

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата г. **Mohammeda Saleha Mohammeda**, дипл. инж. маш.

Одлуком бр. 694/2 од 16.04.2015. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата г. **Mohammeda Saleha Mohammeda** под насловом

Exergoeconomic Analysis and Optimization of Combined Cycle Power Plant with Complex Configuration

(Ексергоекономска анализа и оптимизација комбинованог постројења гасне и парне турбине комплексне конфигурације)

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 г. **Mohammed Saleh Mohammed** је Машинском факултету Универзитета у Београду 30. 01. 2014. дописом под бројем 208/1 пријавио тему докторске дисертације под називом: **Exergoeconomic Analysis and Optimization of Combined Cycle Power Plant with Complex Configuration** (Ексергоекономска анализа и оптимизација комбинованог постројења гасне и парне турбине комплексне конфигурације) и за ментора је предложио проф. др Милана Петровића. На основу пријаве кандидата ННВ Машинског факултета је одлуком бр. 208/2 од 20. 02. 2014. прихватило тему и именовало Комисију за подношење извештаја о прихватању теме докторске дисертације и њене научне заснованости у саставу: проф. др Милан Петровић, ред. професор Машинског факултета Универзитета у Београду, проф. др Зоран Стефановић, ред. професор Машинског факултета Универзитета у Београду, проф. др Драган Туцаковић, ред. професор Машинског факултета Универзитета у Београду, проф. др Милун Бабић, ред. професор Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу Београд

На основу извештаја Комисије бр. 208/3 од 31.03.2014. и одлуке ННВ бр. 208/4 од 03.04.2014. г. поднет је захтев Машинског факултета Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду које је на седници одржаној 12.05.2014. г. донело одлуку бр. 61206-1760/2014 да се даје сагласност на предлог теме докторске дисертације г. Mohammeda Saleha Mohammeda, дипл.инж.маш., а на основу чега је Декан Машинског факултета у Београду донео закључак бр. 1118/1 од 27.05.2014. о одобравању рада на предметној дисертацији под менторством проф. др Милана Петровића.

На основу извештаја проф. др Милана Петровића, ментора, да је докторанд г. Mohammed Saleh Mohammed завршио докторску дисертацију под називом **Exergoeconomic Analysis**

and Optimization of Combined Cycle Power Plant with Complex Configuration (Ексергоекономска анализа и оптимизација комбинованог постројења гасне и парне турбине комплексне конфигурације) а на основу сагласности Комисије Комисије за докторске студије и Координатора за наставу на страном језику Наставно-научно веће Машинског факултета донело је одлуку број 694/2 од 16.04.2015. године о именовању Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације у саставу: проф. др Милан Петровић, ред. професор Машинског факултета Универзитета у Београду, ментор, проф. др Мирко Коматина, ред. професор Машинског факултета Универзитета у Београду, проф. др Драган Туцаковић, ред. професор Машинског факултета Универзитета у Београду, проф. др Зоран Стефановић, ред. професор Машинског факултета Универзитета у Београду у пензији

Кандидат је уписао докторске студије на Машинском факултету у Београду 2011. године.

1.2 Научна област дисертације

Докторска дисертација **Exergoeconomic Analysis and Optimization of Combined Cycle Power Plant with Complex Configuration** (Ексергоекономска анализа и оптимизација комбинованог постројења гасне и парне турбине комплексне конфигурације) припада области Техничких наука (Машинство) и ужој научној области Термоенергетика.

Израдом докторске дисертације руководио је др Милан Петровић, редовни професор на Катедри за термоенергетку Машинског факултета Универзитета у Београду, Група предмета Топлотне турбомашине и Термоенергеска постројења.

1.3 Биографски подаци о кандидату

Г. Mohammed Saleh Mohammed је рођен 27.07.1962. године у Mosul-у, Ирак. Основну школу (1968.-1977.) и гимназији (1987.-1980.) је похађао у Mosul-у, Ирак. Од периода 1981.-1984. је похађао Ваздупловну техничку војну академију у Рајловацу - Сарајево Југославија а од 1984.-1986. је студирао на Машинском факултету у Београду где је у децембру 1986. стекао титулу дипл. инж. (M. Sc.). Од 1988.-2003. је радио као R&D у Alkrama center Baghdad Iraq (Department for designing, production and testing liquid propellant engine). Од 2006. до 2011. је assistant lecturer на Инжењерском факултету у Mosul-у, Ирак за предмете Термодинамика и Лабораторија.

Говори енглески и српски језик.

2 ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1 Садржај дисертације

Докторске дисертације г. **Mohammeda Saleha Mohammeda**, дипл.инж.маш., под називом **Exergoeconomic Analysis and Optimization of Combined Cycle Power Plant with Complex Configuration** (Ексергоекономска анализа и оптимизација комбинованог постројења гасне и парне турбине комплексне конфигурације) је изложена је на 172 странице и садржи 79 слика и дијаграмски приказ, 20 табела и 92 коришћена референтна литературна извора. Докторску дисертацију чине седам поглавља, списак литературе, номенклатура и три додатка:

1. Увод
2. Преглед литерауре и стање и истраживања
3. Термодинамички принципи комбинованих постројења гасне и парне турбине и опис главних компонената
4. Ексергоекономса анализа и оптимизација
5. Математичко моделирање оптимизације комбинованих постројења гасне и парне турбине
6. Резултати и дискусија оптимизационих модела примењених у примерима комбинованих постројења гасне и парне турбине
7. Закључак
Литература
Номенклатура

- A. Подаци о иницијалном комбинованом постројењу гасне и парне турбине
- B. TS дијаграми процеса за оптимизационе случајеве 2 и 3
- C. Блок дијаграм компјутерског програма за оптимизацију комбинованих постројења гасне и парне турбине.

Дисертација је написана на енглеском језику.

2.2 Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу тезе су дати шири аспекти значаја примене и потребе за истраживањем и оптимизацијом комбинованих постројења гасне и парне турбине. Наведени су основи енергетске, ексергетске и економске анализе термонергетских постројења. Наглашени су недостаци до сада примењиваних метода за оптимизацију ових постројења. Дефинисан је циљ истраживања и наведене су хипотезе и методе која ће бити примењене. Укратко је приказана структура рада.

У другом поглављу је приказана стање истраживања у овој области кроз детаљну анализу најважнијих радова са анализом достигнућа и ограничења појединих до сада развијених метода. Развијене методе за термодинамичку анализу и за технокономску оптимизацију су подељени у три групе: за горњи циклуса (гасни блок), за доњи циклус (парни блок и за комбинована постројења гасне и парне турбине. Приказани су најважнији публиковани приступи који се односе на ексергетску анализу, метод ексергетске деструкције и ексергокономску оптимизацију примењени на различита термоенергетска постројења.

Методи до сада развијени обухватају мали број параметара или су ограничени на комбинована постројења једноставне конфигурације.

У трећем поглављу тезе су дате термодинамичке основе комбинованих постројења са приказом циклуса. Анализиран је рад најважнијих компонената комбинованог постројења: гаснотурбинског дела постројења, парнотурбинског дела постројења и котла утилизатора. Приказане су једноставније топлотне шеме постројења са котлом утилизатором (КУ) на један и два притиска као и најкомплексније топлотне шеме са КУ на три притиска. Дефинисани су термодинамички параметри циклуса који могу бити предмет оптимизације: температурска разлика (pinch point, PP) између температуре испаравања у парном циклусу и температуре димних гасова гасног циклуса на излазу из испаривача КУ, притисак свеже паре који може бити на више нивоа и притисак у кондензатору парног циклуса као и ограничења у погледу подручја варирања ових параметара.

У четвртном поглављу су приказане методе енергетске и ексергетске анализе термоенергетских постројења. Изведени су изрази за ексергију система и ексергију компоненти и уведено билансирање ексергија за систем. Дефинисани су параметри: ексергетски степен корисности, ексергетски губици и ексергетска деструкција као важни параметри у ексергокономској оптимизацији постројења. Код ексергокономске анализе дефинисана су три битна корака: (1) квантификовање енергетских и ексергетских токова применом израза за одржање масе, енергије и ексергије за сваку компоненту система, (2) за сваку компоненту се дефинише гориво и производат при чему је производат оно што се жели добити од компоненте у смислу ексергије а „гориво” или улаз је ексергија која се мора довести да би се добио жељени производат, (3) биланс трошкова везан за сваки ток ексергије компоненте једнак је суми трошкова за сваки ток ексергије на улазу компоненте плус одговарајући трошак везан за капиталне инвестиције и трошкове погона и одржавања. Дефинисан је трошак ексергетске деструкције.

У петом поглављу је приказан математички модела оптимизације комбинованих постројења гасне и парне турбине. За анализу је узето комбиновано постројење најкомплексније конфигурације са котлом утилизатором на три нивоа притисака (ниском LP, средњем IP, и високом HP). Развијени су системи једначина који математички описују рад свих битних компонената. Развијени су модели за израчунавање конструктивних параметара (површина) котла утилизатора у зависности од масеног протока паре и параметара паре.

Успостављена је веза између радних параметара компоненти (компресор, грејна комора, гасна турбина, катао утилизатор, парна турбина, кондензатна пумпа, кондензатор, генератор) и инвестиционих трошкова. При овоме су усвајани одговарајући коефицијенти на бази података објављених у литератури. За све компоненте су дефинисани ексергија улаза (горива) и ексергија излаза (продукта). Да би се одредио ток трошкова и трошкови по јединици ексергије формиран је систем линеарних једначина који је решаван помоћу FORTRAN кода.

Дефинисане су три функције циља: најнижа производна цена електричне енергије (случај 1) минимални збир годишњих трошкова рада, ексергетских губитака и ексергетске деструкције (случај 2) и минимум суме специфичних трошкова производа који обухватају трошкове инвестиција, погона и одржавања.

Примењена су два оптимизациона алгоритма: једноставни оптимизациони метод који је кандидат сам развио и комерцијално доступни софтвер MIDACO. Алгоритам који је кандидат сам развио се састоји од 3-корачне секванцијалне итеративне процедуре која се може успешно применити за оптимизацију оваквог проблема са мањим бројем параметара. Софтвер MIDACO за проналажење оптималне комбинације параметара, који је паралелно примењен, је базиран на проширеном алгоритму мравље колоније (ant colony optimization, ACO) за Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP). Ово је једна од ефикасних оптимизационих стратегија које се данас широко примењују у случајевима мултипараметарске оптимизације. Оптимизациони софтвер је уклопљен у програм који је кандидат написао на бази развијеног математичког модела за оптимизацију као екстерни модул.

Дефинисани су параметри који ће се варирати у одређеним технички оправданим границама и тражити комбинација ових параметара која ће дати најбољу функцију циља. Ти параметри су: три притиска (ниски LP, средњи IP и високи притисак VP, и три температурске разлике (pinch point, PP) између температуре испаравања у парном циклусу за радно тело на сваком притиску и температуре димних гасова гасног циклуса на излазу из испаривача КУ. У зависности од комбинације изабраних параметара мењају се протоци паре на сва три притиска, температуре димних гасова на излазу. Као последица тога мења се и степен корисности и укупна електрична снага комбинованог постројења и, даље, трошкови горива. С друге стране, промене ових параметара доводе до промене потребних површина за размену топлоте у котлу излизатору и промена у парном делу постројења што доводи до мањих или већих трошкова инвестиције и одржавања.

У шестом поглављу су је демонстриран развијени систем за оптимизацију на примеру комбинованог постројења гасне и парне турбине најкомплексније конфигурације са котлом утилизатором на три притиска. Гасна турбина је снаге 288 MW са масеним протоком продуката сагоревања на излазу од 688 kg/s и температуром од 580 °C. Изабране су иницијалне вредности за сва три притиска (високи HP, средњи IP и ниски LP) паре у котлу утилизатору од 5 bar 36 bar и 104 bar. Усвојене су исте вредности за pinch point (PP) од 13 °C за сва три нивоа притисака. Изабране иницијалне вредности за ове параметре су у складу са праксом и изведеним постројењима. За иницијалну конфигурацију је спроведен прорачун топлотне шеме, главних термодинамичких параметара постројења и економских показатеља рада. Затим су варирани ови параметри и за сваку комбинацију је спровођен прорачун топлотне шеме постројења, израчунаван степен корисности постројења, инвестициони трошкови, трошкови погона и горива и спроведена комплетна ексергетска анализа постројења и свих кључних компонента, одређивани ексергетски губици и деструкција. Иза тога су онда одређиване функције циља (производна цена електричне енергије, минимални збир годишњих трошкова рада, ексергетских губитака и ексергетске деструкције и минимум суме специфичних трошкова производа који обухватају трошкове инвестиција, погона и одржавања). Поступак је понављан до проналажења оптималне комбинације параметара који су били предмет оптимизације.

У односу на иницијалне вредности параметара дошло је значајнијих промена у вредностима притисака HP, IP, LP као и вредности за PP на појединим нивоима притисака. Степен корисности постројења је могао бити поправљен за око 0,7 % (са 57,7 % на 58,4%), снижена производна цена ел. енергије и повећан годишњи прилив готовине за око 2 милиона US\$.

Упоредени су резултати добијени коришћењем комерцијалног оптимизационог софтвера и сопствено развијеног оптимизационог алгоритма показују веома добро поклапање уз напомену да комерцијални софтвер захтева мање времена за проналажење оптималне комбинације параметара.

У **закључку** је кандидат дао приказ развијеног метода и добијених резултата и закључио да се развијени систем за ексергоекономску оптимизацију може успешно применити и за оптимизацију најкомплекснијих постројења и да се његовом применом може значајно унапредити економичност комбинованих постројења са гасном и парном турбином.

У апендиксу је приказан алгоритам развијеног рачунарског програма.

3 ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Тема која је истраживана у дисертацији је веома савремена и значајна с обзиром да се тек у задње време са великим напретком гасне турбине почела масовна примена комбинованих постројења гасне и парне турбине. Имајући у виду цену природног гаса тренутно су веома актуелна испитивања могућности за даља унапређења ових постројења.

Кандидат је у својој дисертацији развио оригинални систем за ексергоекономску оптимизацију комбинованих постројења гасне и парне турбине за најкомплекснији случај постројења са три нивоа притисака у котлу утилизатору уз узимање у обзир свих утицајних термодинамичких параметара. Спровођењем енергетске, ексергетске и техноекономске анализе као резултат се добијају вредности свих оптималних термодинамичких параметара као и основни технички и економски подаци о машинама у склопу постројења.

Кандидат је развио и сопствену оптимизациону процедуру која се може применити за системе са мањим бројем параметара.

У комбинацији са комерцијалним оптимизационим софтвером, систем се показао као робустан и брз и без ограничења у погледу броја параметара што је демонстрирано на најкомплекснијим примерима.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У дисертацији су коришћене укупно 92 референце које су највећим делом савремени радови објављени у часописима. Највећи коришћених број радова је објављен у последњих десет година. У уводном делу је дата детаљна анализа радова са приказ примењених метода, донетима и ограничењима појединих метода које су други аутори развили. Подаци, једначине које су преузете из објављених радова су исправно и редовно цитирани.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Развој система за вишепараметарску ексергоекономску оптимизацију комбинованог постројења гасне и парне турбине је комплексан задатак у оквиру којег су примењене следеће методе:

- Моделирање процеса у термоенергетским постројењима
- Енергетска и ексергетска анализа анализа комбинованих постројења,
- Техноекономска анализа комбинованих постројења,
- Вишепараметарска оптимизација за један комплексан случај,

- Развој програмског пакета за оптимизацију комбинованих постројења гасне и парне турбине.

Адекватном применом ових метода развијен је робусан и ефикасан систем за ексергоекономску оптимизацију комбинованог постројења комплексне конфигурације.

3.4. Применљивост остварених резултата

Кандидат је на једном конкретном примеру постројења најкомплексније конфигурације у склопу дисертације демонстрирао примену развијеног система за оптимизацију. С обзиром да су на приказаном случају постигнута значајна побољшања код оптимизованог постројења у односу на иницијалну конфигурацију, развијени метод као и софтвер се може успешно применити како код произвођача опреме тако и у електропривредним и пројекатским компанијама.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је потпуно способан за самостални рад јер је применио најсавременије методе научно истраживачког рада и успешно развио и демонстрирао један комплексан систем за моделирање и оптимизацију термоенергетских постројења. Такође, кандидат је оспособљен за академску интерпретацију добијених резултата као и за писање стручних радова.

4 ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1 Приказ остварених научних доприноса

Остварени су следећи научни доприноси:

- развијен је нови метаматички модел за ексергетску анализу комбинованог постројења гасне и парне турбине најкомплексније конфигурације;
- развијен нови математички модел за ексергоекономску оптимизацију комбинованог постројења гасне и парне турбине;
- развијена је нова оптимизациона стратегија за вишепараметарску ексергоекономску оптимизацију ради проналажења комбинације параметара која ће дати минимум функције циља.
- Развијен оригиналан компјутрески систем за ексергоекономску оптимизацију најкомплекснијих параметара уз узимање у обзир свих утицајних термодинамичких параметара.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

У дисертацији је развијен поступак за вишепараметарску ексергоекономску оптимизацију комбинованих постројења гасне и парне турбине комплексне конфигурације уз примену оптимизационог алгорита за брзо и поуздано проналажење оптималне комбинације утицајних параметара.

У односу на приступе који су до сада публиковани у отвореној литератури, развијенији метод је

- свеобухватнији пошто обухвата све утицајне параметре (број параметара није ограничен)
- може се применити без ограничења на све конфигурације комбинованог постројења гасне и парне турбине (као на пример код постројења са три нивоа притисака паре како је то демонстрирано у тези)
- примењен је оптимизациони алгоритам који брзо и поуздано проналази оптималне вредности утицајних параметара

- систем је робустан, брз и применљив у пракси како код развоја нових постројења тако и код пројекатских организација.

4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат је објавио следеће радове који су произашли из дисертације:

1. Mohammd, M. S., Petrovic, M.V.: Thermo-economic optimization of triple pressure HRSG operating parameters for combined cycle plants, THERMAL SCIENCE: Year 2015, Vol. 19, No. 2, pp. 447-460, doi:10.2298/TSCI131124040M, ISSN 0354-9836 M22 (IF=0.962)

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

У оквиру дисертације кандидат је развио нови систем за економску оптимизацију комбинованих постројења гасне и парне турбине комплексних конфигурација. Најважнији допринос кандидата у овој области се огледа у развоју модела оптимизације који дозвољава оптимизацију великог броја параметара без ограничења у погледу комплексности топлотне шеме постројења. Систем је успешно демонстриран на примеру комбинованог постројења гасне и парне турбине са три притиска. Показано је да се применом овог система могу значајно поправити степен корисности постројења као и економски показатељи рада постројења. Модел робустан и универзално применљив за најразличитије конфигурације термоенергетских постројења овог типа. Очекујемо да ће развијена оптимизациона методологија у будућности користити у пракси уместо метода које укључују искуствени избор параметара или сепаратну оптимизацију малог броја најугледнијих параметара.

Сматрамо да је кандидат израдом поднете дисертације показао знање, упорност и способност за самосталан истраживачки рад. Констатује се да је кандидат г. **Mohammed Saleh Mohammed** завршио докторску дисертацију у складу са предвиђеним планом и постављеним циљевима.

Комисије предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета да се докторска дисертација под називом дисертација **Exergoeconomic Analysis and Optimization of Combined Cycle Power Plant with Complex Configuration** (Ексергоекономска анализа и оптимизација комбинованог постројења гасне и парне турбине комплексне конфигурације) кандидата г. г. **Mohammeda Saleha Mohammeda** прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду у складу са важећим правилницима Факултета и Универзитета.

У Београду, 25.05.2015.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

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

проф. др Мирко Коматина,
Универзитет у Београду-Машински факултет

проф. др Драган Туцаковић,
Универзитет у Београду-Машински факултет

проф. др Зоран Стефановић, ред. професор у пензији
Универзитет у Београду-Машински факултет