MATEMATIČKI MODEL ZA SIMULIRANJE RADA KLIMATIZACIONIH SISTEMA U PUTNIČKIM VAGONIMA

MATHEMATICAL MODEL AND SOFTWARE FOR SIMULATION OF AIR-CONDITIONING SYSTEM IN THE PASSENGER COACHES

Mr Milan Despotović, dipl. inž., i prof. dr Milun Babić, dipl. inž., Mašinski fakultet, Kragujevac

U radu je izložen matematički model za simuliranje ponašanja energetskih i regulacijskih komponenti, kao i kompletnih klimatizacionih sistema u putničkim vagonima.

Softverski paket razvijen je na Katedri za energetiku i procesnu tehniku Mašinskog fakulteta u Kragujevcu, a njegov zadatak je da omogući pretprojektno numeričko „eksperimentisanje" radi što jeftinijeg utvrđivanja optimalnih karakteristika strukturnih komponenti sistema za klimatizaciju vazduha u putničkim vagonima.

Razvijeni softverski paket može se lako primeniti i u razvoju klimatizacionih sistema u automobilima, autobusima i drugim sredstvima za transport putnika.

The mathematical model for simulation of the behaviour of energetic and regulation components as well as complete air-conditioning systems in the passenger coaches are presented in this paper.

The software has been developed at Energy and Process Engineering Department at Faculty of Mechanical Engineering of Kragujevac, and its purpose is to enable preliminary numerical experiment, in order to determine optimal characteristics of the air-conditioning system components in passenger coaches, at low costs.

The developed software could also be easily used for the development of air-conditioning systems in cars, buses an other means of transportation.

Ključne reči: simuliranje; regulacija; klimatizacija; softver; putnički vagon
Key words: simulation; regulation; air-conditioning; software; passenger coach

Uvod

Težnja ljudi da što komfornije putuju i brz razvoj konkurentnih sredstava za transport putnika neprestano podstiču proizvođače putničkih vagona da ih usavršavaju. Pored povećanja brzine transporta, proizvođači putničkih vagona veliku pažnju posvećuju unapređenju opšte ugodnosti putovanja, čemu, svakako, veoma doprinosi i pravilna klimatizacija prostora za putnike. Imajući u vidu da je osećaj prijatnosti veoma intimno osećanje putnika i da se taj osećaj razlikuje od čoveka do čoveka, jasno

je koliko se složen zadatak postavlja pred projektante i proizvođače putničkih vagona. Treba, naime, proizvesti punički vagon u kome je moguće svakom putniku da u zajedničkom putničkom prostoru lako i brzo prilagodi opštu klimatizacionu „sliku" svojim ličnim potrebama, a da, pri tom, ne ugrozi osećaj ugodnosti svojih saputnika, što uslovljava kompleksnu opremu i veće troškove. S druge strane, zbog održavanja konkurentne cene putovanja, prodajna cena putničkog vagona mora biti limitirana. Iz istog razloga utrošak energije za optimalnu klimatizaciju putničkog prostora mora biti minimalan, kao što moraju da budu minimalni i troškovi tekućeg održavanja putničkog vagona u toku njegove eksploatacije.

Dakle, veoma visoki zahtevi tržišta i nastojanje proizvođača da profitabilno posluju, uslovljavaju stalno unapređivanje konstrukcije putničkih vagona, pa s tim u vezi i svih komponenata i struktura sistema za klimatizaciju njihovog putničkih prostora.

U nameri da doprinesu što jednostavnijoj i kvalitetnijoj tehničkoj optimizaciji sistema za klimatizaciju putničkog prostora u fazi razvoja novih, ili osavremenjavanja postojećih, putničkih vagona, autori ovoga rada razvili su matematički model i odgovarajući kompjuterski program, za proračun i vizuelizaciju ponašanja klimatizacionog sistema i njegovih vitalnih komponenti u različitim eksploatacionim uslovima. Osnove ove metodologije i deo rezultata dobijenih tokom numeričke simulacije ponašanja konkretnog sistema za klimatizaciju vagona domaće proizvodnje, izneti su u narednom tekstu.

Opis matematičkog modela

Na termodinamičke parametre vazduha unutar putničkog prostora vagona utiče veliki broj unutrašnjih i spoljašnjih faktora, od kojih ističemo sledeće:

– temperaturu i vlažnost vazduha geografskih područja kroz koje se vagon kreće,
– brzinu i smer strujanja vazdušnih masa,
– nivo oblačnosti,
– položaj sunca i intenzitet njegovog zračenja,
– vrstu i intenzitet eventualnih atmosferskih padavina,
– brzinu i pravac kretanja vagona,
– položaj vagona u železničkoj kompoziciji,
– broj putnika i njihovu telesnu termoregulaciju,
– masu, vrstu i početnu temperaturu i vlažnost putničkog prtljaga i dr.

Pored napred navedenih uticaja, na energetski bilans putničkog vagona bitno utiču i: termodinamička svojstva i kvalitet konstrukcije zidova vagona, način i veličina zastakljenih površina itd.

Prilikom izrade matematičkog modela, za sve spomenute faktore koji utiču na termodinamičke veličine stanja vazduha u putničkom prostoru vagona, korišćene su proverene matematičke relacije koje se mogu naći u literaturi, a sistematizovane su u [4] i ovde, zbog ograničenog prostora, nisu rekapitulirane.

Zbir svih toplotnih opterećenja usled navedenih spoljašnjih i unutrašnjih uticaja predstavlja tzv. ukupno „suvo" toplotno opterećenje putničkog vagona, i ono utiče na nivo termodinamičkog komfora putnika u putničkom prostoru vagona, a matematički se može iskazati na sledeći način:

$$\dot{Q}_{suvo} = \dot{Q}_{TR} + \dot{Q}_{ZR1} + \dot{Q}_{ZR2} + \dot{Q}_{LJ} + \dot{Q}_{ostalo},$$

pri čemu se, u vremenskom intervalu $d\tau$, vazduhu u putničkom prostoru dovede/odvede sledeća količina toplote:

$$dQ_{si} = \dot{Q}_{suvo}\, d\tau.$$

Na sl. 1 prikazana je uobičajena struktura sistema za klimatizaciju putničkog prostora u vagonu, a na sl. 2 kvazistacionarna promena entalpije vazduha u h–x dijagramu za vlažan vazduh.

Oslanjajući se na oznake i prikaze na sl. 1 i 2 može se konstatovati sledeće:

– početno stanje vazduha u klima-komori (pre uključivanja sistema za klimatizaciju vazduha) odgovara tački 2_0, koja je određena temperaturom t_{v0} i entalpijom h_{v0};

– pod dejstvom ventilatora, zatim, u klima-komoru iz putničkog prostora pritiče recirkulacioni vazduh stanja 2_0 i spoljašnji vazduh stanja 1, pri čemu se obrazuje smeša vazduha stanja 3_0;

– stanje vazduha na ulazu u klima-komoru, odnosno tačka 3 u h–x dijagramu vlažnog vazduha, određena je, u opštem slučaju, jednačinom bilansa mase, vlage i vazduha u tačkama 1 i 2 (sl. 1):

$$x_{3i} = \frac{\dot{m}_{1i}x_{1i} + \dot{m}_{2i}x_{2i}}{\dot{m}_{1i} + \dot{m}_{2i}} = g_i x_{1i} + (1 - g_i)x_{2i}\,,$$

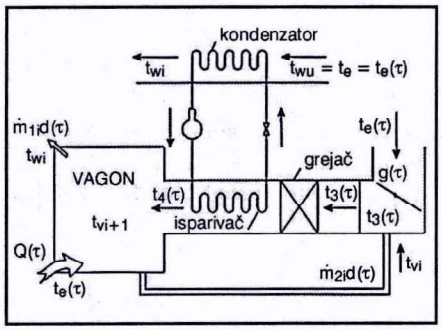
$$(i = 0,\ldots,n);$$

– takav vlažan vazduh prelazi, zatim, preko isparivača (sl. 1) i električnih grejača, usled čega mu se temperatura menja do vrednosti koja odgovara stanju 4_0 (sl. 2).

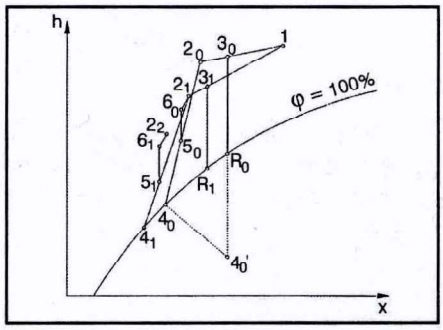
Prilikom hlađenja mase m_{3i} suvog vazduha koja za vreme $d\tau$, u proizvoljnom i-tom trenutku vremena, prođe kroz klima-komoru, iz nje se odvede količina toplote definisana sledećom relacijom:

$$dQ_{34i} = m_{3i}\,(h_{3i} - h_{4i}).$$

Ako se prilikom prelaska preko isparivača vlažni vazduh ohladi do temperature koja je niža od temperature tačke rose, i ako, pri tom, njegovi termodinamički para-



Slika 1. Funkcionalna struktura sistema za klimatizaciju putničkog prostora u vagonu



Slika 2. Prikaz kvazistacionarne promene entalpije vazduha u prostoru za putnike

metri odgovaraju stanju $4'_0$ (sl. 2) koje se nalazi u području magle, onda će doći do delimične kondenzacije vodene pare iz vlažnog vazduha, što će usloviti da se u vlažnom vazduhu, stanja $4'_0$, nađe i tečna faza (voda). Tokom ovakvog hlađenja, u i-tom trenutku vremena, termodinamički parametri stanja vazduha promeniće se od vrednosti definisanih tačkom 3_i do vrednosti određenih tačkom 4_i. Pri tom se (sl. 2) masa kondenzovane vode na površini isparivača može izraziti na sledeći način:

$$\Delta x_t = x_{Ri} - x_{4i} \text{ [kg vode/kg s.v.]}.$$

Međutim, ako rashladni kapacitet rashladnog uređaja ima vrednost:

$$dQ_{34i} \leq m_{3i}\,(h_{3i} - h_{Ri}),$$

onda se u toku hlađenja vazduha ne prelazi u područje magle, pa neće ni biti kondenzacije vodene pare na površini isparivača.

Ovde se napominje da se samo u prvom približenju zanemaruju toplotni gubici i gubici strujne energije u razvodnim kanalima između klima-komore i putničkog prostora, i usvaja da su termodinamički parametari vazduha na izlazu iz klima-komore približno jednaki odgovarajućim termodinamičkim parametrima vazduha u putničkom prostoru vagona. U toku svake naredne iteracije, izračunavaju se toplotni gubici i promena pritiska u razvodnim kanalima između klima-komore i putničkog prostora i vrše odgovarajuće korekcije.

Prilikom ubacivanja klimatizovanog vazduha u putnički prostor vagona dolazi do njegovog mešanja sa vazduhom koji se već tu nalazi, usled čega se menja temperatura vazduha u putničkom prostoru, pri čemu termodinamički parametri stanja vlažnog vazduha odgovaraju stanju 5_i. Istovremeno se iz putničkog prostora izbacuje $m_{1i}d\tau$ otpadnog vazduha stanja 2_i.

Novo stanje vazduha u putničkoj kabini (5_i) nalazi se na liniji mešanja 2_i–4_i, gledano u h–x dijagramu za vlažan vazduh (sl. 2), a određeno je sledećim bilansnim jednačinama:

$$x_{5i} = \frac{\rho V x_{2i} + \dot{m}_{3i} x_{4i} d\tau - \dot{m}_{1i} x_{2i} d\tau - \dot{m}_{2i} x_{2i} d\tau}{\rho V}$$

$$h_{5i} = h_{4i} + \frac{(h_{2i} - h_{4i})(x_{5i} - x_{4i})}{x_{2i} - x_{4i}}$$

Tokom vremena, usled „suvog" toplotnog opterećenja menja se temperatura vazduha u putničkom prostoru do vrednosti koja odgovara tački 6_i (sl. 2).

Ova promena stanja vazduha može se, približno, opisati sledećim dvema jednačinama:

$$x_{6i} = x_{5i},$$

$$x_{6i} = x_{5i} + (dQ_{si}) / \rho V.$$

S druge strane, kao što je to prikazano na sl. 2, zbog odavanja vlage i usled latentne toplote putnika i/ili usled prethodno akumulirane toplote i vlažnosti prtljaga,

između putničkog prtljaga i vazduha u putničkom prostoru, menjaju se, dalje, vlažnost i entalpija vazduha u putničkom prostoru do nivoa koji je određen tačkom 2_{i+1}, da bi se, zatim, deo $m_{2i+1}\, d\tau$ takvog vazduha ponovo uveo u klima-komoru (sl. 1 i 2).

U toku matematičke simulacije rada klimatizacionog sistema u proces se, dalje, u svakom novom iterativnom koraku u proračun uvode sve realnije okolnosti koje karakterišu proces, a koje su na startu simulacionog procesa bile ignorisane.

Promena vlažnosti i entalpije vazduha u putničkom prostoru, usled unošenja/iznošenja prtljaga, odavanja vlažnosti i latentne toplote putnika itd., može se opisati sledećim izrazima:

$$x_{2i+1} = x_{6i} + \frac{n_i d\dot{m}_{tLJi}(1+x_{tLJi})d\tau}{\rho V} + \\ + \frac{d\dot{m}_{tPRi}(1+x_{tPRi})d\tau}{\rho V},$$

$$h_{2i+1} = h_{6i} + \frac{d(\dot{Q}_{LJ} + \dot{Q}_{PR})d\tau}{\rho V}$$

Rashladni kapacitet uređaja mora da bude, uvek, jednak toplotnom opterećenju, da bi se temperatura i vlažnost unutar putničkog prostora održavali na željenoj vrednosti, uz prihvatljiva odstupanja. Kada toplotno opterećenje opada, mora se smanjiti i rashladni kapacitet uređaja, a pri porastu toplotnog opterećenja potrebno je povećati taj rashladni kapacitet.

U toku numeričke simulacije zagrevanja putničkog prostora u vagonu, mora se voditi računa da prilikom porasta toplotnog opterećenja u putničkom prostoru treba obezbediti smanjivanje količine toplote dovedene uz pomoć električnih grejača (koji predstavljaju sastavni deo klimatizacionog sistema koji se tretira u ovom radu), odnosno povećanje dovedene količine toplote pri smanjivanju toplotnog opterećenja.

Razvijeni simulacioni model regulacije termodinamičkih parametara stanja vazduha u putničkom prostoru vagona podrazumeva naizmenično uključivanje i isključivanje električnih grejača, odnosno kompresora u klima-komori. Ovaj način regulacije poznat je kao regulacija ON-OFF.

Prilikom uključivanja i isključivanja električnih grejača, njihova snaga može se predstaviti sledećim relacijama:

$$P(\tau) = \frac{Q(\tau)}{\tau} = P_{\max}\left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}\right)$$

$$P(\tau) = \frac{Q(\tau)}{\tau} = P_{\max} e^{-\frac{\tau}{T}}$$

gde oznaka T predstavlja vremensku konstantu, koja je merilo inertnosti sistema. Što je vremenska konstanta veća, to je veća i inertnost sistema.

Regulacija vlažnosti i temperature vazduha u putničkom prostoru vagona svodi se, dakle, na blagovremeno dodavanje ili oduzimanje električne snage, tj. na uključivanje, odnosno isključivanje grejača i/ili kompresora. Pravovremenost se obezbeđuje pomoću odgovarajućih PID (proporcionalno-integralno-diferencijalnih) regulatora, koji na osnovu izmerenog ulaznog signala (odnosno signala odstupanja stvarne od željene temperature vazduha), uključuju/isključuju grejače i kompresore, uzimajući u obzir informacije o brzini promene temperature vazduha u kabini.

Izlazni signal iz PID regulatora može se matematički simulirati uz pomoć sledeće jednačine:

$$\varepsilon_{iz}(\tau) = k_1\varepsilon(\tau) + k_2\frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} + k_3\int_0^{\tau}\varepsilon(\tau)d\tau$$

Sprezanjem jednačina kojima se uspostavljaju uzročno-posledične veze između:
- toplotne provodnosti zidova putničkog vagona,
- spoljašnjeg okruženja kroz koje se vagon kreće,
- brzine kretanja voza,
- komponenti klima-bloka,
- broja putnika i mase prtljaga koji oni nose sa sobom i
- jednačina kojima se definišu karakteristike regulatora,

i tako dobija matematički model koga čini više međusobno zavisnih algebarskih i diferencijalnih jednačina, uz čiju pomoć se može simulirati „ponašanje" sistema za klimatizaciju putničkog vagona u različitim uslovima njegove eksploatacije.

U matematičkom modelu može se uočiti pet grupa parametara. Prvu predstavljaju parametri koji određuju skup konstrukcijskih i termomehaničkih karakteristika samog vagona i putničke kabine, kao što su, recimo, dimenzije i koeficijenti prolaza toplote. U drugu grupu spadaju veličine koje karakterišu energetske karakteristike komponenata klima-komore. Treću grupu parametara čine klimatski faktori, četvrtu uslovi eksploatacije, a petu parametri elektronskog regulatora.

Menjanjem pojedinih parametara iz prve grupe, uz nepromenjene parametre iz ostalih grupa, može se uspešno simulirati „ponašanje" sprege različitih tipova putničkih vagona sa jednom te istom klima-komorom, i to pri istim uslovima eksploatacije i sa istim parametrima regulatora.

Menjanjem druge grupe parametara, pri nepromenjenim ostalim parametrima, može se simulirati uticaj različitih klima-komora na temperaturu i vlažnost vazduha u jednom te istom putničkom vagonu.

Analogno prethodnom, pri promeni pojedinih članova treće, četvrte i pete grupe parametara, mogu se vršiti simulacije „ponašanja" jedne klima-komore na određenom putničkom vagonu, pri različitim klimatskim uslovima, načinima eksploatacije i parametrima regulatora.

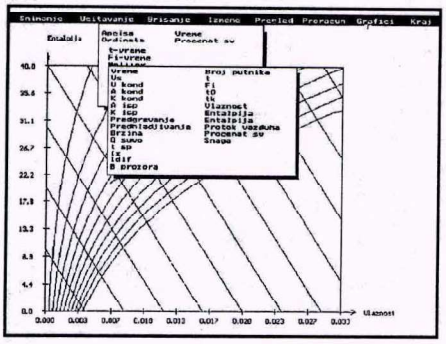
Osvrt na razvijeni softverski paket

Kao nadgradnja razvijenog matematičkog modela, razvijen je kompjuterski program za simulaciju klimatizacije putničkog prostora u vagonima.

Razvijeni softverski paket može se uspešno koristiti u toku pretprojektovanja, projektovanja, ili, pak, rekonstrukcije vagona.

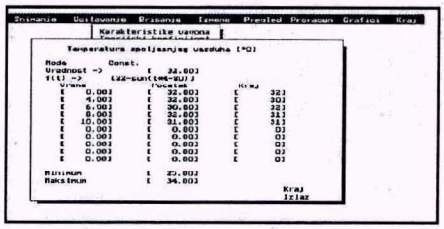
Rad sa razvijenim softverskim paketom veoma je jednostavan i mogu ga koristiti ljudi različitog nivoa stručnosti, zahvaljujući korisničkom interfejsu koji koristi sistem „padajućih" menija (sl. 3).

Izlazne rezultate proračuna program prezentira grafički, i to na način koji omogućuje brz i očigledan uvid u uticaj karakteristika putničkog vagona, rashladnog agregata, grejačke sekcije, klimatskih i eksploatacionih uslova na termodinamičke parametre stanja vazduha u putničkom prostoru.



Slika 3. Prikaz „padajućih" menija

Unos podataka koncipiran je tako da je moguće da se kao ulazni podatak unese konstantna vrednost, funkcionalna vremenska zavisnost, ili tabelarno izražena zavisnost parametra od vremena. Na taj način mogu se simulirati promene ulaznih veličina u toku vremena, kao i razni poremećaji u radu (sl. 4).



Slika 4. Prikaz mogućnosti za unos ulaznih podataka

U toku simulacije „ponašanja" putničkog vagona kao klimatizacijskog objekta, na ekranu računara moguće je pratiti promenu temperature vazduha u putničkom prostoru u funkciji vremena, a ostali termodinamički parametri upisuju se u izlaznu datoteku.

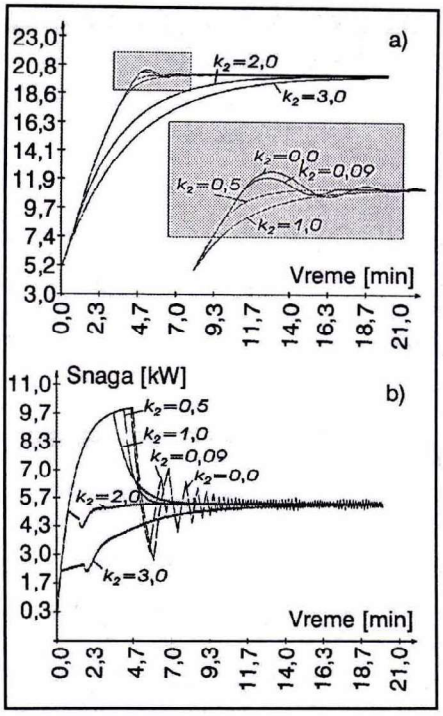
Biranjem opcije „Grafici" u glavnom meniju, nakon završetka simulacionog postupka, može se pogledati promena stanja vazduha u Molijerovom *h*–x dijagramu, kao i dijagrami zavisnosti ostalih veličina od vremena, ili od neke druge veličine. To se postiže biranjem veličina koje će biti prikazane na apscisi, odnosno ordinati dijagrama. Na taj način mogu se dobiti i veoma zanimljive parametarske krive (na primer: relativna vlažnost–apsolutna vlažnost vazduha u putničkom prostoru).

Kao primer dela mogućnosti razvijenog softverskog paketa, na sl. 5–9 prikazani su grafici nastali kao rezultat simulacionog tretmana klimatizacije putničkog vagona „GOŠA", tipa BT.

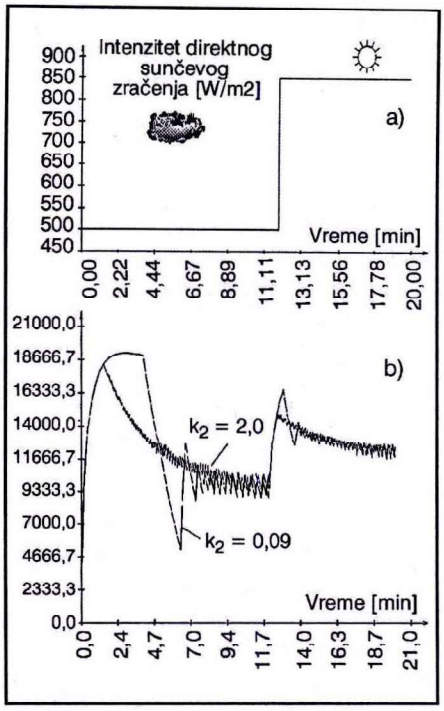
Na sl. 5a prikazana je promena temperature vazduha u putničkom prostoru vagona, a na sl. 5b odgovarajuća promena toplotne snage regulacionih električnih grejača u klimatizacionom sistemu za šest različitih vrednosti konstante u diferencijalnom delu regulatora PID.

Na sl. 6b prikazana je promena snage rashladnog agregata u klima-komori uslovljenog promenom intenziteta sunčevog zračenja pri različitim vrednostima konstante u diferencijalnom delu PID regulatora. Slika 6a prikazuje promenu intenziteta sunčevog zračenja, pri čemu u trenutku $t = 12$ min, dolazi do skoka ove vrednosti sa $I_Z = 500$ na $I_Z = 850$ W/m^2.

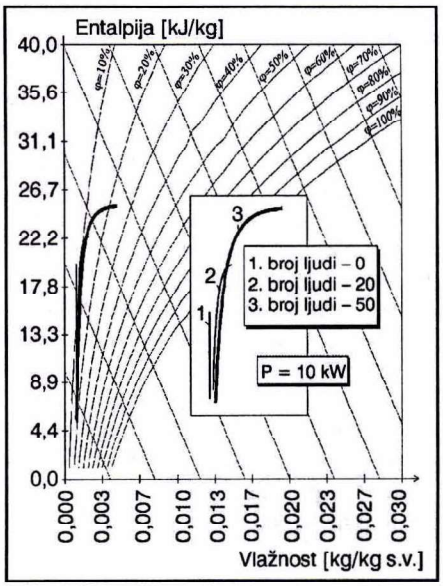
Na sl. 7 izloženi su, u Molijerovom dijagramu, rezultati simulacije promene entalpije i vlažnosti vazduha u putničkom prostoru vagona za tri vrednosti broja putni-



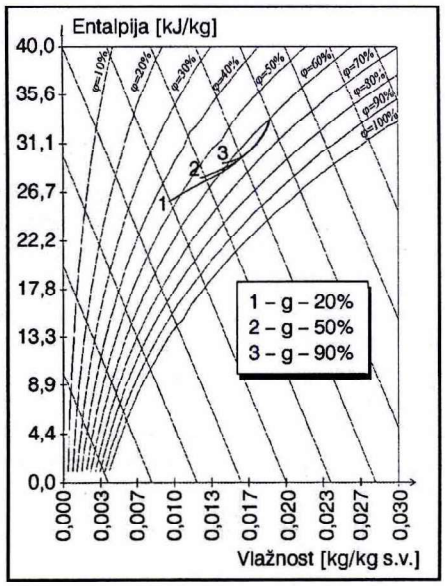
Slika 5



Slika 6



Slika 7

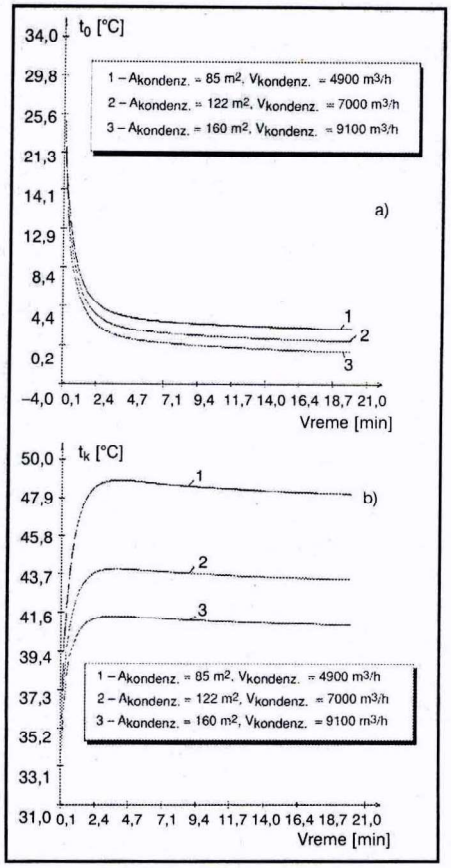


Slika 8

ka u vagonu u uslovima koji mogu nastati prilikom tehničkog otkaza automatskog regulatora.

Slika 8 obuhvata rezultate simulacije promene entalpije i vlažnosti vazduha u putničkom prostoru za slučaj ručne promene količine recirkulisanog vazduha pri tehničkom otkazu automatskog regulatora.

Slika 9a i sl. 9b prikazuju promenu temperature isparavanja i kondenzacije vlažne faze u vazduhu tokom njegovog prelaska preko kondenzatora različitih vrednosti površina u klima-komori, koje se dobijaju prilikom simulacije rada klimatizacionog sistema putničkog vagona u uslovima tehničkog otkaza automatskog regulatora temperature i vlažnosti, što se može koristiti prilikom utvrdivanja optimalne vrednosti kontaktne površine kondenzatora.



Slika 9

Zaključak

Na osnovu testiranja razvijenog softverskog paketa, kao i na osnovu rezultata njegove primene prilikom projektovanja prototipa rashladnog agregata za putničke vagone, autori ovoga rada došli su do zaključaka da on ima sledeća svojstva:

– daje rezultate koji su veoma bliski stvarnim vrednostima;

– ima veliku varijabilnost i prilagodljivost različitim objektima klimatizacije;

– ne zauzima veliki memorijski prostor i izvršavanje mu je veoma kratko;

– mogu ga upotrebljavati korisnici različitih nivoa stručnosti;

– prema prikazanim mogućnostima simulacije razvijeni softverski paket može veoma korisno poslužiti konstruktorima klimatizacionih sistema za putničke vagone u toku pretprojektne selekcije najprikladnijih komponenti klima-komore, uzimajući u obzir radne uslove i vrstu konkretnog vagona.

Oznake

$\dot{Q}_{TR}$ – toplotni fluks usled temperaturske razlike spoljašnjeg i unutrašnjeg vazduha

$\dot{Q}_{ZR1}$ – toplotni fluks od zračenja kroz neprozirnu oplatu

$\dot{Q}_{ZR2}$ – toplotni fluks od zračenja kroz prozore

$\dot{Q}_{LJ}$ – toplotni fluks od ljudi odaje jedan putnik na temperaturi t_{6i}

$\dot{Q}_{PR}$ – toplotni fluks od prtljaga

$\dot{Q}_{ostalo}$ – toplotni fluks od svih ostalih uticaja
I_Z – intenzitet sunčevog zračenja na datu površinu, intenzitet direktnog zračenja
t_e – temperatura spoljašnjeg vazduha
t – temperatura unutrašnjeg vazduha
g_i – procenat svežeg vazduha u mešavini u trenutku $\tau = \tau_i$
V – zapremina putničkog prostora vagona
$\dot{m}_{1i}$ – maseni protok otpadnog vazduha
$\dot{m}_{2i}$ – maseni protok recirkulacionog vazduha
$\dot{m}_{3i}$ – maseni protok vazduha kroz klima-komoru
$d\dot{m}_{tLJi}$ – količina vodene pare koju odaje jedan putnik na temperaturi t_{6i}
$d\dot{m}_{tPRi}$ – količina vodene pare koju odaje prtljag na temperaturi t_{6i}
Δx_t – masa kondenzovane vode na površini isparivača
x_{tLJi} – vlažnost koju isijava čovek za vreme $d\tau$
x_{tPRi} – vlažnost koju izluči/primi prtljag za vreme $d\tau$
x_{2i+1} – vlažnost vazduha u vagonu u sledećem trenutku vremena odnosno nakon isteka vremena $d\tau$
n_i – broj putnika u vagonu u i-tom trenutku vremena
$P(\tau)$ – stvarna snaga grejača
$Q(\tau)$ – količina toplote koju odaje grejač
P_{max} – nominalna snaga grejača
τ – tekuće vreme
$\varepsilon_{iz}(\tau)$ – izlazni signal iz PID regulatora
$\varepsilon(\tau)$ – ulazni signal u PID regulator
k_1 – koeficijent proporcionalnog dela PID regulatora
k_2 – koeficijent diferencijalnog dela PID regulatora
k_3 – koeficijent integralnog dela PID regulatora

Literatura

[1] **Boresen, Bent A.**: *Thermal room models for control analysis*, ASHRAE, Vol. 88, Part 2, 1981.

[2] **Boresen, Bent A.**: *HVAC control process simulation*, ASHRAE, Vol. 88, Part 2, 1981.

[3] **Thompson, J. Garth**: *The effect of room and control systems dynamics on energy consumption*, ASHRAE, Vol. 88, Part 2, 1981.

[4] **Despotović, Milan**: *Modeliranje ponašanja energetskih komponenti u klimatizacionim sistemima putničkih vagona za brze pruge,* magistarski rad, 1994.

[5] **Todorović, Branislav**: *Provera letnjeg rada klimatizacije putničkog vagona namenjenog području srednje Evrope*, jugoslovenski naučno-stručni časopis KGH, SMEITS, Beograd, godina 23, broj 1, februar 1994.