

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 upravljane 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 termoenergetskih 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 истоветности 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 Приступу 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 регулације при наглим променама оптерећења. Затим је укључен систем регулације 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 **Ђорђе 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.

Упоредивањем 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 публикавање 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**, магст. 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**, магст.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