

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Бојана Јокановића.

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета донетом на седници бр. 883 одржаној 21.02.2023. године (број одлуке 339 од 03.03.2023. године), именовани смо за чланове Комисије за оцену докторске дисертације кандидата Бојана Јокановића под насловом

**„Процена преосталог животног века изолационог система обртне електричне машине у условима комбинованог напрезања утврђивањем карактеристике века трајања“**

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

### РЕФЕРАТ

#### 1. УВОД

##### 1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

- 3.11.2017.** Кандидат Бојан Јокановић уписао је докторске академске студије на Електротехничком факултет Универзитета у Београду. Приликом уписа признати су му испити које је положио током магистарских студија и одређено су му два допунска испита за предмете „Вишемоторни електрични погони“ и „Прелазне појаве у електричним машинама“. Оба испита је положио са највећом оценом чиме је стекао услов да приступи процедури пријаве и израде докторске дисертације на Електротехничком факултету Универзитета у Београду у складу са одговарајућим Правилником о докторским студијама.
- 24.6.2021.** Кандидат Бојан Јокановић је пријавио тему за израду докторске дисертације под насловом „Процена преосталог животног века изолационог система обртне електричне машине у условима комбинованог напрезања утврђивањем карактеристике века трајања“. За ментора је предложен др Милан Бебић, ванредни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду.
- 29.6.2021.** Комисија за студије трећег степена разматрала је предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидата упутила Наставно-научном већу на усвајање.
- 16.7.2021.** Наставно-научно веће именовало је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације

**14.12.2021.** Наставно-научно веће усвојило је Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације кандидата Бојана Јокановића. Извештај је поднела Комисија у саставу:

1. др Милан Бебић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
2. др Зоран Лазаревић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
3. др Ненад Карталовић, научни сарадник, Универзитет у Београду – Електротехнички институт „Никола Тесла“ у Београду
4. др Златан Стојковић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
5. др Жељко Ђуровић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

**19.1.2022.** Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Решење број 61206-5358/2-21 од 19.01.2022. За ментора је именован др Милан Бебић, ванредни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

**7.3.2023.** Кандидат Бојан Јокановић предао је докторску дисертацију на преглед и оцену.

**14.2.2023.** Комисија за студије трећег степена потврдила је испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за оцену докторске дисертације кандидата Бојана Јокановића.

**3.3.2023.** Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду именовало је Комисију за оцену докторске дисертације кандидата Бојана Јокановића (Одлука бр. 339 од 03.03.2023.). у саставу:

1. др Златан Стојковић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
2. др Зоран Лазаревић, редовни професор у пензији, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
3. др Ненад Карталовић, научни сарадник, Универзитет у Београду – Електротехнички институт Никола Тесла
4. др Богдан Брковић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
5. др Ковиљка Станковић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

На основу члана 101. Статута Универзитета у Београду, члана 74. Статута Универзитета у Београду-Електротехничког факултета и захтева студента, одобрено је продужење рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма.

## 1.2. Научна област дисертације

Дисертација кандидата Бојана Јокановића припада научној области Техничке науке – Електротехника, ужа научна област Енергетски претварачи и погони. За ментора дисертације одређен је др Милан Бебић, ванредни професор на Универзитету у Београду – Електротехнички факултет, на основу стручних и научних доприноса везаних за ужу научну област дисертације.

### 1.3. Биографски подаци о кандидату

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. Постигне 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. Одбранивши магистарски рад под насловом „Предлог мера 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. 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.

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<sub>g</sub> који и данас раде и које одржава.

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 Загребу, Хрватска.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под насловом „Процена преосталог животног века изолационог система обртне електричне машине у условима комбинованог напрезања утврђивањем карактеристике века трајања“ написана је на српском језику, на 180 страна и садржи 81 слику и 17 табела. Подељена је на 6 поглавља: 1. Увод; 2. Старење изолације статора електричних машина великих снага; 3. Планирање и обрада резултата експеримента; 4. Експеримент и обрада експерименталних резултата; 5. Резултати добијени испитивањем и дискусија; 6. Закључак; а садржи и коришћену литературу и прилоге.

Литература садржи 89 референци које је кандидат користио током израде дисертације и које се односе на претходна истраживања директно повезана са циљем дисертације као и на теоретске основе за спровођење експеримента и за статистичке методе обраде добијених резултата. У прилозима је дато изражавање мерне несигурности експерименталних поступака вршених током рада на дисертацији.

## 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу - Увод, дате су основне карактеристике обртних електричних машина при чему је посебна пажња посвећена њиховим конструктивним решењима. Као специфичност конструктивних решења електричних машина средње и велике инсталисане снаге, посматрани су префабриковани делови намотаја, тзв. кануре. Том приликом је указано на искуства корисника електричних машина да се највећи број кварова јавља на изолацији статора. Имајући то у виду дефинисан је циљ рада – формирање економичног, једноставног, брзог и поузданог експериментално-статистичког поступка за предикцију животног века изолације статора обртне електричне машине.

У другом поглављу – Старење изолације статора електричних машина велике снаге, дати су основни механизми старења изолације, врсте напрезања изолационог система статора обртних електричних машина, као и преглед до сада публикованих резултата који се односе на процену животног века изолационог система статора.

У трећем поглављу – Планирање и обрада резултата експеримента, приказане су статистичке методе коришћене током израде дисертације. На првом месту је пажња посвећена статистичкој обради експерименталних резултата. Такође је дат преглед концепције мерног поступка, обима експеримента и коришћене мерне опреме са релевантним карактеристикама. Посебна пажња је посвећена Вејбуловој статистичкој расподели карактеристичној за статистичке узорке случајних променљивих повезаних са испитивањем изолација. Избор Вејбулове расподеле је логична последица области испитивања пошто се ради о основној расподели екстремних вредности којима несумњиво припадају резултати испитивања. Поред Вејбулове расподеле наведене су основне карактеристике Mann-Whitney-овог теста, као и поступак примене овог теста на проблематику обрађивану у дисертацији. Пошто је у дисертацији део резултата добијен на основу корелације регресије експериментално добијених података под различитим условима, у овом поглављу је приказано на који су начин ове статистичке методе коришћене у раду. Алгоритам за предикцију животног века изолације статора обртне електричне машине се добрим делом заснива на Закону пораста вероватноће електричног пражњења у изолационој структури комбинованог са методом одређивања кривих животног века изолационог система, те је то детаљно приказано у овом поглављу.

У четвртном поглављу – Експеримент и обрада експерименталних резултата, приказана је коришћена експериментална опрема са поступком мерења који се односи на избор недеструктивне методе за одређивање карактеристика животног века обртне машине, као и опис израде испитних узорака који омогућавају економични, брзи и поуздани експериментално-статистички поступак за предикцију животног века изолације статора обртне електричне машине. Детаљно је описано испитивање животног века растућим напоном и свођење добијених резултата на одговарајуће резултате који би се добили методом константног напона, што је омогућило знатно брже извршавање поступка мерења. Такође је овим поглављем обухваћен опис синергије коришћене опреме и мерног поступка која је омогућила добијање репродуцибилних резултата уз прихватљиву комбиновану мерну несигурност и велику статистичку поузданост.

Петим поглављем – Резултати добијени испитивањем и дискусија, су обухваћени избор склопа обртне машине и физичке појаве на микроскопском нивоу релевантне за процену животног века изолације статора обртне машине са резултатима и дискусијом применљивости испитивања случајне променљиве праг парцијалног пражњења на канурама, тангенс угла губитака канура и праг парцијалног пражњења на узорцима узетим са канура, на предикцију стања изолације статора обртне машине; провера тачности метода за одређивање експонента животног века изолационог система асинхроне обртне електричне машине; резултати и дискусија утицаја комбинованог напрезања на преостали животно век и друге карактеристике изолационог система асинхроне обртне електричне машине; ефекат

радиоактивног зрачења на старење изолационог система са описом, резултатима и дискусијом утицаја поља гама и неутронског зрачења на стабилност рада и дужину животног века изолационог система.

У шестом поглављу – Закључак, делимично су поновљени и међусобно повезани резултати и дискусија приказани у претходним поглављима са декларисаним циљем рада и постављеним хипотезама.

На крају су дати списак коришћене литературе и два прилога.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација представља оригинални научно-истраживачки рад у области испитивања и унапређења обртних електричних машина. Проблематика рада је веома актуелна у дужем периоду на шта указује временски распон публикација коришћене литературе. Приказани резултати у дисертацији су показали да је развијени поступак применљив у инжењерској пракси и као такав омогућава продужење животног века обртних електричних машина.

#### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Од великог броја референци из предметне области које је кандидат користио, на списку литературе је коректно навео 89 публикација које су непосредно везане за приказане резултате у дисертацији. У списак литературе су укључене и 3 референце (радови у научним часописима међународног значаја од којих је једна категорија М21 и две категорије М23) на којима је кандидат аутор, а које непосредно произилазе из резултата рада на дисертацији.

#### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У сврху провере постављених хипотеза и остварење циља истраживања, коришћене су све уобичајене истраживачке методе у техничким наукама које подразумевају:

- преглед доступне релевантне научно-стручне литературе;
- проучавање актуелне проблематике у области испитивања и унапређења обртних електричних машина;
- издвајање и дефинисање конкретног дела из актуелне проблематике као основу научне дискусије дате у дисертацији;
- формирање статистичко-математичког модела погодног за анализу проблематике дефинисане у дисертацији;
- конципирање примењеног експерименталног поступка;
- изражавање комбиноване мерне несигурности конципираног експерименталног поступка;
- поређење теоријски предвиђених и експериментално добијених резултата и
- давање сугестија за будућа истраживања у области испитивања и унапређења обртних електричних машина.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Проблематика обрађивана у дисертацији је дефинисана на основу искуства корисника обртних електричних машина као и статистике ремонтних радионица који указују да је приликом експлоатације изолација статора њихова најслабија тачка. Да би се решио проблем превременог испада из рада обртне електричне машине и избегао непотребни ванредни ремонт, развијен је и верификован алгоритам за економичан, брз и поуздан поступак за предикцију животног века изолације статора обртне електричне машине, а који је резултат истраживања предметне дисертације. Приказани резултати могу се сматрати упутством произвођачима обртних електричних машина, којим би деловима канура требало усавршити технолошки поступак производње у циљу продужетка радног века високонапонских обртних електричних машина.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат мр Бојан Јокановић, дипломирани инжењер електротехнике, је током научног рада највећим делом приказаног у докторској дисертацији показао да суверено влада свим методама карактеристичним за научно-истраживачки рад у области електротехнике. Високи степен самосталности показан у досадашњем раду и публиковани радови у научним часописима међународног значаја доказују кандидату способност за креативан рад на решавању проблема из области електротехнике, те се од кандидата могу очекивати нови резултати за унапређење инжењерске праксе у области његовог интересовања.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Током израде дисертације кандидат је остварио све научне доприносе предложене образложењем теме докторске дисертације, а то су:

- Концепција и експериментална верификација поступка за одређивање преосталог животног века изолације статора обртне електричне машине по убрзаном поступку;
- Процена брзине старења (експонента века трајања) за различите делове кануре који су трпели различита механичка напрезања током технолошког поступка израде кануре;
- 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;
- Праћење односа величина релативни остатак века трајања или релативни утрошак века трајања преко квантила вероватноће пробоја изолације статора;
- 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.

### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

У оквиру дисертације су унапређене методе испитивања изолационих система и примењене сложене статистичке методе за уопштавање добијених резултата мерења на

малим узорцима сложених великих система. Такође су унапређени метод статистичке организације експеримента и метод статистичке обраде резултата мерења. Коначном резултату је допринео метод примене растућег напона са конверзијом на одговарајуће резултате који би били добијени методом константног напона. Обједињавањем наведених научно-стручних доприноса развијен је алгоритам за економичан, брз и поуздан поступак за предикцију животног века изолације статора обртне електричне машине. Захваљујући развијеном алгоритму извршена су испитивања различитих врста напрезања изолације статора која могу деловати током експлоатације и дат је модел окончања животног века кануре синергијом одређених типова оптерећења. Добијени резултати приказани у дисертацији омогућавају унапређење технолошког процеса израде канура изолационог система статора обртне електричне машине.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат је аутор/коаутор 4 научне публикације у међународним часописима са SCI листе, од којих је један у часопису категорије M21, три у часописима категорије M23 и три у зборницима конференција од националног значаја. Сви радови су из области дисертације.

##### Категорија M21:

1. **Bojan Jakanović**, 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 (**IF=4.418**) (ISSN 0142-0615).

##### Категорије M23:

1. Nenad Kartalović, **Bojan Jakanović**, Milan Bebić, Đorđe Lazarević, The effect of gamma radiation on the stator insulation of rotating electrical machine, *Radiation Effects and Defects in Solids*, vol. 174, no. 9-10, pp. 777 – 789, 2019 (**IF=0.636**) (ISSN 1042-0150).
2. Nenad Kartalović, **Bojan Jakanović**, Milan Bebić, Đorđe Lazarević, Degradation of Stator Insulation of High-Voltage Asynchronous Machines in Gamma and Neutron Radiation Field, *Nuclear Technology & Radiation Protection*, vol. 34, no. 3, pp. 264-271, 2019 (**IF=1.057**) (ISSN 1451-3994).
3. D. Brajović, **B. Jakanović**, M. Bebić, N. Kartalović, D. Nikezić, Lifetime extension of the high voltage asynchronous machine in relation to the voltage endurance test, *Electrical Engineering*, Open Access, DOI: 10.1007/s00202-023-01767-w, 2023 (**IF= 1.630**) (ISSN 0948-7921).

##### Категорије M63:

1. **Bojan Jakanović**, 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 2-6 jun 2019, Zbornik radova, R D1-01, 2019, ISBN 978-86-82317-80-7.
2. Nenad Kartalović, **Bojan Jakanović** i Milan Bebić, Uticaj gama zračenja na izolaciju statora rotacionih električnih mašina, 34. savetovanje CIGRE Srbija, Vrnjačka banja 2-6 jun 2019, Zbornik radova, R D1-02, 2019, ISBN 978-86-82317-80-7.
3. **Jakanović Bojan**, Bebić Milan, Lazarević Đorđe, Nikezić Dušan i Jurošević Miladin, Degradacija izolacije statora visokonaponskih asinhronih mašina u polju gama i neutronskeg zračenja, 14. SAVJETOVANJE BH K/O CIGRÉ, Neum, BiH, 20-23.10.2019.;

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација „Процена преосталог животног века изолационог система обртне електричне машине у условима комбинованог напрезања утврђивањем карактеристике века трајања (The assessment of the remaining lifetime of the insulation system of rotating electrical machines in combined strains conditions by the lifetime determination)“ кандидата Бојана Јокановића представља оригинални научни допринос научној области Електротехника и рачунарство (ужа научна област Енергетски претварачи и погони).

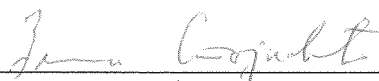
Докторска дисертација је написана на српском језику, излагање је јасно и систематично. Резултати приказани у дисертацији имају и теоријски и практичан значај. Кандидат Бојан Јокановић је овим истраживањем показао научну зрелост и инжењерску способност и креативност, што потврђује спремност за самостални научно-истраживачки рад.

Дисертација кандидата Бојана Јокановића садржи све елементе наведене у образложењу приликом пријаве теме и испуњава све суштинске и формалне услове предвиђене Законом о високом образовању, Правилником о докторским студијама Универзитета у Београду, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

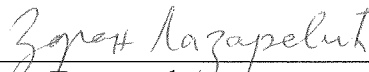
У складу са наведеним, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом „Процена преосталог животног века изолационог система обртне електричне машине у условима комбинованог напрезања утврђивањем карактеристике века трајања“ кандидата Бојана Јокановића прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Београд, 11.4.2023.

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



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



др Зоран Лазаревић, редовни професор у пензији  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Ненад Карталовић, научни сарадник  
Универзитет у Београду – Електротехнички институт Никола Тесла



др Богдан Брковић, доцент  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Ковиљка Станковић, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет