

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Бојана Јокановића, дипл. инж. електротехнике за израду докторске дисертације

Одлуком бр. 5037/18-1 од 16. јула 2021. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Бојана Јокановића дипл. инж. електротехнике за израду докторске дисертације и научне заснованости теме „Процена преосталог животног века изолационог система обртне електричне машине у условима комбинованог напрезања утврђивањем карактеристике века трајања“. На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Бојан Јокановић рођен је 26.04.1984. године у Сарајеву, Босна и Херцеговина. Основну школу „Јован Дучић“ завршио је у Требињу. Средњу школу „Мјешовита Средња Електротехничка Школа“ завршио је 2003. године у Сарајеву. Постиже значајне успехе на такмичењима ученика основних и средњих школа у математици и физици. Електротехнички факултет у Источном Сарајеву уписује 2003. године. Носилац је Плакете Електротехничког факултета за студента са другим просеком оцена на петој години студија у 2007/08 години. Дипломирањем на Одсеку за електроенергетику Електротехничког факултета у Источном Сарајеву стекао је звање дипломирани инжењер електротехнике. Тема дипломског рада је „Анализа грешке на примјеру прорачуна ударних карактеристика уземљивача“. Рад је одбранио са оценом десет (10). Године 2008. уписује постдипломске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Источном Сарајеву, на одсеку за Електроенергетику. Одбравивши магистарски рад под насловом „Приједлог мјера за смањење нивоа виших хармоника насталих компензацијом реактивне електричне енергије у ЕЕС“ стекао је титулу магистра електротехнике. Након тога се 2017. године уписао на докторске студије Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

По завршетку студија, 19.01.2009. године, запошљава се у Енергоинвест-Системи Управљања Енергијом, где и данас ради на пројектовању и имплементацији уређаја и решавању проблема на пољу квалитета електричне енергије, као и помоћног напајања. У протеклих шест година пројектовао је, уградио и пустио у рад уређаје за компензацију реактивне енергије за више од стотину купаца електричне енергије, укупне снаге 40 MVA_g који и данас раде и које одржава. Управо један од таквих пројеката је послужио као практични део магистарског рада на којем ради дуже од три године, када је и положио последњи испит на Одсеку електроенергетика. Од фебруара 2018. године ради као техничка подршка и систем инжењер за производе „National Instruments“, да би данас био на позицији регионалног продајног инжењера за истоимену компанију, за просторе бивше Југославије где води две канцеларије у Београду, Србија и Загреб, Хрватска.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Докторске студије на модулу Енергетски претварачи и погони, Електротехничког факултета Универзитета у Београду уписао је 2017. године. Приликом уписа признати су му испити које је

положио током магистарских студија и одређено да положи још предмете „Вишемоторни електрични погони“ и „Прелазне појаве у електричним машинама“. Оба предмета је положио са највећом оценом чиме је стекао услов да приступи процедури пријаве и израде докторске дисертације на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, а у складу са одговарајућим правилником о III степену студија.

Кандидат Поседује одобрења од Министарства за просторно уређење, грађевинарство и екологију Републике Српске:

- Уверење о положеном стручном испиту из 2012. године;
- Решење за извођење и надзор над извођењем инсталација јаке струје 2013. године;
- Решење за израду техничке документације, електро фаза, јаке струје 2013. године.

Од 2010. године активан је члан техничког комитета BAS/TC 52 Института за стандардизацију Босне и Херцеговине.

Кандидат Бојан Јокановић је објавио 6 радова од чега 3 у часописима са СЦИ листе (1 из категорије M21, 2 из категорије M23). Учествовао је у 2 националне конференције. Списак објављених радова дат је у наставку.

M21- Водећи међународни часопис

1. **Bojan Jokanović**, Milan Bebić, Nenad Kartalović, *The influence of combined strain and constructive solutions for stator insulation of rotating electrical machines on duration of their reliable exploitation*, Electrical Power and Energy Systems, 110, pp. 36-47, 2019, Print ISSN: 0142-0615; IF2018: 4.418

M23- Међународни часопис

1. Nenad Kartalović, **Bojan Jokanović**, Milan Bebić, Đorđe Lazarević, *The effect of gamma radiation on the stator insulation of rotating electrical machine*, Radiation Effects and Defects in Solids, 2019, ISSN: 1042-0150 (Print) 1029-4953 (Online), IF2018: 0.636
2. Nenad Kartalović, **Bojan Jokanović**, Milan Bebić, Đorđe Lazarević, *Degradation of stator insulation of high-voltage asynchronous machines in gamma and neutron radiation field*, Nuclear Technology and Radiation and Protection, 2019, ISSN: 1451-3994 (Print, Online – open access), IF2019: 1.057

M63-Саопштења са скупова националног значаја штампана у целини

1. **Bojan Jokanović**, Milan Bebić i Nenad Kartalović, *Uticaj kombinovanog naprezanja i konstruktivnih rešenja izolacije statora rotacionih električnih mašina na trajanje njihove pouzdane eksploatacije*, 34. SAVETOVANJE CIGRE Srbija, Vrnjačka Banja, 02.06. do 06.06.2019.
2. **Jokanović Bojan**, Bebić Milan, Lazarević Đorđe, Nikezić Dušan i Jurošević Miladin, *Degradacija izolacije statora visokonaponskih asinhronih mašina u polju gama i neutronskega zračenja*, 14. SAVJETOVANJE BH K/O CIGRE, Neum, 20.10. do 23.10.2019.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу резултата досадашњег рада, као и на основу усмене одбране теме докторске дисертације, Комисија има позитивно мишљење о способности Кандидата за самостални и успешан научноистраживачки рад. Кандидат је показао добро познавање постојећих решења у области којом се бави предложена тема, и дао је јасне смернице истраживања и очекиваних резултата у оквиру рада на теми. Имајући све наведено у виду, став комисије је да Бојан Јокановић задовољава све услове да приступи изради докторске дисертације на предложеној тему.

2. Предмет и циљ истраживања

Производња, делимично пренос, а претежно и потрошња електричне енергије се остварује електричним машинама. Електричне машине су ову распрострањену примену стекле захваљујући релативно једноставној конструкцији, изради и одржавању, као и великом степену поузданости у раду [1, 2]. Технолошки напредак у конструкцији високонапонских обртних машина и примена нових материјала, омогућили су повећање јединичне снаге добијене из истог габарита активног материјала [3]. Висок степен поузданости у раду постиже се редовним ремонтима, вођењем рачуна о старењу материјала и унапређењем праћења рада машине у погону (on-line monitoring), и унапређењем заштитних функција машине [4-9].

Доступне референце, потврђене искуствима ремонтних радионица, указују да више од 50% од укупног броја кварова на високонапонским обртним електричним машинама настаје услед оштећења статорског намотаја [10-13]. Свакако, овај проценат варира у зависности од конструктивних решења, технолошких поступака израде машина, контроле квалитета и експлоатационих услова [12]. Изузимајући могућности појава експесних ситуација у раду високонапонске обртне машине до испада из погона и трајног оштећења долази најчешће услед процеса старења изолације статорског намотаја.

Старење је процес у изолационом материјалу или систему који се манифестује у погоршању његових диелектричних својстава. Постоји мноштво фактора који различито утичу на старење разних изолационих система. Разликује се процес старења изолације у обртним машинама, трансформаторима, кабловима итд. због различитог начина коришћења, другачије околине, састава и напрезања [14-15]. Старењу изолационог система највише доприносе напрезања која настају у току експлоатације. Најважније врсте напрезања су: термичко, напонско, механичко, амбијентно и комбиновано. У пракси се искључиво јављају комбинована напрезања [16-19].

Због комплексности узајамног деловања (синергије) ових напрезања до сада није пронађена универзална метода за испитивање изолационог система, нити метода за процену преосталог века трајања. Постоје стандарди за анализу парцијалних утицаја најчешће једне врсте напрезања. Поједностављени начин испитивања чини методу практичном и знатно јефтинијом, али негативно се одражава на тачност и целовитост резултата. Међутим, у погону је могуће да, због других напрезања и утицаја, карактеристике изолационог система одступе од вредности добијене под дејством само једног напрезања [20].

У доступној литератури постоји доста радова у којима се аутори баве старењем изолације електричних машина под утицајем неких од поменутих напрезања [21-26]. Обично се посматра један или два доминантна типа напрезања при чему се синергија ових напрезања третира адитивно и не врши се њено испитивање. Закључци које аутори дају су несумњиво корисни али су искључиво квалитативне природе. Поред тога аутори се претежно фокусирају на један или два елементарна параметра изолације, а друге занемарују. Тако на пример у раду [24] аутори сматрају релевантном карактеристиком старења изолације статорског намотаја електричне машине искључиво тангенс угла губитака и не дају никакав квантитативан параметар који би могао помоћи да се процени преостали век трајања електричне машине на основу њихових испитивања. У раду [25] се испитује термичко, електрично и механичко напрезање изолације електричне машине такође без узимања у обзир синергије ових напрезања. Поред тога овом несумњиво добром раду може се замерити недостатак математичко-статистичког модела који би омогућио квантитативно предвиђање остатка века трајања под дејством посматраних напрезања (у статистичком смислу - ово треба подразумевати код већине изнесених тврдњи у овом раду јер је посматрана проблематика стохастичке природе). Веома је интересантна литература [4] који се бави квалитативном анализом и предвиђањем старења електричних машина уз употребу нових изолационих материјала и нових типова намотаја. Као замерку овом раду се може указати да не постоје подаци о дуговременској употреби описаних машина па самим тим не постоји могућност верификације приказаних резултата. Рад [26] је свакако користан, али има исти недостатак као рад [24], наиме аутори су се фокусирали само на један параметар дијагностике изолације. Они посматрају ефекте напрезања на парцијално пражњење (што је свакако илустративније него тангенс угла губитака, али ипак

недовољно). Сви наведени радови су мањкаво статистички обрађени и у њима није изражена мерна несигурност експерименталног поступка.

У предложеној Докторској дисертацији ће бити испитивани сви релевантни очекивани типови напрезања укључујући и ефекат радиоактивног зрачења на старење изолације електричне машине [27]. Такође ће се у оквиру предложене дисертације посматрати утицај комбинованог напрезања за који се са великом вероватноћом може тврдити да није адитивног типа, односно да постоји синергија дејстава. Као највећи напредак испитивања старења електричних машина у условима експлоатације који би требало да садржи предложени докторат треба истаћи развој алгоритма за квантитативно предвиђање остатка животног века изолације статорског намотаја електричних обртних машина у погону. Поред тога, за све спроведене експерименте у оквиру израде докторске дисертације биће дефинисан буџет мерне несигурности и изражена комбинована мерна несигурност.

Век трајања иреверзибилног изолационог материјала окончава се његовим пробојем. Након пробоја, иреверзибилни изолациони материјал губи своју основну карактеристику да раздваја различите потенцијале што резултира повећањем температуре и притиска (на месту пробоја), односно долази до експлозивног електричног пражњења и склоп, у којем је дошло до пробоја, престаје да функционише. Када ће доћи (и да ли ће уопште доћи) до пробоја иреверзибилног изолационог материјала одређено је обликом криве зависности репрезентативног статистичког узорка случајне променљиве напон пробоја од репрезентативног статистичког узорка случајне променљиве време пробоја, која се назива карактеристиком века трајања. Карактеристика века трајања иреверзибилних изолационих материјала експериментално се одређује поступком познатим као „испитивање изолације константним (сталним) напоном“. Испитивање константним напоном је изузетно захтеван тип експеримента и избегава се када је год то могуће [28].

Као алтернатива испитивању изолације константним напоном се често користи експериментални поступак познат као испитивање изолације растућим напоном. Испитивање изолације растућим напоном подразумева редукцију добијених резултата на резултате добијене испитивањем изолације константним напоном, али уз знатно већу мерну несигурност тип А.

Без обзира да ли се експеримент снимања криве века трајања врши методом константног или растућег напона он је нерационалан и у временском и економском смислу. У овом раду ће се увести алгоритам за снимање кривих века трајања знатно рационалнијим поступком.

Искуство је показало да се дијаграм пробојни напон/пробојно време, такозвана „карактеристика века трајања“, може конструисати помоћу одабраних квантила вероватноће p случајне величине пробојно време (t_{dp}) и пробојни напон (U_{dp}) већег броја експериментално одређених статистичких расподела случајних величина пробојно време и пробојни напон. По правилу такви дијаграми образују праву линију на дупло-експоненцијалној скали. Ако су за одабране квантиле вероватноће познати интервали поверења, они се могу пренети на карактеристику века трајања. За сваки квантил реда p пробојног времена (који представља вероватноћу пробоја изолације након времена t експериментом константног напона) карактеристика века трајања се описује изразом $U_{dp} = k_{dp} \cdot t_{dp}^{-1/r}$ где је k_{dp} константа која карактерише геометрију структуре, а r експонент века трајања који зависи од изолационог материјала. Експонент века трајања има константну вредност и представља нагиб криве века трајања. Током регуларног старења (старења под приближно истим условима) карактеристика века трајања задржава константну вредност нагиба. Међутим, ако из неког разлога (механичко оштећење, промена амбијенталних услова) дође до значајних промена карактеристика изолационог материјала, константа века трајања мења вредност и карактеристика века трајања престаје да буде монотонно опадајућа [29].

Увођењем једначине века трајања створена је могућност да се на основу ње и само једног одређивања статистичког уређеног пара узорака случајних променљивих пробојно време и пробојни напон одреди фамилија (различитих квантила p) једначина века трајања статорског намотаја (или сличног изолационог система). Тиме се врши знатна временско-економска уштеда. Алгоритам који то омогућава састоји се од следећих корака: 1- одређивање методом константног напона минимално по

50 одбирака случајних променљивих пробојно време и пробојни напон. Број од 50 одбирака случајних променљивих проистиче из Студентове расподеле и представља минимални број одбирака случајних променљивих у статистичком узорку да би овај био прихватљив као репрезентативан; 2- претходно одређеним случајним променљивама придружити теоријске статистичке расподеле које их фитују са најмањом статистичком несигурношћу. За случајне променљиве пробојно време и пробојни напон логично је очекивати да припадају статистичким расподелама екстремних вредности (тј. у сваком случају исход је екстремна вредност - минимум или максимум). Са великом вероватноћом се може очекивати да ће резултат бити да случајне величине пробојни напон и пробојно време припадају Вејбуловој (Weibull) расподели [30]; 3- формирање система од две једначине. Прва једначина је претходно уведена и аналитички представља карактеристику века трајања (уз постојање константи k_{dp} и r). Друга једначина се добија изједначавањем добијених функција расподела случајне величине пробојно време уз фиксну вредност пробојног напона (U_{dp}) са функцијом расподеле случајне величине пробојни напон уз фиксну вредност пробојног времена (t_{dp}). Могућност овог изједначавања проистиче из исте вероватноће пробоја; 4- на основу система од две једначине, без обзира на типове расподела случајних величина пробојно време и пробојни напон, могуће је одредити експонент криве века трајања на основу параметара расподела које ће кандидат претходно одредити централном методом и методом максималне веродостојности (engl. maximum likelihood estimation -MLE). Овде треба напоменути да се у решавању формираног система једначина неће појављивати константа k_{dp} пошто су сви испитивани узорци једне серије идентични.

Овако уведен алгоритам омогућава да се на основу само једног снимања статистичке расподеле за случајну променљиву пробојно време (уз константну вредност напона), једног снимања статистичке расподеле за случајну променљиву пробојни напон (уз одговарајућу константну вредност времена) и прорачуна експонента века трајања одреди карактеристика века трајања унапред одређеног квантила вероватноће (што се своди на провлачење праве познатог нагиба кроз дату тачку). Добијање карактеристика века трајања статорског намотаја и испитивање његовог старења, привидно, знатно олакшава и убрзава предложени алгоритам.

Ова тврдња је тачна, али је, на жалост, тачно и оно привидно. Наиме, добијање карактеристике века трајања описаним алгоритмом би било знатно убрзано када би се снимање статистичких расподела пробојно време вршило при вредностима сталног напона мало нижим од максималне вредности пробојног напона статорске изолације. Међутим, у том случају би области поверења биле тако велике да би добијени резултат био бесмислен. Ако би се, пак, статистичке расподеле случајне променљиве пробојно време одређивале под условом минималних вредности области поверења, тј. при вредности сталног напона мало изнад минималне вредности пробојног напона статорске изолације добио би се коректан резултат за чије би добијање било потребно више десетина година.

Компромисно решење за вредност сталног напона при коме се снимају статистичке расподеле случајне променљиве пробојно време је приближно на средини опсега вредности пробојног напона изолације статорског намотаја. Такво решење би дало употребљиву криву века трајања, али уз не баш прихватљив временско-материјални трошковник. Наиме, за добијање статистичког узорка од 50 вредности пробојног напона би било потребно 99 идентичних (у статистичком смислу) статорских намотаја. Међутим, приликом формирања репрезентативног статистичког узорка пречишћавањем експериментално добијених случајних променљивих применом Шовенеовог критеријума (Chauvenet's criterion) дошло би до одбацивања не малог броја експериментално добијених случајних вредности. Из тог разлога за спровођење овог експеримента треба планирати минимум 120 идентичних статора са намотајима. Овај опис коректно изведеног испитивања диелектричне чврстоће статорског намотаја је дат да би се боље схватио исказ „не баш прихватљив временско-материјални трошковник“.

Међутим, намотај је модуларног типа, и састоји од више идентичних повезаних канура, што олакшава статистички приступ испитивању. Пошто су кануре самостални делови статорског намотаја, пробој изолације једне кануре истовремено значи и пробој изолације целог статорског намотаја (оваква конструкција омогућава репарацију статорског намотаја једноставном заменом кануре са пробијеном

изолацијом, кануром истог типа). Кануре, као самостални делови статорског намотаја, формиране су као сендвич структура које чине више међусобно изолованих проводника. Кануре које су дужине 1 m и дуже, могу да се секу на „сендвич“ узорке дужине реда 5-10 cm. Из таквих „сендвич“ узорака могу се релативно лако издвојити узорци проводник-изолатор-проводник (у даљем тексту узорци). Пошто пробој изолације унутар кануре доводи до пробоја целе кануре (након пробоја једног међупроводног изолатора, непробијени изолатор сендвич структуре дође на двоструко оптерећење) проистиче да пробој кануре, односно статорског намотаја одређен пробојем узорка проводник-изолатор-проводник. На основу тога, може се тврдити да је издржљивост изолације статорског намотаја могуће одредити испитивањем издржљивости узорака.

Изолација намотаја високонапонских обртних машина је по правилу предимензионисана, да би се обезбедила што већа поузданост рада. Пуштањем високонапонске обртне машине у рад (а слично се дешава и у стању мировања) изолација намотаја полако слаби, у складу са законом века трајања односно вредност пробојног напона изолације (критичне вредности поља) постепено опада. Са слабљењем изолације расте величина „релативни утрошак века трајања“ машине уз истовремено опадање њој комплементарне величине „релативни остатак века трајања“. У тренутку када се вредност номиналног радног напона изједначи са вредношћу пробојног напона најмањег квантила вероватноће p , вредност тог најмањег квантила вероватноће p постаје и вероватноћа пробоја узорка, тј. вероватноћа пробоја кануре, односно вероватноћа пробоја изолације намотаја статора. Пошто се вероватноће малих квантила изузетно тешко одређују (увек, а посебно експериментима са константним напоном) никоме не би пало на памет да због могућности тако мале вероватноће хаварије врши ревизије или ремонте изолације намотаја статора. Даљим радом високонапонске обртне машине, вредност номиналног радног напона прелази на карактеристике века трајања које одговарају већим квантилима вероватноће p случајне величине пробојно време. Пошто се уједно ради о вероватноћи хаварије изолације статора, остаје на кориснику да одлучи када ће ремонтовати изолацију статора и осталих делова високонапонске обртне машине подложних старењу (то остаје на кориснику, пошто се произвођач машине обезбедио прописаним обавезним ремонтима при релативно малим вероватноћама хаварије). Овакав развој догађаја није идеалан, али је прихватљив са становишта предвидљивости.

Међутим, проблеми настају када високонапонска машина мења услове експлоатације. Тада карактеристика века трајања може значајно да изгуби своју линеарност, и да пређе у облик изломљених правих различитих нагиба (тј. различитих вредности експонента века трајања) и да у најгорем случају достигне нулту вредност релативног остатка века трајања много пре него што се може очекивати. Из тог разлога услови експлоатације високонапонске обртне машине (и њима одговарајући експонент века трајања) морају бити узети у обзир приликом планирања њихове поуздане експлоатације.

У циљу верификације претходно изведеног алгоритма за брзо добијање криве века трајања биће извршено одређивање кривих века трајања изолације на моделу намотаја статора (5-10 канура постављених у стеге) и одговарајуће испитивање на узорцима. Ако се добију приближно исте вредности експонента века трајања сматраће се да је предложени алгоритам верификован.

Испитивања и анализе предложене у докторској дисертацији биће извршене за изолације статора електричних обртних машина, које су биле у погону под познатим, сличним условима 5, 10, 15 и 20 година. Под максимално контролисаним условима из извађених канура ће према нацрту аутора, бити израђени узорци који ће омогућавати мерење: $\tan \delta$, ϵ_r , ϵ_c диелектричне чврстоће и прага парцијалног пражњења. Посебно ће бити узимани узорци из равног дела кануре, врата кануре и главе кануре. Аутор ће, такође, пројектовати узорке са три електроде да би се омогућило мерење унутрашње и површинске отпорности. Поред узорака узетих из статорског намотаја машина које су биле у погону, исти узорци и по истом поступку ће бити узети и из нових канура статора високонапонске обртне машине (150 kW, 6000 V).

Према плану експеримента такви узорци ће бити изложени дуготрајним напрезањима познатих релевантних параметара: температура, напон, механичко напрезање, дејство пренапона, доза неутронског и доза гама зрачења. Током експеримента ће бити испитивано и комбиновано деловање

наведених напрезања да би се проценила синергија takvog деловања на експонент преосталог века трајања. Током свих ових мерења за све испитиване узорке биће процењена вредност експонента преосталог века трајања у правилним интервалима времена. Добијени резултати ће бити употребљени да се одреди и коефицијент корелације између одређиваних параметара изолације и експонента преосталог века трајања.

2.1. Релевантне референце у вези са темом

- [1] Arthur Eugene Fitzgerald, Charles Kingsley, Stephen D. Umans, *Electrical Machinery*, McGraw-Hill, (2003).
- [2] S. Vukosavić, *Electrical Machines*, Springer-Verlag, (2013)
- [3] M. Rosu, P. Zhou, D. Lin, D. Ionel, M. Popescu, F. Blaabjerg, V. Rallabandi, D. Staton, *Multiphysics Simulation By Design For Electrical Machines, Power Electronics, And Drives*, John Wiley & Sons, Inc (2018)
- [4] G. Stone, I. Culbert, E. Boulter, H. Dhirani, *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*, John Wiley & Sons, Inc, 2nd Edition (2014)
- [5] Diagnostic testing and monitoring of rotating machines, Omicron, (February 2019).
- [6] P. J. Tavner, Review of condition monitoring of rotating electrical machines, *IET Electr. Power Appl.*, Vol. 2 No. 4, pp. 215-247 (2008).
- [7] P. Zhang, T. G. Habetler, A Survey of Condition Monitoring and Protection Methods for Medium-Voltage Induction Motors, *IEEE transactions on industry applications*, vol. 47, no. 1, pp. 143-146 (2011).
- [8] B. Wilhelm, Online Monitoring of Motor, *Royal Belgian Institute of Marine Engineers*, No.1, Vol.34, ORBIT 15 (2014).
- [9] S. Nandi, H. A. Toliyat, and L. Xiaodong, Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, pp. 719–729, (2005).
- [10] O. Imoru, A. A. Jimoh, Y. Hamam, Origin and Manifestation of Electrical Machine Faults—A review, *The 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE)* (2014).
- [11] S. Ul Haq, A Study on Insulation Problems in Drive Fed Medium Voltage Induction Motors, A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical and Computer Engineering, Waterloo, Ontario, Canada, (2007).
- [12] Industrial Survey "Monitoring und Diagnose elektrischer Maschinen und Antriebe", Allianz Schadensstatistik an HS Motoren, 1996-1999, in *VDE Workshop* (2001).
- [13] D. V. Spyropoulos, E. D. Mitronikas, A Review on the Faults of Electric Machines Used in Electric Ships, *Advances in Power Electronics*, (2013).
- [14] T. W. Dakin, E. N. Henry and G. A. Mullen, "Life Testing of Electronic Power Transformers-Part II," in *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-3, no. 1, pp. 13-18, Feb. 1968, doi: 10.1109/TEI.1968.299049.
- [15] Higashiyama M, et al.: Lifetime evaluation of oil-immersed power capacitor using conversion factor between model sample and practical equipment, (2011) pp. 329-334 *IEEE Transaction on Power and Energy* 131(3).
- [16] C. P. Steinmetz, B. G. Lamme, Temperature and Electrical Insulation, *Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers* Vol. 32, Issue: 2, (1913).
- [17] K. Zhao, L. Cheng, C. Zhang, D. Nie and W. Cai, "Induction motors lifetime expectancy analysis subject to regular voltage fluctuations," 2017 *IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, Saskatoon, SK, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/EPEC.2017.8286230.
- [18] K. Delaere, R. Belmans and K. Hameyer, Influence of rotor slot wedges on stator currents and stator vibration spectrum of induction motors: a transient finite element analysis, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 39, pp. 1492 – 1494 (2003).

- [19] B. Jokanović, M. Bebić, N. Kartalović, The influence of combined strain and constructive solutions for stator insulation of rotating electrical machines on duration of their reliable exploitation, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 110, pp. 36-47, (2019).
- [20] C. Burdulea, J. Chatelain, New Valuation Method for Degradations in the State of Insulation of Electrical Machines, (1974) *Rev Gen Electr*, 83 (10), pp. 679-688.
- [21] E.L. Brancato, L.M. Johnson, Thermal aging problems in electrical insulation, past, present and future, *Proceedings of the 8th Electrical Insulation Conference*, pp. 56-60 (1968).
- [22] A. Cimino, C. Staubach and F. Jenau, Ageing behavior of the insulation system used in rotating machines, *Conference: 2017 INSUCON - 13th International Electrical Insulation Conference (INSUCON)* (2017)
- [23] W. Starr, H. Endicott, Progressive stress – A new accelerated approach to voltage endurance, *IEEE Trans. PAS* 55 (1961) 8, S. 515-525.
- [24] C. Rusu-Zagar, P. Notinger, C. Stancu, Ageing and degradation of electrical machines insulation, *Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods and Technologies*, Volume 8, ISSN 1314-7269 (Online), 2014. Published at: <http://www.scientific-publications.net>.
- [25] T. Munih; D. Miljavec, A method for accelerated ageing of electric machine insulation, *Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics - Mechatronika 2014*, DOI: 10.1109/MECHATRONIKA.2014.7018237.
- [26] M. Danikas, A. Karlis, A review on electrical machines insulation aging and its relation to the power electronics arrangements with emphasis on wind turbine generators, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 15, Issue 4, 2011, Pages 1748-1752, ISSN 1364-0321.
- [27] N. Kartalović, B. Jokanović, M. Bebić, Đ. Lazarević, The effect of gamma radiation on the stator insulation of rotating electrical machine, *Radiation Effects and Defects in Solids*, preprint (2019).
- [28] A. J. Schwab, *High-Voltage Measurement Techniques*, M.I.T. Press, 1972.
- [29] W. Hauschild, W. Mosch, *Statistical techniques for high-voltage engineering*, Institute of Electrical Engineers; ENGLISH ed. edition (31 Dec. 1992).
- [30] W. Weibull, A statistical distribution function of wide applicability, *J. of Applied Mechanics*, 18, (1951) 9, pp. 293-297.

3. Полазне хипотезе

X1: Кануре формиране од међусобно изолованих проводника који су повезани и смештени у жлебове статора високонапонске обртне машине производе се јединственим технолошким поступком користећи исте материјале. Међутим, током израде кануре не може се постићи њихова идентичност. Обзиром на технолошки поступак израде кануре, пресовање и накнадно обликовање увртањем, ослабљена места се са великом вероватноћом јављају на међупроводној изолацији, управо на деловима који су трпели највећа механичка напрезања. Током рада електричне обртне машине може доћи до делимичног или потпуног пробоја међупроводне изолације код једне од канура које формирају статорски намотај. Као последица таквог оштећења кануре, долази до поремећаја рада високонапонске обртне машине или њеног испада из погона.

Хипотеза се заснива на претпоставци да најслабији модул (канура) конструкције статорског намотаја високонапонске обртне електричне машине, настао неизбежном варијацијом технолошког поступка његове производње и/или несавршености дела материјала, на свом најслабијем месту у међупроводној изолацији може довести до неправилног рада или испада (или чак уништења) високонапонске електричне машине. Уколико се ова хипотеза потврди, предлог аутора би могао бити да се за дате делове кануре усаврши технолошки поступак производње.

X2: Све кануре истог типа изложене истим условима напрезања током истог времена експлоатације или експеримента имају исти експонент века трајања одређен најслабијим делом изолације кануре. Имајући то у виду, може се очекивати да ће узорци са најслабијом изолацијом бити из истог статистичког скупа из кога се може одредити експонент века трајања.

Хипотеза се заснива на претпоставци да је део кануре који у условима експлоатације најбрже стари сачињен од узорака који такође најбрже старе током експлоатације и као такви доприносе пробоју међупроводне изолације кануре односно изолације намотаја статора обртне машине.

Х3: Ефекти различитих типова напрезања на изолациону карактеристику намотаја, кануре или њеног најслабијег дела, не могу се сабирати (нису адитивни) као дејства појединачних утицаја који делују у одвојеним временским интервалима, већ се морају посматрати у сложеном синергијском деловању. Свеобухватни показатељ којим се правилно исказује утицај комбинованог напрезања изолације намотаја је карактеристика преосталог животног века.

Различита појединачна напрезања изолационог система у појединачном дејству имају мањи утицај на карактеристике изолационог система од заједничког деловања два или више напрезања истовремено. Имајући у виду да поједини процеси старења имају стохастички, односно статистички карактер, онда се за процену тих утицаја, као и саме карактеристике преосталог животног века, користе статистичке методе анализе.

Х4: Сви материјали од којих је израђена високонапонска обртна машина подложни су процесу старења. Током редовног ремонта врши се замена мањих делова високонапонске обртне машине према за њу предвиђеном протоколу. Статорски намотај се проверава и евентуално мења само у случају генералног ремонта или хаварије. Међутим, проценом карактеристике преосталог века трајања статорског намотаја могуће је проценити потребу његовог ранијег или каснијег ремонта у односу на протокол произвођача. Ова могућност је посебно важна ако високонапонска обртна машина мења услове рада током времена експлоатације.

Хипотеза се заснива на претпоставци да промена режима рада или амбијенталних услова експлоатације електричне обртне машине може довести до промене нагиба криве века трајања (тј. промене вредности експонента века трајања) и тиме убрзати или успорити потребу генералног ремонта статорског намотаја (одржавање према стању). Правовременом проценом степена убрзаног старења, односно преосталог животног века, може се спречити нежељени испад високонапонске обртне машине (са пратећим последицама) или продужити период поузданог рада без трошкова превременог ремонта.

4. Научне методе истраживања

Истраживања која ће аутор спровести у предложеном докторском раду имаће, углавном, све елементе уобичајене у научно-инжењерској пракси. То ће бити: 1- преглед релевантне литературе; 2- проучавање актуелне проблематике области; 3- издвајање и дефинисање једног конкретног дела претходно проучене актуелне проблематике као основу научне дискусије коју намерава водити у пријављеној Докторској дисертацији; 4- формирање статистичко-математичког модела погодног за анализу проблематике пријављене докторске дисертације; 5- конципирање експерименталног поступка који ће се примењивати у пријављеној Докторској дисертацији; 6- изражавање комбиноване мерне несигурности конципираног експерименталног поступка; 7- поређење теоријски предвиђених и експериментално добијених резултата и 8- давање сугестија за наставак истраживања у области којој припада предложена докторска дисертација.

Преглед литературе у области за коју се кандидат определио тражиће доста времена, али ће пружити и пуно корисних података. Наиме, давне 1981. године као заједнички пројекат свих значајнијих електроенергетских институција СФРЈ био је покренут пројекат „Век трајања изолационих система као показатељ квалитета“. Наведена проблематика је актуелна и данас на међународном плану па ће кандидат имати могућност широког увида у област од интереса.

Статистичко-математички модел (алгоритам) који кандидат предлаже у предложеној дисертацији може се показати веома корисним у инжењерској пракси.

5. Очекивани научни допринос

1. Концепција и експериментална верификација поступка за одређивање преосталог века трајања изолације статора по убрзаном поступку.
 2. Процена брзине старења (експонента века трајања) за различите делове кануре који су трпели различита механичка напрезања током технолошког поступка израде кануре.
 3. Процена вредности свих релевантних карактеристика изолације статора на одговарајућим узорцима и утицаја уобичајених напрезања као и њихове синергије на експонент века трајања. Одређивање коефицијента корелације између свих релевантних карактеристика изолације статора и утицаја уобичајених напрезања као и њихове синергије.
 4. Праћење односа величина релативни остатак века трајања или релативни утрошак века трајања преко квантила вероватноће пробоја изолације статора.
 5. Одређивање утицаја претходног релевантног утрошка века трајања високонапонске обртне машине на експонент века трајања у случају промене напрезања, уз тип или типове напрезања као параметра.
- Као стручни допринос се може сматрати давање сугестија произвођачима машина, којим би деловима канура требало усавршити технолошки поступак производње у циљу продужетка радног века високонапонских обртних машина.

6. План истраживања и структура рада

Истраживање могућности процене преосталог животног века изолационог система обртне електричне машине у условима комбинованог напрезања ће се одвијати у следећим корацима:

- 1) Проучавање доступне релевантне научно-стручне литературе са посебним нагласком на прибављање годишњих извештаја поменутог пројекта „Век трајања изолационих система као показатеља квалитета“.
- 2) Прибављање података из инжењерске праксе о хаваријама на високонапонским обртним машинама које су се догодиле са сумњом на старење изолационог материјала у условима експлоатације.
- 3) Проучавање статистичко-математичко-нумеричких модела повезаних са проблемом старења електричних обртних машина.
- 4) Извођење алгоритма за брзи поступак прорачуна експонента века трајања статорске изолације.
- 5) Одређивање века трајања статорске изолације применом модела намотаја формираног постављањем канура у стеге под истим условима под којим се постављају и у жлебове статора.
- 6) Одређивање века трајања узорака добијених из канура изведеним алгоритмом.
- 7) Поређење добијених резултата наведених начина одређивања века трајања.
- 8) Одређивање експонента века трајања и остатка века трајања нових и коришћених (5, 10, 15 и 20 година) машина, испитивањем узорака изложених истовременим напрезањима под условима очекиваним током експлоатације.
- 9) Одређивање утицаја комбинованог напрезања са познатим параметрима експеримента на експонент века трајања.
- 10) Одређивање коефицијента корелације између експериментално одређених карактеристика изолације и експонента века трајања уз услове експеримента као параметре.

Текст докторске дисертација биће написан на српском језику

7. Закључак и предлог

На основу приложене документације и непосредног увида у досадашњи научни рад кандидата Бојана Јокановића, дипл. инж. електротехнике, Комисија закључује следеће:

Кандидат испуњава све законске, формалне и суштинске услове прописане Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Београду и Статутом Електротехничког факултета у Београду за израду докторске дисертације.

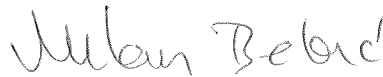
Предложена тема **„Процена преосталог животног века изолационог система обртне електричне машине у условима комбинованог напрезања утврђивањем карактеристике века трајања“** је научно заснована а резултати до којих ће се доћи израдом ове дисертације представљаће оригиналан допринос.

Комисија констатује да тема припада ужој научној области Енергетски претварачи и погони за коју је Електротехнички факултет Универзитета у Београду матичан и при томе за ментора докторске дисертације предлаже ванредног професора др Милана Бебића запосленог на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. У контексту овог предлога, уз извештај је приложен списак радова који квалификују ванредног професора др Милана Бебића за ментора.

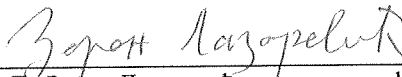
На основу претходно изложеног, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да кандидату Бојану Јокановићу одобри израду докторске тезе под насловом **„Процена преосталог животног века изолационог система обртне електричне машине у условима комбинованог напрезања утврђивањем карактеристике века трајања“**

У Београду, 30.11.2021. године

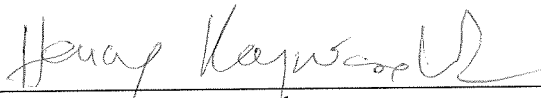
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Милан Бебић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



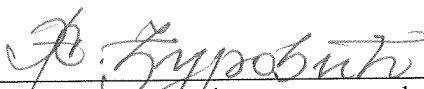
Др Зоран Лазаревић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



Др Ненад Карталовић, научни сарадник
Електротехнички институт „Никола Тесла“ у Београду



Др Златан Стојковић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



Др Жељко Буровић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет