

проф. др Милан Петровић, ред. професор, Универзитет у Београду - Машински факултет, ментор
проф. др Драгослава Стојиљковић, ред. професор, Универзитет у Београду - Машински факултет
проф. др Драган Туцаковић, ред. професор, Универзитет у Београду - Машински факултет
проф. др Милан Гојак, 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 **Срђана Б. Милића**, мас. инж. маш., студента докторских студија

Одлуком Наставно-научног веће Машинског факултета Универзитета у Београду бр. 859/2 од 25.06.2020. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Срђана Б. Милића, под насловом:

СИСТЕМ ЗА ПРОРАЧУН ТОПЛОТНИХ ШЕМА И АНАЛИЗУ РАДА ТЕРМОЕНЕРГЕТСКИХ ПОСТРОЈЕЊА СА ПАРНИМ ТУРБИНАМА

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 Срђан Б. Милић је уписао Докторске академске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду школске 2011/2013. године. Положио је испите из свих предмета предвиђених наставним планом и програмом за ниво Докторских академских студија са просечном оценом 10,00 (десет). Због ангажовања на научноистраживачким пројектима, кандидат је у неким школским годинама имао статус мировања (2014/15) као и статус продужетака (2018/2019, 2019/20 и 2020/21) година студија.

Наставнонаучно веће Машинског факултета Универзитета у Београду је на седници одржаној 01.06.2017. године донело Одлуку бр. 1112/2 да се тема докторске дисертације, кандидата **Срђана Б. Милића**, под називом **Систем за прорачун топлотних шема и анализу рада термоенергетских постројења са парним турбинама** прихвата а на седници од 17.07.2017. донело Одлуку бр. 1112/4 о заснованости теме и испуњености услова за израду тезе. За ментора рада је именован проф. др Милан Петровић. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је донело Одлуку бр. 61206-3092/2-17 од 28.08.2017., којом се даје сагласност на предлог теме докторске дисертације **Срђана Б. Милића** под називом **Систем за прорачун топлотних шема и анализу рада термоенергетских постројења са парним турбинама**.

На основу обавештења ментора да је кандидат завршио тезу, Одлуком Наставно-научног веће Машинског факултета Универзитета у Београду бр. 859/2 од 25.06.2020. именована је комисија за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Срђана Б. Милића у саставу:

- проф. др Милан Петровић, ред. професор Универзитет у Београду-Машински факултет, ментор,
- проф. др Драгослава Стојиљковић, ред. професор Универзитет у Београду-Машински факултет,
- проф. др Драган Туцаковић, ред. професор, Универзитет у Београду-Машински факултет,

- проф. др Милан Гојак, 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 Срђана Б. Милића, под називом **Систем за прорачун топлотних шема и анализу рада термоенергетских постројења са парним турбинама** припада научној области Машинство, ужа научна област Термоенергетика – топлотне турбомашине и термоенергетска постројења.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Срђан Милић је рођен 10.06.1987. године у Прилепу, Република Македонија. Основну школу и средњу машинску школу је завршио у Панчеву.

Машински факултет у Београду је уписао 2006. године. Основне академске студије (B.Sc.) је завршио 2009. године, а Дипломске академске студије (M.Sc.) 2011. године, на Модулу за термоенергетику, са укупном просечном оценом 9,91 (девет и 91/100). Дипломирао је са оценом 10 (десет) код ментора проф. др Милана Петровића. Током студија је примао стипендију Фонда за младе таленте "Доситеј".

У периоду август - септембар 2011. је боравио на стручној пракси у фирми АЛСТОМ (данас Џенерал Електрик), Елблаг, Пољска.

На Машинском факултету у Лабораторији за топлотне турбомашине је запослен од 01.01.2012. године где је радио као сарадник на истраживању. У звање асистента за ужу научну област Термоенергетика за Групу предмета топлотне турбомашине и термоенергетска постројења је изабран децембра 2014. а реизабран у истом звању 2018. године.

Од 01.01.2012. учествује на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја "Систем за оптимизацију рада термоблокова капацитета преко 300 MW" (Евиденциони број пројекта III 42007). Такође, од 2016. године учествује на међународном пројекту Horizon 2020 "Flexible Fossil Power Plants for the Future Energy Market through new and advanced Turbine Technologies, HORIZON 2020", (2016-2018, Grant No. 653941 codeword: FLEXTURBINE).

Учествовао је у изради научних и развојних пројеката и студија из области термоенергетике и испитивања парних турбопостројења. Ужа научна област, којом се бави је Топлотне турбомашине и термоенергетска постројења.

Говори енглески језик.

Познаје програмске језике FORTRAN, C, C++, Qt Frameworks и корисничке рачунарске програме: AutoCAD, Catia, као и основну администрацију на оперативним системима GNU/Linux.

Водећи је аутор и коаутор у више радова представљених на скуповима од међународног значаја и у часописима.

Објављени радови

Радови у међународним часописима

1. Petkovic, D., Banjac, M., **Milic, S.**, Petrovic, M. V., Wiedermann, A. Modelling the Transient Behaviour of Gas Turbines. **Trans of the ASME, Journal of Turbomachinery**, 2020, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4046451>, ИФ=2866, 39/130 (за 2019.) **M21**
2. **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 Volume 22, Issue 1 Part B, Pages: 735-746 <https://doi.org/10.2298/TSCI170903242M> ИФ=1.541 35/60 (за 2018.) **M22**

Радови објављени у домаћим часописима

1. Бањац, М., Ђукановић, Д., **Милић, С.**, Недељковић, С., Петровић, М.: Могућности примене комбиноване производње електричне енергије и топлоте у јавним објектима посебне намене. **КГХ**, ISSN, 0350-1426 1/2015.

Радови представљени на научним скуповима

1. 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) V02AT45A014

2. 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)
3. 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/>
4. Petkovic, Đ., Banjac, M., Milić, S., Petrović, M.V., Modeliranje prelaznih režima rada toplotnih turbina, Elektrane 2018, Zlatibor, 05.- 08. novembar 2018.
5. Banjac, M., **Milic, S.**, Petrovic, M. V. A Simple Model for Thermodynamic Properties of Air and Combustion Gases for Educational Purposes. - ASME Turbo: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Seoul, South Korea, June 13–17, 2016, Paper No. GT2016-57601, pp. V006T07A007; 10 pages doi:10.1115/GT2016-57601;
6. **Milić, S.**, Banjac, M., Nedeljković, S., Ranković, M., Đukanović, D., Petrović, M.V., Stevanović, M., Novaković, G.: Analiza rada kondenzatorskog postrojenja u TE Morava 120 MW. Elektrane 2016, Zlatibor 23-26. Nov. 2016;
7. Petrović, M.V., **Milić, S.**, Banjac, M., Nedeljković, S., Đukanović, D., Ranković, M., Stevanović, M., Novaković, G.: Ispitivanje parnog turbopostrojenja TE Morava 120 MW. - Elektrane 2016, Zlatibor 23-26. Nov. 2016.,
8. Ranković, M. Banjac, M., **Milić, S.**, Nedeljković, S., Petrović, M.V.: Metod za aerodinamički proračun aksijalnih gasnih turbina, Elektrane 2016, Zlatibor 23-26. Nov. 2016.
9. Петровић, М., Деспић, М., **Милић, С.**, Бањац, М., Ђукановић, Д., Недељковић, С., Папић, Б., Максимовић, С., Конечки, Г., Лакић, С., Стевановић, С.: Развој система за ON-LINE праћење и анализу рада парног турбопостројења у ТЕ-ТО Нови Сад. - Међународна Конференција Електране 2014, 28-31. октобра 2014., Србија;
10. Петровић, М., Деспић, М., Ђукановић, Д., Бањац, М., **Милић, С.**, Биљановски, Ђ., Петковић, М., Класнић, Г., Јосиповић, С., Безмаревећ, С., Ковачевић, Д., Пауновић, В.: Искуства са пријемних испитивања парног турбопостројења у ТЕ Никола Тесла А6. - Међународна Конференција Електране 2012, 30. октобар - 2. новембар 2012., Србија.

Техничка решења

1. 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
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., Ђукановић, Д., 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
8. Петровић, М., **Милић, С.**, Бањац, М., Ђукановић, Д., Петковић, Ђ., Термотехничка испитивања парног турбопостројења ТЕ Костолац А2 снаге 210 MW, ЛТТ 1/19, Машински факултет, Београд, 2019. и ЈП Електропривреда Србије
9. Живановић, Т., Петровић, М., 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, Rađeno za 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, Rađeno za фирму **EscherTec**, Zuerich, Швајцарска
12. Petrović, M., **Banjac, M.**, Milić, S., Redesign of MAN MGT 6200 Axial Compressor, University of Belgrade - Faculty of Mech. Engineering, Belgrade, 2018, LTT-04/17, performed for MAN Diesel&Turbo, Germany
13. 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

14. Петровић, М., **Милић, С.**, Бањац, М., Ђукановић, Д., Петковић, Ђ., Гаранцијска испитивања турбине и турбопостројења ТЕНТ А4, ИЦ Машински факултет, Београд, 2018., ЛТТ-02/18, рађено за Електропривреду Србије
15. Петровић, М., **Милић, С.**, Бањац, М, Недељковић, С., Ђукановић, Д., Ранковић, М.: Испитивање парног турбопостројења ТЕ Никола Тесла Б2 снаге 665 MW, Машински факултет, Београд, 2017. ЛТТ-07/16
16. Петровић, М., **Милић, С.**, Бањац, М, Недељковић, С., Ђукановић, Д., Ранковић, М.: IP Turbine Efficiency Measurement in TPP Nikola Tesla B2, Obrenovac, Машински факултет, Београд, 2016. ЛТТ-08/16 урађено за фирму General Electric, Немачка
17. Петровић, М., **Милић, С.**, Бањац, М, Недељковић, С., Ђукановић, Д., Ранковић, М.: Performance Test Concerning IP Turbine Efficiency in TE Morava, урађено за фирму General Electric, Пољска, Машински факултет, Београд, 2016. ЛТТ-05/16
18. Петровић, М., **Милић, С.**, Бањац, М, Недељковић, С., Ранковић, М. Ђукановић Д.: Прорачун рада индустријске парне турбине на променљивим режимима, Машински факултет, Београд, 2016. ЛТТ-04/16
19. Петровић, М., **Милић, С.**, Ђукановић, Д., Бањац, М, Милчић, Н., Недељковић, С., Ранковић, М., Термотехничка испитивања постројења за комбиновану производњу топлотне и електричне енергије у ТО Нови Сад, ИЦ Машинског факултета, Београд, 2016. ЛТТ-03/16 М84
20. Петровић, М., **Милић, С.**, Бањац, М, Недељковић, С., Ранковић, М., Ђукановић, Д.: Термотехничка испитивања са анализом рада парног турбопостројења ТЕ Морава снаге 120 MW, ИЦ Машинског факултета, Београд, 2016. ЛТТ-02/16
21. Петровић, М., **Милић, С.**, Бањац, М, Недељковић, С., Ранковић, М., Ђукановић, Д.: IP Turbine Efficiency Measurement in TPP Morava Svilajnac, ИЦ Машинског факултета, Београд, 2016. ЛТТ-01/16
22. Петровић, М., **Милић, С.**, Бањац, М., Недељковић, С., Ђукановић, Д. Гаранцијско испитивање парног турбопостројења ТЕ Никола Тесла А3 снаге 328,5 MW, ИЦ Машинског факултета у Београду ЛТТ-03/15, 2015.
23. Петровић, М., **Милић, С.**, Ђукановић, Д., Недељковић, С., Бањац, М., Дондур, Н. Студија изводљивости енергетских пројеката у ХИП Петрохемија Панчево, Машински факултет, Београд, 2013. ЛТТ-01/150209
24. Петровић, М., **Милић, С.**, Ђукановић, Д., Недељковић, С., Бањац, М., Интерактивни модел енергетског биланса парног система ХИП Петрохемија, Машински факултет, Београд, 2013. ЛТТ-02/15
25. Петровић, М., Деспић, М., **Милић, С.**, Бањац, М., Ђукановић, Д., Generalni projekat sa prethodnom studijom opravdanosti postrojenja za kombinovanu proizvodnju električne i toplotne energije sa gasnim turbinama u MSK Kikinda, Машински факултет, Београд, 2013. ЛТТ-01/13
26. Петровић, М., Деспић, М., **Милић, С.**, Бањац, М., Ђукановић, Д., Техничко решење са анализом оправданости модернизације турбине блока 5 у ТЕ Колубара А, Машински факултет, Београд, 2013. ЛТТ-02/13
27. Петровић, М., Деспић, М., **Милић, С.**, Бањац, М., Ђукановић, Д., Студија оправданости са идејним пројектом санације и адаптације блока А3 снаге 305 MW у ТЕ "Никола Тесла" А - Део парна турбина и парно турбопостројење, Машински факултет, Београд, 2013. ЛТТ-03/13
28. Петровић, М., Деспић, М., **Милић, С.**, Бањац, М., Ђукановић, Д., Испитивање парног турбопостројења ТЕ Никола Тесла А5 снаге 344,4 MW, ИЦ Машинског факултета у Београду, ЛТТ-01/12, 2012, рађено за ТЕ Никола Тесла, Обреновац
29. Петровић, М., Деспић, М., **Милић, С.**, Бањац, М., Ђукановић, Д., Пријемно испитивање парне турбине високог притиска ТЕ Никола Тесла А5, ИЦ Машинског факултета у Београду, ЛТТ-02/12, 2012, рађено за ТЕ Никола Тесла, Обреновац
30. Петровић, М., Деспић, М., **Милић, С.**, Бањац, М, Ђукановић, Д., Испитивање парног турбопостројења ТЕ Никола Тесла Б1 снаге 665 MW, ИЦ Машинског факултета у Београду, ЛТТ-03/12, 2012, рађено за ТЕ Никола Тесла, Обреновац

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Срђана Милића под називом **Систем за прорачун топлотних шема и анализу рада термоенергетских постројења са парним турбинама** је изложена на укупно 112 страна и садржи 107 слика, 4 табела и 88 коришћених литературних извора:

Дисертација садржи следећа поглавља:

1 Увод

2 Дефиниције кључних показатеља квалитета рада парног турбопостројења и радних карактеристика компонената

3 Математички модели компонената парног турбопостројења

4 Систем за прорачун топлотних шема парних блокова на номиналним и парцијалним режимима

5 Развој система за испитивање парних турбопостројења

6 Развој методе за праћење и анализу рада парних турбопостројења

7 Закључак

Литература

Прилог А – Приказ рачунарског програма за конфигурисање топлотне шеме, унос радних параметара и геометријских карактеристика компоненти парног турбопостројења

Прилог Б – Пример прорачуна мерне несигурности одређивања степена корисности TSP

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

Кандидат је у Уводу дао преглед стања савремене енергетике и услова у којима се развијају нове енергетске технологије. Истакнута је потреба за смањењем емисије штетних материја у околину, раст цена горива, појачана конкуренција између произвођача електричне енергије и повећање примене обновљивих извора енергије. Образложена је потреба за развојем нових методологија и софтверских пакета за прорачун топлотних шема и симулацију рада термоенергетских постројења са парним турбинама као и моделирања појединих његових компонената са циљем повишења степена корисности, поузданости и побољшања понашања на парцијалним режимима. Дат је детаљан критички преглед већ развијених модела и пакета у овој области који су приказани у публикованим радовима других аутора. Образложен је циљ истраживања које је предузето у склопу израде дисертације са очекиваним резултатима и ограничењима као и перформансама које развијени систем треба да испуни да би нашао примену у савременој термоенергетици.

У поглављу 2 су дефинисани кључни показатељи квалитета рада парног турбопостројења и радне карактеристике компонената. Дефинисан је степен корисности парног турбопостројења бруто и специфични рад генератора бруто за различите случајеве (парни блок са и без топлификације, напојна пумпа са погоном од електромотора или од помоћне турбине). Дефинисан је унутрашњи степен корисности и проточна карактеристика парне турбине за различите случајеве регулисања. За остале компоненте (кондензатор, загрејачи напојне воде и главног кондензата и друге) парног турбопостројења су дефинисане радне карактеристике: температурске разлике, падови притисака као параметри важни за пројектовање и за праћење и анализу рада.

У поглављу 3 су дати математички модели за одређивање радних карактеристика и симулацију рада на променљивим режимима појединих компонената парног турбопостројења.

Приказан је модел за одређивање степена корисности и проточне карактеристике парне турбине са млазничким регулисањем, регулисањем пригушивањем и регулисањем клизним притиском. Модели су калибрисани и верификовани поређењем резултата прорачуна са експерименталним подацима прикупљеним испитивањима парних турбина у термоелектранама. Модел обухвата симулацију турбине високог, средњег и ниског притиска као и помоћне турбине за погон турбонапојне пумпе. Модел парне турбине садржи систем заповишне паре.

Модели за симулацију рада кондензатора и загрејача главног кондензата и напојне воде су засновани на прорачуну преноса топлоте и хидрауличком прорачуну струјања радних материја у овим уређајима. На основу развијених модела могу се одредити температурске разлике и падови притисака као главне радне карактеристике на номиналном и променљивим режимима рада за познату геометрију (број, димензије и материјал цеви). У дизајн моду се могу за задате температурске разлике одредити потребне површине за размену топлоте што представља улазне податке за техноекономску анализу.

У овом делу су још дати модели за прорачун рада система даљинског грејања, одузимања паре за технолошког потрошача, рада агрегата напојне пумпе, догрејача паре, протока свеже паре, губитка радне материје и допуне циклуса, пада притиска у пароводима одузимања паре.

У поглављу 4 је дат развој система за прорачун топлотних шема парних турбопостројења. Приказан је начин формирања система једначина код прорачуна линије експанзије паре у турбини. Математички модел за прорачун линије загрејача напојне воде и главног кондензата дат је системом једначина који је написан у матричном облику $\mathbf{A}\cdot\mathbf{x} + \mathbf{B}\cdot\mathbf{y} + \mathbf{C}\cdot\mathbf{z} = \mathbf{0}$ где су са \mathbf{x} , \mathbf{y} и \mathbf{z} означени вектори са подацима о енталпијама главног кондензата и напојне воде испред и иза загрејача, енталпије паре одузимања и енталпије кондензата паре одузимања. \mathbf{A} и \mathbf{B} представљају матрице протока главног кондензата, напојне воде и протоке одузимања. Матрица \mathbf{C} описује распоред кондензата одузимања. Дат је начин имплементације развијених модела турбине, кондензатора, напојне пумпе и других компонената у свеобухватни систем једначина за прорачун топлотне шеме. Прорачун топлотне шеме парног турбопостројења се спроводи итеративно позивајући сваки модел компоненти турбопостројења узимајући најпре податке које су задати, као и усвојене почетне вредности. Приказани модели за прорачун компонената топлотне шеме, као и метода за прорачун топлотне шеме су написани у програмском језику C++. Графички део програма за конфигурисање топлотне шеме је написан у програмском пакету Qt 5. У развијеном и написаном рачунарском програму могуће је додавати и нове компоненте са сопственим математичким моделима пратећи претходно описане моделе, водећи рачуна о прилагођавању модела за прорачун топлотне шеме парног турбопостројења. Дати су примери прорачуна топлотне шеме за један парни блок, понашања на променљивим оптерећењима, прорачун утицаја и оптимизације основних термодинамичких параметара, као и утицаја конфигурације топлотне шеме на степен корисности турбопостројења. Дат је такође прорачун утицаја одступања појединих параметара од номиналне вредности на степен корисности турбопостројења и снагу генератора бруто (корекционе криве).

У поглављу 5 је приказана примена развијеног система за прорачун топлотних шема код термотехничких испитивања парног турбопостројења. Овде је дат модел за обраду података испитивања, одређивање мерне несигурности, усаглашавања података за даљи прорачун и одређивање главних термодинамичких параметара парног турбопостројења као главних резултата испитивања. Дата су два примера обраде података испитивања за блокове снаге 210 MW са детаљним анализама рада турбопостројења и свих компонената.

У поглављу 6 је приказан развој и примена методе за праћење и анализу рада парних турбопостројења. Метода је заснована на преузимању података (120 до 180 у зависности од сложености постројења) континуланих мерења у термоелектрани. Систем обрађује ове податке и израчунава експлатационе радне карактеристике парног турбопостројења и сваке његове компоненте. Истовремено, систем спроводи симулацију рада турбопостројења за тренутне радне услове (доведену количину топлоте и температуру расхладне воде) и одређује радне карактеристике турбопостројења и сваке компоненте за пројектно стање постројења. Поређењем експлатационих радних карактеристика и пројектованих се добије увид у стање турбопостројења и свака појединачне компоненте. Такође, се одређује дефицит електричне снаге, односно, разлика између постигнуте снаге и снаге која би се постигла при пројектном стању турбопостројења при истој доведеној количини топлоте. Одређен је и утицај одступања у радним карактеристикама сваке компоненте на дефицит снаге. Овим се добијају важни подаци о неправилностима у раду и потреби одржавања како би се побољшала економичност и спречиле хаварије. Развијен је и одговарајући софтверски пакет са графичким интерфејсом за приказ и праћење најважнијих резултата. Систем ради online са прорачунима у реалном времену. Један овакав софтверски пакет је инсталисан у ТЕ Пљевља и у дисертацији су дати илустративни резултати из ове термоелектране.

У Закључку су дата закључка разматрања.

У прилогу А је приказан рачунарски програма за конфигурисање топлотне шеме, унос радних параметара и геометријских карактеристика компоненти парног турбопостројења док је у Прилогу Б дат пример прорачуна мерне несигурности одређивања степена корисности TSP.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација под називом **Систем за прорачун топлотних шема и анализу рада термоенергетских постројења са парним турбинама** кандидата Срђана Милића представља

савремен и оригиналан допринос у области прорачуна термоенергетских постројења са парним турбинама. Ова дисертација је урађена на основу истраживачко развојних пројеката које је Лабораторија за топлотне турбомашине Машинског факултета у Београду спроводила за електропривредна предузећа у земљи и региону. Циљ ових пројеката је био да се унапреди постојећа технологија и побољша економичност рада термoeлектрана.

Побољшање степена корисности термoeнергетских постројења је једно од најважнијих питања енергетике. Оно је постало нарочито актуелно последњих година због раста цена фосилних горива и построжавања захтева у погледу емисије штетних материја у околину. Развој свеобухватних модела за прорачун топлотних шема термоенергетских постројења постао је могућ тек последњих двадесетак година са развојем нумеричких метода, мерне и аквизиционе технике и примене DCS система у термoeлектранама. Кандидат Срђан Милић је развио оригиналну методологију базирану на сопственим експерименталним подацима као и оригиналне софтверске пакете који су већ нашли значајну примену.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Прегледом цитиране литературе, која је наведена у поглављу Литература, закључује се да је кандидат Срђан Милић при изради дисертације цитирао референтне и актуелне публиковане изворе. У докторској дисертацији коришћена је обимна савремена и релевантна литература из области прорачуна топлотних шема парног блока, моделирања процеса у парним турбинама, преноса топлоте у кондензаторима и загрејачима напојне воде и главног кондензата, испитивања парних турбопостројења и мониторинга и анализе рада. Већина коришћене литературе је новијег датума и објављена 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. Коришћене референце представљају избор савремене литературе, која приказује актуелно стање у предметној области истраживања у свету, али које указују и на могуће правце даљег научног рада.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методe које су коришћене у истраживању обухватају:

- моделирање термодинамичких и струјних процеса трансформације унутрашње енергије у механички рад;
- моделирање пролаза топлоте у термоенергетским постројењима;
- моделирање променљивих режима рада термоенергетских постројења;
- нумеричке методе решавања система нелинеарних једначина;
- програмирање и развој рачунарског програма;
- експерименталне методе испитивања термоенергетских постројења;
- статистичка обрада измерених података;
- математички модели за праћење и валидацију измерених података;
- верификација резултата прорачуна са резултатима добијеним на основу спроведених испитивања.

Овде треба посебно истаћи опсежан експериментални рад којим су калибрисани и потврђени развијени математички модели парног турбопостројења и појединих компонената. С обзиром да експериментални рад са парним турбинама велике снаге није могућ у лабораторији, мерења су обављена на терену у више термoeлектрана различитих снага, конфигурација и параметара.

3.4. Применљивост остварених резултата

Истраживање спроведено у склопу израде дисертације кандидата Срђана Милића је већ нашло примену у развојним пројектима које је Машински факултет израдио за електропривредна и индустријска предузећа пре свега:

- пројекти подизање снаге и побољшања степена корисности парних блокова у Електропривреди Србије (ТЕ Никола Тесла А3, Б1, Б2)

- испитивања и анализе рада парних турбопостројења (ТЕ Никола Тесла А3, А4, А5, Б1, Б2, ТЕ Костолац А2, ТЕ Морава)
- моделирања и контролни прорачуни код нових блокова (ТЕ Костолац Б3)
- модернизације постојећих блокова са парним турбинама (ТЕ Гацко, ТЕ Угљевик)
- билансирања и оптимизације погона (ТЕ Никола Тесла А3, А5, А6, ТЕ-ТО Нови Сад)
- оптимизација грејања Београда из ТЕ Никола Тесла А
- пројекат грејања Сарајева из ТЕ Какањ,
- on-line праћење и анализа рада турбопостројења ТЕ Пљевља,
- развој система за билансирање енергије у ХИП Петрохемија Панчево,
- оптимизације погона турбосета Азотаре Панчево и
- другим пројектима.

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

- у фази прорачуна термоенергетских постројења за оптимизацију параметара и топлотне шеме,
- за термотехничка испитивања парних турбопостројења за обраду и анализу резултата,
- код постројења у погону као експертски систем за праћење и анализу рада.

Из примера обрађених у дисертацији може се закључити да се применом овог система може значајно повећати економичност рада термоенергетских постројења и унапредити прорачун нових термоелектрана.

С обзиром на стечено искуство и потврду развијене методологије очекујемо примену главних резултата дисертације и далеко шире од региона Западног Балкана.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је током вишегодишњег научноистраживачког рада, а посебно током израде ове докторске дисертације показао да је у стању да самостално решава проблеме и да успешно влада савременим научним сазнањима, као и теоријским и нарочито експерименталним методама, што представља основу за даљи успешан научноистраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У докторској дисертацији под називом **Систем за прорачун топлотних шема и анализу рада термоенергетских постројења са парним турбинама** кандидата Срђана Милића остварен је оригиналан допринос у области прорачуна термоенергетских постројења са парним турбинама.

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

- нова методологија за прорачун топлотних шема термоенергетских постројења парним турбинама која има флексибилну структуру и омогућаваће прорачун најсложенијих конфигурација ових постројења. Методологија обухвата и моделирање понашања постројења на променљивим режимима рада, оптимизацију конфигурације и параметара постројења, примењива је за рад у кондензационом и топлификационом режиму као и код различитих погона напојне пумпе и начина регулисања парне турбине (поглавље 4),
- развој нових модела за симулацију рада свих компонената термоенергетског постројења. Ови модели имају могућност рада (поглавље 3),
 - у режиму прорачуна (дизајн мод), када се за задате карактеристике и пројектне параметре одређује геометрија и главне димензије чиме се постављају основе за техноекономску анализу постројења,
 - у режиму анализе, када се за задату геометрију и променљиве услове рада одређују радне карактеристике компонената,

Развијена методологија за прорачун топлотних шема и модели компонената су примењени за:

- развој модела за спровођење испитивања, обраду експерименталних података и одређивање радних карактеристика код парних турбина и парних турбопостројења (поглавље 5),

- развој новог експертског система за праћење и анализу рада парних турбопостројења који на бази прорачуна променљивих режима рада и мерења кључних параметара процеса у реалном времену израчунава радне карактеристике постројења и појединих компонената, одређује утицај одступања у параметрима процеса и радним карактеристикама компонената на степен корисности и снагу термоенергетског постројења, указује на узроке одступања и начин отклањања (поглавље 6),

Развијена методологија за прорачун топлотних шема парних турбопостројења (поглавље 4), модел кондензатора (поглавље 3.3), модел за спровођење испитивања (поглавље 5) и систем за анализу рада парних турбопостројења (поглавље 6) су приказани и у раду објављеном у часопису категорије M22 (<https://doi.org/10.2298/TSCI170903242M>) док су делови модела турбине (поглавље 3.1) коришћени при изради модела представљеном у раду у часопису M21 (<https://doi.org/10.1115/1.4046451>).

Развој горе наведених методологија је праћен развојем одговарајућих софтверских пакета који су опремљени графичким интерфејсима за приказ резултата и штампање извештаја.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

На основу прегледа релевантне научне литературе и постојећих решења из области прорачуна рада термоенергетских турбопостројења са парним турбина, констатује се да су резултати истраживања, приказани у овој докторској дисертацији, значајни и научно утемељени.

Упоредивањем задатих циљева и остварених резултата, јасно је да су изнађена квалитетна решења, развијене експерименталне процедуре, развијени софтверски пакети за брз прорачун топлотних шема, оптимизацију конфигурације и параметара спровођење испитивања, праћење рада, утврђивање одступања у раду постројења и компонената од пројектованог, утврђивање утицаја појединих одступања на снагу и степен корисности блока.

Развијени систем је већ нашао значајну примену у области термоенергетских постројења са парним турбинама.

4.3. Верификација научних доприноса

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

- развијене методологије за прорачун топлотних шема термоенергетских постројења и модели за симулацију рада парних турбина и других компонената турбопостројења верификовани су експерименталним резултатима. Експериментални подаци су добијени спровођењем испитивања на парним турбинама и парним турбопостројењима која имају различите конфигурације и параметре (поткритичне и наткритичне), различите снаге (од 100 до 650 MW) и различите режиме рада (кондензационе и топлификационе). Такође, код испитиваних турбина били су заступљени сви постојећи системи регулације,
- комплетан систем који обухвата развијене методологије и софтверске пакете је верификован вишеструким применама у истраживачкоразвојним пројектима код модернизације постојећих и градње нових термоелектрана који су реализовани, као и код пројекта испитивања, анализе рада и унапређења економичности парних турбопостројења,
- нарочито значајну верификацију представља примена развијене методологије у ТЕ Пљевља где се на бази online праћења и анализе рада успешно управља радом парног турбопостројења.

Научни резултати из дисертације су публиковани у часописима:

1. **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 Volume 22, Issue 1 Part B, Pages: 735-746 <https://doi.org/10.2298/TSCI170903242M> ИФ=1.541 35/60 (за 2018.) **M22**
2. Petkovic, D., Banjac, M., **Milic, S.**, Petrovic, M. V., Wiedermann, A. Modelling the Transient Behaviour of Gas Turbines. **Trans of the ASME, Journal of Turbomachinery**, 2020, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4046451>, ИФ=2866, 39/130 (за 2019.) **M21**

као у 10 радова објављеним на научним скуповима чији је списак дат у оквиру тачке 1.3 овог Реферата.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

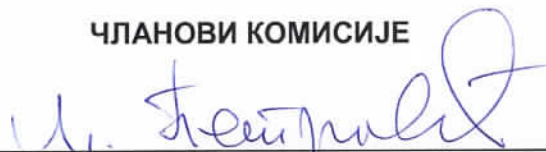
На основу прегледа и детаљне анализе докторске дисертације под називом **Систем за прорачун топлотних шема и анализу рада термоенергетских постројења са парним турбинама** кандидата Срђана Б. Милића, маг. инж. маш., студента докторских студија, Комисија за преглед, оцену и одбрану констатује:

- да урађена докторска дисертација представља оригинални научни рад са научним доприносом у области техничких наука,
- 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.

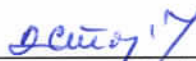
Комисија предлаже Наставнонаучном већу Машинског факултета Универзитета у Београду да прихвати овај Реферат и упути га Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду на усвајање, а дисертацију **Систем за прорачун топлотних шема и анализу рада термоенергетских постројења са парним турбинама** кандидата Срђана Б. Милића, маг. инж. маш., студента докторских студија, стави на увид јавности, а да се након тога кандидат позове на јавну одбрану дисертације.

Београд, 04.12.20202.

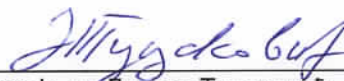
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



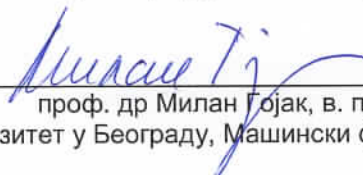
проф. др Милан Петровић, ред. професор, ментор
Универзитет у Београду - Машински факултет



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



проф. др Драган Туцаковић, ред. професор
Универзитет у Београду, Машински факултет



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



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