

РАСПОДЕЛА ТОПЛОТНЕ ЕНЕРГИЈЕ У КОТЛОВСКОМ ПОСТРОЈЕЊУ ТЕРМОЕЛЕКТРАНЕ И ПРОЦЕНА ЗАПРЉАНОСТИ ГРЕЈНИХ ПОВРШИНА

Александар Латиновић¹, Владо Шимшић
ЈП ЕПС, Дирекција за производњу енергије, Београд
Предраг Васић, Петар Татомировић
Термоелектрана “Никола Тесла Б” Обреновац
Никола Крајновић
Институт “Михајло Пупин – Аутоматика” Београд

Апстракт – Расподела топлотне енергије по грејним површинама унутар котловског постројења у термоелектрани је један од кључних фактора за ефикасност рада котла. Током експлоатације таложе се наслаге пепела на грејним површинама и пројектована расподела топлотне енергије се нарушава. Изражено запрљање одређене грејне површине може указати на нерегуларно сагоревање у ложишту (недостатак O_2 , расподела и квалитет мељаве угља, ...)

У овом раду је описан софтверски програм, заснован на термодинамичким прорачунима, помоћу ког се одређује расподела топлотне енергије унутар котла и прејудицира запрљаност грејних површина котла. Описане су погодности програма за рад у реалном времену на ДЦС систему електране. Резултат рада није само да се запрљање констатује, већ и да се предузму мере како би се даље запрљање смањило или уклонило деловањем дувача гара. Програм је прилагођен за блок Б1 у термоелектрани „Никола Тесла Б“ у Обреновцу.

Кључне речи: расподела топлотне енергије, запрљаност грејних површина

HEAT ENERGY DISTRIBUTION WITHIN BOILER PLANT AT THERMAL POWER PLANTS AND ESTIMATION OF ASH DEPOSIT ON HEATING SURFACES

Abstract – The distribution of heat energy on boiler heating surfaces in a thermal power plant is one of the key factors in the efficiency of the boiler. During the exploitation ash deposit can accumulate on heating surfaces and projected heat distribution is disturbed. Severe ash deposit on specific heating surface can result from irregular combustion in the boiler (lack of O_2 , distribution and quality of milling, ...).

This paper describes software, based on thermodynamic calculations, that determines the distribution of heat within the boiler and predicts ash deposit on specific heating surface of the boiler. Software ability to work in real time on DCS system for thermal power plant is also described in this paper. The result of this paper is not only to locate heating surface with severe ash deposit, but also to take next step, to further reduce or eliminate ash deposit with soot blowers. The program is adapted for unit B1 at the power plant "Nikola Tesla B" in Obrenovac.

Keywords: distribution of heat energy, ash deposit on heating surface

¹ e-mail аутора: aleksandar.latinovic@eps.rs

1. УВОД

Услед развоја нових дигиталних система управљања електраном (Digital Control System – DCS), постојања великог броја мерења која се могу пратити у реалном времену, складиштити и обрађивати, дата је могућност за релативно лако имплементирање разних апликација за праћење и побољшање рада постројења. Управо на основу горе реченог развила се идеја о праћењу расподеле топлотне енергије по грејним површинама котла, у циљу бољег разумевања процеса који се одвија у њему. Иако је овде фокус праћења расподеле топлотне енергије по грејним површинама котла стављен на могућност раног откривања запрљаности грејних површина, предности познавања расподеле топлоте су вишеструке (одређивање положаја ватре у ложишту, рад у неким некарактеристичним прелазним режимима, ...). У ову сврху направљен је софтверски програм (апликација) који се користи мерењима преузетим са ДЦС система електране. Програм је прилагођен за блок Б1 у термоелектрани „Никола Тесла Б“ у Обреновцу али се може прилагодити за било који блок који има имплементиран ДЦС систем управљања и који архивира потребна мерења.

2. ПРОБЛЕМ ПРЉАЊА ГРЕЈНИХ ПОВРШИНА СА ГАСНЕ СТРАНЕ

Током рада парног котла долази до прљања грејних површина са гасне стране, при чему се стварају чврсте и растресите наслаге. Прљање грејних површина долази највише до изражаја код котлова са сагоревањем спрашеног угља у лету, јер су гасовити продукти сагоревања засићени чврстим летећим честицама.

Уколико је спрашивање угља (квалитет мељаве) грубље, има услова да прљање буде интензивније. Прљање изазивају летећи пепео, летећа шљака, летећи кокс и чађ. Летећи пепео и кокс стварају најчешће растресите наслаге које се лако одстрањују, док се летећа шљака лепи за грејне површине стварајући тврде слојевите наслаге које доводе до сметњи у раду котла.

За растресите наслаге су карактеристичне релативно мале силе узајамног привлачења. Стварање растреситих наслага зависи од низа фактора од којих су најзначајнији брзина гасова, пречник цеви, поредак цеви, геометрија грејне површине, величина и гранулометријски састав летећег пепела, хемијски састав пепела, угао наструјавања грејне површине и концентрација летећег пепела у димним гасовима.

Чврсте наслаге се стварају претежно у ложиштима парних котлова када је температура димних гасова виша од температуре омекшавања пепела или у случају незадовољавајуће аеродинамичке организације ложишног процеса, када растопљене честице летећег пепела не стигну да се охладе и очврсну, него се лепе за њих. Процес зашљакивања ложишта обично почиње на зидовима ложишта, између екрана и у зауставним зонама у ложишту.

Зашљакивањем се смањује количина топлоте предата пријемнику у ложишту и повишава температура димних гасова на излазу из њега. Поред повећања топлотног отпора, наслаге пепела при малим брзинама могу битно да смање пресек за струјање димних гасова.

Са гледишта размене топлоте, према општем изразу за коефицијент пролаза топлоте,

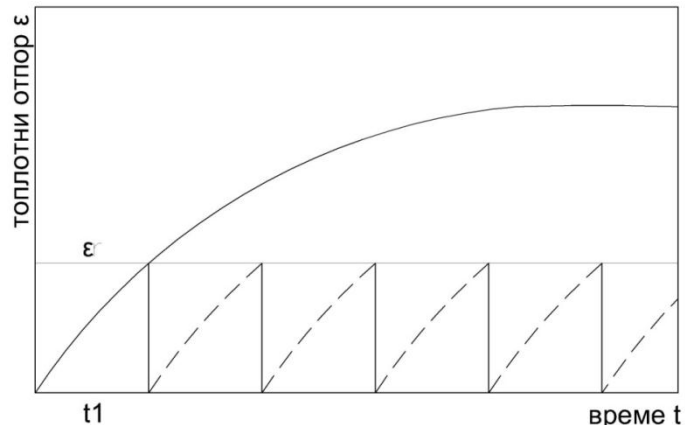
$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (1)$$

димензије наслага пепела одређују отпор провођењу топлоте $\varepsilon_{\text{п}} = \delta_{\text{п}}/\lambda_{\text{п}}$.

$\delta_{\text{п}}$ - дебљина наслага пепела;

$\lambda_{\text{п}}$ - коефицијент проводљивости наслага пепела.

Топлотни отпор наслага на грејним површинама са гасне стране зависи експоненцијално од времена експлоатације котла (Слика 1.). У почетку се топлотни отпор, дебљина наслага, повећава брзо, а затим достиже практично равнотежно стање. Ако се жели да се топлотни отпор током рада парног котла одржава на одређеној вредности, на пример, на оној која је усвојена при термичком прорачуну конвективних грејних површина ($\varepsilon_{\text{р}}$), мора се приступити чишћењу грејних површина у једнаким временским интервалима (τ_1).



Слика 1. Зависност топлотног отпора од времена, теоријска крива

Чишћење грејних површина у зависности од положаја у ложишту врши се парним и воденим дувачима гара. Рад дувача гара по правилу је аутоматски по унапред дефинисаном програму. Према искуственој процени руковоаца котла налог за чишћење грејних површина може се издати ручно. Доле приказани прорачун примљене енергије по грејним површинама могао би навестити руковоацу котла која грејна површина је запрљана и у којем тренутку треба вршити њено прање.

Неблаговремено коришћење дувача гара довело би до прљања грејних површина изнад неке очекиване, пројектне вредности. Прљањем грејних површина нарушава се расподела топлоте по истим. Такође, као последица прљања грејних површина на неким грејним површинама дошло би до прегревања пријемног флуида што изискује повећање количина воде за убризгавање. Још једна последица запрљаности грејних површина је пораст температуре димних гасова на излазу из котла. Очигледно је да би повећање протока воде за убризгавање и повишена температура димних гасова на излазу из котла довела до знатног погоршања степена корисности котла.

3. ПРОРАЧУН ПРИМЉЕНЕ ТОПЛОТНЕ ЕНЕРГИЈЕ ПО ГРЕЈНИМ ПОВРШИНАМА

Котловско постројење блока Б1 у ТЕНТ у Обреновцу има следеће грејне површине: економајзер, испаривач, прегрејач 1, прегрејач 2, прегрејач 3, прегрејач 4, међупрегрејач 1, међупрегрејач 2 и међупрегрејач 3. Економајзер је посматран као једна целина. Према струјању димног гаса, грејне површине стоје у следећем поретку: испаривач, прегрејач 3, прегрејач 4, међупрегрејач 3, прегрејач 2, међупрегрејач 2, прегрејач 1, међупрегрејач 1 и економајзер.

За сваку грејну површину на блоку Б1 рачуната је енергија коју грејна површина прими у једној секунди. Динамичке промене унутар котла нису од значаја за овај рад, тако да је узето да је проток паре на улазу и излазу из грејне површине једнак. Такође, занемарене су и динамичке промене примљене енергије услед промене средње температуре паре унутар грејне површине. При прорачуну енергије коју грејна површина прими у јединици времена коришћена је следећа једначина:

$$P_{top} = \dot{m} \cdot h(t_{iz}, p_{iz}) - \dot{m} \cdot h(t_{ul}, p_{ul}) \quad (2)$$

t_{ul}, t_{iz} – температура паре на улазу и излазу грејне површине [°C];

p_{ul}, p_{iz} – притисак паре на улазу и излазу грејне површине [bar];

\dot{m} – проток паре кроз грејну површину [kg/s];

h – енталпија паре [kJ/kg];

P_{top} – топлотна снага [W].

Мерења температуре и притиска преузета су из система за складиштење података блока Б1 (из архиве). Мерење укупног протока такође је преузето из архиве. Свака грејна површина подељена је у четири гране. Како су била доступна сва мерења по гранама, укључујући и проток убризгавања, при прорачуну укупне енергије грејне површине рачунала се енергија по свакој грани грејне површине. Проток кроз појединачну грану рачунат је на месту убризгавања, коришћењем следећих једнакости:

$$\dot{m}_{iz} \cdot h(t_{iz}, p_{iz}) = \dot{m}_u \cdot h(t_u, p_u) + \dot{m}_{ul} \cdot h(t_{ul}, p_{ul}) \quad (3)$$

$$\dot{m}_{iz} = \dot{m}_u + \dot{m}_{ul} \quad (4)$$

$$\dot{m}_{ul} = (\dot{m}_u \cdot (h(t_u, p_u) - h(t_{iz}, p_{iz}))) / (h(t_{iz}, p_{iz}) - h(t_{ul}, p_{ul})) \quad (5)$$

t_{ul}, t_{iz}, t_u – температура паре пре и после убризгавања и температура воде за убризгавање, редом[°C];

p_{ul}, p_{iz}, p_u – притисак паре пре и после убризгавања и притисак воде за убризгавање, редом[bar];

$\dot{m}_{ul}, \dot{m}_{iz}, \dot{m}_u$ – проток паре кроз пре и после убризгавања и проток убризгавања по грани, редом [kg/s];

h – енталпија паре [kJ/kg];

Проток по грани израчунат према једначини (5) коришћен је при прорачуну енергије по јединици времена за сваку грану грејне површине према једначини (2). Проток по гранама по израчунавању је балансиран са укупним протоком паре, мереном величином која се архивира.

За потребе прорачуна развијен је софтвер који на основу тачака из таблица енталпије, које садрже вредности енталпија, за тачно одређену мрежу вредности температура и притисака, рачуна енталпију у произвољној тачки. Софтвер за унете вредности температуре и притиска интерполацијом израчунава енталпију паре (односно воде) узимајући у обзир линију засићења.

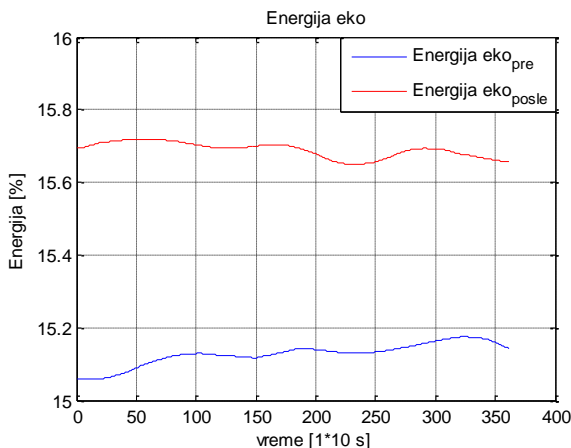
4. РЕЗУЛТАТИ ПРОРАЧУНА

За потребе прорачуна из архиве блока Б1 преузета су мерења по гранама грејних површина, за сваку грејну површину, која су потребна за израчунавање енергије по јединици времена, односно за потребе израчунавања једначина (2) и (5). Такође, узимани су периоди рада са константним и међусобно једнаким параметрима. Период који је преузимао био је између 60 и 90 минута.

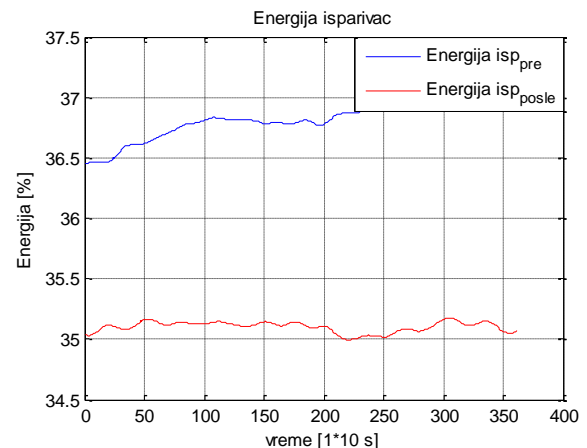
Одабрана су четири дана за које су преузета мерења. Поређење је вршено за по два одабрана дана посебно. Прво поређење, слике од 2 до 10, узето је за један дан у априлу и један дан у новембру. Циљ је био да се покаже како се мења расподела енергије за релативно чист котлао (април, енергија на сликама од 2 до 10 представљена плавом бојом) у односу на расподелу енергије после седам месеци рада (новембар, енергија на сликама од 2 до 10 представљена црвеном бојом). У оба дана параметри рада су били једнаки, снага 650 MW, једнако прегрејање, укључене обе линије загрејача високог притиска ... Потребно је приметити да је за оба одабрана дана апсорбована енергија од стране котла иста, само је другачије распоређена. На приказаним резултатима прорачуна дат је процентуални удео сваке грејне површине у односу на укупну енергију котла. Због благих промена, временска скала подељена је на 10 s, иако су доступна мерења на 1 s.

Друго поређење урађено је за одабрана два дана, један пре и један после првог чишћења котла дувачима гара, слике од 11 до 19. Циљ одабраног поређења је да покаже ефикасност чишћења. Одабрано је да параметри рада буду једнаки. При описаном поређењу укључена је једна линија загрејача високог притиска. Занимљиво је да се упореде и режими рада са једном линијом загрејача високог притиска (слике од 11 до 19) и са обе линије загрејача (слике од 2 до 10). При оба поређења снага блока била је 650 MW.

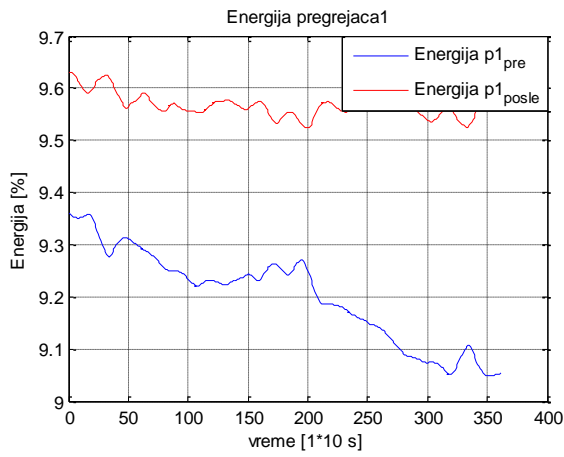
Потребно је нагласити у вези са првим поређењем, да је пре одабраног дана у новембру месецу било неколико чишћења дувачима гара.



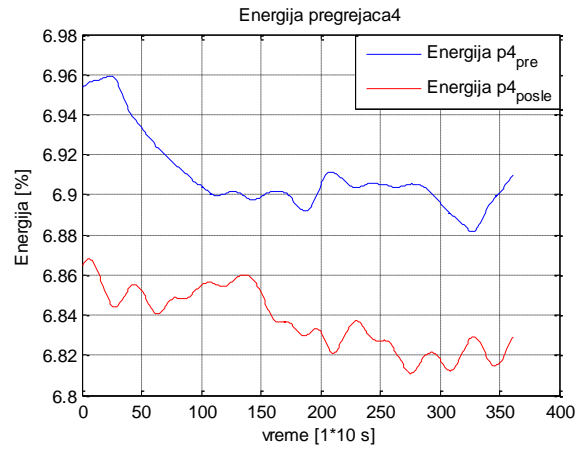
Слика 2



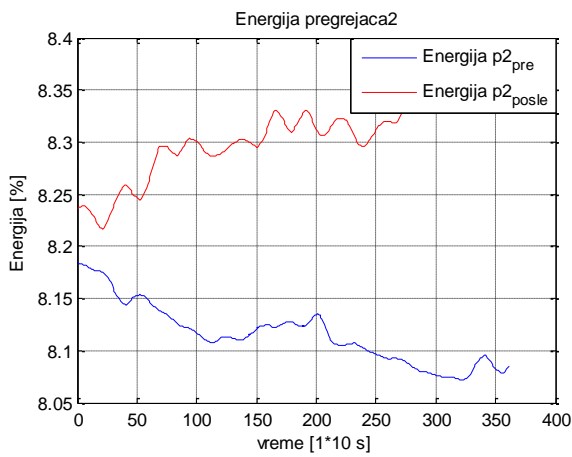
Слика 3



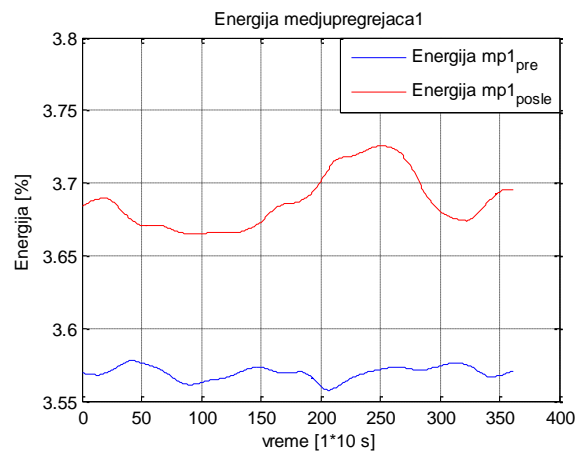
Слика 4



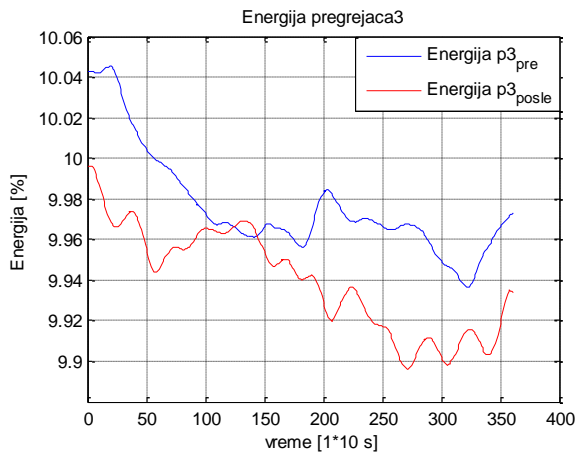
Слика 7



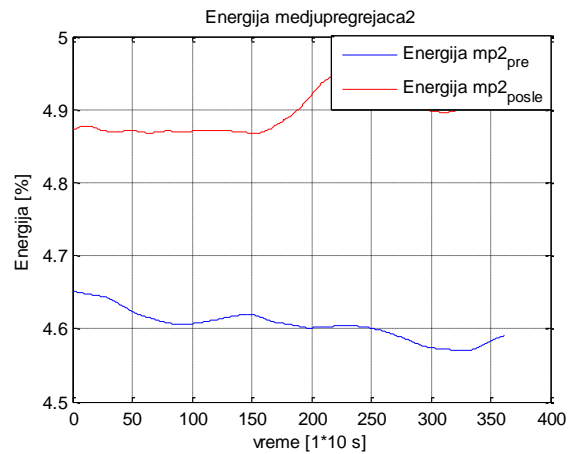
Слика 5



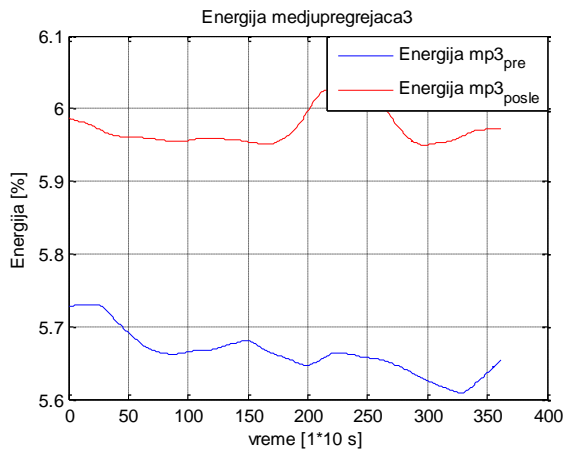
Слика 8



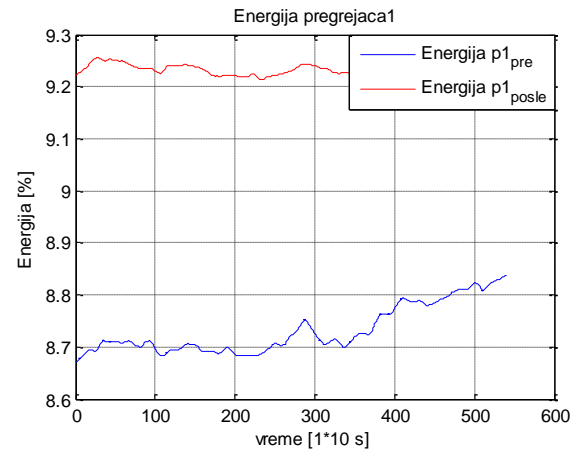
Слика 6



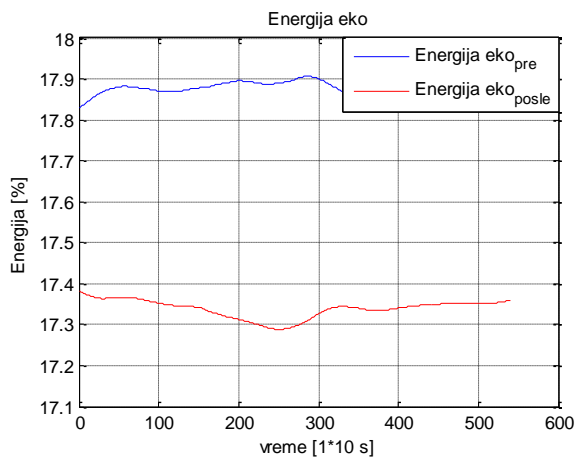
Слика 9



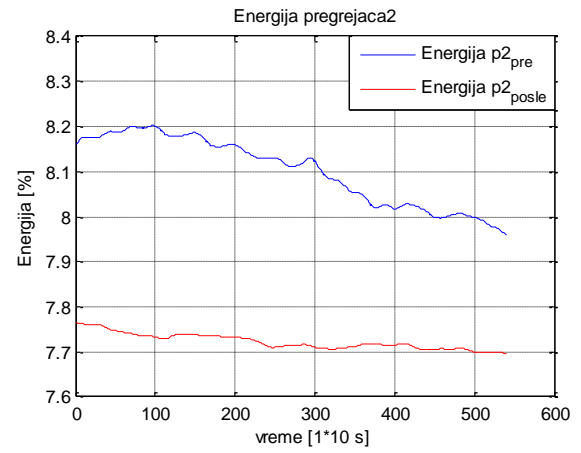
Слика 10



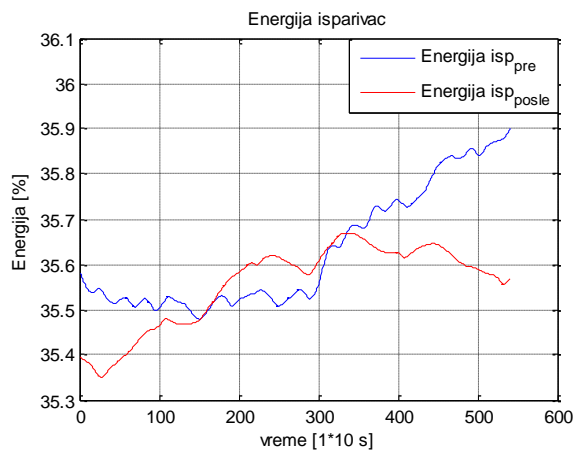
Слика 13



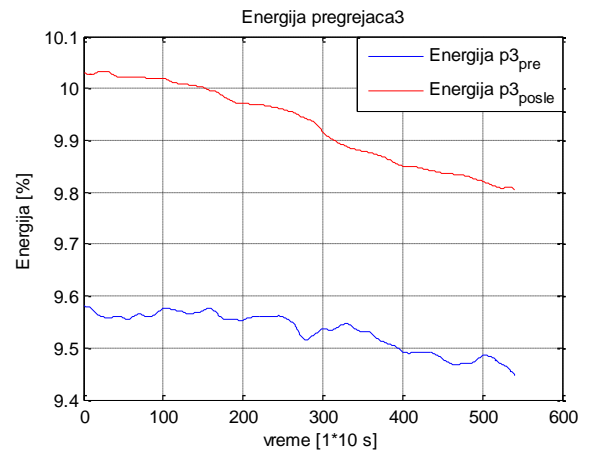
Слика 11



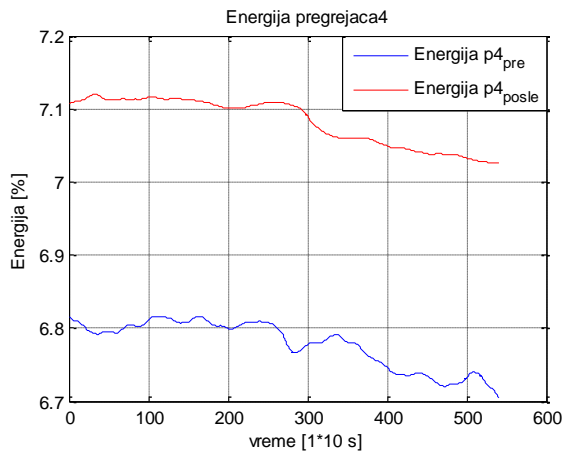
Слика 14



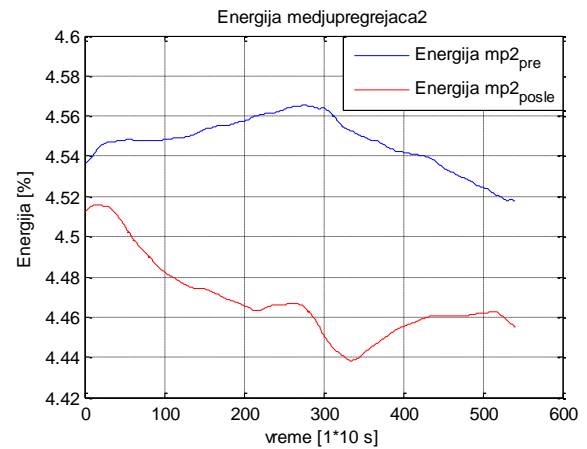
Слика 12



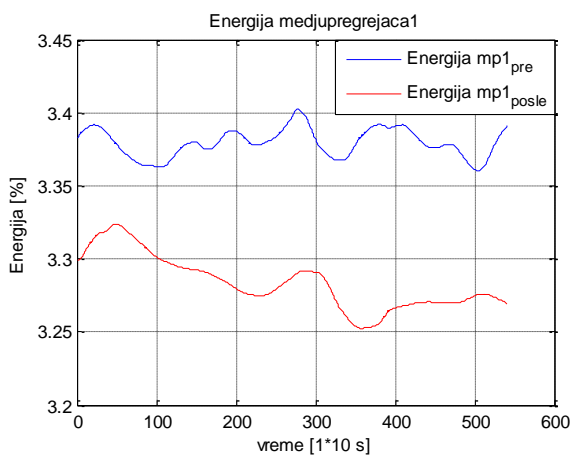
Слика 15



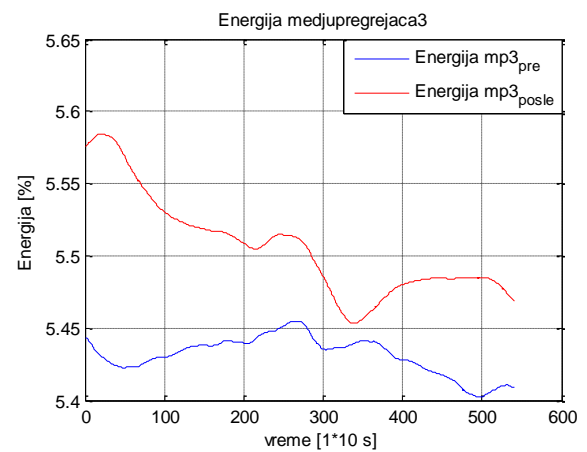
Слика 16



Слика 18



Слика 17



Слика 19

5. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА ПРОРАЧУНА

На сликама од бр.2 до бр.10 јасно се види прерасподела топлотне енергије по грејним површинама у периоду релативно чистог и запрљаног котла. Испаривач процентуално прима највише топлотне енергије од горива од свих грејних површина, за случај блока ТЕНТ Б1 то износи грубо око 35% укупне енергије која се преда измењивачким површинама. Уједно, испаривач је грејна површина која је највише подложна прљању. Са слике бр.3 може се закључити да је количина топлоте коју прими испаривач када је запрљан за око 1,5% мања у односу на количину топлоте коју прими када је релативно чист. Управо ово смањење може се приписати запрљању самог испаривача. До сличних закључака долази се и за грејне површине које су по струјању гасова иза испаривача: прегрејач 3 (слика бр.6), прегрејач 4 (слика бр.7), међупрегрејач 3 (слика бр.10), с тим што је овде разлика нешто нижа у зависности од укупне количине топлоте коју та грејна површина прима. Грејна површина која има предиспозицију да има најдебље наслаге је прегрејач 3. Разлог зашто разлика у примљеним енергијама на слици б није већа је у због тога, што ће касније бити показано, да је на прегрејачу 3 најбоље чишћење, а између мерења узетих за април и новембар било је неколико прања котла дувачима гара. Што се тиче грејних површина које су по струјању димних гасова иза међупрегрејача 3, а то су: прегрејач 2 (слика бр.5), међупрегрејач 2 (слика бр.9), прегрејач 1 (слика бр.4), међупрегрејач 1

(слика бр.8) и економијазер (слика бр.2), код њих је ситуација обрнута. Количине топлоте које се предају овим грејним површинама када је котао запрљан су веће од оних када је котао релативно чист. Узрок овоме је управо запрљање грејних површина које су прве по струјању димних гасова, пре свега испаривача, услед чега се не одузима довољно топлоте димним гасовима у ложишту и повећаног преузимања топлоте у конвективном делу гасног тракта. Ово је посебно изражено код економијазера који у периоду када је котао запрљан прима око 0,7% више енергије. Како је температура воде која улази у економијазер једнака у оба случаја, следи да је температура димних гасова који струје кроз економијазер виша у случају прљавог котла.

Слични закључци се могу извести из другог примера поређења, слике бр. 11 до бр. 19, где је узет период непосредно пре и после прања котла. Једина недоумицу представља испаривач слика бр. 12 где су предате количине топлоте испаривачу пре и после прања готово на истом нивоу. Један од могућих узрока овоме може бити евентуално лоше прање испаривача. Такође, могуће је да запрљаност грејних површина утиче на потрошњу угља у толикој мери да је за исту снагу потребна мања количина угља, што касније има утицаја на енергију коју прими испаривач. Потребно је поменути да је приказано прво прање котла дувачима гара. У наредним прањима остварено је боље прање испаривача, али је одабрано прво прање због апсолутно једнаких параметара рада котла пре и после прања.

Још једна ствар коју треба напоменути при поређењу серије слика од 2 до 10 и серије слика од 11 до 19, је да су у првом случају укључене обе линије загрејача воде високог притиска док у другом случају ради само једна линија. Количина топлоте која се размени на економијазеру је приметно различита. Наиме, у тренуцима када ради само једна линија ЗВП количина топлоте коју прими економијазер је за око 2% већа у односу на период када су радиле обе линије, што је последица хладније воде која улази у економијазер.

6. ЗАКЉУЧАК И ДАЉА ИСТРАЖИВАЊА

На основу приказаног може се закључити да израчунавање топлотне енергије по грејним површинама може дати задовољавајуће резултате у прањењу запрљаности грејних површина. Промена примљене енергије грејне површине може да укаже коју грејну површину је потребно више третирати.

Израчунавањем расподеле топлотне енергије по грејним површинама пре и после прања котла може се оценити ефикасност прања котла.

Поред наведеног, израчунавањем расподеле топлотне енергије по грејним површинама отварају се нове могућности за даље унапређење ефикасног рада котла. Софтвер који је описан у овом раду има могућност да ради у реалном времену, уграђен у ДЦС систем управљања. Једини услов исправног рада је да мерења потребна за прорачун енергије буду доступна и исправна. У случају да софтвер ради у реалном времену било би могуће да се на основу промене примљене енергије процени којој страни котла је ближа жижа.

Наредно унапређење софтвера је да се представи динамичка промена топлотне енергије по грејним површинама. Са динамичком променом топлотне енергије у реалном времену могао би се стабилизовати рад котла и предвидети велики поремећаји у ложењу, јер се промена енергије на одређеним грејним површинама може се установити до три пута пре него што се то види на промени притиска.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Упутства за котловско постројење – ТЕНТ Б, скрипте, *Термоелектране „Никола Тесла“*, Обреновац.
- [2] Љ. Бркић, Т. Живановић, Д. Туцаковић, “Парни котлови”
- [3] Љ. Бркић, Т. Живановић, Д. Туцаковић, “Термички прорачун парних котлова” , треће допуњено и измењено издање, *Машински факултет Универзитета у Београду*, Београд, 2005.
- [4] Ђорђе Козић, Богосав Васиљевић, Владимир Бекавац, “Приручник за термодинамику у јединицама СИ”, *Машински факултет*, Београд, 2005.
- [5] P. K. Nag "Power plant engineering" Tata McGraw-Hill, 2002.