

DETERMINATION OF THE AVERAGE ANNUAL EFFICIENCY BY ADAPTED MEASUREMENT PROCEDURE ON CHP PLANTS

Aleksandar Erić*, Dejan Cvetinović, Predrag Škobalj, Nikola Živković, Nada Milutinović

*«Vinča» Institute of Nuclear Sciences, National Institute of the Republic of Serbia,
University of Belgrade, Laboratory for Thermal Engineering and Energy,
Mike Petrovica Alasa 12-14, 11351 Vinca, Belgrade, Serbia*

Abstract: The paper presents the methodology for the determination of the average annual efficiency of CHP plants. The method is based on determining the effective efficiency on three different loads in order to obtain a functional dependence of the efficiency and unit load. For the calculation of the average annual efficiency, the annual load of the plant and the calculated functional dependence of the efficiency are taken into account. When calculating the effective efficiency, both methods, direct and indirect, were used. The methodology for determining the average annual efficiency of the CHP plant was implemented on the example of the cogeneration gas power plant "VELEBIT 3B" within the petroleum company NIS, Serbia. The presented methodology can be applied to similar plants for the determination of average annual efficiency.

Key words: CHP plant, methodology, average annual efficiency, adapted methodology

1. INTRODUCTION

Kombinovana proizvodnja toplotne i električne energije CHP je mnogo efikasniji način konverzije energije nego kada je u pitanju proizvodnja toplotne i električne energije odvojeno [1]. Generalno gledano u zavisnosti od načina pokretanja generatora za proizvodnju električne energije postrojenja se razlikuju, tako da postoje više tipova CHP: parne turbine, gasne turbine, ORC turbine [2], motori sa unutrašnjim sagorevanjem itd, a u poslednje vreme se javljaju i gorivne ćelije u obliku malih CHP paketa [3]. Svako od ovih postrojenja ima svoju primenu u zavisnosti od veličine postrojenja i tehnoloških zahteva.

Pored toga što su CHP postrojenja sama po sebi mnogo efikasnija od klasičnih postrojenja za proizvodnju električne i toplotne energije, optimizacija i neprekisno usavršavanje postojećih postrojenja nameće se kao neophodan korak u postizanju što veće efikasnosti. Stoga je neophono

analizirati efikasnost postrojenja tokom njegovog rada tokom cele godine. Kontinualno praćenje efikasnosti CHP postrojenja je moguće, ali je veoma teško i komplikovano, jer da bi se to uradilo na precizan način potrebno je merenje velike količine parametara koje nije uvek jednostavno odrediti samo procesnim instrumentima, već je potrebno i dodatno merenje.

Stoga je razvijena metodologija određivanja efikasnosti, odnosno stepena korisnosti CHP postrojenja na godišnjem nivou na osnovu merenja efektivnog stepena korisnosti i poznavanja opterećenja na godišnjem nivou. Razvijena metodologija se zasniva na određivanju efektivnog stepena korisnosti na više različitih opterećenja, nakon čega se određuje funkcionalna zavisnost opterećenje-stepen korisnosti. Na osnovu te funkcionalne zavisnosti i zavisnosti opterećenje-vreme integraljenjem se dobija efikasnost postrojenja u vremenu. Ključna stvar u celokupnoj metodologiji je, zapravo, određivanje efektivnog stepena korisnosti postrojenja koje se može odrediti prema dve metode, direktnoj i indirektnoj. Za obe metode potrebna su specifična termotehnička merenja na postrojenju. Izbor metode određivanja efektivnog stepena korisnosti, kao i obim merenja, zavisi od vrste postrojenja i njegove specifičnosti i vrši se nakon detaljnog proučavanja svakog postrojenja ponaosob. Generalno gledano za određivanje efektivnog stepena korisnosti prema direktnoj metodi potrebno je poznavanje uložene i dobijene (korisne) energija, a prema indirektnoj metodi potrebno je poznavanje korisne energije i energije sadržane u gubicima. Međutim, imajući u vidu da kogenerativna postrojenja nisu tipska postrojenja, već svako ima određene specifičnosti, svakom postrojenju se mora posvetiti posebna pažnja prilikom definisanja metodologije, izbora metode određivanja efektivnog stepena korisnosti i izbora metoda u okviru termotehničkih merenja na postrojenju. U ovom radu dat je primer određivanja godišnjeg stepena korisnosti kogeneracionog postrojenja na primeru kogeneracione gasne elektrane „VELEBIT 3B“ u okviru kompanije „Naftna industrija Srbije A.D.“ [4]. Metodologija se zasniva na određivanju efektivnog stepena korisnosti postrojenja na 50, 75 i 100% opterećenja (500kWe, 750kWe i 1000kWe) koji se računa na osnovu sprovedenih termotehničkih merenja na postrojenju. Pored metodologije proračuna srednjeg godišnjeg stepena korisnosti postrojenja, prikazan je metod određivanja efektivne vrednosti stepena korisnosti postrojenja, i po direktnoj, i po indirektnoj metodi.

2. OPIS POSTROJENJA

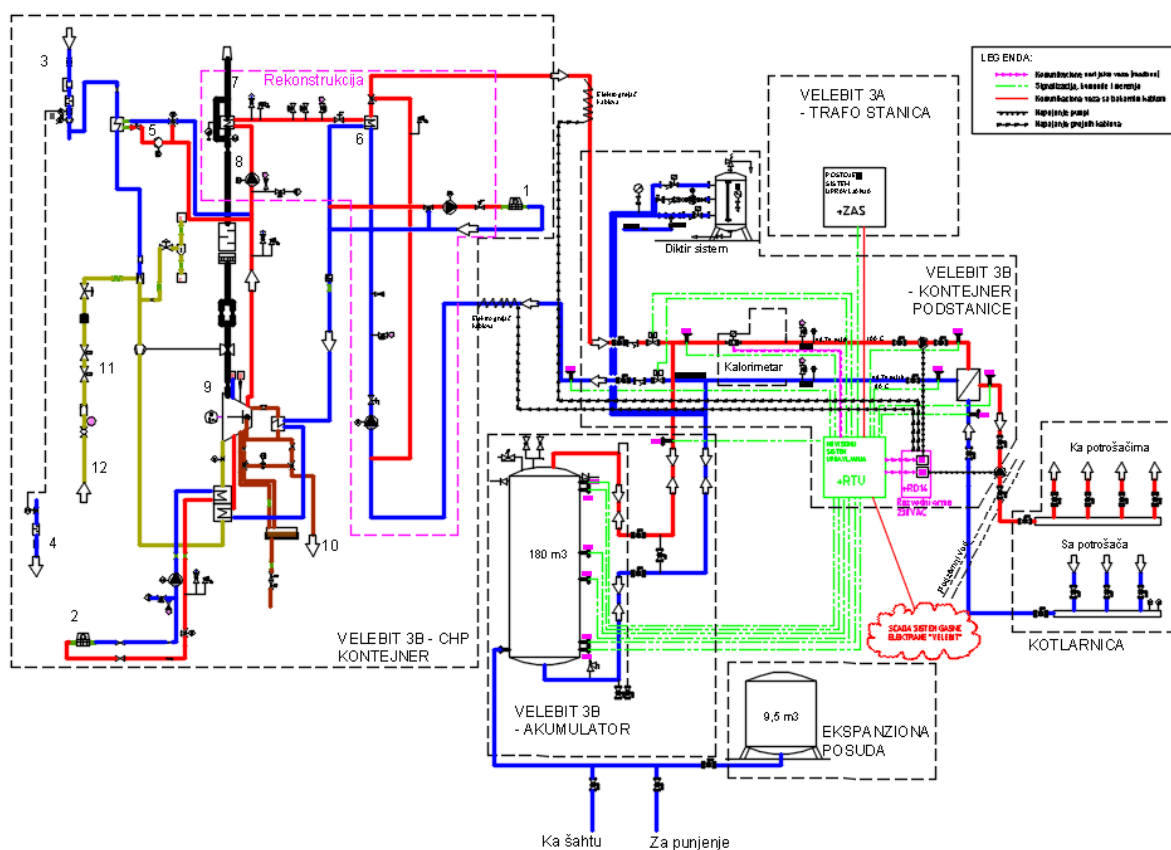
Na naftnom polju SS - I Velebit izgrađena su 2013. godine kogeneraciona postrojenja (elektrane) „Velebit 1“ i „Velebit 2“ jednake snage od po 1 MVA i od tada su u stalnom pogonu. Gasna elektrana „Velebit 3“ izgrađena je kao jedan objekat snage 2x1 MVA, sa dva agregata identičnih snaga i u radu je od februara 2015. godine. Od puštanja u rad kogeneracionih elektrana „Velebit 1“ i „Velebit 2“ proizvodnja toplotne energije iz ovih elektrana pokrivala je sve potrebe konzuma na polju SS1

Velebit, dok je novoizgrađena kotlarnica kapaciteta 2x560 kW (koja je van predmetne parcele gasne elektrane) bila van pogona i služila je kao rezerva. Zbog izmenjenog kvaliteta gasa Naručilac je ograničio snagu svake jedinice na 999 kW.

Rekonstrukcija je izvršena radi dobijanja „Feed-in“ tarife za jedan od agregata elektrane „Velebit 3“, čijom je rekonstrukcijom dobijen kogeneracioni agregat „Velebit 3B“ koji ispunjava uslove za dobijanje „Feed-in“ tarife, dok je drugi agregat („Velebit 3A“) zadržan u postojećem stanju.

Rekonstrukcija gasne elektrane je urađena tako da jedinica koja je transformisana u kogeneracionu elektranu zadovoljava ceo toplotni konzum naftnog polja SS1 Velebit. Ugradnjom rezervoara – akumulatora toplote, koji je spregnut u radu sa ovom elektranom, treba da obezbedi takav rad elektrane da se postigne srednji godišnji stepen korisnosti od najmanje 75% (prema Uredbi Vlade Republike Srbije - „Uredba o uslovima i postupku sticanja statusa povlašćenog proizvođača električne energije privremenog povlašćenog proizvođača i proizvođača električne energije iz obnovljivih izvora energije“, u daljem tekstu Uredba) uz maksimalnu moguću proizvodnju električne energije.

Elektrana i akumulator se toplovodom povezuju sa postojećom kotlarnicom odakle se vrši distribucija toplotne energije prema potrošačima (Slika 2.1).



Slika 2.1. Tehnološka šema postrojenja

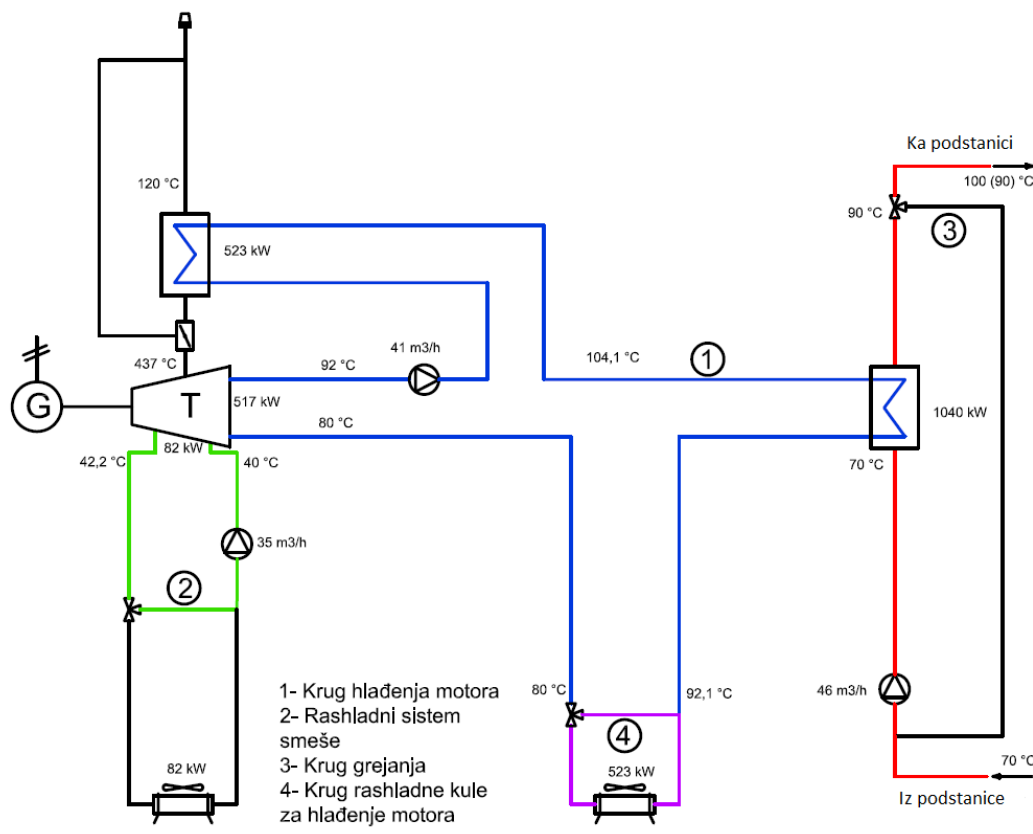
Otpadna toplota koja se odvodi u visokotemperaturnoj liniji se koristi za proizvodnju toplotne energije koja se šalje potrošačima, dok se otpadna toplota niskotemperaturne linije (II stepen hlađenja gasne smeše) ne koristi, već se preko kula za hlađenje, kao što je to i u postojećem stanju, odvodi u okolinu.

Visokotemperaturna linija sa razmenjivačima toplote obuhvata sledeće krugove gasnog motora:

- hlađenje izduvnih gasova motora;
- hlađenje gasnog motora;
- hlađenje ulja za podmazivanje;
- hlađenje smeše gasa i vazduha iza kompresije u turbopunjaču (Cirkulacioni krug 2).

Ova toplotna energija se preko razmenjivača toplote predaje toploj vodi koja se dalje transportuje do kontejnera podstanice, a odatle u akumulaciju i/ili ka potrošačima. Niskotemperaturna linija razmenjivača postoji već ugrađena u kontejner i obezbeđuje normalan rad motora i obuhvata samo jedan krug gasnog motora, tj. hlađenje mešavine gasa i vazduha iza drugog stepena kompresije (međuhladnjak 2 koji ima niže temperature fluida).

Visokotemperaturna linija sa razmenjivačima toplote inkorporirana je u cirkulacioni krug hlađenja motora (1) na Slici 2.2. Ovaj cirkulacioni krug obuhvata korišćenje otpadne toplote motora i korišćenje otpadne toplote izduvnih gasova preko razmenjivača toplote nominalne snage 549 kW koji je smešten u liniju izduvnih gasova.

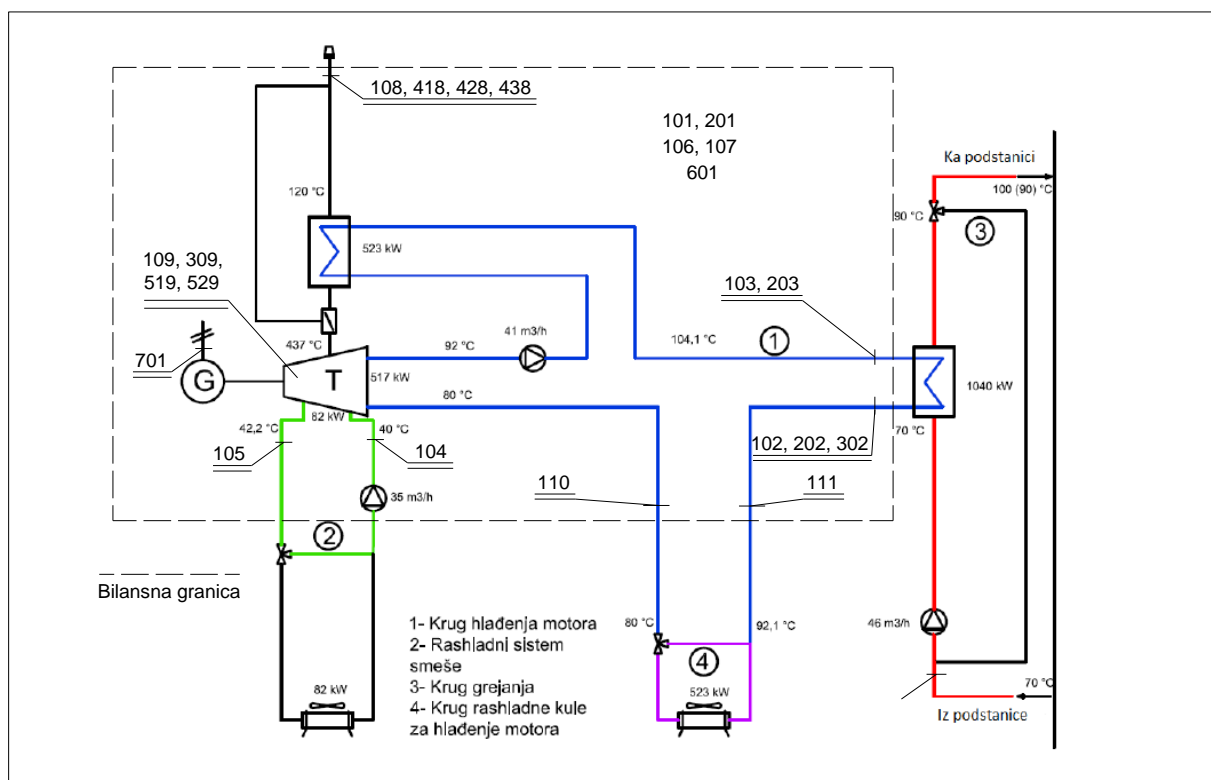


Slika 2.2. Šema rashladnih krugova na kogeneracionom postrojenju „Velebit 3B“

Cirkulacioni krug (3) sa svojim razmenjivačem toplote nominalne snage 1022 kW i cirkulacionom pumpom kapaciteta 49,6 m³/h obezbeđuje isporuku toplotne energije ka kotlarnici i korišćenje otpadne toplote motora. Cirkulacioni krug rashladne kule za hlađenje motora (4), sa svojim razmenjivačem toplote nominalne snage 523 kW i kulom za hlađenje, koji je u postojećem stanju obezbeđivao hlađenje motora sada je povezan sa cirkulacionim krugom (1) i uključuje se automatski kada potrebe za grejanjem ne obezbeđuju dovoljno hlađenje rashladne tečnosti motora.

2. METODOLOGIJA

Metodologija održavanja godišnjeg stepena korisnosti opisanog postrojenja bazira se na određivanju stepena korisnosti za više različitih stepena opterećenja (50, 75 i 100%) imajući u vidu da postrojenje radi na različitim opterećenjima u toku godine. Poznavanjem zavisnosti opterećenja postrojenja u toku godine od vremena, moguće je izračunati zavisnost stepena korisnosti postrojenja od vremena, kao i njegovu usrednjenu vrednost na godišnjem nivou. Stepenn korisnosti se generalno može računati direktnom i indirektnom metodom. Direktna metoda podrazumeva računanje odnosa dobijene i uložene energije, dok indirektna metoda uzima u obzir proračun svih gubitaka koji se javljaju u procesu. Obe metode su prihvatljive i prilikom preciznog određivanja trebalo bi da daju identične rezultate.



Slika 3.1. Šema mernih mesta na bilansnoj granici postrojenja „Velebit 3B“

U cilju određivanja stepena korisnosti prema obe metode, potrebno je sprovođenje merenja određenih ulaznih veličina koje su neophodne za proračun. Da bi se merenje karakterističnih veličina sprovelo,

prevashodno je potrebno postaviti bilansnu granicu posmatranog sistema koja mora precizno da definiše sve ulazne i izlazne veličine koje su od važnosti za dalji proračun. Šema postrojenja sa prikazanom bilansnom granicom i mernim podacima prikazana je na Slici 3.1.

Bilansna granica kombinovanog postrojenja „Velebit 3B“ obuhvata sledeće:

- sa strane goriva – merna ravan na ulazu goriva u kontejner sa motorom u kojoj se definišu parametri korišćenog gasa;
- sa strane vazduha – merna ravan na ulazu vazduha u kontejner sa motorom;
- sa strane vode u Krugu hlađenja motora (1) na ulazu u podstanicu – merna ravan na cevovodu vode na ulazu u podstanicu, odnosno od kontejnera;
- sa strane vode u Krugu hlađenja motora (1) na izlazu iz podstanice – merna ravan na cevovodu vode na izlazu iz podstanice, odnosno ka kontejneru;
- sa strane vode u Krugu rashladnog sistema smeše (2) – merna ravan na cevovodu vode na ulazu u rashladnu kulu motora, odnosno od kontejnera;
- sa strane vode u Krugu rashladnog sistema smeše (2) – merna ravan na cevovodu vode na izlazu iz rashladne kule motora, odnosno ka kontejneru;
- sa strane vode u Krugu rashladnog sistema motora (4) – merna ravan na cevovodu vode na ulazu u rashladnu kulu motora, odnosno od kontejnera;
- sa strane vode u Krugu rashladnog sistema motora (4) – merna ravan na cevovodu vode na izlazu iz rashladne kule motora, odnosno ka kontejneru;
- sa strane dimnih gasova – merna ravan na kanalu dimnih gasova iza hladnjaka dimnih gasova.
- sa strane generatora – merna ravan na stezaljkama generatora.

Na svakoj navedenoj mernoj ravni potrebno je kvantifikovati vrednosti ulaznih i izlaznih veličina koje su bitne za računsko određivanje stepena korisnosti. Radi jednostavnijeg sagledavanja merenja, merene veličine su grupisane u nekoliko grupa.

Grupa 1: Korisna toplota proizvedena u kombinovanom ciklusu

Korisna toplota elektrane u kombinovanom ciklusu određuje se na osnovu merenja parametara vode na ulazu i izlazu iz bilansne granice Kruga hlađenja motora (1), računanjem razlike entalpija i množenjem sa masenim protokom.

Ulazne veličine u bilansnu granicu sistema sa vodene strane su parametri vode pritisak, temperatura i maseni protok (102, 202, 302), a izlazne veličine biće pritisak i temperatura (103, 203).

Grupa 2: Električna energija proizvedena u kombinovanom ciklusu

Snaga električne energije proizvedena u kombinovanom ciklusu elektrane meri se na stezaljkama generatora (701).

Grupa 3: Toplotna energija potrošenog goriva u kombinovanom ciklusu

Energija uneta gorivom u kombinovani ciklus određuje se računskim putem na osnovu merenja temperature i protoka goriva (109, 309) na ulazu u bilansnu granicu i merenja sastava korišćenog goriva (519, 529).

Grupa 4: Određivanje drugih veličina relevantnih za proračun

Za određivanje stepena korisnosti prema direktnoj metodi dovoljano je merenje bilansnih veličina u okviru prve tri grupe. Međutim, radi provere i sigurnosti, može se računati stepen korisnosti i prema indirektnoj metodi. Sve dodatne veličine koje su potrebne za određivanje stepena korisnosti po ovoj metodi, a nisu sadržane u prve dve grupe, svrstane su u ovu grupu. Prema indirektnoj metodi potrebno je da se odrede svi gubici na bilansnoj granici postrojenja:

- gubitak u izlaznom dimnom gasu;
- gubitak u Krugu rashladnog sistema smeše (2);
- gubitak u Krugu rashladnog sistema motora (4)
- gubitak na zračenje.

Gubitak u izlaznom dimnom gasu računa se na osnovu merenja temperature i sastava izlaznog dimnog gasa na dimnjaku (108, 418, 428, 438) i količine goriva na ulazu u bilansni sistem (309, 519, 529). Maseni protok dimnih gasova određuje se stehiometrijskim putem. Gubitak energije u Krugu rashladnog sistema smeše (2) određuje se na osnovu merenja parametara vode (104 i 105) na ulazu i izlazu iz bilansne granice Rashladnog sistema smeše. Gubitak energije u Krugu rashladne kule za hlađenje motora (4) određuje se na osnovu merenja parametara vode na ulazu i izlazu iz bilansne granice Kruga rashladne kule za hlađenje motora. Ulazne veličine u bilansnu granicu sistema sa vodene strane je temperatura (110), a izlazna veličina je temperatura (111). Pritisak vode na ulazu i izlazu se uzima kao i u krugu hlađenja motora. Gubitak na zračenje određuje se u skladu sa preporukama standarda SRPS EN 12952-15 (2009).

Merenja svih ulaznih veličina na bilansnoj granici sistema obavljaju se u stabilnim režimima rada, kontinualno u trajanju od jednog sata u kome su izmerene veličine u okviru dozvoljenih odstupanja.

3.1. Direktna metoda određivanja stepena korisnosti

Određivanje stepena korisnosti postrojenja direktnom metodom podrazumeva računanje odnosa korisne i uložene energije, odnosno energije u vremenu (snage) [5]:

$$\eta_{K,DIR} = \frac{\left(E + \dot{Q}_{NS,kg} \right)}{\dot{Q}_{(N)Ztot}} \tag{1}$$

gde je u zagradi izraza (1) korisna snaga na izlazu iz bilansnog sistema, koja se sastoji od neto električne snage $E(kW)$ i korisne toplotne snage $\dot{Q}_{NS,kg} (kW)$. Veličina u imeniocu izraza (1) $\dot{Q}_{(N)Ztot}$

(kW) predstavlja snagu uloženu na ulazu u bilansni sistem, u ovom slučaju gorivom i vazduhom. Korisna toplotna snaga u razmatranom kombinovanom postrojenju sastoji se od heat received in engine cooling circuit:

$$\dot{Q}_{NS,kg} = \dot{m}_{wu,kg} (h_{ST,kg} - h_{FW,kg}) \quad (2)$$

gde je $\dot{m}_{wu,kg}$ - maseni protok vode u rashladnom krugu motora 1, a $h_{ST,kg}$ i $h_{FW,kg}$ entalpije polazne i povratne vode rashladnog kruga motora na bilansnoj granici, respektivno. Ove entalpije se određuju računskim putem na osnovu poznavanja veličina stanja medijuma (pritiska i temperature).

Snaga na ulazu u bilansnu granicu postrojenja se sastoji od snage unete gorivom i vazduhom i snage unete električnim uređajima (ventilatori, pumpe, itd.), pa se može predstaviti sledećim izrazom:

$$\dot{Q}_{(N)Ztot} = \dot{Q}_{(N)ZF} + \dot{Q}_{(N)Z} \quad (3)$$

Snaga uneta u bilansnu granicu koja je proporcionalna masenom protoku goriva se računa na sledeći način:

$$\dot{Q}_{(N)ZF} = \dot{m}_F (H_{(N)} + h_F + J_{(N)A}) \quad (4)$$

gde je \dot{m}_F - maseni protok goriva na ulazu u bilansni sistem, $H_{(N)}$ - donja toplotna moć goriva, h_F - fizička entalpija goriva, $J_{(N)A}$ - entalpija vazduha računata na jediničnu količinu goriva:

$$J_{(N)A} = \mu_A \cdot \bar{c}_{pA} (t_A - t_r) \quad (5)$$

gde je μ_A - combustion air mass to fuel ratio:

$$\mu_A = \mu_{Ao} (1 + x_{H_2OAd}) \quad (6)$$

Ovaj koeficijent zavisi od masenog udela vlage u vazduhu (x_{H_2OAd}) i dry combustion air mass to fuel mass ratio:

$$\mu_{Ad} = \mu_{Aod} + \rho_{nAd} \cdot V_{God} \cdot \frac{y_{O_2d}}{y_{O_2Ad} - y_{O_2d}} \quad (7)$$

Dry combustion air mass to fuel mass ratio zavisi od stoichiometric combustion air mass to fuel mass ratio koji se računa na osnovu hemijskog sastava goriva:

$$\mu_{Aod} = \sum \mu_{Aodi} x_i \quad (8)$$

i od stoichiometric flue gas volume:

$$V_{God} = \sum V_{Godi} x_i \quad (9)$$

Fizička entalpija goriva predstavlja razliku entalpije goriva između temperature goriva na ulazu u bilansni sistem i referentne temperature:

$$h_F = \bar{c}_F (t_F - t_r) \quad (10)$$

3.2. Indirektna metoda određivanja stepena korisnosti

Indirektna metoda određivanja stepena korisnosti je metoda koja se bazira na određivanju gubitaka energije u procesu [5]. Prema ovoj metodi stepen korisnosti se definiše na sledeći način:

$$\eta_K = 1 - \frac{\sum \dot{Q}_{(N)Ltot}}{\sum \dot{Q}_{(N)Ztot}} \quad (11)$$

Veličina $\sum \dot{Q}_{(N)Ltot}$ predstavlja sumu svih gubitaka, dok je veličina $\dot{Q}_{(N)Ztot}$ već definisana i predstavlja ukupnu energiju u jedinici vremena koja ulazi u bilansku granicu sistema. Međutim, određivanje ove veličine u odnosu na direktnu metodu se razlikuje u tome što se protok goriva na ulazu u bilansnu granicu ne meri, već se iterativno određuje na osnovu merenja i određivanja korisne energije $\dot{Q}_{NS,kg}$ i bilansiranja ukupne energije na ulazu i izlazu. Određivanje korisne energije se obavlja po istoj proceduri kao i kod direktne merode. Ova metoda je naročito pogodna kada su u pitanju postrojenja kod kojih je teško odrediti protok goriva ili je metoda određivanja protoka jako nepouzdana. Iako kada je u pitanju razmatrano postrojenje to nije slučaj, jer je protok goriva je meren precizno procesnim merilom, radi sigurnosti primenjena je i indirektna metoda.

Ukupni gubici $\sum \dot{Q}_{(N)Ltot}$ se u razmatranom slučaju sastoje od četiri gubitka:

$$\sum \dot{Q}_{(N)Ltot} = \dot{Q}_{(N)LF} + \dot{Q}_{RC} + \dot{Q}_{NS,hs} + \dot{Q}_{NS,ek} \quad (12)$$

Najdominantniji član u ovoj sumi gubitaka je gubitak u dimnom gasu koji se definiše na sledeći način:

$$\dot{Q}_{(N)LF} = \dot{Q}_{(N)G} + \dot{Q}_{CO} \quad (13)$$

i sastoji se od gubitka usled fizičke entalpije dimnih gasova $\dot{Q}_{(N)G}$ i gubitka usled nepotpunosti sagorevanja \dot{Q}_{CO} . Gubitak usled entalpije dimnih gasova predstavlja najveći gubitak i računa se ko snaga koja uzima u obzir razliku entalpija između temperature dimnog gasa i referentne temperature:

$$\dot{Q}_{(N)G} = \dot{m}_F \cdot \mu_G \cdot \bar{c}_{pG} \cdot (t_G - t_r) \quad (14)$$

Koeficijent μ_G predstavlja količinu dimnog gasa po jediničnoj količini goriva:

$$\mu_G = \mu_A + 1 \quad (15)$$

Loss due to unburned CO:

$$\dot{Q}_{CO} = \dot{m}_F \cdot V_{Gd} \cdot y_{COd} \cdot H_{COd} \quad (16)$$

gde je H_{CO_n} -calorific value of CO, y_{CO_d} -CO content in exit flue gas, V_{Gd} -dry flue gas volume:

$$V_{Gd} = V_{God} \cdot \frac{y_{O_2d}}{0.20938 - y_{O_2d}} \quad (17)$$

U ovoj jednačini y_{O_2d} predstavlja udeo kiseonika u suvim dimnim gasovima, a V_{God} stehiometrijsku zapreminu dimnog gasa:

$$V_{God} = \sum V_{Godi} \cdot x_i \quad (18)$$

Radiation and convection losses:

$$\dot{Q}_{RC} = C \cdot \dot{Q}_{NS,kg}^{0.7} \quad (19)$$

where $C=0.0113$.

Losses in mixture cooling circuit:

$$\dot{Q}_{NS,hs} = \dot{m}_{wu,hs} (h_{ST,hs} - h_{FW,hs}) \quad (20)$$

Losses in cooling tower circuit:

$$\dot{Q}_{NS,ek} = \dot{m}_{wu,ek} (h_{ST,ek} - h_{FW,ek}) \quad (21)$$

3.3. Određivanje srednjeg godišnjeg stepena korisnosti

Kao što je već pomenuto srednji godišnji stepen korisnosti je moguće odrediti na osnovu poznavanja zavisnosti stepena korisnosti od opterećenja postrojenja:

$$\eta(f) = f_1(\dot{Q}) \quad (22)$$

Osim toga potrebno je poznavanje zavisnosti opterećenja postrojenja u toku godine, koje se u zavisnosti od željene tačnosti, može prikazati na časovnom, dnevnom ili mesečnom nivou:

$$\dot{Q}(\tau) = f_2(\tau) \quad (23)$$

Množenjem prethodna dva izraza dolazi se do zavisnosti stepena korisnosti postrojenja od vremena u sledećem obliku:

$$\eta(\tau) = \eta(f) \cdot \dot{Q}(\tau) \quad (24)$$

Usrednjavanjem dobijenih vrednosti moguće je izračunati vrednost stepena korisnosti na bilo kom vremenskom intervalu.

3.4. Merna nesigurnost

Svaka izračunata veličina u procesu zavisi od više uticajnih veličina (izmerena veličina, koeficijent, izračunata vrednost, itd) i može se predstaviti kao funkcija tih veličina u sledećem obliku [5]:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (25)$$

Na svaku izmerenu veličinu x_i u procesu utiče više parametara, ako što su merna procedura, merni uređaj, mereni objekat itd. Prilikom merenja mogu se javiti dve vrste grešaka, sistemske i slučajne. Sistemske greške je moguće otkloniti, ali na slučajne je teže uticati. Zato je bitno da se definiše koliko maksimalno utiče pojedina veličina x_i na ukupnu grešku merenja. Taj uticaj se može predstaviti kao greška usled uticaja veličine x_i kao u_{Mx_i} , odnosno greška usled merenja veličine x_i . Ukupni uticaj svih uticajnih veličina na izračunatu vrednost y može da se predstavi u sledećem obliku:

$$u_{My} = \pm \sqrt{\sum \left[\frac{\partial y}{\partial x_i} u_{Mx_i} \right]^2} \quad (26)$$

Izraz (26) predstavlja apsolutnu vrednost greške, međutim u praksi se češće koristi njena relativna vrednost:

$$\varepsilon_y = \frac{u_{My}}{y} = \pm \sqrt{\sum \left[\frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{x_i}{y} \frac{u_{Mx_i}}{x_i} \right]^2} \quad (27)$$

Na osnovu ove jednačine moguće je definisati relativnu grešku određivanja stepena korisnosti prema direktnoj i indirektnom metodi. Prema direktnoj metodi relativna greška određivanja efektivnog stepena korisnosti je:

$$\varepsilon_{\eta D} = \pm \sqrt{\left[\frac{\dot{m}_F \cdot H_{(N)tot}}{\dot{Q}_{(N)Ztot}} \right]^2 \cdot (\varepsilon_{\dot{m}_F}^2 + \varepsilon_{H_{(N)tot}}^2) + \left[\frac{\dot{Q}_{(N)Z}}{\dot{Q}_{(N)Ztot}} \right]^2 \cdot \varepsilon_{\dot{Q}_{(N)Z}}^2 + \varepsilon_{\dot{Q}_N}^2} \quad (28)$$

Najveći uticaj na relativni grešku ima greška koja se pravi usled određivanja ukupne toplotne moći koja obuhvata donju toplotnu moć goriva, fizičku entalpiju goriva i entalpiju vazduha potrebnog za sagorevanje:

$$\varepsilon_{H_{(N)tot}} = \pm \sqrt{\left[\frac{H_{(N)}}{H_{(N)tot}} \right]^2 \cdot \varepsilon_{H_{(N)tot}}^2 + \left[\frac{J_{AF}}{H_{(N)tot}} \right]^2 \cdot \left[\varepsilon_{\mu A}^2 + \varepsilon_y^2 + \left[\frac{u_{MeA}}{t_A - t_r} \right]^2 \right]} \quad (29)$$

Prema indirektnoj metodi merna nesigurnost usled određivanja efektivnog stepena korisnosti se definiše kao:

$$\varepsilon_{\eta(N)B} = \sqrt{\left[\frac{l_G}{\eta_B} \right]^2 \cdot \left[\varepsilon_{\mu G}^2 + \left(\frac{\mu_A}{\mu_G} \right) \cdot \varepsilon_y^2 + \varepsilon_{H_{(N)tot}}^2 + \varepsilon_{CpG}^2 + \left[\frac{u_{MG}}{t_G - t_r} \right]^2 \right] + \left[\frac{l_{RC}}{\eta_B} \right]^2 \cdot 0.5^2 + \left[\frac{l_{CO}}{\eta_B} \right]^2 \cdot \left[\frac{u_{MyCod}}{y_{Cod}} \right]^2} \quad (30)$$

4. REZULTATI I ANALIZA

Na osnovu statističke analize izmerenih ulaznih i izlaznih parametara vode na kogeneracionoj elektrani „Velebit 3B“, feed-in, Trešnjevac, Srbija“ (pritisci, temperature i protok vode na ulazu i izlazu, temperature i sastav dimnih gasova, protok i sastav goriva na ulazu, itd.), izvršen je izbor

reprezentativnog vremenskog intervala za proračun stepena korisnosti. U Tabeli 4.1 date su izmerene vrednosti veličina sa merenja na objektu „Velebit 3B“ u okviru kompanije „Naftna industrija Srbije A.D.“, na K.O. Trešnjevac, Srbija, za izabrane vremenske periode [6].

Tabela 4.1. Lista izmerenih veličina za proračun stepena korisnosti

Red. broj	Merno mesto i oznaka mernog instrumenta	Oznaka mernog mesta	Režim 1 12:25- 12:55	Režim 2 13:25- 13:55	Režim 3 15:15- 15:45	Jed. mere
Okolina						
1.	Temperatura vazduha	101	21,0	21,5	21,5	°C
2.	Barometarski pritisak	201	1013	1011	1010	hPa
Voda u Krugu grejanja na ulasku u bilansnu granicu						
3.	Temperatura vode na ulasku u bilansnu granicu	102	69,30	71,26	62,10	°C
4.	Pritisak vode na ulasku u bilansnu granicu	202	1,82	1,82	1,89	MPa
5.	Protok vode ulasku u bilansnu granicu	302	27,0	27,2	26,5	t/h
Voda u Krugu grejanja na izlasku iz bilansne granice						
6.	Temperatura vode izlaz iz bilansne granice	103	88,10	93,53	91,80	°C
7.	Pritisak vode izlaz iz bilansne granice	203	1,50	1,49	1,60	MPa
Voda u Krugu rashladnog sistema smeše na ulasku u bilansnu granicu						
8.	Temperatura vode na ulasku u bilansnu granicu	104	38,38	37,21	39,70	°C
Voda u Krugu rashladnog sistema smeše na izlasku iz bilansne granice						
9.	Temperatura vode izlaz iz bilansne granice	105	42,63	41,94	42,93	°C
Voda u Krugu rashladne kule za hlađenje motora na ulasku u bilansnu granicu						
10.	Temperatura vode na ulasku u bilansnu granicu	110	37,24	53,34	46,74	°C
Voda u Krugu rashladne kule za hlađenje motora na izlasku iz bilansne granice						
11.	Temperatura vode izlaz iz bilansne granice	111	42,08	57,56	50,73	°C
Vazduh na ulazu u bilansnu granicu						
12.	Temperatura vazduha na ulazu u bilansnu granicu (izvan kontejnera)	106	21,0	21,5	21,5	°C
13.	Temperatura vazduha na ulazu u bilansnu granicu (u kontejneru)	107	33,8	40,1	36,6	°C
Dimni gasovi na izlasku iz bilansne granice						
14.	Temperatura dimnih gasova	108	127,50	136,71	139,00	°C
15.	Sadržaj O ₂ u dimnom gasu	418	11,71	12,30	12,96	m ³ /m ³
16.	Sadržaj CO u dimnom gasu	428	8	9	12	ppm
17.	Sadržaj CO ₂ u dimnom gasu	438	5,74	5,39	5,01	m ³ /m ³
Gorivo						
18.	Donja toplotna moć pri standardnim uslovima	519	33,92	34,07	33,87	MJ/kg
19.	Protok goriva	309	0,1492	0,1929	0,2495	t/h
20.	Temperatura goriva	109	16,80	16,80	16,69	°C
Generator						
21.	Snaga na stezaljkama generatora	701	501,8	752,0	990,3	kWe

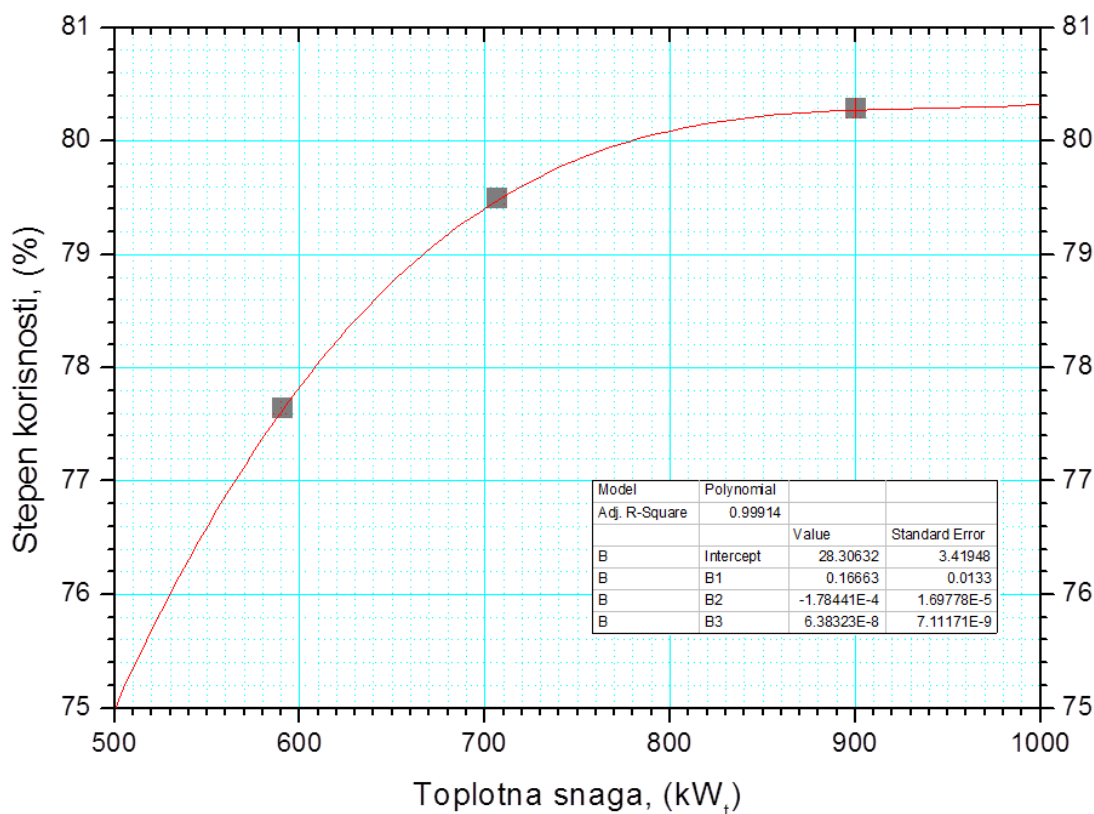
Na osnovu izmerenih koje su prikazane u tabeli, prikazanom metodologijom moguće je izračunati vrednosti stepena korisnosti postrojenja na zadatim opterećenjima od $f=(100\%, 75\% \text{ i } 50\%)$.

Rezultati su prikazani u Tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Efektivni stepen korisnosti

Opterećenje	Stepen korisnosti, direktna metoda, (%)	Stepen korisnosti, indirektna metoda, (%)	Merna nesigurnost, (%)
50% (50kW _e)	77.64	77.63	1.47
75% (750kW _e)	79.50	79.51	1.53
100% (100kW _e)	80.29	80.28	1.64

Iz tabele se vidi veoma dobro slaganje stepena korisnosti koji su određeni prema direktnoj i indirektnoj metodi. Funkcionalna zavisnost stepena korisnosti od opterećenja $\eta(f)$ prikazana je na Slici 4.1.



Slika 4.1. Funkcionalna zavisnost stepena korisnosti od opterećenja

Dobijena funkcionalna zavisnost stepena korisnosti kogeneracione elektrane „Velebit 3B“, od toplotnog opterećenja izraženog u kW, može se predstaviti sledećom jednačinom:

$$\eta(f) = 28.30632 + 0.16663 \cdot Q_t - 1.78441 \cdot 10^{-4} \cdot Q_t^2 + 6.38323 \cdot 10^{-8} \cdot Q_t^3 \quad (31)$$

Iz dokumenta vlasnika postrojenja preuzeto je srednje mesečno toplotno opterećenje elektrane. Iz ovih podataka o opterećenju elektrane po mesecima $\dot{Q}(\tau)$, množenjem i vremenskim usrednjavanjem

izračunata je ukupna godišnja vrednost stepena korisnosti postrojenja prema formuli (24). Rezultati određivanja ukupnog godišnjeg stepena korisnosti dati su u Tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Srednji mesečni stepen korisnosti kogeneracionog postrojenja „Velebit 3B“

Mesec	$\dot{Q}(\tau)$, kW _t	$\eta(\tau)$, %
Januar	939,82	80,29
Februar	901,19	80,27
Mart	778,97	80,00
April	1027,0	80,37
Maj	1027,0	80,37
Jun	1027,0	80,37
Jul	599,2	77,82
Avgust	540,4	76,32
Septembar	550,64	76,61
Oktobar	1026,99	80,37
Novembar	1027,0	80,37
Decembar	1027,0	80,37

Usrednjavanjem izračunatih vrednosti stepena korisnosti posmatranog kogenerativnog postrojenja na mesečnom nivou dobija se stepen korisnosti postrojenja na godišnjem nivou: $\bar{\eta} = 79.46\%$.

5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan koncept metodologije određivanja godišnjeg stepena korisnosti na kogeneracionom postrojenju. Metodologija se bazira na određivanju efektivnog stepena korisnosti postrojenja na više različitih opterećenja u cilju dobijanja funkcionalne zavisnosti. Dobijena zavisnost efektivnog stepena korisnosti od opterećenja u kombinaciji sa vremenskom krivom poterećenja služi u svrhu određivanja stepena korisnosti na godišnjem nivou. Prikazane su dve metode određivanja efektivnog stepena korisnosti CHP postrojenja, direktna i indirektna, odnosno metoda gubitaka. Osim toga predstavljan je metod proračuna merne nesigurnosti prema obe metode. Osim proračunskog dela, u radu je prikazana i metodologija termotehničkih merenja na postrojenju u cilju dobijanja svih neophodnih parametara za proračun efektivnih stepena korisnosti. Razvijena metodologija je predstavljena na primeru proračuna godišnjeg stepena korisnosti kogenerativnog postrojenja „Velebit 3B“ u okviru kompanije „Naftna industrija Srbije A.D.“, na K.O. Trešnjevac, Srbija. Na postrojenju su prilikom određivanja efektivnih stepena korisnosti primenjene obe metode. Rezultati su pokazali veoma dobro slaganje, tako da je zaključak da se obe metode određivanja efektivnog stepena korisnosti mogu ravnopravno koristiti, a njihov izbor treba da zavisi od tehničkih zahteva korisnika i specifičnosti samog postrojenja.

Razvijena metodologija određivanja godišnjeg stepena korisnosti CHP postrojenja može da ima značajnu primenu u procesima praćenja efikasnosti njihovog rada, što je veoma važno sa aspekta uštede primarne energije, smanjenja emisije GHG gasova, kao i u procesu dekarbonizacije, koja je u poslednje vreme veoma interesantna oblast.

NOMENCLATURE

\bar{c} -	srednji toplotni kapacitet	$\dot{Q}_{(N)ZF}$ -	snaga uneta gorivom
E -	električna snaga	u_{Mx_i} -	greška merenja
h -	entalpija	V -	zapremina
$H_{(N)}$ -	donja toplotna moć goriva	x -	maseni udeo
$J_{(N)A}$ -	entalpija vazduha na ulazu	y -	zapreminski udeo
\dot{m} -	maseni protok	ε -	relativna greška merenja
$\dot{Q}_{(N)Ltot}$ -	snaga toplotnih gubitaka	η -	efektivni stepen korisnosti
$\dot{Q}_{NS,kg}$ -	korisna toplotna snaga	$\bar{\eta}$ -	srednji godišnji stepen korisnosti
$\dot{Q}_{(N)Ztot}$ -	snaga naulazu u bilansni system	μ_A -	combustion air mass to fuel ratio
		μ_G -	flue gas mass to fuel ratio
		ρ -	gustina

ACKNOWLEDGMENT

The research was funded by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia, Grant no. 451-03-68/2020-14/200017 («Vinča» Institute of Nuclear Sciences, National Institute of the Republic of Serbia, University of Belgrade)

Takođe velika zahvalnost se duguje kompaniji „Naftna industrija Srbije A.D.“.....

REFERENCES

- [1] Leilei Dong, Hao Liu, Saffa Riffat, Development of small-scale and micro-scale biomass-fuelled CHP systems –A literature review, Applied Thermal Engineering 29 (2009) 2119–2126.
- [2] Guoquan Qiu, Hao Liu, Saffa Riffat, Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle, Applied Thermal Engineering 31 (2011) 3301-3307.
- [3] M.V. Biezma, J.R. San Cristobal, Investment criteria for the selection of cogeneration plants—a state of the art review, Applied Thermal Engineering 26 (2006) 583–588.
- [4] Aleksandar Erić, Dejan Cvetinović i Predrag Škobaļj, Ispitivanje termotehničkih instalacija na kogeneracionoj elektrani „Velebit 3“ „FEED--IN, Trešnjevac, Srbija, Plan ispitivanja, Izveštaj za korisnika, NIV_LTE 651/1.

- [5] Water-tube boilers and auxiliary installation – Part 15: Acceptance tests, European standard, EN 12952-15: 2009.
- [6] Aleksandar Erić, Dejan Cvetinović i Predrag Škopalj, Ispitivanje termotehničkih instalacija na kogeneracionoj elektrani „Velebit 3“ „FEED--IN, Trešnjevac, Srbija, Izveštaj za korisnika, NIV_LTE 651/2.