uz opis metode i principa mjerenja, daju se i rezultati mjerenja provedeni u hidroelektrani Walgauwerk na vertikalnim Francis turbinama. Rezultatima mjerenja se potvrđuje dobro preklapanje izračunatih i izmjerenih vrijednosti korisnosti te se navodi i mogućnost korištenja metode kao dodatnog izvora informacija pri određivanju gubitaka agregata. Mjerenje u trajnom radu agregata može koristiti za ranu detekciju problema uzrokovanih pojavom torzijskih vibracija a daje i uvid u stanje agregata.

### **Pitanja za diskusiju**

1. U radu se spominje mogućnost korištenja metode za određivanje gubitaka. Koji parametri najviše utječu i kolika je dobivena točnost te metode?
2. Može li se netočnost postavljenih markera za svaku ravninu naknadno korigirati u mjernom sustavu ili je li za njih nužno početno postavljanje u „nulu“?
3. U provedenim mjerenjima se iznad 60% nazivne snage primjećuju manje oscilacije snage od kojih je izrazitija na generatoru. Koliki je utjecaj na tu pojavu primarnog karaktera agregata, a koliki je vezan uz korištene mjerne metode i brzine uzorkovanja?

### **A1-14 Nino Rozić, Petar Bašić, Elis Sutlović i Marin Despalatović**

#### **OPTIČKI SENZOR ZA MJERENJE VIBRACIJA HIDROGENERATORA - PRELIMINARNI REZULTATI**

U radu je opširno opisan prijenosni sustav za mjerenje vibracija i otkrivanje nenormalnih radnih stanja u pogonskim uvjetima, a sastoji se od laserskog izvora, pristupačnog telekomunikacijskog optičkog vlakna, uređaja za kondicioniranje i obradu signala te prijenosnog računala za pohranu i analizu podataka. Optički senzor, zasnovan na principu interferometra, koristi se kao pasivni detektor vibracija vrlo niskih amplituda. Razvijeni prijenosni mjerni sustav eksperimentalno je provjeren na laboratorijskoj maketi, a dobiveni rezultati uspoređeni su s onima dobivenima tradicionalnim senzorima. Kroz istraživanje i mjerenja, cilj je ispitati i usavršiti algoritam koji će omogućiti off-line, kao i on-line rano otkrivanje abnormalnog rada hidroagregata, kao i dokazati mogućnost mjerenja na daljinu koristeći postojeću telekomunikacijsku optičku infrastrukturu PP HE JUG-a.

### **Pitanja za diskusiju**

1. Je li moguće iz mjernog sustava dobiti kontinuirani valni oblik vibracijske veličine (pomak, vibracijska brzina ili ubrzanje) koji se može podvrgnuti daljnjim postupcima analize (npr. izračun srednje efektivne vrijednosti, "peak-to-peak" vrijednosti)?
2. Može li se na istu referentnu petlju priključiti više mjernih petlji kako bi se osiguralo mjerenje vibracija na više pozicija istovremeno?
3. Koja se daljnja istraživanja planiraju napraviti na senzoru i planira li se komercijalizacija?



**A1-15** Ivan Poljak, Filip Hleb, Siniša Kovačević i Vjekoslav Vuljanko

**MJERENJE TEMPERATURA ROTORA MALOG HIDROGENERATORA**

U referatu autori prezentiraju koncepciju, dizajn, način ugradnje i primjenu sustava RWMS („Rotor Wireless Monitoring System“) za kontinuirano mjerenje temperatura rotora vertikalnog beskontaktnog kompaktnog generatora za hidroelektranu Palmafossen u Norveškoj. Temperature sonde ugrađene su za vrijeme izrade generatora. Prikazana je usporedba rezultata ispitivanja i projektnih izračuna. Autori navode da sustav Končar RWMS ostaje trajno ugrađen i da omogućava trajno mjerenje temperatura rotora tijekom životnog vijeka generatora.

**Pitanja za diskusiju**

1. Opisani sustav prima i druga mjerenja rotorskih veličina (vibracije, napon uzbude,..) no kao što je u radu spomenuto, nije u funkciji prilikom mehaničke vrtnje kada nema uzbude. Je li razrađen dizajn sustava napajanja i za te mogućnosti?
2. Na koji se način interno kontrolira rad rotorskog sustava i komunikacijske jedinice?

**A1-16** Branko Šumberac i Mauro Vozila

**POGONSKA ISKUSTVA I ODRŽAVANJE VISOKONAPONSKIH ASINKRONIH ELEKTROMOTORA U TERMOELEKTRANI PLOMIN BLOK 2**

Autori su detaljno opisali 20 godišnja pogonska iskustva i pristup održavanju visokonaponskih asinkronih elektromotora koji pogone 25 različitih radnih mehanizama pogona vlastite potrošnje bloka 2 TE Plomin. Uvodno je dan kratki tehnički opis pojedinih grupa elektromotornih pogona s aspekta odabira, izvedbe i uloge u sustavu TE. Opisana je način kontinuiranog praćenja pogonskih parametara i ugrađenog sustava zaštita, navedene su korištene dijagnostičke metode u okviru preventivnog održavanja. Navedeni su i osnovni uzroci i vremena neraspoloživosti pojedinih elektromotora te organizacija, načini, mjesto i vrijeme sanacije kvarova motora. Sistematizirana iskustva iz proteklog 20 godišnjeg razdoblja mogu osim baze za daljnje praćenje stanja biti i poticaj za daljnja poboljšanja u pogonu i održavanju kao i kod eventualnih budućih ulaganja ili obnove TE Plomin.

**Pitanja za diskusiju**

1. Kako autori procjenjuju preostali vijek trajanja postojećih visokonaponskih motora, s aspekta broja pogonskih sati rada, istrošenosti izolacijskog sustava i zamora materijala?
2. Je li razmatrana zamjena nekih od navedenih motora novim motorima koji imaju znatno veću korisnost od postojećih, dizajniranih i izrađenih pred više od 25 godina?

Preferencijalna tema 4: **Primjena novih znanja, materijala i tehnologija u dizajnu, proizvodnji i eksploataciji električnih strojeva i elektroničkih pretvarača za sustave distribuiranih izvora električne energije.**

Odabrano je 6 radova, označenih šiframa od A1-17 do A1-22

**A1-17** Slaven Nađ, Goran Mileković, Marko Škreblin i Igor Belas

### **SIMULACIJA MJERENJA OTPORA VODLJIVOG SLOJA ŠTAPA STATORSKOG NAMOTA I USPOREDBA S IZMJERENIM VRIJEDNOSTIMA**

Autori su opisali standardno mjerenje električnog otpora vodljivog sloja na bazi grafita utorskog dijela visokonaponskog štapa statorskog namota te su simulirali mjerenje električnog otpora pomoću programskog paketa Simcenter Magnet Electric koristeći Current Flow 3D proračun. Prezentirani su rezultati mjerenja električnog otpora na tri uzorka statorskih štapova metodom Al trakica, točkastom metodom te mjerenjem površinskog otpora na 1 cm<sup>2</sup>. Dobivene su određene korelacije između rezultata dobivenih mjerenjem i postupkom simulacije. Od navedenih mjernih metoda za određivanje površinskog otpora, metoda pomoću Al trakica pokazala se najpouzdanijom.

#### **Pitanja za diskusiju**

1. Zašto je vrijednost otpornosti manja poslije završene termičke obrade u odnosu na prije?
2. Navedeno je da površinski električni otpor mora biti u određenim granicama. Koje su to granice?
3. Za vodljivi dio utorskog dijela štapa koristi se materijal na bazi grafita koji može biti u obliku trake ili premaza ( laka). Koji materijal je bolji i zašto, te koliku vrijednost električnog otpora mora imati u dostavnom stanju da se može koristiti u proizvodnji?

**A1-18** Stjepan Stipetić, Marin Brajković, Antonio Čuljak i Tomislav Kolarić

### **ISPITIVANJE ELEKTRIČNIH STROJEVA ZA POGONE PROMJENJIVE BRZINE VRTNJE PREMA NORMI IEC 60034-2-3**

U referatu je opisan laboratorijski postav za ispitivanje električnih strojeva namijenjenih za pogone promjenjive brzine vrtnje i provedbu mjerenja korisnosti sinkronog reluktantnog motora prema normi IEC-60034-2-3. Postav se sastoji od opterećenog stroja (asinkronog motora koji se nalazi u režimu upravljanja momentom) i ispitivanoga stroja (sinkronog reluktantnog motora koji se nalazi u režimu upravljanja brzinom). Zadavanjem radnih točaka momenta i brzine upravlja nadređeni PLC. Mjerenje električnih i mehaničkih veličina provodi se akvizicijskim sustavom i senzorima visoke točnosti. U radu su prikazana provedena mjerenja korisnosti motora, u hladnom i toplom stanju. Norma zadaje redosljed radnih točaka prema kojem se vrši mjerenje, kako bi se temperatura motora što manje promijenila. Obradeni rezultati pokazuju da je korisnost reluktantnog motora u klasi IE4.

#### **Pitanja za diskusiju**

1. Možete li napraviti usporedbu upotrijebljenih naponsko-frekvencijskih pretvarača Siemens, ABB i Danfoss?
2. Kako utječu naponski debalans i harmonici na korisnost motora?
3. Može li se povezati opterećenje prema normi IEC 60034-2-3 s normom IEC 60034-1?

## USPOREDBA GUBITAKA U ŽELJEZU ASINKRONOG MOTORA KOD NAPAJANJA IZ SINUSNOG IZVORA I IZ PRETVARAČA FREKVENCIJE

U radu su uspoređeni rezultati dobiveni mjerenjem na sinusnom naponu, na frekvencijskom pretvaraču i rezultati izračunati metodom konačnih elemenata. Mjerenja na sinusnom naponu su provedena na klasični način prema IEC normi pri čemu su odvojeni gubici u željezu od gubitaka trenja i ventilacije. Tako izmjereni gubici trenja i ventilacije korišteni su pri određivanju gubitaka u željezu kada je motor napajan frekvencijskim pretvaračem. Rezultati simulacija pokazuju povećane gubitke u željezu kada je motor napajan iz pretvarača na svim analiziranim frekvencijama, što je u skladu s očekivanjima. Pri sinusnom napajanju razlike izračunatih i izmjerenih gubitaka su unutar 25 %. Pri napajanju iz pretvarača utvrđeno je znatno povećanje gubitaka u štapovima rotorskog kaveza zbog prisutnosti viših harmonika u magnetskom polju. Ukupni izračunati gubici praznog hoda u tom slučaju jako odstupaju od izmjerenih (do 135 %) što ukazuje na moguće odstupanje pretpostavljenog i stvarnog valnog oblika izlaznog napona pretvarača.

### Pitanja za diskusiju

1. Je li prilikom izračuna gubitaka u željezu metodom konačnih elemenata korišten empirijski faktor obrade lima te ako je korišten, koliko je iznosio?
2. Kojom metodom bi se podesili koeficijenti Steinmetzove jednadžbe da se postigne bolje slaganje izračunatih i izmjerenih gubitaka u željezu u cijelom rasponu brzina vrtnje pri sinusnom napajanju?
3. U radu je modeliran izlazni napon pretvarača kao 6-pulsni pravokutnog oblika. Taj način modulacije se obično primjenjuje na visokim brzinama vrtnje zbog smanjenog omjera sklopne frekvencije pretvarača i frekvencije osnovnog harmonika napona, dok se na nižim brzinama koristi širinsko-impulsna modulacija, ili se primjenjuje u pretvaračima velike snage gdje je sklopna frekvencija ograničena. Koristi li realni pretvarač na kojemu su izvršena mjerenja uvijek 6-pulsni napon i je li valni oblik napona pretvarača provjeren mjerenjem pomoću osciloskopa ili A/D pretvarača?

## MAGNETSKA BUKA ASINKRONOG KAVEZNOG ELEKTROMOTORA

Analizirana je magnetska buka vučnog motora za pogon tramvaja TMK 2200. Taj motor u stvarnosti radi u kombinaciji s odgovarajućim pretvaračem, a u ovom referatu prezentirani su rezultati laboratorijskih ispitivanja kod sinusnog napajanja i kod napajanja iz pretvarača. Uspoređeni su rezultati ispitivanja i rezultati provedene simulacije u programskom paketu Magnetic Noise Acoustic Analysis Tool for Electrical Engineering (MANATEE), za nekoliko brzina vrtnje motora u uvjetima praznog hoda i opterećenja motora, kod sinusnog napajanja.

### Pitanja za diskusiju

1. U referatu su analizirane frekvencije sila koje pobuđuju vibracije statorskog paketa i na koje se može utjecati odabirom broja utora. Sukladno opisu vibracija paketa (slika 2), bi li bilo korisno napraviti mehanički proračun ili ispitivanje vlastitih frekvencija statorskog paketa?
2. Kod asinkronih kavezni motora koji rade s jednom brzinom vrtnje se magnetska buka analizira samo za nazivnu brzinu vrtnje. Kod vučnih motora koji rade u širokom opsegu brzina vrtnje je velika mogućnost nastanka rezonancije kod neke brzine vrtnje. Treba li zbog toga napraviti opsežniju analizu magnetske buke takvih motora?

## **PRIMJENA METODE SREDNJIH GUBITAKA ZA ODREĐIVANJE TOPLINSKI EKVIVALENTNOG TRAJNOG OPTEREĆENJA ASINKRONOG VUČNOG MOTORA NISKOPODNOG TRAMVAJA**

Autori su u radu demonstrirali metodu za određivanje toplinski ekvivalentne radne točke vučnog asinkronog motora otvorene izvedbe s radijalnim ventilatorom. Cilj metode je zamijeniti niz nestacionarnih simulacija uzastopnih ciklusa vožnje vučnog motora s jednom stacionarnom simulacijom kojom se u kraćem roku i uz manji angažman računalnih resursa dobivaju približno ista zagrijanja glavnih komponenti motora. U radu su uspoređene temperature dijelova stroja dobivene dvjema metodama i pokazana su dobra međusobna slaganja. Primjena takve metode mogla bi imati značajnu vrijednost u projektiranju asinkronih motora za intermitirane pogone. Ventilacijski i toplinski modeli realizirani su komercijalnim programskim paketom Ansys Motor-CAD.

### **Pitanja za diskusiju**

1. Kako tumačite činjenicu da se za bitno različite srednje temperature statorskih kanala (52 °C u stacionarnom i 92 °C u nestacionarnom modelu) dobivaju iste temperature aktivnih dijelova statora?
2. Možete li komentirati činjenicu da je izračunata temperatura ležaja niža i od temperature ležajnog štita i od temperature vratila u osi?

## **OPTIMIRANJE ELEKTROVUČNIH MOTORA TEMELJENO NA METAMODELIRANJU**

Autori u radu opisuju računalno učinkovit način optimizacije sinkronog motora s okomito umetnutim permanentnim magnetima (engl. spoke type motor) za pogon niskopodnog tramvaja baziran na izradi tzv. metamodela povezujući računalne alate Ansys optiSLang, Ansys Motor-CAD i Mathworks Matlab. Parametrizacija geometrije motora i elektromagnetske simulacije izvode se automatski. Provedena je višeciljna optimizacija elektromagnetskog dizajna vučnog motora kako bi se pronašao najbolji kompromis između duljine paketa i srednjih gubitaka na ciklusu vožnje tramvaja pri čemu treba biti zadovoljen zahtjev za otpornost magnetna na demagnetizaciju. S odabranim konačnim dizajnom s Pareto fronte postižu se 19 % manji srednji gubici na ciklusu vožnje uz 31 % kraći paket u odnosu na početno projektno rješenje motora.

### **Pitanja za diskusiju**

1. Kakav se tip hlađenja preporučuje za pogon pokretan predloženim motorima ?
2. Kakva je raspodjela srednjih gubitaka?
3. Koliko je ukupno trajanje ovog projekta temeljenog na metamodeliranju i kolika je procjena uštede vremena u projektiranju u odnosu na klasično korištenje MKE ?

Izvješće izradili:

Prof. dr. sc. Drago Ban, prof. dr. sc. Damir Žarko, prof. dr. sc. Dragan Pustaić i prof. dr.sc. Mario Vražić

Zagreb, 20. srpnja 2021.