



УНИВЕРЗИТЕТ
У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ
ФАКУЛТЕТ

UNIVERZITET
U BEOGRADU
MAŠINSKI
FAKULTET

UNIVERSITY OF
BELGRADE
FACULTY OF
MECHANICAL ENGINEERING

<http://www.mas.bg.ac.rs>

Наш знак:

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
Већу научних области техничких
наука
Студентски трг бр. 1 Београд

Ваш знак:

Београд,

Поштовани,

У прилогу Вам достављамо захтев за давање сагласности о урађеној докторској дисертацији са пратећом документацијом, која се односи на докторанта:

- **ЂОРЂА ПЕТКОВИЋА, маг. инж. маш. „ПРОРАЧУН ПРЕЛАЗНИХ РЕЖИМА РАДА ГАСНИХ ТУРБИНА“**

С поштовањем,

Декан
Машинског факултета
Универзитета у Београду

проф. др Владимир Поповић



УНИВЕРЗИТЕТ
У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ
ФАКУЛТЕТ

UNIVERZITET
U BEOGRADU
MAŠINSKI
FAKULTET

UNIVERSITY OF
BELGRADE
FACULTY OF
MECHANICAL ENGINEERING

<http://www.mas.bg.ac.rs>

Наш знак:

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Ваш знак:

Студентски трг бр. 1 Београд

Београд,

Поштовани ,

Достављамо Вам уз Извештај о урађеној докторској дисертацији, један штампани примерак и идентичну електронску верзију докторске дисертације под називом **„ПРОРАЧУН ПРЕЛАЗНИХ РЕЖИМА РАДА ГАСНИХ ТУРБИНА“** кандидата **ЂОРЂА ПЕТКОВИЋА**, маст. инж. маш.

С поштовањем,

Декан
Машинског факултета
Универзитета у Београду

проф. др Владимир Поповић

Факултет МАШИНСКИ

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

672/4

(Број захтева)

07.09.2023.

(Датум)

Већу научних области техничких наука

(Назив већа научне области коме се захтев упућује)

ЗАХТЕВ**за давање сагласности на одлуке о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације и о именовању комисије за одбрану**

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тач. 4. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета", број 186/15-пречишћени текст и 189/16), дате сагласност на одлуку о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације:

КАНДИДАТ БОРЂЕ (ДРАГОЉУБ) ПЕТКОВИЋ

(име, име једног од родитеља и презиме)

студент докторских студија на студијском програму МАШИНСКО ИНЖЕЊЕРСТВО

пријавио је докторску дисертацију под називом:

ПРОРАЧУН ПРЕЛАЗНИХ РЕЖИМА РАДА ГАСНИХ ТУРБИНА

из научне области: Технологија материјала

Универзитет је дана 11.05.2022. својим актом под бр. 61206-1751/2-22

дао сагласност на предлог теме докторске дисертације

која је гласила:

ПРОРАЧУН ПРЕЛАЗНИХ РЕЖИМА РАДА ГАСНИХ ТУРБИНА

Име и презиме ментора др Милан Петровић, ред. проф.Комисија за оцену докторске дисертације именована је на седници одржаној од 04.05.2023.одлуком факултета под бр. 672/2, у саставу:

	Име и презиме члана комисије	звање	научна област	Установа у којој је запослен
1.	др Драгослава Стојиљковић	ред. проф.	Техн. мат. – Погонски мат. и сагоревање	Машински факултет
2.	др Милан Гојак	ред. проф.	Термомеханика	Машински факултет
3.	др Милан Ристановић	ред. проф.	Аутоматско управљање	Машински факултет
4.	др Милан Бањац	ванр. проф.	Термоенергетика	Машински факултет
5.	др Будимир Росић	ванр. проф.	Машинство	Универзитет у Оксфорду, Факултет инжењерских наука

Напомена: уколико је члан Комисије у пензији навести датум пензионисања.

Датум стављања извештаја Комисије и докторске дисертације на увид јавности 14.07.2023.

Наставно-научно веће факултета усвојило је извештај Комисије за оцену докторске дисертације на седници одржаној дана 07.09.2023.

Комисија за одбрану докторске дисертације именована је на седници одржаној 04.05.2023.

одлуком факултета под бр. 672/2

, у саставу:

	Име и презиме члана комисије	звање	научна област	Установа у којој је запослен
1.	др Драгослава Стојиљковић	ред. проф.	Техн. мат. – Погонски мат. и сагоревање	Машински факултет
2.	др Милан Гојак	ред. проф.	Термомеханика	Машински факултет
3.	др Милан Ристановић	ред. проф.	Аутоматско управљање	Машински факултет
4.	др Милан Бањац	ванр. проф.	Термоенергетика	Машински факултет
5.	др Будимир Росић	ванр. проф.	Термоенергетика	Универзитет у Оксфорду, Факултет инжењерских наука

Напомена: уколико је члан Комисије у пензији навести датум пензионисања.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Проф. др Владимир Поповић

- Прилози:
1. Одлука Наставно-научног већа о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације и одлука о именовању Комисије за одбрану докторске дисертације
 2. Извештај Комисије о оцени докторске дисертације
 3. Примедбе на извештај Комисије о оцени докторске дисертације (уколико их је било) и мишљење Комисије о примедбама

Напомена: Факултет доставља Универзитету захтев са прилозима у електронској форми и у једном писаном примерку за архиву Универзитета

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број: 672/4
Датум: 07.09.2023. године
Београд, Краљице Марије 16

На основу члана 40. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 88/2017, 27/2018 – др. закон 73/2018, 67/2019, 11/2021 – аутентично тумачење, 67/2021 – др. Закон, 67/2021), члана 64. Статута Машинског факултета – пречишћени текст (број 1136/4 од 28.06.2021. године), Одлуке о изменама и допунама Статута број 239/6 од 17.02.2023. године и члана 46. Правилника о докторским студијама Машинског факултета и извештаја Комисије у саставу: др Драгослава Стојиљковић, ред. проф., др Милан Гојак, ред. проф., др Милан Ристановић, ред. проф., др Милан Бањац, ванр. проф. и др Будимир Росић, ванр. проф., Универзитет у Оксфорду, Факултет инжењерских наука о оцени докторске дисертације **„Прорачун прелазних режима рада гасних турбина“** студента докторских студија **Ђорђа Петковића, маг. инж. маш.**, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној 07.09.2023. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Усваја се извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације **„ПРОРАЧУН ПРЕЛАЗНИХ РЕЖИМА РАДА ГАСНИХ ТУРБИНА“** студента **ЂОРЂА ПЕТКОВИЋА, маг. инж. маш.**

Докторску дисертацију и извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације доставити на давање сагласности Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, по истеку рока од 30 дана у коме су били на увиду јавности.

Одлуку доставити: Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, студенту, ментору и архиви Факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Владимир Поповић

проф. др Драгослава Стојиљковић, ред. професор, Универзитет у Београду - Машински факултет
проф. др Милан Гојак, ред. професор, Универзитет у Београду - Машински факултет
проф. др Милан Ристановић, ред. професор, Универзитет у Београду - Машински факултет
проф. др Милан Бањац, в. професор, Универзитет у Београду - Машински факултет
проф. др Будимир Росић, в. професор, Универзитет у Оксфорду, Факултет инжењерских наука

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ Машински факултет

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Ђорђа Д. Петковића**, магист. инж. маш., студента докторских студија

Одлуком Наставно-научног веће Машинског факултета Универзитета у Београду бр. 672/2 од 04.05.2023. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Ђорђа Д. Петковића**, под насловом:

ПРОРАЧУН ПРЕЛАЗНИХ РЕЖИМА РАДА ГАСНИХ ТУРБИНА

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

Кандидат Ђорђе Д. Петковић је уписао Докторске академске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду школске 2017/2018. године. Положио је испите из свих предмета предвиђених наставним планом и програмом за ниво Докторских академских студија са просечном оценом 10,00 (десет).

Наставно-научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду је на седници одржаној 10.03.2022. године донело Одлуку бр. 237/4 да се тема докторске дисертације, кандидата **Ђорђа Д. Петковића**, под називом **Прорачун прелазних режима рада гасних турбина** прихвата, а на седници од 14.04.2022. донело Одлуку бр. 237/6 о заснованости теме и испуњености услова за израду дисертације. За ментора дисертације је именован проф. др Милан Петровић. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је донело Одлуку бр. 61206-1751/2-22 од 11.05.2022., којом се даје сагласност на предлог теме докторске дисертације **Ђорђа Д. Петковића**, под називом **Прорачун прелазних режима рада гасних турбина**.

На основу обавештења ментора да је кандидат завршио дисертацију, Наставно-научно веће Машинског факултета Универзитета у Београду је донело Одлуку бр. 672/2 од 04.05.2023. о именовању комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Ђорђа Д. Петковића**, у саставу:

- проф. др Драгослава Стојиљковић, ред. професор Универзитет у Београду-Машински факултет,
- проф. др Милан Гојак, ред. професор, Универзитет у Београду-Машински факултет,
- проф. др Милан Ристановић, ред. професор, Универзитет у Београду-Машински факултет,
- проф. др Милан Бањац, в. професор, Универзитет у Београду-Машински факултет
- проф. др Будимир Росић, в. професор, Универзитет у Оксфорду, Факултет инжењерских наука.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација Ђорђа Д. Петковића под називом **Прорачун прелазних режима рада гасних турбина** припада научној области **Машинство**, ужа научна област **Термоенергетика – топлотне турбомашине и термоенергетска постројења**, за коју је Машински факултет Универзитета у Београду матичан.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Ђорђе Д. Петковић је рођен 09.12.1993. године у Параћину, Република Србија. Основну школу и гимназију (природноматематички смер) завршио је у Параћину. На Машински факултет у Београду уписао се 2012. године. Основне академске студије (B.Sc.) је завршио 2015. године са просечном оценом **9,93** (девет и 93/100). Мастер академске студије (M.Sc.) је завршио 2017. године, на модулу за Термоенергетику, са просечном оценом **9,95** (девет и 95/100). Мастер рад на тему: „Развој математичког модела за једнодимензијски и дводимензијски прорачун вишеступних парних турбина“ код ментора проф. др Милана Петровића је одбранио у септембру 2017. године, са оценом 10 (десет). За време студија награђиван је за постигнуте резултате. Проглашен је за студента генерације уписане на факултет школске 2012/2013. године, као и за најбољег студента на мастер академским студијама из генерације уписане на студије шк. 2015/2016. године.

Докторске студије на Машинском факултету у Београду је уписао 2017. године и положио све обавезне и изборне предмете, Истраживање и публикавање I-IV и одбранио Пројекат идеје докторске дисертације. Бави се развојем математичких модела и софтвера за предвиђање понашања гасних турбина при прелазним режимима рада као и прорачуном струјања у топлотним турбомашинама. Учествовао је у међународном HORIZON2020 пројекту FLEXTURBINE на унапређењу метода за развој нове генерације гасних турбина.

На Машинском факултету се запослио 14.11.2017. у Лабораторији за топлотне турбомашине и термоенергетска постројења као истраживач. У јуну 2021. године, изабран је у звање асистента за ужу научну област Термоенергетика за Групу предмета Топлотне турбомашине и Термоенергетска постројења.

Говори енглески језик.

Члан је америчког удружења машинских инжењера ASME (American Society of Mechanical Engineers) и Друштва термичара Србије.

Водећи је аутор и коаутор у више радова који су објављени на међународним скуповима и у часописима од међународног значаја. Учествовао је у изради више истраживачких и развојних пројеката за домаће и водеће светске фирме из области термоенергетике.

Објављени радови

Радови објављени у међународним часописима

1. **Petkovic, D.**, Banjac, M., Milic, S., Petrovic, M. V., Wiedermann, A., Modelling the Transient Behaviour of Gas Turbines, **Trans. ASME Journal of Turbomachinery**, 2020, 142(8): 081005. **M22** (IF=2.713), <https://doi.org/10.1115/1.4046451>
2. Banjac, M., Savanovic, T., **Petkovic, D.**, Petrovic, M.V., A Comprehensive Analytical Shock Loss Model for Axial Compressor Cascades, **Trans. ASME Journal of Turbomachinery**, 2022, 144(9): 091003. **M23** (IF=1.792), <https://doi.org/10.1115/1.4053852>

Радови представљени на научним скуповима

1. Petrovic, M.V., Wiedermann, A., Banjac, M., Milic, S., **Petkovic, D.**, Madzar, T., 2022, New Method for Cycle Performance Prediction Based on Detailed Compressor And Gas Turbine Flow Calculations, paper No. GT2022-82229, **ASME Turbo** 2022, June 13–17, 2022, Rotterdam, Netherlands
2. **Petkovic, D.**, Banjac, M., Milic, S., Madzar, T., Petrovic, M.V., Wiedermann, A., 2022. Simulation of the Overall Transient Operation of Gas Turbines, paper No. GT2022-82250, **ASME Turbo** 2022, June 13–17, 2022, Rotterdam, Netherlands

3. Banjac, M., Savanovic, T., **Petkovic, D.**, Petrovic, M., A Comprehensive Analytical Shock Loss Model for Axial Compressor Cascades, **ASME Turbo 2021**, Virtual, Online, June 7-11, Paper No. GT2021-58580, 2021.
4. Petrovic, M.V., Wiedermann, A., **Petkovic, D.**, Banjac, M., Milic, S., Simulation of Transient and Part-Load Operation of Gas Turbines. International Gas Turbine Congress **IGTC 2019.**, Tokyo, 17-22, Nov. 2019.
5. **Petkovic, D.**, Banjac, M., Milic, S., Petrovic, M. V., Wiedermann, A. Modelling the Transient Behaviour of Gas Turbines. Proceedings of the **ASME Turbo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition**. Volume 2A: Turbomachinery. Phoenix, Arizona, USA June 17–21, 2019. V02AT45A014. ASME. <https://doi.org/10.1115/GT2019-91008>
6. **Petković, Đ.**, Banjac, M., Milić, S., Petrović, M.V., Modeliranje prelaznih režima rada toplotnih turbina, Elektrane 2018, Zlatibor, 05.- 08. novembar 2018.
7. Petrovic, M. V., Wiedermann, A., Banjac, M., **Petkovic, Dj.**, Milic, S., Software Tool for Simulation and Analysis of Gas Turbine Engine during Transient Operation, Turbomachines 2018, Prague, Czech Republic, September 25-26, 2018 <https://turbo2018.asiplzen.cz/abstracts-proceedings/>
8. Milić, S., Petrović, M. V., Banjac, M. B., **Petković, Đ.**, Đukanović, D., Jankov, N., Despotović, V., Miletić, D., Ispitivanje i analiza rada parnog turbopostrojenja snage 210 MW, Elektrane 2021, Beograd, 17.-18. novembar 2021.
9. Petrović, M. V., Milić, S., Banjac, M. B., **Petković, Đ.**, Madžar, T., Petrović, L., Vujičić, B., Novaković, Ž., Rešenje modernizacije parnog turbopostrojenja snage 300 MW, Elektrane 2021, Beograd, 17.-18. novembar 2021.

Истраживачки и развојни пројекти

1. Petrović, M., Milić, S., Banjac, M, S., Đukanović, **Petković, Đ.**, Madžar, T., Ispitivanje parnog turbopostrojenja TE Nikola Tesla B1 Obrenovac, Mašinski fakultet, Beograd, 2022, LTT-4/21, rađeno za Elektroprivredu Srbije
2. Petrovic, M., Banjac, M., **Petkovic, D.**, Madzar, T.: Software System for Aerodynamic Design and Flow Analysis of Axial Compressors, ongoing project, University of Belgrade-Faculty of Mech Engineering, LTT-5/21, for Mitsubishi Heavy Industries LTD, Tokyo, Japan
3. Petrovic, M., **Petkovic, D.**, Banjac, M.,Milic, S., Madzar, T.: Development of method and software for predicting the transient behavior of gas turbines, AG Turbo Project "TurboGruen.", partner MAN. Energy Solution, Oberhausen, Germany LTT-6/21
4. Petrović, M., Milić, S., Banjac, M, S., Đukanović, **Petković, Đ.**, Madžar, T., Tehničko rešenje modernizacije TE Ugljevik - deo: parno turbopostrojenje, Mašinski fakultet, Beograd, 2021., LTT1/21, rađeno za Elektroprivredu Republike Srpske
5. Petrović, M., Milić, S., Banjac, M, S., Đukanović, **Petković, Đ.**, Madžar, T., Tehničko rešenje modernizacije TE Gacko- deo: parno turbopostrojenje, Mašinski fakultet, Beograd, 2021., LTT2/21, rađeno za Elektroprivredu Republike Srpske
6. Petrović, M., Milić, S., Banjac, M, S., Đukanović, **Petković, Đ.**, Madžar, T., Specijalna ispitivanja i ekspertize turbopostrojenja TE Kostolac, blok A1 snage 100 MW, Mašinski fakultet, Beograd, 2021., LTT3/21, rađeno za Elektroprivredu
7. Petrović, M., Milić, S., Banjac, M, S., Đukanović, **Petković, Đ.**, Madžar, T.,Termotehnička ispitivanja postrojenja za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije u TO Voždovac – Beograd, Beograd, 2020., LTT-1/20, rađeno za Energotehnika-Južna Bačka d.o.o. Novi Sad
8. Petrović, M., Milić, S., Banjac, M, S., Đukanović, **Petković, Đ.**,Sistem za online upravljanje parne turbine i analiza rada sa termotehničkim ispitivanjima parnog turbopostrojenja TE Pljevlja snage 225 MW, Mašinski fakultet, Beograd, 2020, LTT-02/19, rađeno za Elektroprivredu Crne Gore
9. Petrović, M., Milić, S., Banjac, M, S., Đukanović, **Petković, Đ.**, Termotehnička ispitivanja postrojenja za kombinovanu proizvodnju toplotne i električne energije TO Novi Sad – Jug, Mašinski fakultet, Beograd, 2020., LTT-8/19, rađeno za Energotehnika-Južna Bačka d.o.o. Novi Sad

10. Petrović, M., Milić, S., Banjac, M, S., Đukanović, **Petković, Đ.**, Termotehnička ispitivanja parnog turbopostrojenja TE Gacko snage 300 MW, Mašinski fakultet, Beograd, 2020., LTT4/19, rađeno za Elektroprivredu Republike Srpske
11. Petrović, M., Milić, S., Banjac, M, S., Đukanović, **Petković, Đ.**, Termotehnička ispitivanja parnog turbopostrojenja TE Ugljevik snage 300 MW, Mašinski fakultet, Beograd, 2020., LTT5/19, rađeno za Elektroprivredu Republike Srpske
12. Petrović, M., Milić, S., Banjac, M, S., Đukanović, **Petković, Đ.**, Matematički modeli turbopostrojenja sa kontrolnim proračunima, analizom rada i predlogom mera za poboljšanje stanja u TE Gacko, Mašinski fakultet, Beograd, 2020., LTT6/19, rađeno za Elektroprivredu Republike Srpske
13. Petrović, M., Milić, S., Banjac, M, S., Đukanović, **Petković, Đ.**, Matematički modeli turbopostrojenja sa kontrolnim proračunima, analizom rada i predlogom mera za poboljšanje stanja u TE Ugljevik, Mašinski fakultet, Beograd, 2020., LTT7/19, rađeno za Elektroprivredu Republike Srpske
14. Petrović, M., Milić, S., Banjac, M, S., Đukanović, **Petković, Đ.**, Optimizacija proizvodnje toplote za daljinsko grejanje Beograda iz blokova A3-A6 u TE „Nikola Tesla A“, Mašinski fakultet, Beograd, 2019., LTT-4/18, rađeno za Energoprojekt-Entel i JP Elektroprivreda Srbije, 2019.
15. Petrović, M., Milić, S., Banjac, M, S., Đukanović, **Petković, Đ.**, Termotehnička ispitivanja parnog turbopostrojenja TE Kostolac A2 snage 210 MW, LTT 1/19, Mašinski fakultet, Beograd, 2019. i JP Elektroprivreda Srbije, 2019.
16. Živanović, T. (rukovodilac dela kotao), Petrović, M. (rukovodilac dela turbopostrojenje), Tucaković, D., Milić, S., Stupar, G., Banjac, M, Đukanović, D., Ranković, M., **Petković, Đ.**, Kontrolni proračuni glavnih termoeenergetskih postrojenja, kotlovskog i turbopostrojenja, u sklopu projektovanja i izgradnje novog Bloka B3 u TE Kostolac, Mašinski fakultet, Beograd, 2018., LTT-9/16, rađeno za JP Elektroprivreda Srbije
17. Petrovic. M., Banjac, M., Milic, S., Rankovic, M., **Petkovic, Dj.**, 3D Flow Calculation and Loss Analysis for a Low Aspect Ratio Turbine Stator Row Including Labyrinth Seals, Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, 2018. LTT-01/17, Rađeno za firmu EscherTec, Zuerich, Švajcarska
18. Petrovic, M., Banjac, M., Milic, S., **Petkovic, Dj.**: Fine optimization of the flow path of a 14 stage steam turbine and optimization of the stacking of the last 3 stages, Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade, 2018. LTT-02/17, Rađeno za firmu EscherTec, Zuerich, Švajcarska
19. Petrović, M., Milić, S., Banjac, M., Đukanović, D., **Petković, Đ.**, Termodinamička ispitivanje i analiza rada turboseta u postrojenju Azotna kiselina, III linija u HIP Azotara, Pančevo, Mašinski fakultet, Beograd, 2018., LTT-01/18, rađeno za HIP Azotara Pančevo
20. Petrović, M., Milić, S., Banjac, M., Đukanović, D., **Petković, Đ.**, Garancijska ispitivanja turbine i turbopostrojenja TENT A4, IC Mašinski fakultet, Beograd, 2018. LTT-02/18, rađeno za Elektroprivredu Srbije

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертацији кандидата **Ђорђа Д. Петковића** под називом **Прорачун прелазних режима рада гасних турбина** је изложена на укупно 108 страна + 13 страна у којима се налази листа са именима ментора и чланова комисије, захвалница, сажетак, садржај и номенклатура. Дисертација садржи 90 слика, 16 табела и 80 коришћених литературних извора.

Дисертација садржи следећа поглавља:

1. Увод
2. Прелазни режими рада
3. Приступу у моделирању

4. Систем регулисања
5. Математички модел
6. Валидација и демонстрација методе
7. Закључак

Литература.

Поред овога, дисертација садржи и: Захвалницу, Резиме на српском и енглеском језику, Садржај, Номенклатуру са списком коришћених ознака, Биографију аутора, Изјаву о ауторству, Изјаву о истовестности штампане и електронске верзије докторског рада и Изјаву о коришћењу.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У Уводу је наведен значај примене гасних турбина у производњи електричне енергије у оквиру садашњих и будућих електроенергетских система. Укратко је описан историјски развој и објашњена је улога алата за предвиђање понашања машине на номиналним, парцијалним и прелазним режима рада. У одељку Стање истраживања су изложени постојећи алати за прорачун транзијентних појава. Затим су наведени њихови недостаци и дефинисан је циљ истраживања, са задацима које је потребно испунити. На крају је дата структура дисертације.

У другом поглављу, под насловом Прелазни режими рада, детаљно су објашњени физички феномени које се јављају током прелазних појава: акумулација масе и енергије радног флуида у запреминама проточног дела, акумулација енергије загревањем металних елемената турбоагрегата, промена величине различитих зазора између ротационих и стационарних елемената услед промене температуре метала и центрифугалне силе, кашњење процеса сагоревања у грејној комори и кашњење одзива система регулисања. Потом су описани карактеристични радни режими: стартовање, нагла промена оптерећења и заустављање. У последњем одељку су изложена радна ограничења са последицама неадекватног рада.

Треће поглавље носи назив Приступи у моделирању и у њему је извршена класификација на моделе „беле кутије“ у којима се моделира процес користећи основне законе физике, и на моделе „црне кутије“ који су засновани на различитим типовима вештачких неуронских мрежа. Прва група је даље подељена према комплексности на: нултодимензијске, једнодимензијске, дводимензијске и тродимензијске моделе. Образложене су предности и недостаци на основу којих је усвојено даље истраживање нултодимензијских модела. Најпре су објашњени стационарни модели који су засновани на уклапању компоненти, а затим и динамички. Изложени су приступи моделирању прелазних режима рада изнад празног хода и стартовања.

У четвртном поглављу је описан основни концепт регулисања у затвореним системима аутоматског управљања са ПИД регулаторима. Објашњени су принципи функционисања регулатора П, ПИ и ПИД дејства на примеру регулисања броја обртаја променом протока горива. У одељку Подешавање ПИД регулатора су изложене Циглер-Николсове методе учестаносног и одскочног одзива. Затим су објашњени кругови регулисања променом масеног протока горива, променом геометрије компресора и променом количине одузимања ваздуха уз компресора. На крају поглавља су изложени потпуно доступни модели система регулисања.

У петом поглављу је изложен развијени математички модел и детаљно описано моделирање сваке компоненте постројења, као и система регулисања. Прво је образложен начин добијања карактеристика компресора и турбине и трансформација у одговарајући формат. Потом је објашњен модел полуидеалног гаса за одређивање термодинамичког стања ваздуха и продуката сагоревања. У пратећим одељцима су описани модели компонената: усисни и издувни систем, компресор, грејна комора, турбина. Дефинисана је динамика обртних маса на основу закона одржања механичке енергије и поступак билансирања постројења по првом закону термодинамике. У одељку Систем регулисања објашњени су примењени модели за регулацију снаге/броја обртаја и температуре гасова на излазу из турбине. Затим су описани алгоритам прорачуна, методе за решавање обичних диференцијалних једначина и метода интерполације мапа. Показана је процедура трансформисања

динамичком модела у статички. На крају је објашњена организација програма и приказани су улазни и излазни подаци.

У шестом поглављу, под насловом Демонстрација и валидација методе, изложени су резултати симулација спроведених помоћу развијеног динамичког модела и поређење са експерименталним подацима. На примеру једновратилне индустријске гасне турбине је урађена валидација модела постројења без система регулisaња при наглим променама оптерећења. Затим је укључен систем регулisaња и спроведена је једна симулација која обухвата стартовање из хладног стања, промене оптерећења, заустављање и стартовање из топлог стања. Демонстриран је и утицај брзине промене снаге и губитка оптерећења на понашање гасне турбине. У другом делу је спроведена симулација рада двовратилне индустријске гасне турбине. Обухваћени су режими стартовања, промене оптерећења са варирањем броја обртаја слободне турбине и заустављање. У последњем одељку су изнете нумеричке перформансе и време извршења симулација.

Седмо поглавље носи наслов Закључак и садржи завршна разматрања у складу са дефинисаним циљевима истраживања. Приказани су научни и практични доприноси дисертације. На крају су дате препоруке за будућа истраживања у овој области.

У поглављу Литература дат је списак цитираних референци са 80 литературних извора.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација под називом **Прорачун прелазних режима рада гасних турбина** кандидата **Ђорђа Д. Петковића** представља савремен и оригиналан допринос у области прорачуна транзијентних понашања постројења са гасним турбинама. Ова дисертација је урађена у склопу научноистраживачких пројеката на развоју нових гасних турбина које је Лабораторија за топлотне турбомашине Машинског факултета у Београду спроводила за водеће светске компаније у овој области. Највећи део истраживања је обављен у склопу пројекта HORIZON 2020, 2016-2018, Grant No. 653941 (codeword: FLEXTURBINE) под називом *Flexible Fossil Power Plants for the Future Energy Market through new and advanced Turbine Technologies*, где је Машински факултет био део конзорцијума који су чинили свих 7 произвођача топлотних турбомашина у Европи и 14 универзитета.

Брзина стартовања и заустављања и понашање на променљивим и транзијентним условима рада је кључно питање примене топлотних турбомашина у савременој енергетици. Ово питање је нарочито добило на значају са масовним укључивањем енергетских капацитета базираним на енергији Сунца и ветра. Производња из оваквих електрана је непредвидива, па је флексибилност рада и могућност преузимања улоге "backup"-постројења један од најважнијих захтева који се поставља пред термoeлектране на фосилна горива у новим условима тржишта електричне енергије.

Детаљна симулације рада гасних турбина на прелазним режимима постало је могуће тек последњих двадесетак година са развојем одговарајућих нумеричких метода, компјутерске механике флуида и рачунара довољног капацитета. То је омогућило да се развију прецизни модели и обаве прорачуни струјања и понашања гасне турбине и турбокомпресора на променљивим оптерећењима. Кандидат **Ђорђе Д. Петковић** је развио оригиналну методологију базирану на сопственим моделима поједених феномена које прате транзијентна стања гасних турбина као и оригиналне софтверске пакете за једновратилне и двовратилне гасне турбине који су већ нашли конкретну примену у развоју нових машина.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Прегледом цитиране литературе, која је наведена у поглављу Литература, закључује се да је кандидат **Ђорђе Д. Петковић** при изради дисертације употребио референтне и актуелне публиковане изворе. У докторској дисертацији коришћена је обимна, савремена и релевантна литература из области прорачуна струјања у топлотним турбомашинама, моделирања процеса у гасним турбинама, преноса топлоте и сагоревања, динамичког понашања ротора турбомашина и управљања радом гасних турбина. Највећи део коришћене литературе је новијег датума и објављен

у последњих 15 година, у референтним научно-стручним часописима, што потврђује савременост у приступу анализи проблема разматраних у докторској дисертацији. Велики део наведене литературе је кандидату служио као основа за преглед стања области истраживања. Истицањем најважнијих резултата, презентованих у коришћеној литератури, дат је релевантан приказ постојећег стања у областима, које су биле предмет истраживања кандидата током рада на дисертацији. Један део коришћене литературе је старијег датума, чиме је кандидат показао да је проучио и генезу истраживања у овој области и одао признање пионирским радовима и истраживачима.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методе које су коришћене у истраживању обухватају:

- моделирање термодинамичких и струјних процеса трансформације унутрашње енергије у механички рад,
- моделирање преношења топлоте у компонентама гасне турбине,
- моделирање физичких процеса карактеристичних за прелазне режиме рада гасних турбина,
- нумеричке методе решавања система диференцијалних и нелинеарних једначина,
- програмирање и развој рачунарског програма,
- валидацију динамичког модела на основу расположивих експерименталних података.

Посебно треба истаћи опсежан рад на верификацији развијене методе којим су калибрисани и потврђени развијени математички модели гаснотурбинског постројења и појединих компонената. С обзиром да експериментални рад са гасним турбинама велике снаге није могућ у лабораторији, мерења су обављена на испитним постројењима код произвођача опреме. Кандидат је учествовао у планирању експеримената и обради експерименталних података.

Методе су адекватно изабране тако да развијени метод веома прецизно симулира прелазне појаве у гасним турбинама. Израчунавања се обављају са потребном брзином тако да се процеси могу паралелно симулирати са радом гасне турбине у реалним условима.

3.4. Применљивост остварених резултата

Истраживање спроведено у склопу израде дисертације кандидата **Ђорђа Д. Петковића** је већ нашло примену у развојним пројектима које је Машински факултет израђује за неке од водећих светских компанија које се баве гасним турбинама, а пре свега код фирме MAN Energy Solutions, Oberhausen, Немачка, при развоју њихове три гасне турбине снага 6, 8 и 15 MW.

Метод се примењује у фази пројектовања за:

- оптимизацију времена стартовања гаснотурбинског постројења,
- одређивање маргине стабилног рада компресора,
- анализу динамичке промене зазора између ротирајућих и непокретних делова гасне турбине при стартовању из различитих топлотних стања машине,
- одређивање радних карактеристика при прелазним и променљивим режимима,
- анализу утицаја појединих конструктивних и аеродинамичких решења за турбину, грејну комору и компресор на флексибилност гасне турбине,
- развој и тестирање система управљања.

Код постојећих гасних турбина развијени метод се примењује за:

- праћење и анализу рада у циљу повећања расположивости и животног века машине,
- анализу инцидентних догађаја који су се десили на машинама у раду.

Очекује се да ће се примена система проширити и на неке друге произвођаче гасних турбина у свету.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је током вишегодишњег научноистраживачког рада, а посебно током израде докторске дисертације показао да је у стању да самостално решава проблеме и да успешно влада савременим

научним сазнањима, као и теоријским, нумеричким и експерименталним методама, што представља основу за даљи успешан научноистраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У докторској дисертацији **Ђорђа Д. Петковића** под називом **Прорачун прелазних режима рада гасних турбина** остварен је оригиналан допринос у области моделирања процеса у топлотним турбомашинама.

По нашој оцени, најважнији научни резултати и доприноси ове дисертације су:

- развој новог динамичког модела гасне турбине за прорачун прелазних режима рада који се састоји од претходно израчунатих карактеристика компресора и турбине и система обичних диференцијалних једначина за предвиђање динамичког понашања појединачних компоненти. Већи број мапа компресора обухвата промену геометрије услед закретања преткола и закола. У моделу је омогућена промена количине одузетог ваздуха из компресора, као и количина ваздуха који се убризгава за хлађење лопатица турбине. Узет је у обзир утицај ових промена на радне режиме. Имплементиран је и физички феномен акумулације енергије унутар конструктивних елемената компоненти, као и прогревање компонената при стартовању из хладног стања и хлађење при заустављању. У обзир је узета и динамика ротирајућих елемената гасне турбине како би се моделирало залетање вратила при стартовању, промена снаге, степена корисности и термодинамичких параметара од улаза у компресор до излаза из гасне турбине. Слична процедура је примењена и код моделирања заустављања турбине. Овај модел је приказан у поглављима 5.1-5.7.
- допринос који посебно треба истаћи је развој и имплементација модела за одређивање промене процепа између врха лопатица и кућишта (поглавље 5.4.3). Овај феномен настаје због дилатација лопатица изазваних порастом броја обртаја и различите промене димензија делова (кућишта, вратила и лопатица) при хлађењу или загревању машине у процесу стартовања или заустављања. Модел је развијен на бази теоријског разматрања и анализе експерименталних података на стварној гасној турбини. Имплементиран је увођењем мапа са карактеристикама компресора (степен корисности и степен компресије у функцији масеног протка на улазу) за различите вредности референтног процепа. Развијен је систем за интерполацију радних карактеристика када се за дате услове рада одреди актуелна висина процепа.
- развој и имплементација солвера за брзо и прецизно решавања система диференцијалних једначина који је омогућио да израчунавање свих величина са веома малим временским кораком буде бржи него што сам процес тече у реалном ремену, тако да је могућа примена код on-line праћења и анализе рада гасних турбина.

Развој горе наведене методологије је пропраћен развојем одговарајућих софтверских пакета који су опремљени графичким интерфејсом за приказ резултата и штампање извештаја.

Развијени систем за симулацију прелазних режима рада гасних турбина је примењен при развоју нових модела гасних турбина код једног од водећих светских произвођача индустријских гасних турбина.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

На основу прегледа релевантне научне литературе и постојећих решења из области прорачуна прелазних режима рада гасних турбина, Комисија констатује да су резултати истраживања приказани у овој докторској дисертацији, значајни и научно утемељени.

У односу на постојеће, нови систем за симулацију прелазних режима гасних турбина развијен у склопу ове дисертације, има следеће предности:

- обухвата више параметара и феномена,

- постиже већу прецизност с обзиром да се за прорачун радних карактеристика компресора и турбине користе модели за детаљни прорачун струјања у најширем опсегу рада,
- време израчунавања је краће од трајања од самог процеса, што омогућава on-line примену система код гасних турбина у погону,
- методологија омогућава прорачун различитих конфигурација гасних турбина, различите начине управљања, као и симулацију свих секвенци погона: стартовање из хладног и топлог стања, брзе промене оптерећења, рад на празном ходу и заустављање.

Упоређивањем задатих циљева и остварених резултата, јасно је да су примењена квалитетна решења, да развијени математички модели прецизно описују феномене који се јављају при прелазним режимима рада и да развијени софтверски пакет довољно брзо прорачунава процес. Обављен је свеобухватан експериментални рад и темељна валидација методологије поређењем нумеричких резултата са експерименталним подацима.

Развијени систем је већ нашао значајну примену код развоја нових гасних турбина.

4.3. Верификација научних доприноса и публиковање резултата

Научни резултати и доприноси остварени у дисертацији су верификовани на следећи начин:

- поређењем нумеричких и експерименталних података за једновратилну гасну турбину MAN MGT6000-1s електричне снаге 6,6 MW немачке фирме MAN Energy Solutions. За ову турбину су спроведени прорачуни радних карактеристика турбине и компресора при различитим радним условима и висинама процепа код компресора, израђене одговарајуће мапе и учитани су геометријски подаци о компонентама и систему управљања. Спроведени су свеобухватни експерименти за различите секвенце рада гасне турбине: стартовање, стационарни рад, промена оптерећења, заустављање и поновни старт из топлог стања, заустављање и хлађење машине. Спроведени су нумерички прорачуни за исте секвенце рада гасне турбине и упоређени резултати. Поређење је показало одлично слагање код свих релевантних параметара. Додатно, успешно је спроведено истраживање могућности убрзања стартовања и прорачун понашања турбине при острвском раду.
- поређењем нумеричких и експерименталних података за двовратилну гасну турбину MAN MGT6000-2s механичке снаге 6,9 MW немачке фирме MAN Energy Solutions. Овај модел има турбину високог и турбину ниског притиска које раде на одвојеним вратилима и са различитим променљивим бројем обртаја. Конфигурација је компликованија у односу на једновратилну машину. За ову турбину су, такође, спроведени прорачуни радних карактеристика турбине и компресора при различитим радним условима и висинама процепа код компресора, израђене су одговарајуће мапе и учитани геометријски подаци о компонентама и систему управљања. Спроведени су експерименти за различите секвенце рада гасне турбине: стартовање, стационарни рад, промена оптерећења, промена броја обртаја турбине ниског притиска, заустављање и хлађење машине. Спроведени су нумерички прорачуни за исте секвенце рада гасне турбине и упоређени резултати. Поређење је показало одлично слагање код свих релевантних параметара.

Научни резултати из дисертације су публиковани у најзначајнијем часопису у области топлотних турбомашина:

1. **Petkovic, D.**, Banjac, M., Milic, S., Petrovic, M.V., Wiedermann, A., Modelling the Transient Behaviour of Gas Turbines, **Trans. ASME Journal of Turbomachinery**, 2020, 142(8): 081005. **M22** (IF=2.713), <https://doi.org/10.1115/1.4046451>
2. Banjac, M., Savanovic, T., **Petkovic, D.**, Petrovic, M.V., A Comprehensive Analytical Shock Loss Model for Axial Compressor Cascades, **Trans. ASME Journal of Turbomachinery**, 2022, 144(9): 091003. **M23** (IF=1.792), <https://doi.org/10.1115/1.4053852>

Резултати су објављени и у 7 радова на међународним научним скуповима који су дати у списку радова (од редног броја 1 до 7) у оквиру тачке 1.3 овог Реферата.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу прегледа и детаљне анализе докторске дисертације под називом **Прорачун прелазних режима рада гасних турбина** кандидата **Ђорђа Д. Петковића**, маг. инж. маш., студента докторских студија, Комисија за преглед, оцену и одбрану констатује:

- да урађена докторска дисертација представља оригинални научни рад са научним доприносом у области Техничких наука - Машинство, ужој научној области Термоенергетика,
- да је написана у складу са свим стандардима за научно-истраживачке радове и
- да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању, стандардима и Статутом Машинског факултета у Београду.

Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да прихвати овај Реферат и упути га Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду на усвајање, а дисертацију **Прорачун прелазних режима рада гасних турбина** кандидата **Ђорђа Д. Петковића**, маг. инж. маш., студента докторских студија, стави на увид јавности, а да се након тога кандидат позове на јавну одбрану дисертације.

Београд. 16.06.2023.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

проф. др Драгослава Стојиљковић, ред. професор
Универзитет у Београду - Машински факултет

проф. др Милан Гојак, ред. професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

проф. др Милан Ристановић, ред. професор
Универзитет у Београду - Машински факултет

проф. др Милан Бањац, в. професор
Универзитет у Београду - Машински факултет

проф. др Будимир Росић, в. професор
Универзитет у Оксфорду, Факултет инжењерских наука

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број: 672/4
Датум: 07.09.2023. године
Београд, Краљице Марије бр. 16

На основу члана 40. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 88/2017 и 27/2018-др. закон), члана 41. Правилника о докторским студијама на Универзитету у Београду, члана 64. Статута Машинског факултета – пречишћени текст (број 1136/4 од 28.06.2021. године), Одлуке о изменама и допунама Статута број 239/6 од 17.02.2023. године и члана 46. Правилника о докторским студијама Машинског факултета, Наставно-научно веће на седници одржаној 07.09.2023. године, донело је

ОДЛУКУ

Усваја се извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације **„ПРОРАЧУН ПРЕЛАЗНИХ РЕЖИМА РАДА ГАСНИХ ТУРБИНА“** студента **ЂОРЂА ПЕТКОВИЋА**, маг. инж. маш.

Јавна одбрана докторске дисертације обавиће се по добијању сагласности Универзитета у Београду.

Универзитет у Београду је својом Одлуком број 61206-1751/2-22, од 11.05.2022. године, дао сагласност на предлог теме докторске дисертације.

Објављени радови студента у часописима међународног значаја:

1. **Petkovic, D.**, Banjac, M., Milic, S., Petrovic, M.V., Wiedermann, A., Modelling the Transient Behaviour of Gas Turbines, **Trans. ASME Journal of Turbomachinery**, 2020, 142(8): 081005. **M22** (IF=2.713), <https://doi.org/10.1115/1.4046451>

Одлуку доставити: студенту, ментору, Катедри за термоенергетику и архиви Факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Владимир Поповић

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број:672/2
Датум: 04.05.2023. године
Београд, Краљице Марије бр.16

На основу обавештења др Милана Петровића, ред. проф., ментора да је студент **Ђорђе Петковић**, маг. инж. маш., завршио докторску дисертацију **“Прорачун прелазних режима рада гасних турбина”**, уз сагласност свих чланова Већа наставника Катедре за термоенергетику, а сагласно члану 40. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 88/2017, 27/2018 – др. закон 73/2018, 67/2019, 11/2021 – аутентично тумачење, 67/2021 – др. Закон, 67/2021) и члану 43. Правилника о докторским студијама Машинског факултета, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној дана 04.05.2023. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

- др Драгослава Стојиљковић, ред. проф.,
- др Милан Гојак, ред. проф.
- др Милан Ристановић, ред. проф.
- др Милан Бањац, ванр. проф.
- др Будимир Росић, associate professor, Универзитет у Оксфорду, Факултет инжењерских наука

именују се за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације **«ПРОРАЧУН ПРЕЛАЗНИХ РЕЖИМА РАДА ГАСНИХ ТУРБИНА»** студента **ЂОРЂА ПЕТКОВИЋА**, маг. инж. маш.

Одлуку доставити: члановима Комисије, студенту и архиви Факултета.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Владимир Поповић