

Dinamika i regulacija rada akumulatora pare

Akumulatori pare se koriste u različitim granama industrije i u elektranama kako bi se uskladila produkcija pare sa promenljivim toplotnim zahtevom potrošača. Pri povećanoj potrošnji pare kotao ne može da prati brze promene zahteva potrošača zbog inercije procesa sagorevanja i transporta toplote u ložištu, dok bi pri smanjenoj potrošnji pare višak proizvedene pare morao da se ispušta u atmosferu ili u kondenzatore niskog pritiska što predstavlja gubitak energije. Takođe, promenljiva potrošnja pare uzrokuje dinamičke promene pritiska u parovodima, cevnom sistemu kotla, sudovima pod pritiskom, koje su nepovoljne sa stanovišta integriteta metalnih zidova parovoda i sudova pod pritiskom, a pogotovu su nepovoljne za stanje materijala doboša i cevnih sistema u parnim kotlovima. Primenom akumulatora pare moguće je značajno ublažiti dinamičke promene pritiska, ali i povećati energetska efikasnost snabdevanja parom.

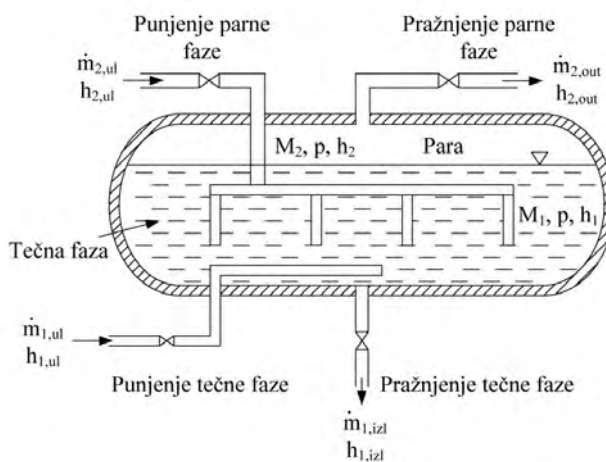
I. Uvod

Akumulator pare je sud pod pritiskom ispunjen vodom i parom (slika 1). Princip rada akumulatora pare zasnovan je na promeni pritiska i faznom prelazu. U periodima smanjene potrošnje puni se parom pa pritisak u njemu raste i para se kondenzuje, a u periodima povećane potrošnje, koji nisu pokriveni povećanom produkcijom pare, akumulator se prazni, pritisak u njemu opada i dolazi do adijabatskog isparavanja vode.

Brojni su primeri industrijskih procesa u čijem je radu potrebna periodično promenljiva potrošnja pare, a time i moguća primena akumulatora pare, na primer: bojenje tkanine u tekstilnoj industriji [1], proizvodnja stakla, vulkanizacija gume, prerada duvana [2], proizvodnja metala [3] i u termoelektranama za pokrivanje vršnog opterećenja [4]. Kratko vreme odziva i velika brzina pražnjenja omogućuju primenu akumulatora pare u kompenzaciji brzih nestacionarnih promena insolacije u solarnim elektranama [5,6].

Promenljiv pritisak sa kojim radi akumulator pare, izaziva izrazitu termodinamičku neravnotežu između vode i pare u akumulatoru. Iako se voda i para nalaze u direktnom kontaktu, svaka faza ima različitu vrednost temperature. Sa druge strane, isparavanje i kondenzacija se ne dešavaju trenutno već nekom konačnom brzinom. U ovom radu je predstavljen termodinamički model akumulatora pare koji se zasniva na termičkoj neravnoteži između vode i pare, koja daje tačnije predviđanje promene pritiska, temperature vode i pare, nivoa vode u toku punjenja i pražnjenja akumulatora u odnosu na rezultate ravnotežnog modela. Model se lako implementira u kompjuterski program čime se omogućavaju kompjut-

erske simulacije nestacionarnih procesa u akumulatoru pare.



Slika 1: Izgled akumulatora pare

Neravnotežni model akumulatora pare se zasniva na bilansnim jednačinama mase i energije za svaku fazu posebno [7]. Brzine isparavanja i kondenzacije se izračunavaju prema empirijskim korelacijama, koje uzimaju u obzir zavisnost brzina promene faze od mase vode u akumulatoru. Toplotni protok između pare i vode se određuje u uslovima termičke neravnoteže. Model je predstavljen sistemom običnih diferencijalnih jednačina prvog reda u kojima su zavisno promenljive veličine pritisak, mase i entalpije vode i pare, a vreme je nezavisna promenljiva. Nestacionarne promene pritiska pare i položaj nivoa vode u akumulatoru zavise od početnih i graničnih uslova, kao što su početna masa

vode, brzine uticanja i isticanja pare, ulazna temperatura i pritisak pare, odnosno entalpija pare, kao i brzine isparavanja i kondenzacije. Sistem jednačina se numerički rešava primenom metode Runge-Kutta za određene početne uslove [8]. Validacija modela je izvršena poređenjem numerički dobijenih rezultata sa izmerenim vrednostima prilikom procesa punjenja akumulatora.

II. Matematički model

U cilju analize nestacionarnih uslova punjenja i pražnjenja akumulatora pare razvijen je matematički model zasnovan na bilansima mase i energije vode i vodene pare u akumulatoru i neravnotežnim procesima isparavanja i kondenzacije. Proračun neravnotežnih procesa faznog prelaza podrazumeva da se isparavanje i kondenzacija ne odvijaju trenutno sa promenom pritiska u dvofaznoj mešavini, što je karakteristika ravnotežnog modela, već da zavise od termičke neravnoteže, koja je određena odstupanjem temperature tečne faze (vode) od temperature zasićenja koja je određena pritiskom u akumulatoru pare. Bilansne jednačine modela su:

- bilans mase vode

$$\frac{dM_1}{dt} = \dot{m}_{1B} + \dot{m}_{PT1}, \quad (1)$$

- bilans mase pare

$$\frac{dM_2}{dt} = \dot{m}_{2B} + \dot{m}_{PT2}, \quad (2)$$

- bilans energije vode

$$\frac{dH_1}{dt} = (\dot{m}H)_{1B} + \dot{m}_{PT1}h'' + \dot{Q}_{21} + V_1 \frac{dp}{dt} \quad (3)$$

- bilans energije pare

$$\frac{dH_2}{dt} = (\dot{m}H)_{2B} + \dot{m}_{PT2}h'' + \dot{Q}_{21} + V_2 \frac{dp}{dt} \quad (4)$$

Pojedini članovi u jednačinama (1)-(4) predstavljaju:

- neto bilans masenih protoka uticanja i isticanja vode u odnosu na akumulator pare

$$\dot{m}_{1B} = \sum_{i=1}^{N_1} \dot{m}_{1B,i}(t,p), \quad (5)$$

- neto bilans masenih protoka uticanja i isticanja pare u odnosu na akumulator pare

$$\dot{m}_{2B} = \sum_{i=1}^{N_2} \dot{m}_{2B,i}(t,p), \quad (6)$$

- neto bilans protoka energije putem uticanja i isticanja vode je određen sa

$$(\dot{m}h)_{1B} = \sum_{i=1}^{N_1} \dot{m}_{1B,i}h_{1B,i} \quad (7)$$

- neto bilans protoka energije putem uticanja i isticanja pare je određen sa

$$(\dot{m}h)_{2B} = \sum_{i=1}^{N_2} \dot{m}_{2B,i}h_{2B,i} \quad (8)$$

Protoci uticanja u navedenim sumama imaju znak plus, dok protoci isticanja imaju znak minus. Promena mase vode isparavanjem i kondenzacijom se određuje kao

$$\dot{m}_{PT1} = \dot{m}_c - \dot{m}_e, \quad (9)$$

a promena mase pare isparavanjem i kondenzacijom se određuje kao

$$\dot{m}_{PT2} = \dot{m}_c - \dot{m}_e \quad (10)$$

Takođe, model je zasnovan i na bilansu zapremine

$$V_1 + V_2 = V \quad (11)$$

Brzina isparavanja je određena izrazom

$$\dot{m}_e = \rho_v \frac{1}{\tau_e} \frac{h_1 - h'}{r} V_1 \text{ za } h_1 > h' \quad (12)$$

pri čemu je $\dot{m}_c = 0$ ako je voda u stanju zasićenja ili ako je pothlađena, to jest za $h_1 \leq h'$.

Brzina kondenzacije se definiše kao

$$\dot{m}_c = \rho_l \frac{1}{\tau_c} \frac{h' - h_1}{r} V_1 \text{ za } h_1 \leq h' \quad (13)$$

pri čemu je ako je voda u stanju zasićenja ili ako je para pregrejana to jest $h_1 \geq h'$.

U izrazima za brzine isparavanja i kondenzacije figurišu relaksacione konstante isparavanja i kondenzacije τ_e i τ_c . Ove konstante su određene pri simulacijama eksperimentalnih testova u cilju dobijanja zadovoljavajućeg slaganja izmerenih i sračunatih vrednosti pritiska. Toplotni protok sa pregrejane pare na tečnost i obrnuto, koji figuriše u bilansnim jednačinama (3) i (4), računa se kao

$$\dot{Q}_{21} = k_{21} a_i (T_2 - T_1) V_i \quad (14)$$

gde je a_i specifična razdelna površina, a k_{21} je koeficijent prelaza toplote. Bilansne jednačine mase i energije (1-5) se transformišu u sistem diferencijalnih jednačina prvog reda sa izvodima po zavisanu promenljivim, a to su mase i entalpije vode i pare, i pritisak. Specifične zapremine tečne i parne faze su odgovarajuće funkcije pritiska i entalpije $v_1 = v_1(p, h_1)$ i $v_2 = v_2(p, h_2)$. Nakon diferenciranja bilansa zapremine po vremenu dobija se izraz

$$v_1 \frac{dM_1}{dt} + v_2 \frac{dM_2}{dt} + M_1 \left(\frac{\partial v_1}{\partial p} \Big|_h \frac{dp}{dt} + \frac{\partial v_1}{\partial h} \Big|_p \frac{dh_1}{dt} \right) + M_2 \left(\frac{\partial v_2}{\partial p} \Big|_h \frac{dp}{dt} + \frac{\partial v_2}{\partial h} \Big|_p \frac{dh_2}{dt} \right) = 0 \quad (15)$$

U bilansima energije vrednosti totalnih entalpija H_1 i H_2 su zamenjene odgovarajućim proizvodima masenih protoka i entalpije tako da se posle diferenciranja dobijaju izrazi

$$\frac{dH_1}{dt} = \frac{1}{M_1} \left[(\dot{m}h)_{1B} + \dot{m}_{PT1}h'' + \dot{Q}_{21} + M_1 v_1 \frac{dp}{dt} - h_1 \frac{dM_1}{dt} \right] \quad (16)$$

$$\frac{dH_2}{dt} = \frac{1}{M_2} \left[(\dot{m}h)_{2B} + \dot{m}_{PT2}h'' + \dot{Q}_{21} + M_2 v_2 \frac{dp}{dt} - h_2 \frac{dM_2}{dt} \right] \quad (17)$$

Smenjivanjem jednačina (16) i (17) u jednačinu (15) se dobija:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\left(h_1 \frac{\partial v_1}{\partial h} \Big|_p - v_1 \right) \frac{dM_1}{dt} + \left(h_2 \frac{\partial v_2}{\partial h} \Big|_p - v_2 \right) \frac{dM_2}{dt}}{\left(\frac{\partial v_1}{\partial p} \Big|_h + \frac{\partial v_1}{\partial h} \Big|_p \right) M_1 + \left(\frac{\partial v_2}{\partial p} \Big|_h + \frac{\partial v_2}{\partial h} \Big|_p \right) M_2} + \frac{\frac{\partial v_1}{\partial h} \Big|_p [(mh)_{hB} + \dot{m}_{PT1} h'' - \dot{Q}_{21}]}{\left(\frac{\partial v_1}{\partial p} \Big|_h + \frac{\partial v_1}{\partial h} \Big|_p \right) M_1 + \left(\frac{\partial v_2}{\partial p} \Big|_h + \frac{\partial v_2}{\partial h} \Big|_p \right) M_2} + \frac{\frac{\partial v_2}{\partial h} \Big|_p [(mh)_{hB} + \dot{m}_{PT2} h'' - \dot{Q}_{21}]}{\left(\frac{\partial v_1}{\partial p} \Big|_h + \frac{\partial v_1}{\partial h} \Big|_p \right) M_1 + \left(\frac{\partial v_2}{\partial p} \Big|_h + \frac{\partial v_2}{\partial h} \Big|_p \right) M_2} \quad (18)$$

Jednačine (1), (2), (16), (17) i (18) se numerički rešavaju primenom metode Runge-Kutta [8] za određene vrednosti početne mase i entalpije tečne i parne faze i početni pritisak u akumulatoru pare.

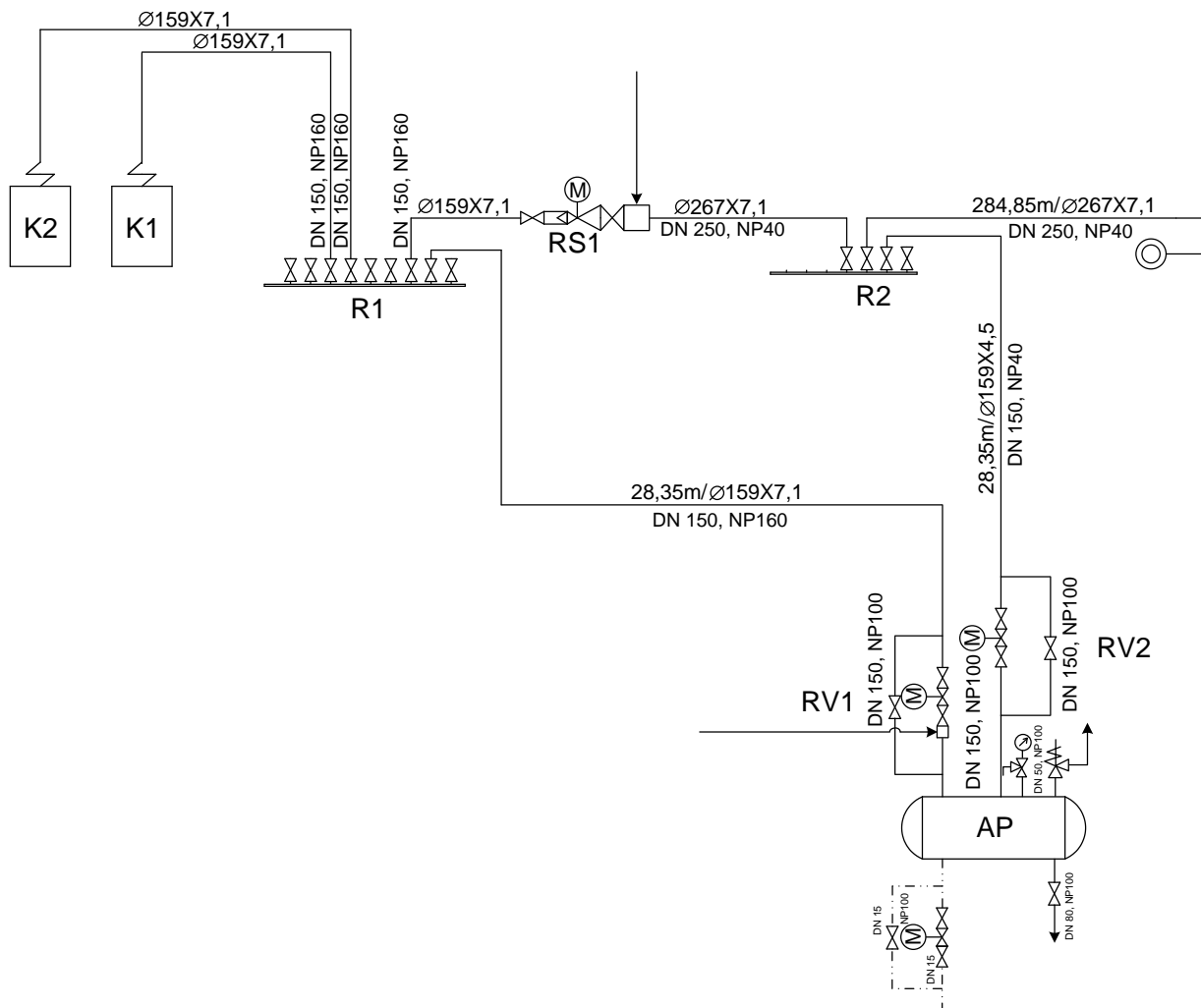
III. Validacija modela

Model prikazan u radu primenjen je na proračun punjenja i pražnjenja akumulatora pare u toplani u Vreocima, ogranak „Pre-

rada“ Rudarskog basena „Kolubara“ d.o.o. [7]. Pregrejana para se iz kotlova, preko akumulatora pare transportuje ka sušari uglja. Šematski prikaz sistema za snabdevanje sušare uglja parom je prikazan na slici 2. Ukupna unutrašnja zapremina akumulatora pare je 64 m³. Maksimalno dozvoljeni pritisak u kotlu i u akumulatoru, pri kome se otvaraju sigurnosni ventili, iznosi 55 bar. U sprovedenim simulacijama je pretpostavljeno da se u početnom trenutku tečna i parna faza nalaze u stanju termičke ravnoteže određenom početnim pritiskom.

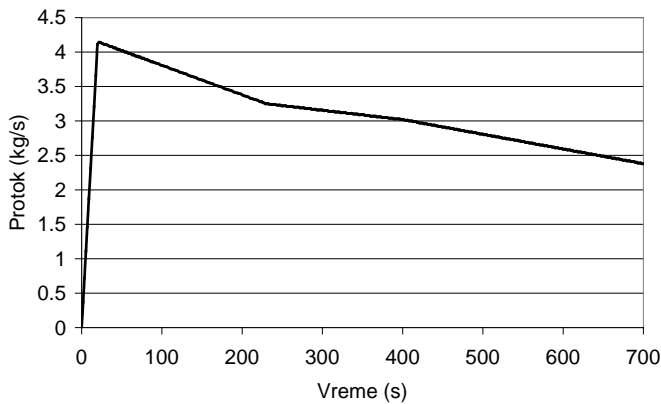
Razvijeni model je validiran za test punjenja akumulatora pare [9]. Izmereni protok, pritisak i temperatura pare na ulazu u akumulator su predstavljeni na slikama 3 i 4. Nema drugih uticaja ni isticanja. Poređenjem izračunatog porasta pritiska u akumulatoru sa izmerenim vrednostima postignuto je dobro slaganje, slika 5.

Na slici 6 je prikazan konstantan maseni protok uticanja pare u akumulator kao i promenljivi maseni protok isticanja koji je određen zahtevom za potrošnju pare u sušari uglja. Promenljivi maseni protok isticanja je obezbeđen regulacionim ventilom na izlazu iz akumulatora. Usvojeno je da je para koja utiče u akumu-

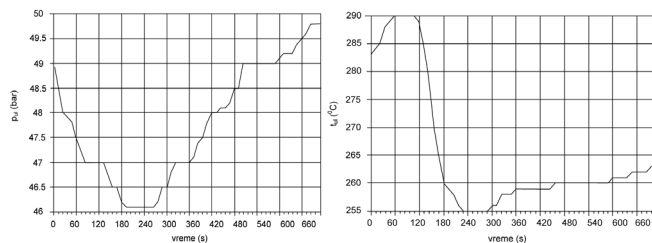


Slika 2: Sistem za snabdevanje sušare uglja parom

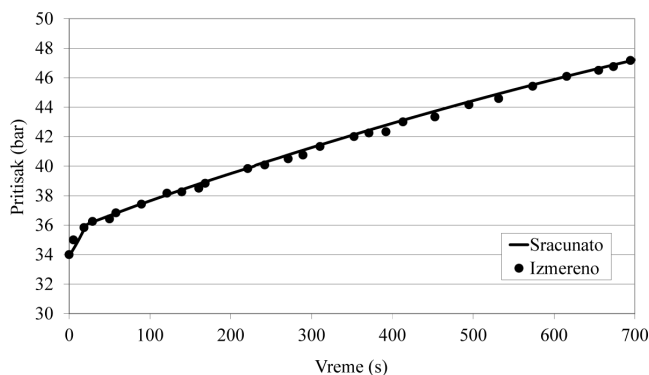
lator suvozasiceana, što je obezbedeno hladenjem pregrejane pare iz parnog kotla u hladnjaku pare. U početnom trenutku voda zauzima 50% zapremine akumulatora pare dok su tečna i parna faza u stanju zasićenja i nalaze se na pritisku od 25 bar. Ovakvi uslovi dovode do periodične promene pritiska u akumulatoru pare koja je predstavljena na slici 7. Odgovarajuća promena nivoa vode prikazana je na slici 8. Ostali parametri akumulatora pare, kao što su mase vode i pare, takođe se menjaju periodično.



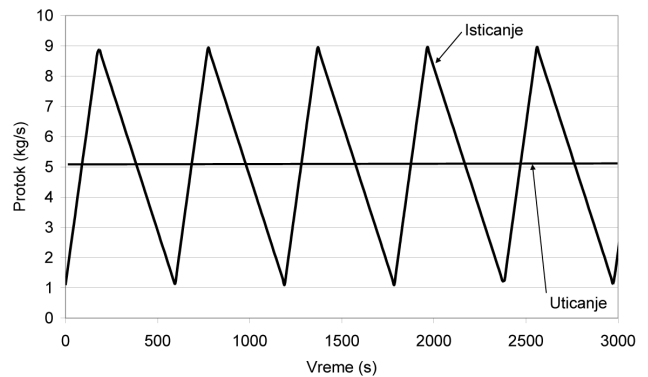
Slika 3: Izmereni protok pare na ulazu u akumulator



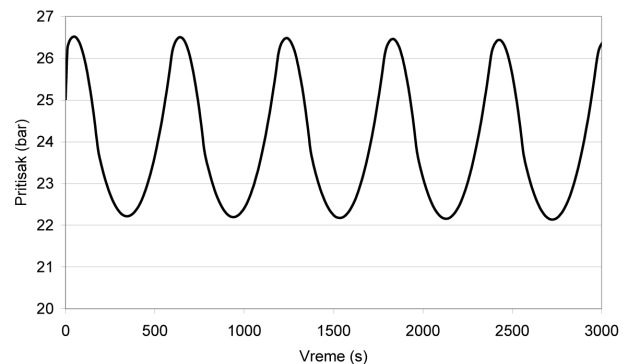
Slika 4: Izmereni pritisak (levo) i temperatura pare na ulazu u akumulator pare (desno)



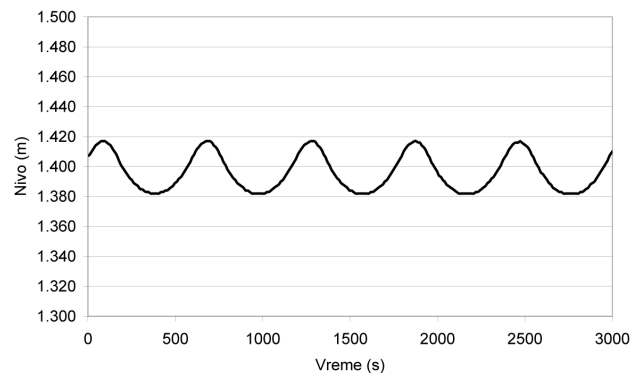
Slika 5: Izmerena i izračunata promena pritiska u toku testa punjenja akumulatora pare



Slika 6: Uticanje i isticanje iz akumulatora pare pri radu 4 grupe autoklava u sušari uglja



Slika 7: Promena pritiska u akumulatoru pare pri radu 4 grupe autoklava u sušari uglja



Slika 8: Promena nivoa vode u akumulatoru pare pri periodično promenljivoj potrošnji pare 4 grupe autoklava u sušari uglja

Razvijeni model su primenili strani autori [10] i validirali ga za uslove njihove eksperimentalne instalacije. Oni su na eksperimentalnom akumulatoru pare sproveli testove punjenja i pražnjenja pri različitim početnim uslovima. Sproveli su tri grupe merenja i numeričkih simulacija za punjenje akumulatora pare i dve grupe za pražnjenje akumulatora. Pri punjenju akumulatora pare pritisak (slika 9 levo) brzo raste do vrednosti kada se otvara

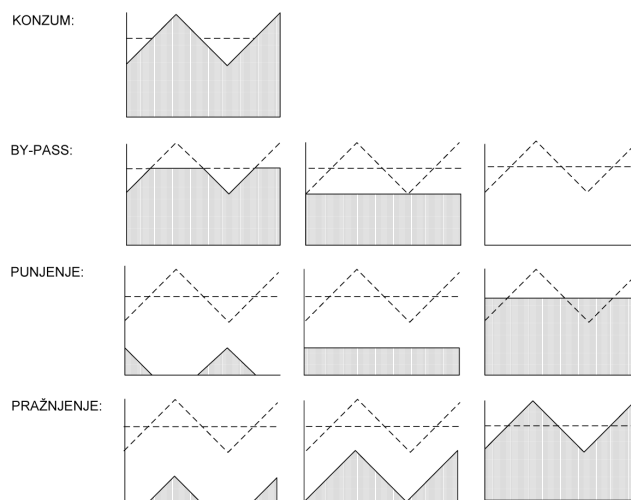
ventil za punjenje akumulatora, onda brzo opada kako se ventil zatvara sve dok se na kraju ne stabilizuje. Neravnotežni proces punjenja akumulatora se dešava zbog toga što uvođenjem pare u akumulator pritisak raste, a voda koja je bila u stanju zasićenja za pritisak pre otvaranja ventila za punjenje, nije trenutno promenila temperaturu, pa se ona nalazi na temperaturi nižoj od temperature zasićenja za novouspostavljeni pritisak u akumulatoru, usled čega se para kondenzuje. Novo ravnotežno stanje po zatvaranju ventila za punjenje uspostavlja se nakon vremena relaksacije neravnotežnog procesa kondenzacije, što je prikazano nakon pika pritiska u približno 37 s na slici 9 levo.

Pri pražnjenju akumulatora pare (slika 9 desno) pritisak ne zadržava vrednost po zatvaranju ventila za ispuštanje pare već raste do nove ravnotežne vrednosti. Neravnotežni proces se dešava zbog toga što voda ne može trenutno da promeni temperaturu, i ona se još neko vreme nalazi na temperaturi zasićenja za pritisak pre otvaranja ventila za ispuštanje. Pošto je usled ispuštanja pare pritisak opao, voda adijabatski isparava jer je na temperaturi višoj od temperature zasićenja za pritisak po zatvaranju ventila za ispuštanje pare. Isparavanje vode uzrokuje porast pritiska u akumulatoru.

Poređenjem rezultata numeričke simulacije sa izmerenim vrednostima na eksperimentalnom akumulatoru pare autori [10] su zaključili da se primenom našeg neravnotežnog termodinamičkog modela može tačno predvideti termodinamičko ponašanje akumulatora pare pri njegovom punjenju i pražnjenju.

IV. Regulacija rada akumulatora pare

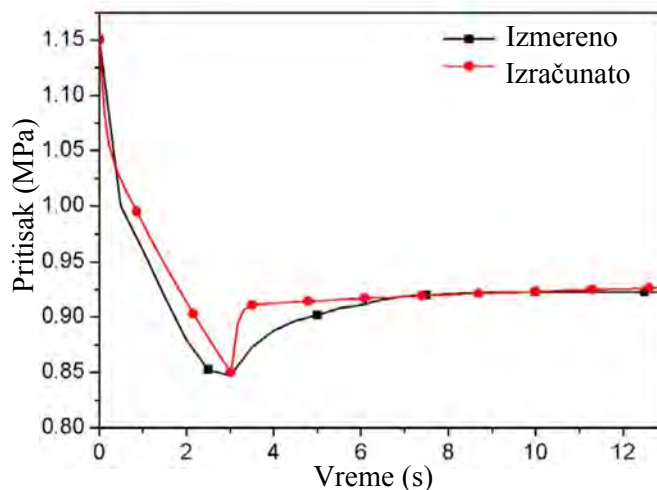
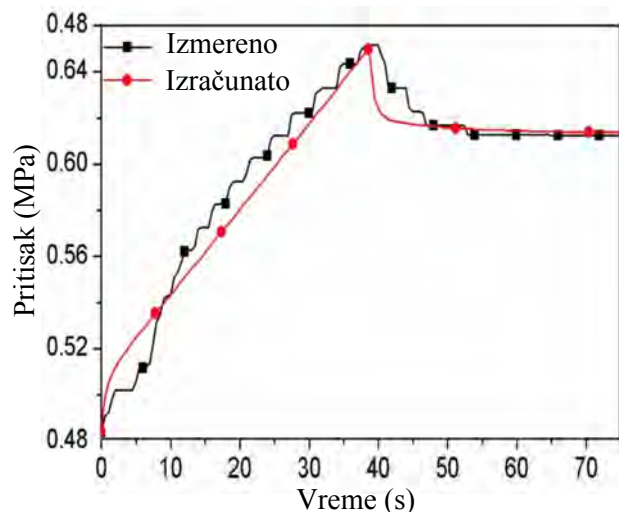
Mogući načini regulacije rada akumulatora pare za slučajeve kada se promenljiva potrošnja pare isporučuje preko razdelnika R2 (slika 2), a potrošnja pare iz razdelnika R1 (slika 2) je konstantna su prikazani na slici 10. Dijagram u gornjem levom uglu na slici 10 pokazuje pretpostavljenu periodičnu promenu potrošnje pare niskog pritiska u sušari. Vertikalno poredani dijagrami u koloni levo, središnjoj koloni i koloni desno pokazuju moguću



Slika 10: Moguća regulacija punjenja i pražnjenja akumulatora pare: promenljivo uticanje i isticanje pare u akumulatoru i promenljiv protok kroz redukcioni stacionu by-pass parovoda - kolona levo, konstantno uticanje u akumulator i protok kroz by-pass liniju i promenljivo isticanje iz akumulatora - kolona u sredini, celokupan protok pare za sušaru se sprovodi kroz akumulator - kolona desno

rad akumulatora pare, odnosno različite načine sprege punjenja i pražnjenja akumulatora pare i protoka kroz zaobilazni paralelni (by-pass) parovod sa redukcioniom stanicom RS1 (paralelna veza akumulatora i redukcione stanice je prikazana na slici 2):

a) U slučaju prikazanom dijagramima u koloni levo, akumulator se puni parom u periodima smanjene potrošnje pare u sušari i prazni se u periodima povećane potrošnje. Pri tome, u periodima smanjene potrošnje pare, smanjuje se i protok kroz by-pass vod, a u periodu povećane potrošnje protok kroz by-pass vod je konstantan, a višak potrošnje pare se obezbeđuje iz akumulatora.



Slika 9: Izmerena i izračunata promena pritiska u toku testa punjenja (levo) i pražnjenja (desno) eksperimentalnog akumulatora pare [10]

Pri ovom načinu rada se ostvaruju minimalni protoci punjenja i pražnjenja akumulatora.

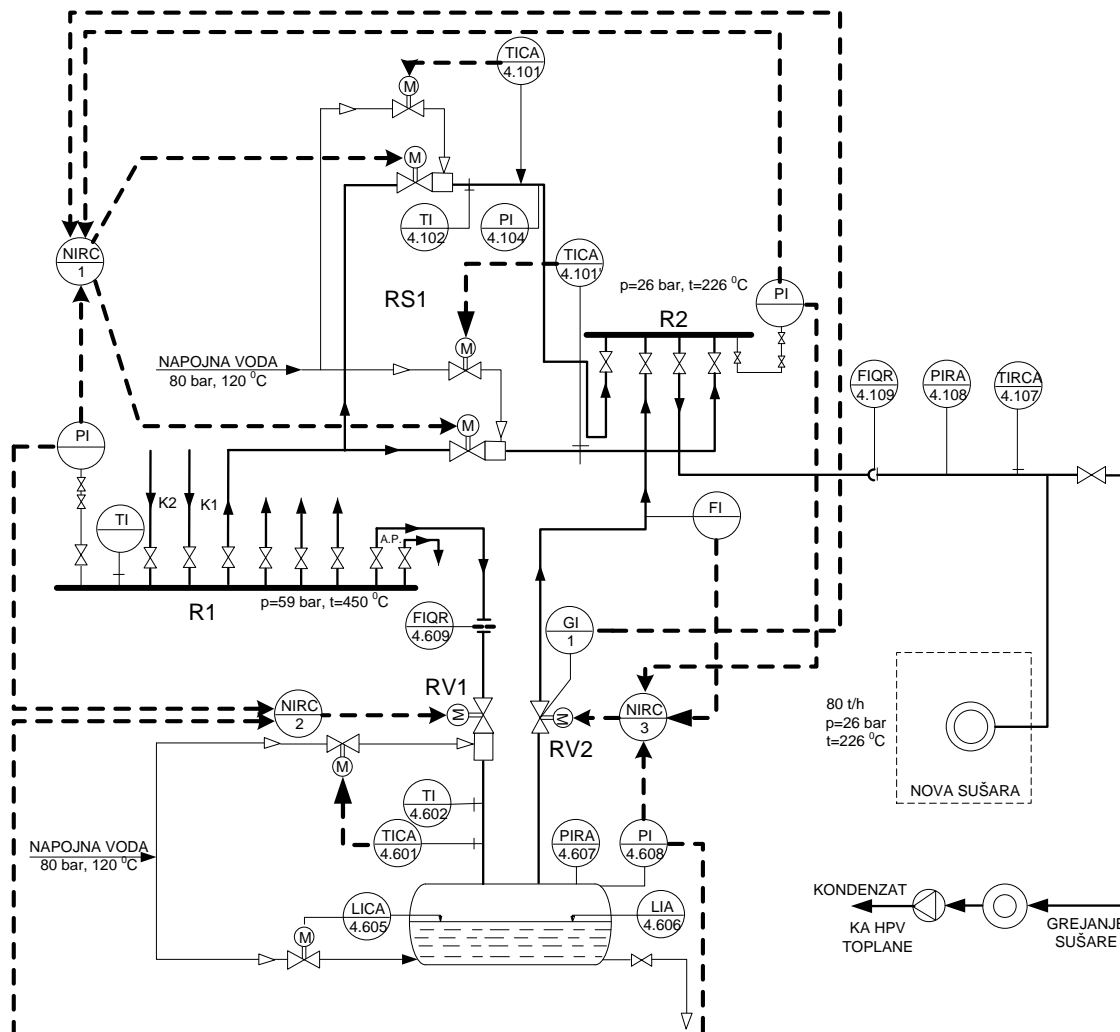
b) U okviru režima rada prikazanog na dijagramima u središnjoj koloni protok kroz by-pass je konstantan i jednak je najmanjem protoku potrošnje pare. Takođe, konstantan je i protok uticanja pare u akumulator pare. Jedino se menja protok isticanja pare iz akumulatora shodno zahtevima tehnološkog procesa u sušari. Konstantni maseni protoci kroz by-pass liniju i na ulazu u akumulator obezbeđuju konstantan pritisak u razdelniku pare R1 (slika 11), a promenljiv protok pare iz akumulatora, koji je uslovljen promenljivom potrošnjom pare u sušari, obezbeđuje konstantan pritisak u razdelniku R2.

c) U okviru režima prikazanog dijagramima u desnoj koloni, celokupni protok pare za potrebe rada sušare se provodi kroz akumulator pare, dok je by-pass linija zatvorena. Protok uticanja pare u akumulator pare je konstantan, a protok isticanja pare iz akumulatora se menja shodno zahtevima tehnološkog procesa u sušari. Konstantan maseni protok na ulazu u akumulator obezbeđuje konstantan pritisak u razdelniku pare R1 (slika 11), a promenljiv protok pare iz akumulatora obezbeđuje konstantan pritisak u razdelniku R2.

U opštem slučaju potrošnja pare koju obezbeđuju razdelnici R1 i R2 (slika 2) može biti promenljiva i stohastička. Zbog toga su jedini mogući način regulacije rada, koji obezbeđuju iskorišćenje ukupnog kapaciteta akumulatora, promena protoka punjenja i pražnjenja akumulatora, kao i promena protoka kroz redukcionu stanicu by-pass parovoda. Sistem upravljanja radom akumulatora pare u opštem slučaju je opisan u sledećem potpoglavlju.

IV.1. Sistem upravljanja radom akumulatora pare

Merenja i regulaciona kola za upravljanje radom akumulatora pare [11] su prikazani na slici 11. Punjenje akumulatora pare se vrši pomoću regulacionog ventila RV1, čijim zatvaranjem i otvaranjem upravlja regulaciono kolo 2NIRC. Pražnjenje akumulatora pare se vrši pomoću regulacionog ventila RV2 kojim upravlja regulaciono kolo 3NIRC. Položaj regulacionih ventila u redukcionoj stanici RS1, koja je u paralelnoj vezi sa akumulatorom pare, se zadaje regulacionim kolom 1NIRC. Upravljanje regulacionim ventilom za dovod napojne vode u hladnjak pare se vrši pomoću kola 4.601 TICA, dok se otvaranje i zatvaranje pre-



Slika 11: Merenja i regulacioni krugovi za upravljanje radom akumulatora pare

gradnih ventila za dovod i odvod napojne vode u akumulator pare zadaje regulacionim kolom 4.605 LICA. Sledi opis navedenih regulacionih kola.

IV.1.1. Regulacija protoka kroz by-pass liniju (redukcionu stanicu RS1) – kolo 1NIRC

Regulaciono kolo 1NIRC (slika 11) upravlja elektromotornim ventilima u redukcionoj stranici RS1 na osnovu signala merenja pritiska u razdelniku R1 na izlazu iz kotlova i signala merenja pritiska u razdelniku R2 iz koga se para šalje ka potrošaču to jest sušari. Takođe, koristi se i signal o krajnjem položaju regulacionog ventila RV2 na izlazu iz akumulatora (indikacija da li je ventil RV2 potpuno otvoren ili zatvoren).

Ukoliko pritisak u razdelniku R2 raste i regulacioni ventil RV2 je potpuno zatvoren, kolo 1NIRC šalje signal za pritvaranje regulacionih ventila u redukcionoj stanici RS1 sve dok se ne postigne željena vrednost pritiska u razdelniku R2.

Ukoliko pritisak u razdelniku R2 opada i ukoliko je regulacioni ventil na izlazu iz akumulatora RV2 potpuno otvoren, regulaciono kolo 1NIRC šalje signal da se regulacioni ventili u redukcionoj stanici RS1 otvaraju.

Ukoliko pritisak u razdelniku R1 opadne ispod dozvoljene vrednosti, kolo 1NIRC šalje signal za zatvaranje ventila u RS1 kako bi se pritisak u razdelniku R1 zadržao u okviru propisanih vrednosti. Ovaj signal ima prioritet nad ostalim signalima poslatim kolu 1NIRC.

IV.1.2. Regulacija punjenja akumulatora pare – kolo 2NIRC

Regulaciono kolo 2NIRC (slika 11) upravlja elektromotornim regulacionim ventilom RV1, u parovodu za punjenje akumulatora, na osnovu signala o izmerenim vrednostima pritiska u razdelniku R1, koji se nalazi ispred akumulatora pare, i pritiska u akumulatoru pare.

Ukoliko pritisak u razdelniku R1 poraste iznad dozvoljene vrednosti i pritisak u akumulatoru je niži od pritiska u razdelniku R1, kolo 2NIRC šalje signal za otvaranje ventila RV1.

Ukoliko je pritisak u akumulatoru jednak ili viši od pritiska u razdelniku R1 ili je pritisak u razdelniku R1 niži od donje dozvoljene vrednosti, regulacioni ventil RV1 se zatvara ili ostaje zatvoren.

IV.1.3. Regulacija pražnjenja akumulatora pare – kolo 3NIRC

Regulaciono kolo 3NIRC (slika 11) upravlja elektromotornim regulacionim ventilom RV2 na izlazu iz akumulatora pare na osnovu izmerenih vrednosti pritiska u razdelniku R2 i vrednosti pritiska u akumulatoru.

Ukoliko pritisak u razdelniku R2 opada ispod donje dozvoljene vrednosti i pri tome je pritisak u akumulatoru viši od pritiska u razdelniku R2, kolo 3NIRC šalje signal za otvaranje regulacionog ventila RV2.

Ukoliko pritisak u razdelniku R2 raste iznad gornje dozvoljene vrednosti, kolo 3NIRC šalje signal za zatvaranje ventila RV2.

Ukoliko je pritisak u akumulatoru niži od pritiska u razdelniku R2, regulacioni ventil RV2 se ne otvara.

IV.1.4. Regulacija temperature pare na ulazu u akumulator pare – kolo 4.601 TICA

Regulaciono kolo 4.601 TICA (slika 11) upravlja regulacionim ventilom za dovod napojne vode u hladnjak pare (ventil broj 19 na slici 11) na osnovu signala izmerene temperature pare iza hladnjaka pare i signala o položaju regulacionog ventila RV1.

Izmerena temperatura pare iza hladnjaka se upoređuje sa temperaturom zasićenja za izmereni pritisak u akumulatoru pare. Ukoliko je izmerena temperatura viša od zadate, regulacioni ventil za dovod napojne vode se otvara, u suprotnom se pritvara.

Ukoliko je regulacioni ventil RV1 na ulazu u akumulator pare potpuno zatvoren kolo 4.601 TICA šalje signal za potpuno zatvaranje ventila broj 19 kako bi se zaustavilo ubrizgavanje napojne vode u parovod na ulazu u akumulator kroz koji ne protiče para.

Regulacija temperature pare u redukcionoj stanici RS1 upravljačkim kolima 4.101 TICA i 4.101' TICA se vrši na sličan način kao regulacija temperature pare na ulazu u akumulator kolum 4.601 TICA.

IV.1.5. Regulacija nivoa vode u akumulatoru – kolo 4.605 LICA

Regulaciono kolo 4.605 LICA (slika 11) otvara i zatvara pregradne ventile za dovod i odvod napojne vode u akumulator pare na osnovu izmerenog nivoa vode u akumulatoru pare.

Ukoliko je nivo vode u akumulatoru niži od donje dozvoljene vrednosti, regulaciono kolo otvara ventil broj 23 za dovod napojne vode u akumulator, a zatvara ga kada nivo dostigne propisanu vrednost. Ukoliko je nivo vode viši od gornje dozvoljene vrednosti, regulaciono kolo 4.605 LICA otvara ventil broj 16 za ispuštanje vode iz akumulatora, a zatvara ga kada nivo dostigne propisanu vrednost.

V. Zaključak

Razvijen je neravnotežni numerički model za simulaciju i analizu dinamike rada sistema za akumulaciju pare. Model je zasnovan na bilansnim jednačinama mase i energije za svaku od faza, kao i na neravnotežnim korelacijama za određivanje brzina kondenzacije i isparavanja. Dobijeni rezultati pokazuju vremenske promene pritiska, nivoa vode, masa i entalpija tečne i parne faze. Sistem upravljanja akumulatorom pare zasnovan na mernim i regulacionim krugovima je predstavljen u radu. Izvršeni testovi autora ovog rada, ali i stranih autora pokazuju pouzdanost ovog modela koji se koristi kao podrška pri projektovanju i analizama rada sistema za akumulaciju pare.

NOMENKLATURA

a	specifična razdelna površina, m^2/m^3
H	totalna entalpija, J
h	specifična entalpija, J/kg
	koeficijent prelaza toplote, $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
B	masa, kg
\dot{m}	maseni protok, kg/s
p	pritisak, Pa
\dot{Q}	toplotna snaga, W
r	latentna toplota, J/kg
T	temperatura, K
t	vreme, s
V	zapremina, m^3
v	specifična zapremina, m^3/kg

Grčki simboli

ρ	gustina, kg/m^3
τ	relaksaciona konstanta, s

Indeksi

B	granični parametar
c	kondenzacija
e	isparavanje
ul	ulaz
PT	parametar faznog prelaza
izl	izlaz
1	voda
2	para
21	prelaz toplote sa pare na vodu
'	zasićena voda
“	zasićena para

Literatura

- [1] Goldstern, W., *Thermal energy storage in industry and power stations*, Proceedings of the International Conference on Energy Storage, BHRA Fluid Engineering, Brighton, UK, 1981, April 29 – May 1, pp. 113-120.
- [2] Price, N., *Steam accumulators provide uniform loads on boilers*, Chemical Engineering, 89 (23), pp. 131-135, 1982.
- [3] Shnaider, D.A., Divnich, P.N., Vakhromeev, I.E., *Modeling the dynamic mode of steam accumulator*. Automation and Remote Control, 71, pp. 1994-1998, 2010.
- [4] Beckmann, G., Gilli, P.V., *Thermal Energy Storage*. Berlin: Springer-Verlag, 1984.
- [5] Steinmann, W.D., Eck, M., *Buffer storage for direct steam generation*. Solar Energy, 80, pp. 1277-1282, 2006.
- [6] Bai, F., Xu, C., *Performance analysis of a two-stage thermal energy storage system using concrete and steam accumulator*, Applied Thermal Engineering, 31, pp. 2764-2771, 2011.
- [7] Stevanović, V., Maslovarić B., Prica, S., *Izrada tehnološkog projekta – analize rada akumulatora pare i postrojenja za akumulaciju pare na osnovu sniženih tehnoloških parametara*, Mašinski

fakultet Univerziteta u Beogradu, 2011, Beograd, Srbija.

- [8] Hamming, R.W., *Numerical Methods for Scientists and Engineers*, Dover Publications, Inc., New York, 1986.
- [9] Stevanovic, V., Maslovaric, B., and Prica, S., *Dynamics of steam accumulation*, Applied Thermal Engineering, 37, pp. 73-79, 2012.
- [10] Sun, B., Guo, J., Lei, Y., Yang, L., Li, Y., Zhang, G., *Simulation and verification of a non-equilibrium thermodynamic model for a steam catapult's steam accumulator*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 85, pp. 88-97, 2015.
- [11] Stevanovic, V., Petrovic, M. M., Milivojevic, S., Maslovaric, B., *Prediction and control of steam accumulation*, Heat Transfer Engineering, 36, pp. 498-510, 2015.

Autori

Milan M. PETROVIĆ,
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet,
Kraljice Marije 16, 11120 Beograd

Sanja MILIVOJEVIĆ
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet,
Kraljice Marije 16, 11120 Beograd

Vladimir STEVANOVIĆ
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet,
Kraljice Marije 16, 11120 Beograd



29. MEĐUNARODNI
KONGRES O
PROCESNOJ
INDUSTRIJI

PROCESING '16