ORC PROCES – ORGANSKI DELOVNI KROŽNI PROCESI TUDI V SLOVENIJI

Andrej SENEGAČNIK, Uroš GLAVINA, Mihael SEKAVČNIK

POVZETEK

Članek obravnava ORC (Organic Rankine Cycle) proces. To je delovni krožni proces namenjen pretvorbi nizko temperaturne toplote v mehansko delo – električno energijo. Delovna snov je organsko hladivo, ki se uparja pri nižjih parametrih kot voda. Zaradi spremenjenih lastnosti hladiva, glede na vodo ima tudi ORC proces nekatere posebnosti. V članku je predstavljen ORC proces, ki je apliciran v slovenski industriji. Električna moč generatorja je 125 kW, delovna snov je HFC245 fa (R245 fa). Prikazane so nekatere posebnosti in dosedanje obratovalne izkušnje z ORC procesom.

ABSTRACT

The article deals with ORC (Organic Rankine Cycle) process. This is a thermodynamic power cycle for conversion low temperature heat into mechanical work. The working media is an organic refrigerant. Operating parameters are lower than in water cycle. Due to specific properties of refrigerant also the ORC process has some peculiarities. The article presents the ORC process, which is applied in the Slovenian industry. Generator power is 125 kW, working media is HFC245 fa (R245 fa). Some specific features and operating experience of ORC processes are addressed in this article.

1. UVOD

Zaradi vedno večjih zahtev po zmanjševanju onesnaževanja okolja na globalni ravni, zmanjševanju toplogrednega učinka uporabe fosilnih goriv, ter povečanju energijske učinkovitosti se išče razne niše toplotnih virov za proizvodnjo mehanskega dela oz. električne energije. Izraziti, do sedaj prezrti viri toplote so odpadni energijski tokovi v industriji. Ti viri so navadno dimni plini z nizko (t < 300 °C) ali srednjo (t < 500 °C) temperaturo, včasih celo nizkotlačna vodna para. V zadnjem času se pojavljajo kot vir toplote tudi visokotemperaturni (t > 500 °C) izpušni plini iz stabilnih plinskih motorjev lociranih na deponijah komunalnih odpadkov in v bioplinarnah.

Pretvorljivost toplote v mehansko delo določa Carno-jev teorem. Ta določa, da je razmerje med pridobljenim mehanskim delom, količino dovedene, ter tudi odvedene toplote (termični izkoristek procesa) proporcionalno temperaturam dovedene in odvedene toplote. V idealnem primeru, ko je izkoristek pretvorbe največji je $\eta_C = 1 - T_{od}/T_{do}$. Realni toplotni stroji pa so optimirani v smislu maksimalnega pridobivanja mehanskega dela (oz. minimalne porabe

goriva pri največjem učinku) in ne največjega izkoristka. Procesi z največjim izkoristkom bi namreč potekali izredno počasi bi imeli majhno mehansko moč in bili zelo dragi. Courzon–Ahlborn-ov teorem pojasni [**Error! Reference source not found.**], da se zaradi neizogibne nepovračljivosti prenosa toplote v in iz procesa (omejena prenosna površina in omejen čas) termični izkoristek dodatno zmanjša na $\eta_{CA} = 1-(T_{od}/T_{do})^{1/2}$. Pri termičnem izkoristku η_{CA} dosežemo optimum, pri katerem ima realni toplotni stroj največjo mehansko moč. To velja tudi za primer ORC procesov, saj se vrednost realnega izkoristka obravnavanega ORC procesa zelo približa izkoristku η_{CA}

Pri pretvorbi nizkotemperaturne toplote v mehansko delo klasični Rankinovi parni krožni procesi niso več primerni, ker se zaradi nizke temperature dovedene toplote voda ne uparja več. Zato je potrebno vodo zamenjati z organsko delovno snovjo, ki se uparja pri bistveno nižjih parametrih (temperaturi). S tem dobimo tako imenovani ORC – organski Rankinov krožni proces, ki po teoriji še vedno poteka med dvema izentropama in izobarama. Glede na dane temperaturne pogoje dovoda in odvoda toplote se izbere ustrezna organska delovna snov [**Error! Reference source not found.**].

2. ORC PROCES V SLOVENIJI

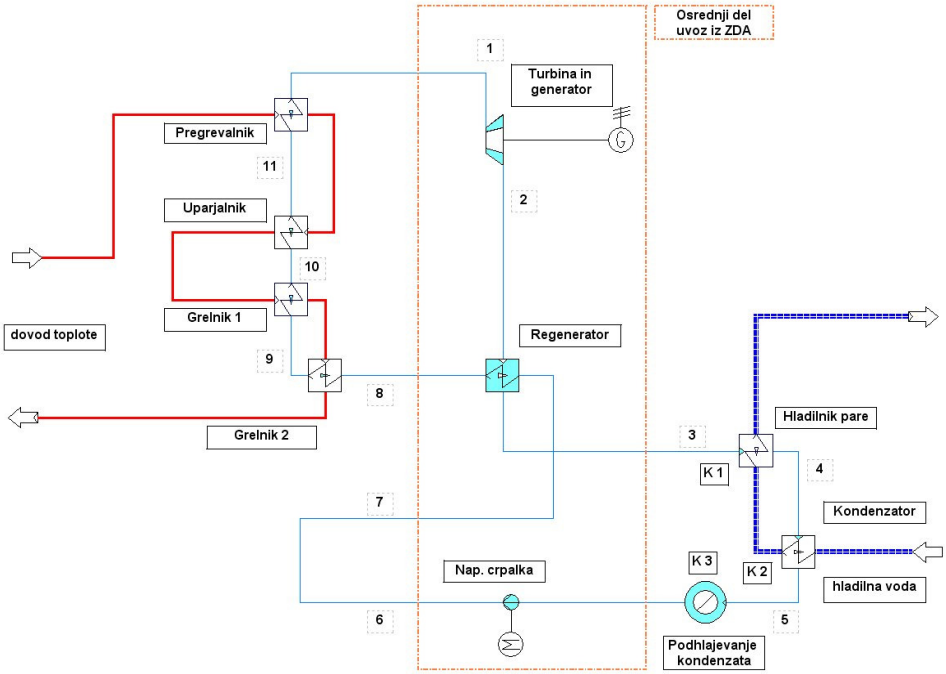
Projekt uvajanja ORC v Sloveniji predvideva izrabo nizko temperaturne odpadne toplote na več lokacijah [**Error! Reference source not found.**]. Zagon prvega ORC postrojenja v Sloveniji je bil v drugi polovici leta 2010. Osnovni pogoj, ki ga mora izpolnjevati določena lokacija, je dovolj velik toplotni tok odpadne toplote, ~1 MW, ustrezne temperature in seveda tudi možnost odvoda toplote iz ORC procesa v okolico. S tem namenom je bilo pregledanih več možnih lokacij, ki izpolnjujejo osnovne tehnološke zahteve po količini in temperaturnem nivoju odpadne toplote. V slovenski industriji namreč ne obstaja veliko ustreznih lokacij, ker nimamo velikih postrojenj z velikimi odpadnimi tokovi. Zahteva za toplotni tok ~1 MW odpadne toplote izhaja iz dejstva, da je ponudnik osnovne enote ORC procesa velika »multinacionalka« (GE Power&Water, Heat Recovery Solutons) in je nabor ustreznega števila "velikih" lokacij njihovega delovanja bistveno večji.

2.1 Osnovni opis ORC procesa

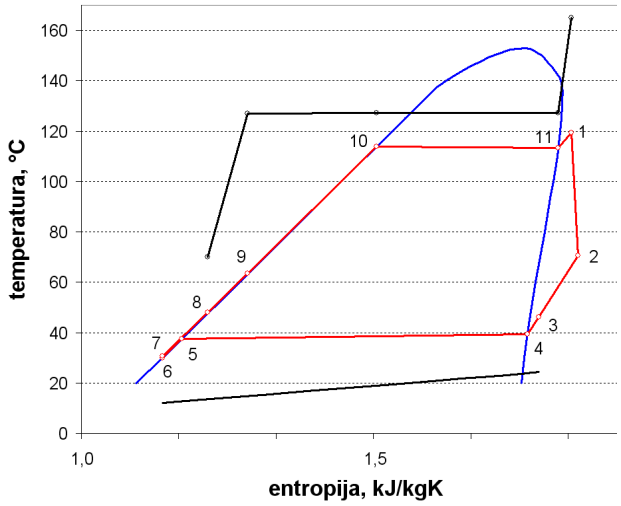
Shematsko je ORC proces predstavljen na sliki 1, pripadajoči diagram *T-s* pa na sliki 2. Sliki prikazujeta situacijo ko se kot izvor toplote za ORC proces uporablja pregreta vodna para. Dovod toplote in prehod iz kapljevitega stanja v pregreto paro se izvaja izobarno. Segrevanje kapljevine, uparjanje in pregrevanje pare je v shemi, slika 1, predstavljeno z ločenimi elementi. Na sliki 1, je označen tudi osrednji del postrojenja, ki se kot zaključena celota uvozi iz ZDA. V okviru izvedbe projekta, je potrebno projektirati dva prenosnika toplote – dovod toplote (uparjalnik) in odvod toplote (kondenzator) glede na razpoložljive parametre toplotnega vira in izvedbene možnosti odvoda toplote v okolico [**Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.**].

Osnovne značilnosti ORC procesa, ki je apliciran v Sloveniji, so:

- delovna snov krožnega procesa – hladilno sredstvo HFC245 fa – 1,1,1,3,3-pentafluoropropane (v uporabi je tudi oznaka R245 fa)
- okvirni parametri sveže pare HFC245 fa pred vstopom v turbino: 20 bar, 125 °C
- okvirni parametri kondenzacije: 2,3 bar, 38 °C
- masni pretok HFC245 fa: 4,02 kg/s
- električna moč generatorja: 125 kW
- turbina z generatorjem je uležajena v magnetnih brezkontaktnih ležajih in ima spremenljivo število vrtljajev 24000-30000 min^{-1}
- generator proizvaja izmenični tok različnih frekvenc, sledi močnostni usmernik in nato močnostni razsmernik 3F, 50 Hz, 0,4 kV, ki je priklopljen in sinhroniziran z distribucijskim omrežjem. Izgube zaradi dvakratne pretvorbe AC/DC/AC so ~8 %



Slika 1: Osnovna shema ORC procesa

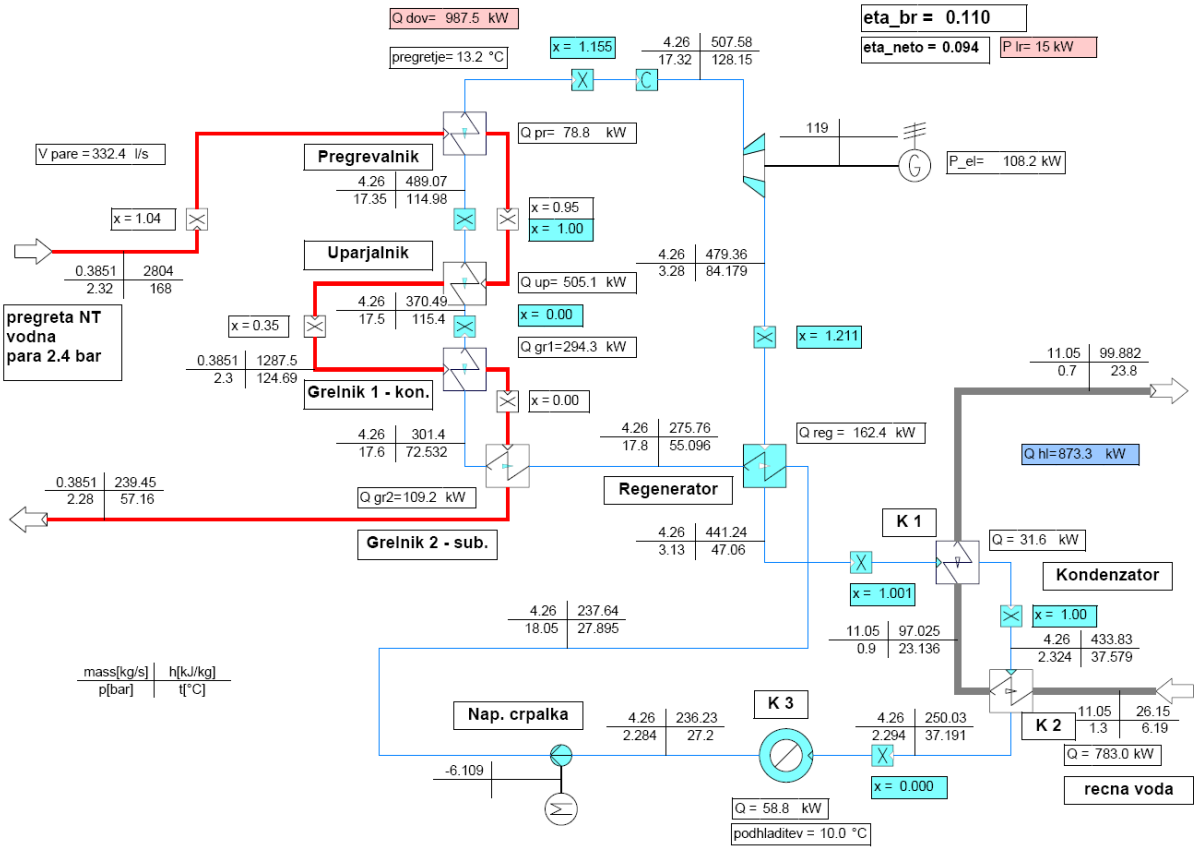


Slika 2: Diagram *T-s* ORC procesa

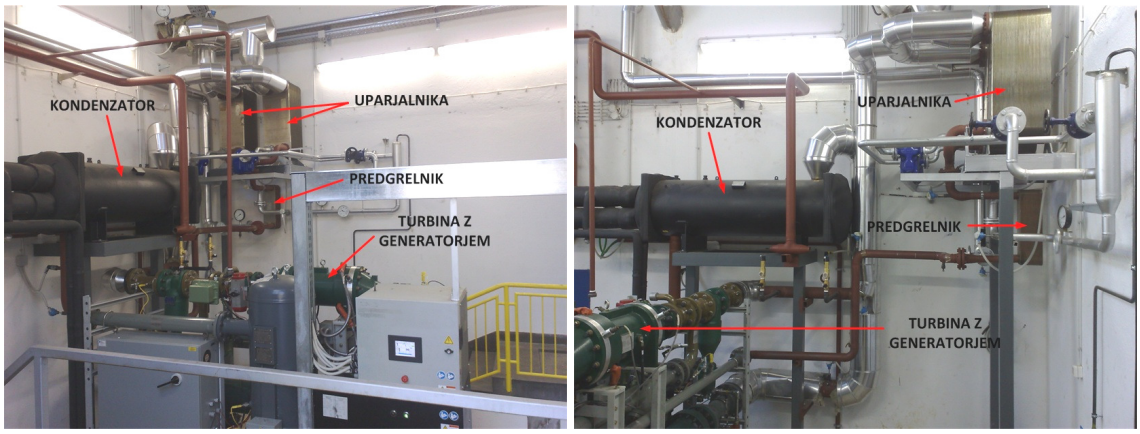
Kot je razvidno iz diagrama *T-s* je za ORC proces značilna delovna snov z nadvito mejno krivuljo, zaradi česar para z ekspanzijo v turbini postaja vedno bolj pregreta. Ker z izentropno ekspanzijo nikakor ne moremo doseči rosilne krivulje, se para po ekspanziji v turbini najprej ohlaja v regenerativnem grelniku, kjer segreva napajalni – kapljeviti HFC245 fa za napajalno črpalko in šele nato vstopa v kondenzator. To je torej čisto klasično regenerativno gretje napajalnega freona, s to razliko, da grelni medij pri tem ne kondenzira. Zaradi tega regenerativno gretje pri ORC procesih ne zmanjšuje moči turbine tako kot pri vodnih Rankinovih procesih. V diagramu *T-s*, slika 2, sta s črno linijo vrisani tudi temperaturni karakteristiki izvora in ponora toplote.

2.2 Termodinamični parametri ORC procesa

Slika 3 prikazuje energijsko in masno bilanco izvedenega in obratujočega ORC procesa pri delni obremenitvi, električna moč generatorja 108 kW (polna moč generatorja 125 kW). Kot izvor toplote se pri tem ORC-u uporablja pregreta vodna para tlaka 2,4 bar in temperature 165 °C. Smiselnost uporabe vodne pare za pogon ORC je s termodinamskega stališča seveda vprašljiva. Toda zaradi raznih državnih spodbud pri proizvodnji električne energije v kogeneraciji in iz obnovljivih virov (lesna biomasa), pa tudi takšna uporaba vodne pare postane ekonomsko smiselna. Pri segrevanju HFC245 fa se ogrevna vodna para skondenzira. Termodinamično so to štirje različni procesi in so zato obravnavani ločeno; grelnik 1 (podhladitev vodnega kondenzata), grelnik 2 (segretje HFC245 fa do vrelišča), uparjalnik in pregrevalnik. Podobno je tudi pri odvodu toplote, kjer imamo najprej hladilnik pare, kondenzator in nato podhlajevanje kondenzata. Navedeni parametri na sliki 3 so bili dobljeni pri obratovanju pilotnega postrojenja v Sloveniji. Praktična izvedba postrojenja je prikazana na sliki 4. Energijska in masna bilanca je izračunana s programskim paketom IPSEpro 4.0 [**Error! Reference source not found.**].



Slika 3: Parametri ORC postrojenja pri delni obremenitvi in električni moči generatorja 108 kW



Slika 4: Izvedeno pilotno ORC postrojenje v Sloveniji

3. TEHNOLOGIJA SPOJEV V ORC SISTEMIH

Ker je delovna snov v ORC procesu hladilni plin HFC245 fa je potrebno zadostiti predpisom s področja hladilniške tehnike. Toplogredni učinki hladilnih plinov so praviloma več kot 1000 večji od toplogrednega učinka CO_2. Zato je potrebno z okoljskega vidika, kakor tudi vidika obratovalnih stroškov (visoki davki in nabavni stroški za HFC245 fa pri dopolnjevanju sistema) stalno zagotavljati zadostno tesnjenje.
Ukrepi, ki omogočajo dosego zadostnega tesnjenja so:

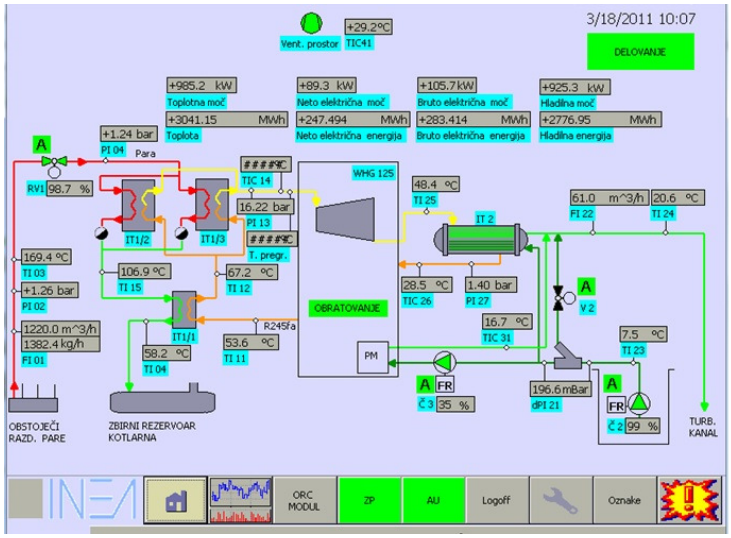
- čim manjše število razstavljivih spojev v sistemu
- implementacija navojnih tesnilnih spojev z bakrenimi tesnili ali O-ringi (tlačna in temperaturna tipala…)
- uporaba ustreznih tesnilnih masti za razstavljive spoje (Loctite, X-pando ipd.)
- NPT navoji (konus)
- prirobnice za uporabo v hladilniški tehniki (npr. amonijačne konične prirobnice)
- dosledno upoštevanje navodil za montažo in vzdrževanje razstavljivih spojev – ustrezna priprava površine prirobnic in izbor ustreznih tesnil, uporaba momentnega ključa, mazanje vijakov, predpisani vrstni red zategovanja vijakov,…

4. OBRATOVALNE IZKUŠNJE

Pilotni ORC na lokaciji v Kamniku ima preko 3200 obratovalnih ur (v času pisanja prispevka). V omrežje je bilo oddane preko 259 MWh električne energije, na generatorju proizvedene pa preko 296 MWh električne energije. Specifična lastna raba obravnavanega ORC postrojenja je torej ~12,5 %. Bruto izkoristek pretvorbe toplote v električno energijo je za obravnavano obdobje ~11 % oz. neto izkoristek (upoštevana lastna raba sistema) preko 9,6 %. Neto izkoristek je odvisen od danosti posamezne lokacije implementacije ORC naprave, t.j. dovoda in odvoda toplote. Predvsem sistem odvoda toplote močno vpliva na lastno rabo. V obravnavanem primeru, se toplota odvaja v reko in je za pogon črpalke hladilne vode potrebna relativno majhna električna moč. V primerih, ko je odvod toplote izveden z zračnimi kondenzatorji se lastna raba lahko občutno poveča zaradi pogona ventilatorjev prisilnega vleka – zlasti v toplih poletnih mesecih.

Vodenje ORC-a z mersko regulacijsko in varnostno opremo omogočajo veliko avtonomnost delovanja postrojenja in posredno znižujeta obratovalne stroške. ORC je v stalni pripravljenosti za zagon, če ni v napaki ali okvari nobena naprava ali stroj. Ko so izpolnjeni pogoji za zagon, t.j. zadosten vir toplote (ustrezna temperatura pregrete vodne pare), se samodejno zažene. V primeru zasilne ustavitve je potrebno ročno izbrisati napako in preveriti stanje postrojenja. Daljinski nadzor omogoča stalno spremljanje in analizo obratovalnih parametrov. S tem je omogočeno sledenje spremembam obratovalnih parametrov in ustrezno ukrepanje ob planiranih ustavitvah. Priporočljivo je voditi dnevnik kontrole tesnosti spojev tako, da se v določenem časovnem intervalu (mesečno, na 3 mesece ali podobno) preveri tesnost spojev z ročnim detektorjem prisotnosti freona (po možnosti umerjenega na izbrani freon HFC245 fa).

Investicija instalacije je odvisna od okolja, v katerega se implementira ORC. Vrsta vira toplote določa način prenosa toplote v ORC, parametri (temperatura in pretok) pa velikost prenosnika toplote. Prenos je lahko neposredno iz primarnega vira toplote (primer pilotnega postrojenja v Kamniku) ali pa je potrebna izvedba vmesnega sekundarnega ogrevalnega kroga (praviloma vročevodni, npr. implementacija na stabilni plinski motor na bioplin). Okolje definira tudi zahteve za merilno regulacijsko opremo. V primeru implementacije na primarni krog vira toplote sta regulacijska in varnostna oprema že v sklopu generatorja toplote, v kolikor pa je potrebno zgraditi sekundarni krog je potrebno vgraditi tudi ločeno regulacijsko in varnostno opremo.



Slika 5: Osnovni prikaz sistema za daljinski nadzor in upravljanje

Predvideni obratovalni in vzdrževalni stroški so nizki, saj zaradi vodenja samega ORC-a, varnostno regulacijske opreme in daljinskega nadzora ter upravljanja ni zahteve za stalno prisotnost osebja. Tehnološka rešitev brezdotičnega magnetnega uležajenja turbine in generatorja odstrani potrebo po turbinskem mazalnem sistemu ter s tem dodatno poenostavi obratovanje, vzdrževanje in znižuje obratovalne stroške.

5. ZAKLJUČEK

Članek obravnava ORC (Organic Rankine Cycle) proces. To je delovni krožni proces namenjen pretvarjanju nizko temperaturne toplote v mehansko delo oz. električno energijo. ORC proces je klasični Rankinov krožni proces omejen z dvema izobarama in dvema izentropama, pri katerem je delovna snov organsko hladilo. Značilnost organskih hladil je tudi nadvita mejna krivulja zaradi česar se para pri izentropni ekspanziji pregreva in oddaljuje od rosilne krivulje. V članku je predstavljen ORC proces, ki je apliciran v slovenski industriji. Osnovne značilnosti tega ORC procesa so: delovna snov HFC245 fa, masni tok 4 kg/s, temperatura pare na vstopu v turbino 125 °C, električna moč generatorja 125 kW, dovedeni

toplotni tok 930 kW in neto izkoristek procesa ~9,6 %. Naprava je do sedaj obratovala 3200 ur in pri tem oddala v omrežje ~260 MWh električne energije. Predvideni obratovalni in vzdrževalni stroški ORC postrojenja so nizki. Vodenje ORC-a in varnostno regulacijska oprema omogočata veliko avtonomnost delovanja, ter obratovanje sistema brez aktivnega nadzora, tudi v času zagona ali ustavitve. Sodobna tehnološka rešitev magnetnega uležajenja turbine in generatorja poenostavlja vzdrževanje in obratovanje, ter niža obratovalne stroške.

6. LITERATURA

[1] Senegačnik A., Sekavčnik M., Termodinamične karakteristike nizko temperaturnega delovnega krožnega procesa z organsko delovno snovjo pri implementaciji v različna industrijska okolja, Fakulteta za strojništvo, št. 03-01/1-10-AS, januar 2010

[2] Curzon F.L., Ahlborn B., Efficiency of a Carnot engine at maximum power output, Am. J: Phys., vol. 43, 1975, 22-24

[3] SimTech, IPSEpro Process Simulation Environment, System version 4.0, Graz, Austria, 2003

[4] Longo G.A., Gasparella A., Heat transfer and pressure drop during HFC refrigerant vaporisation inside a brazed plate heat exchanger, International Journal of Heat and Mass Transfer, 50, 2007, 5194–5203

[5] Garcia-Cascales J.R. et al., Assessment of boiling and condensation heat transfer correlations in the modelling of plate heat exchangers, International Journal of Refrigeration, vol. 30, 2007, 1029-1041

[6] Jokar A., et al., Dimensional analysis on the evaporation and condensation of refrigerant R-134a in minichannel plate heat exchangers, Applied Thermal Engineering, vol. 26, 2006, 2287–2300

[7] Giovanni A. Longo, Andrea Gasparella, HFC-410A vaporisation inside a commercial brazed plate heat exchanger, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 32, 2007, 107–116

[8] Förster H., Der Sorptionskraftprozess, BWK, 1/2, Springer VDI Verlag, 2010, 67–74

NASLOVI AVTORJEV

izr. prof. dr. Andrej Senegačnik, univ. dipl. inž. – Fakulteta za strojništvo, Ljubljana
Uroš Glavina, univ. dipl. inž – Inea d.o.o., Stegne 11, Ljubljana
izr. prof. dr. Mihael Sekavčnik, univ. dipl. inž. – Fakulteta za strojništvo, Ljubljana

Fakulteta za strojništvo
Aškerčeva 6
SI-1000 Ljubljana
e-pošta: andrej.senegacnik@fs.uni-lj.si