

Факултет Машински

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

237/6

(Број захтева)

14.04.2022.

(Датум)

Веће научних области техничких наука

(Назив већа научне области коме се захтев
упућује)

ЗАХТЕВ

за давање сагласности на одлуку о прихватању теме докторске дисертације и о одређивању ментора

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тач. 3. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета", број 186/15-пречишћени текст и 189/16), дате сагласност на одлуку о прихватању теме докторске дисертације:

„ПРОРАЧУН ПРЕЛАЗНИХ РЕЖИМА РАДА ГАСНИХ ТУРБИНА“

(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ

Термоенергетика

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног од родитеља и презиме кандидата:
ЂОРЂЕ (ДРАГОЉУБ) ПЕТКОВИЋ
2. Претходно образовање (назив и седиште факултета, студијски програм):
Мастер академске студије - Машински факултет Београд
3. Година завршетка претходног нивоа студија: 2017.
4. Година уписа на докторске студије: 2017.
5. Назив студијског програма докторских студија: Машинско инжењерство

ПОДАЦИ О МЕНТОРУ:

Име и презиме ментора:

Милан Петровић

Звање:

редовни професор

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Banjac, M., Savanovic, T., Petkovic, D., Petrovic, M. V. "A Comprehensive Analytical Shock Loss Model for Axial Compressor Cascades." **Trans of the ASME. J. Turbomach.** 2022, 144(9): 091003. <https://doi.org/10.1115/1.4053852> M22, петогодишњи IF=1.967 за 2020
2. Petkovic, D., Banjac, M., Milic, S., Petrovic, M. V., Wiedermann, A., Modeling the Transient Behavior of Gas Turbines." **Trans of the ASME. J. Turbomach.** 2020, 142(8): 081005. <https://doi.org/10.1115/1.4046451> , M22, петогодишњи IF=1.967 за 2020.
3. Banjac M., Petrovic M.V., Wiedermann A., Secondary Flows, Endwall Effects, and Stall Detection in Axial Compressor Design. **Trans of the ASME, J. Turbomach.** 2015, 137(5), pp. 051004 (12 pages); ISSN 0889-504X, [doi:10.1115/1.4028648](https://doi.org/10.1115/1.4028648), M23, петогодишњи IF=0.896 за 2015
4. Banjac, M., Petrovic, M.V., Wiedermann, A., A New Loss And Deviation Model For Axial Compressor Inlet Guide Vanes, **Trans of the ASME. J. Turbomach.**, 2014, 136(7), pp. 071011(1-13); [doi:10.1115/1.4025956](https://doi.org/10.1115/1.4025956) M22, петогодишњи IF=1302 за 2014.
5. Petrovic, M.V., Wiedermann, A., Through-Flow Analysis of Air-Cooled Gas Turbines, **Trans of the ASME. J Turbomach.**, 2013, 135(6). pp. 061019 (1-8), ISSN 0889-504X, doi:10.1115/1.4023463 M22, петогодишњи IF=1,214 за 2013
6. Tucakovic, D., Stupar, G., Zivanovic, T., Petrovic, M., Belosevic, S., Possibilities for reconstruction of existing steam boilers for the purpose of using exhaust gases from 14 MW or 17 MW gas turbine, **Applied Thermal Engineering**, 2013. 56(1-2), pp. 83-90, ISSN 1359-4311, <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.03.028>, M21а петогодишњи IF=2,880 за 2013
7. Banjac, M. B., Đukanovic, D. R., Petrovic, M. V., Techno-Economic Analysis of Gas Turbine-Based C.H.P. Plant Operation under a Feed-in Tariff System, **Thermal Science** 2020, 24(6 Part B), pp. 4103-4114, <https://doi.org/10.2298/TSCI200103150B>, M23, петогодишњи IF=1.701 за 2020.
8. Milic, S., Petrovic, M.V., Banjac, M., Djukanovic, D., Nedeljkovic, S.M.: Analysis of Operation of the Condenser in a 120 MW Thermal Power Plant, **Thermal Science**, 2018 Vol. 22(1), Part B, Pages: 735-746 <https://doi.org/10.2298/TSCI170903242M> M22, IF=1.541 за 2018
9. Mohammed M.S., Petrovic M.V., Thermoeconomic optimization of triple pressure HRSG operating parameters for combined cycle plants, **Thermal Science**, 2015, 19(2), pp. 447-460, ISSN 0354-9836, [doi:10.2298/TSCI131124040M](https://doi.org/10.2298/TSCI131124040M), M23, петогодишњи IF=0,955 за 2015.
10. Alus, M., Petrovic, M.V., 2012, Optimization of the triple-pressure combined cycle power plant, **Thermal Science**, 16(3), pp. 901-914, ISSN 0354-9836, DOI: [10.2298/TSCI120517137A](https://doi.org/10.2298/TSCI120517137A) M22 петогодишњи IF=0,931 за 2012

Обавештавамо вас да је Наставно – научно веће на седници одржаној 14.04.2022. године размотрило предложену тему и закључило да је тема подобна за израду докторске дисертације јер садржи оригиналну идеју и да је од значаја за развој науке, примену њених резултата, односно развој научне мисли уопште.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Прилог:

1. Одлука Наставно-научног већа о прихватању теме и одређивању ментора
2. Извештај Комисије о оцени научне заснованости теме докторске дисертације

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

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -

Број: 237/6

Датум: 14.04.2022. године

Београд, Краљице Марије 16

На основу захтева студента **Ђорђа Петковића**, маг. инж. маш., бр. 237/1 од 04.02.2022. године да му се одобри израда докторске дисертације, реферата 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, ванредни професор, Универзитет у Оксфорду, Факултет инжењерских наука, Велика Британија број 237/5 од 11.04.2022. године, а на основу члана 30. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 76/2005, 100/2007 – аутентично тумачење, 97/2008, 93/2012 и 89/2013), члана 64. Статута Машинског факултета – пречишћени текст (број 1136/4 од 28.06.2021. године) и члана 30. Правилника о докторским студијама Машинског факултета, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 14.04.2022. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Прихвата се научна заснованост теме докторске дисертације и констатује да студент **ЂОРЂЕ ПЕТКОВИЋ**, маг. инж. маш, испуњава услове за израду докторске дисертације **«ПРОРАЧУН ПРЕЛАЗНИХ РЕЖИМА РАДА ГАСНИХ ТУРБИНА»**.

Одлуком ННВ број 237/3, од 10.03.2022. године за ментора докторске дисертације Ђорђа Петковића, маг. инж. маш. именован је др Милан Петровић, ред. проф.

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

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Владимир Поповић

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

Предмет: Подобност теме и кандидата за израду докторске дисертације студента докторских студија г. **Ђорђа Петковића**, магист. инж. маш.

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета у Београду бр. 237/4 од 10.03.2022. именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата г. **Ђорђа Петковића**, магист. инж. маш. под називом **Прорачун прелазних режима рада гасних турбина** под менторством проф. др Милана Петровића.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

РЕФЕРАТ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Ђорђе 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, одбранио је 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. 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.

1.2. Сечено научноистраживачко искуство

1.2.1. Списак положених испита

Кандидат **Ђорђе Петковић** је уписао Докторске академске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду школске 2017/2018. године. Положио је све испите предвиђене Програмом усавршавања са просечном оценом 10,00. Приказ свих положених испита је дат у наредној табели

Р. бр.	Назив предмета	Предметни професор	год. студија (ЕСПБ)				оцена испита
			1. год.		2. год.		
			I	II	III	IV	
1.	Виши курс математике	проф. др С. Радојевић проф. др И. Аранђеловић	5				10 (десет)
2.	Нумеричке методе	проф. др М. Спалевић проф. др А. Цветковић	5				10 (десет)
3.	ОМНИР и комуникација	проф. др М. Недељковић	5				10 (десет)
4.	Оптимизација термоенергетских постројења	проф. др М. Петровић	5				10 (десет)
5.	Истраживање и публикување I	проф. др М. Петровић	10				10 (десет)
6.	Одабрана поглавља из механике флуида	проф. др М. Лечић ванр. проф. др А. Ћоћић		5			10 (десет)
7.	Режими и енергетска ефикасност термоенергетских постројења	проф. др М. Петровић		5			10 (десет)
8.	Виши курс линеарних система	проф. др М. Ристановић		5			10 (десет)
9.	Истраживање и публикување II	проф. др М. Петровић		15			10 (десет)
10.	Струјање у топлотним турбомашинама	проф. др М. Петровић			5		10 (десет)
11.	Моделирање турбулентних струјања	ванр. проф. др А. Ћоћић			5		10 (десет)
12.	Истраживање и публикување III	проф. др М. Петровић			20		10 (десет)
13.	Истраживање и публикување IV	проф. др М. Петровић				8	10 (десет)
14.	Пројекат идеје докторске дисертације	проф. др М. Петровић, ванр. проф. др М. Бањац, доц. др С. Милић				22	10 (десет)

Просечна оцена 10,00 (девет и 00/100).

1.2.2. Списак објављених радова

Радови објављени у међународним часописима

1. **Petkovic, D.**, Banjac, M., Milic, S., Petrovic, M. V., Wiedermann, A., Modelling the Transient Behaviour of Gas Turbines, ASME J. Turbomach., 2020, 142(8): 081005.
2. Banjac, M., Savanovic, T., **Petkovic, D.**, Petrovic, M.V., A Comprehensive Analytical Shock Loss Model for Axial Compressor Cascades, ASME J. Turbomach., 2022, 144(9): 091003.

Радови представљени на научним скуповима

1. 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.
2. 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.
3. Banjac, M., Savanovic, T., **Petkovic, D.**, Petrovic, M.V., A Comprehensive Analytical Shock Loss Model for Axial Compressor Cascades, ASME Paper GT2021-58580, Proc. ASME Turbo 2021: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Volume 2A: Turbomachinery. Virtual, Online. June 7-11 (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 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, ASME Paper GT2019-91008, Proc. ASME Turbo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Volume 2A: Turbomachinery. Phoenix, Arizona, USA. June 17-21 (2019)

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

Техничка решења

1. Петровић, М., Милић, С., Бањац, М, С., Ђукановић, **Петковић, Ђ.**, Систем за онлине управљање парне турбине и анализа рада са термотехничким испитивањима парног турбопостројења ТЕ Плјевља снаге 225 MW, Машински факултет, Београд, 2020, ЛТТ-02/19, рађено за Електропривреду Црне Горе
2. Петровић, М., Милић, С., Бањац, М, С., Ђукановић, **Петковић, Ђ.**, Термотехничка испитивања постројења за комбиновану производњу топлотне и електричне енергије ТО Нови Сад – Југ, Машински факултет, Београд, 2020., ЛТТ-8/19, рађено за Енерготехника-Јужна Бачка д.о.о. Нови Сад
3. Петровић, М., Милић, С., Бањац, М, С., Ђукановић, **Петковић, Ђ.**, Термотехничка испитивања парног турбопостројења ТЕ Гацко снаге 300 MW, Машински факултет, Београд, 2020., ЛТТ4/19, рађено за Електропривреду Републике Српске
4. Петровић, М., Милић, С., Бањац, М, С., Ђукановић, **Петковић, Ђ.**, Термотехничка испитивања парног турбопостројења ТЕ Угљевик снаге 300 MW, Машински факултет, Београд, 2020., ЛТТ5/19, рађено за Електропривреду Републике Српске
5. Петровић, М., Милић, С., Бањац, М, С., Ђукановић, **Петковић, Ђ.**, Математички модели турбопостројења са контролним прорачунима, анализом рада и предлогом мера за побољшање стања у ТЕ Гацко, Машински факултет, Београд, 2020., ЛТТ6/19, рађено за Електропривреду Републике Српске
6. Петровић, М., Милић, С., Бањац, М, С., Ђукановић, **Петковић, Ђ.**, Математички модели турбопостројења са контролним прорачунима, анализом рада и предлогом мера за побољшање стања у ТЕ Угљевик, Машински факултет, Београд, 2020., ЛТТ7/19, рађено за Електропривреду Републике Српске
7. Петровић, М., Милић, С., Бањац, М, С., Ђукановић, **Петковић, Ђ.**, Оптимизација производње топлоте за даљинско грејање Београда из блокова А3-А6 у ТЕ „Никола Тесла А“, Машински факултет, Београд, 2019., ЛТТ-4/18, рађено за Енергопројект-Ентел и ЈП Електропривреда Србије, 2019.
8. Петровић, М., Милић, С., Бањац, М, С., Ђукановић, **Петковић, Ђ.**, Термотехничка испитивања парног турбопостројења ТЕ Костолац А2 снаге 210 MW, ЛТТ 1/19, Машински факултет, Београд, 2019. и ЈП Електропривреда Србије, 2019.
9. Живановић, Т. (руководилац дела котао), Петровић, М. (руководилац дела турбопостројење), Туцаковић, Д., Милић, С., Ступар, Г., Бањац, М, Ђукановић, Д., Ранковић, М., **Петковић, Ђ.**, Контролни прорачуни главних термоенергетских постројења, котловског и турбопостројења, у склопу пројектовања и изградње новог Блока Б3 у ТЕ Костолац, Машински факултет, Београд, 2018., ЛТТ-9/16, рађено за ЈП Електропривреда Србије
10. 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, Рађено за фирму EscherTec, Zuerich, Швајцарска
11. 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, Рађено за фирму EscherTec, Zuerich, Швајцарска
12. Петровић, М., Милић, С., Бањац, М., Ђукановић, Д., **Петковић, Ђ.**, Термодинамичка испитивање и анализа рада турбосета у постројењу Азотона киселина, III линија у ХИП Азотара, Панчево, Машински факултет, Београд, 2018., ЛТТ-01/18, рађено за ХИП Азотара Панчево
13. Петровић, М., Милић, С., Бањац, М., Ђукановић, Д., **Петковић, Ђ.**, Гаранцијска испитивања турбине и турбопостројења ТЕНТ А4, ИЦ Машински факултет, Београд, 2018. LTT-02/18, рађено за Електропривреду Србије

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Кандидат Ђорђе Петковић, студент докторских студија на Машинском факултету Универзитета у Београду, је завршио студије на Машинском факултету у Београду и стекао диплому мастер инжењера машинства. Током докторских студија положио је све предвиђене испите планом докторских студија укључујући лабораторијски рад и припреме за пријаву дисертације и стекао 120 ЕСПБ бодова. Одбранио пројекат идеје за израду дисертације. Одржавао је наставу више година на Машинском факултету у Београду, објавио је више радова у часописима и на међународним конференцијама и учествовао у изради више научних пројеката и техничких решења.

Кандидат је уведен у проблематику докторске дисертације припремом и полагањем предмета, израдом и презентацијом радова на међународним конференцијама, истраживачко-развојним пројектима и интензивним лабораторијским радом. Тиме су се стекли формални и стварни услови за наставак рада докторској дисертацији са предложеним насловом.

2. Предмет и циљ истраживања

Преко 60% електричне енергије у свету се производи у термоелектранама на фосилна горива. Због ограничених резерви горива, али и последица емисије штетних материја на околину, тежи се повећању удела обновљивих извора у производњи електричне енергије. Непредвидива природа ових извора енергије у погледу тренутног капацитета, доводи до нестабилности електроенергетског система, што се може ублажити флексибилним радом термоелектрана на фосилна горива. Тако се од постојећих термоенергетских постројења све чешће захтевају брзе промене оптерећења, али и учестала стартовања и заустављања. Како су савремени парни блокови изузетно сложени системи са великим бројем компонената, карактерише их велика инертност и лошије динамичке карактеристике. Сходно томе, гасни блокови су најпогоднији кандидати за покривање разлика које могу настати услед наглих промена у билансу производње и потрошње електричне енергије. Приликом пројектовања једне гасне турбине, поред карактеристика на номиналном и парцијалним режимима рада, морају се размотрити и њене динамичке карактеристике и понашање у прелазним режимима рада.

Први динамички модел гасне турбине је развијен почетком 50-их година прошлог века од стране Ота и Тејлора [1] где је показано да се понашање турбомлазних авиона може описати системом првог реда. Овакав модел, који се може сматрати линеарним, даје поуздане резултате само у близини стационарног радног режима. Неколико година касније, Дуган [2] и Филипи и Дуган [3] су развили нови модел у коме је гасна турбина представљена нелинеарним системом. Овај метод укључује само поремећаје изазване разликом рада али са претпоставком да је масени проток на улазу у компоненту једнак протоку на излазу. Фавке и Сараванамуту [4] дефинишу овај метод као итеративни и упоређују га са ICV методом (ICV - intercomponent volume) која укључује неједнакост рада и протока. ICV метод има физички смисао и широко се примењује код динамичким модела [5–9].

Већина модела, који су развијени од 80-их година прошлог века, може се поделити у две групе: нуладимензијски (0Д) и једнодимензијски (1Д). Нуладимензијски модели користе постојеће карактеристике компоненти и једноставне релације које описују њихову интеракцију. Тиме се добија кратко време прорачуна па се могу применити за симулацију рада у реалном времену [5-7]. Ови моделу су веома зависни од тачности карактеристика које се добијају на основу експерименталних резултата или нумеричких резултата у случају примене комплексних алата за аеродинамички прорачун компресора и турбине. Компресори обично имају променљиву геометрију и неколико одузимања ваздуха што се мора узети у обзир при прорачуну. Код постојећих модела ефекти променљиве геометрије на понашање компресора нису дефинисани [5,6] или су коришћене методе скалирања постојећих карактеристика [7]. Скалирање се може приметити само у близини познатог радног режима али у екстремнијим случајевима, када је покретно претколо затворено, овај приступ даје лоше резултате. Поред тога, у постојећим моделима, ефекти одузимања ваздуха из компресора и убризгавања у турбину нису обухваћени. Такође, већина динамичких модела не разматра размену топлоте између конструктивних елемената и радног флуида [5,6,8] али која има значајан утицај при великим променама температуре што се догађа током стартовања и наглих промена оптерећења. Једнодимензијски модели дају бољи увид у динамику унутар компоненте али су рачунски захтевни и посебна пажња мора бити посвећена стабилности и конвергенцији прорачуна [9].

Претходно развијени модели су базирани само на једном сегменту нестационарног рада гасних турбина. Неки модели су примењени за симулирање наглих промена оптерећења [5,6], док се други користе за симулирање стартовања [10,11]. Међутим, процедура заустављања је ретко симулирана. Постоје неколико модела који су примењени за микро гасне турбине [12,13]. Такође, постоје дводимензијски модели за термичку анализу понашања гасне турбине током заустављања [14,15].

У склопу планираног истраживања биће развијен систем за симулацију прелазних режима гасних турбина који ће, у односу на постојеће, бити свеобухватнији пошто ће обухватити више параметара и феномена. Он ће бити и прецизнији с обзиром да ће се за прорачун радних катактеристика компресора и турбине користити модели за детаљни прорачун струјања у најширем опсегу рада. Време израчунавања ће бити краће од самог процеса, што ће омогућити on-line примену система код гасних турбина у погону.

Прелазним или транзијентним режимима рада се називају нестационарни процеси преласка из једног стационарног стања у друго. За изучавање прелазних режима гасног блока битно је размотрити следеће карактеристичне физичке процесе:

- тренутно квазистатичко стање сваке компоненте,
- акумулацију масе и енергије радног флуида у запремини проточног дела машине,
- акумулацију топлоте загревањем металних елемената турбоагрегата,
- промену величине различитих зазора између ротационих и стацiorних елемената услед промене температуре метала,
- кашњење процеса сагоревања у грејној комори, услед потребног времена од тренутка убризгавања горива до његовог сагоревања,
- одзив система регулације.

Набројане појаве имају различит утицај на промену стања целокупног система и математички се могу описати основним законима термодинамике и једнодимензијским струјним моделом. Предложени концепт система укључује неколико основних компоненти постројења, при чему су карактеристични физички процеси у свакој компоненти описани одговарајућим законитостима. Опис неких компоненти подразумева алгебарске и диференцијалне релације између појединачних физичких величина, док се тренутно радно стање саме турбине или компресора дефинише употребом готових радних карактеристика. Ове радне карактеристике биће претходно израчунате постојећим рачунарским кодом за дводимензијски аеродинамички прорачун аксијалних турбина и компресора.

Прорачун се спроводи за сваку гасну турбину на основу следећих података:

- конфигурације гасне турбине са основним термодинамичким параметрима на номиналном режиму рада,
- основних геометријских података (броја ступњева компресора и турбине, масе појединих компоненти, поларни момент инерције вратила),
- података о одузимањима из компресора и убризгавањима у гасну турбину у случају хлађења лопатица,
- радних карактеристика компресора и турбине.

Модел за прорачун треба да у себи садржи следеће модуле:

- компресор,
- грејну комору,
- гасну турбину,
- усисни и издувни систем,
- систем управљања.

Као резултат прорачуна се добија:

- номинална радна тачка,
- промене термодинамичких параметара и протока током задатог прелазног процеса,
- промене параметара током једног или више сукцесивних стартовања и заустављања,

- топлотни флуksi између радног флуида и металних елемената компоненти као и њихово термичко стање,
- промене радијалних зазора компресора и турбине.

Модел за прорачун треба да има флексибилну структуру у циљу омогућавања прелазних процеса различитог интензитета.

Време извршења прорачуна треба да буде краће од стварне промене како би се модел могао применити за праћење, анализу и дијагностику рада постројења у реалном времену.

Резултате прорачуна је потребно упоредити са експерименталним подацима на примерима једновратилне и двовратилне турбине.

- [1] Otto, E. W., Taylor, B. L., 1950, "Dynamics of a Turbo-jet Engine Considered as a Quasi-Static System," NACA Report TN-2091.
- [2] Dugan, J. F., 1955, "Component Operating Trends during Acceleration and Deceleration of Two Hypothetical Two-Spool Turbojet Engines," NACA Report RM-E54L28.
- [3] Filippi, R. E., Dugan, J. F., 1956, "Effect of Design Over-All Compressor Pressure Ratio Division on Acceleration Characteristics of Three Hypothetical Two-Spool Turbojet Engines," NACA Report RM-E56D13.
- [4] Fawke, A. J., Saravanamuttoo, H. I. H., 1971, "Digital Computer Methods for Prediction of Gas Turbine Dynamic Response," SAE Transactions, Vol. 80, pp. 1805-1813.
- [5] Camporeale, S. M., Fortunato, B., Mastrovito, M., 2006, "A Modular Code for Real Time Dynamic Simulation of Gas Turbines in Simulink," ASME J. Eng. Gas Turbines Power, 128(3), pp. 506-517.
- [6] Kim, J. H., Song, T. W., Kim, T. S., Ro, S. T., 2001, "Model Development and Simulation of Transient Behavior of Heavy Duty Gas Turbines," ASME J. Eng. Gas Turbines Power, 123, pp. 589-594.
- [7] Panov, V., 2009, "GasTurboLib: Simulink Library for Gas Turbine Engine Modelling," ASME Paper No. GT2009-59389.
- [8] Kurzke, J., 1995, "Advanced User-Friendly Gas Turbine Performance Calculations on a Personal Computer," ASME 95-GT-147.
- [9] Schobeiri, T., 1986, "A General Computational Method for Simulation and Prediction of Transient Behavior of Gas Turbines," ASME Paper No. 86-GT-180.
- [10] Kim, J. H., Song, T. W., Kim, T. S., Ro, S. T., 2002, "Dynamic Simulation of Full Startup Procedure of Heavy Duty Gas Turbines," ASME J. Eng. Gas Turbines Power, 124 (3), pp. 510-516
- [11] Kim, J. H., Kim, T. S., 2019, "Development of a Program to Simulate the Dynamic Behavior of Heavy-Duty Gas Turbines During the Entire Start-Up Operation Including Very Early Part," J. Mech. Sci. Technol., 33, 4495–4510.
- [12] Traverso, A., 2005, "TRANSEO Code for the Dynamic Performance Simulation of Micro Gas Turbine Cycles," ASME Paper No. GT2005-68101.
- [13] He, T., Li, D., Xue, Y., 2019, "Start Up and Shut Down Simulation of Micro Gas Turbine Based on Reinforcement Learning," International Conference on Applied Energy 2019, Paper No. 693.
- [14] Svendsdotter, S., Skelton, L., Ingle, J., 2007, "Shutdown Modelling to Extend Operation to Extreme Ambient Conditions," ASME Paper No. GT2007-28110.
- [15] Reddy, V. V., Selvam, K., De Prosperis, R., 2016, "Gas Turbine Shutdown Thermal Analysis and Results Compared with Experimental Data," ASME Paper No. GT2016-56601.

3. Полазне хипотезе

У овој докторској дисертацији се полази од следећих основних хипотеза:

- Повећање удела обновљивих извора у производњи електричне енергије захтева флексибилан рад термоенергетских постројења. Развојем модела за предвиђање прелазног понашања гасних турбина омогућава се оптимизација стартовања и заустављања, чиме се смањује број експеримената и постиже уштеда у току фазе развоја.
- Постојећи модели су примењиви само за један сегмент транзијентних режима рада, претежно за нагле промене оптерећења или стартовање. Не постоје адекватни модели за симулирање заустављања гасне турбине.

- Свеобухватни динамички модел постројења гасне турбине је применљив за тестирање појединих елемената система управљања.
- На основу апстрактног модела могуће је упоредити понашање стварне машине са резултатима прорачуна и детектовати одступање појединих параметара од очекиваних вредности.

4. Научне методе истраживања

Методе које ће се у истраживањима користити обухватају:

- моделирање термодинамичких и струјних процеса трансформације унутрашње енергије у механички рад,
- моделирање размене 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,
- валидација динамичког модела на основу расположивих експерименталних података.

5. Очекивани резултати и научни допринос

Очекује се да из истраживања произађе следећи научни допринос:

- Нови систем за симулацију прелазних режима гасних турбина који ће, у односу на постојеће, обухватити више параметара и феномена. Он ће бити и прецизнији с обзиром да ће се за прорачун радних катактеристика компресора и турбине користити модели за детаљни прорачун струјања у најширем опсегу рада. Време израчунавања ће бити краће од самог процеса, што ће омогућити on-line примену система код гасних турбина у погону.
- Методологија ће омогућавати прорачун различитих конфигурација гасних турбина, различите начине управљања као и симулацију свих секвенци погона: стартовање из хладног стања, брзе промене оптерећења, рад на празном ходу, заустављање и стартовање из различитих термичких стања.

Очекује се да ће развијени систем имати примену у пракси и то:

- У фази пројектовања гасних турбина за оптимизацију параметара у циљу побољшања динамичких карактеристика постројења.
- Код постојећих постројења за праћење и анализу рада. Очекује се да се применом овог модела може повећати расположивост и животни век машина.

6. План истраживања и структура рада

Планом истраживања предвиђене су следеће целине:

1. Развој методологије за моделирање компонената постројења са гасним турбинама.
2. Моделирање рада постројења на прелазним режимима.
3. Развој и тестирање рачунарског програма.
4. Демонстрација развијеног система на примеру једновратилне и двовратилне турбине.

Структура докторске дисертације обухвата следеће оквирне целине које ће бити обрађене:

1. Уводна разматрања и опис проблема који се истражује.
2. Приказ и дискусија постојећих математичких модела и системе за прорачун.
3. Развој математичког модела и нумеричког кода.
4. Валидација математичког модела и верификација нумеричког кода.
5. Закључак о оствареним резултатима и научном доприносу докторске тезе, као и предлог наставка истраживања у овој научнотехничкој области.

7. Закључак и предлог

На основу изложеног приказа предложене теме и досадашњих активности кандидата, Комисија је дошла до следећих закључака:

Анализом пријаве теме кандидата **Ђорђа Петковића**, маг. инж. маш., Комисија за оцену подобности и научне заснованости теме закључује да је предложена тема изузетно актуелна за израду докторске дисертације, као и да кандидат испуњава све предвиђене услове прописане Законом о високом образовању и Статутом Машинског факултета, при чему поседује истраживачке способности за рад на докторској дисертацији.

Предложена тема **Прорачун прелазних режима рада гасних турбина** је актуелна с обзиром на растући значај енергетике, све већу примену обновљивих извора енергије, захтеве за брзим стартом и флексибилним погоном гасних турбина које у будућим електроенергетским системима треба да играју једну од главних улога. Планира се примена модерних аналитичких и нумеричких метода. Предвиђени научни доприноси ће допринети унапређењу научних знања у области термоенергетике и развоју система за симулацију прелазних режима рада гасних турбина..

Кандидат, студент докторских студија **г. Ђорђе Петковић**, маг. инж. маш., испунио је све услове предвиђене програмом ових студија за пријаву дисертације. Положио је испите који укључују и лабораторијски рад, изложио је више радова на међународним конференцијама, учествовао је у домаћим и међународним научноистарживачким пројектима и израдио више техничких решења. Кандидат је више година одржавао вежбе из Групе предмета Топлотне турбомашине и Термоенергетска постројења на Машинском факултету у Београду.

Комисија предлаже Већу докторских студија да се студенту докторских студија Машинског факултета Универзитета у Београду, **г. Ђорђу Петковићу**, одобри израда докторске дисертације под насловом **Прорачун прелазних режима рада гасних турбина**. Тема припада области техничких наука – машинство, ужој научној области **Термоенергетика**. За ментора ове докторске дисертације предлаже се проф. др Милан Петровић.

Београд, април 2022.

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,
В. Британија

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
- МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ –
Број: 237/3
Датум: 10.03.2022. године
Београд, Краљице Марије бр.16

На основу члана 64. Статута Машинског факултета Универзитета у Београду – пречишћен текст, арх. бр. 1136/4 од 28.06.2021. године и члана 20. а сагласно члану 29. Правилника о докторским студијама на Универзитету у Београду од 24.05.2016.г., Наставно-научно веће Машинског факултета на седници одржаној дана 10.03.2022. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Именује се **др Милан Петровић, ред. проф.** за ментора докторске дисертације **„Прорачун прелазних режима рада гасних турбина“** кандидата **Ђорђа Петковића, маст. инж. маш.**, студента докторских студија.

Одлуку доставити: ментору, докторанту и архиви.

ДЕКАН
МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

проф. др Владимир Поповић