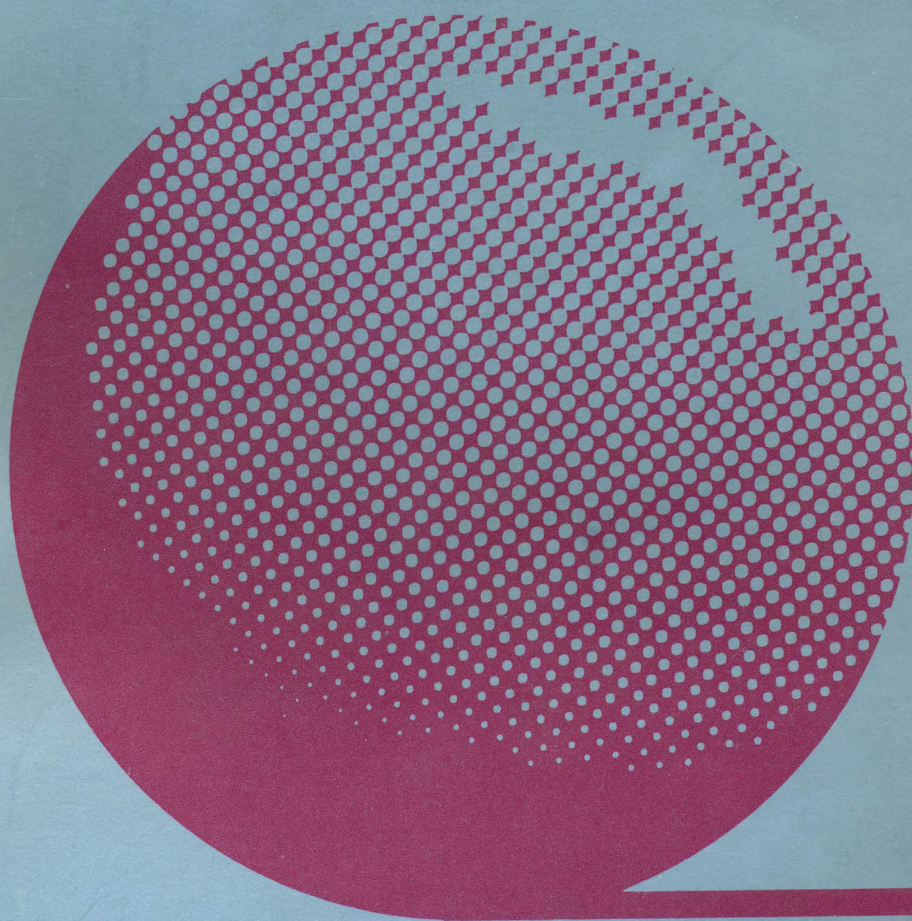


# TERMOTEHNIKA

3-4 1993

YU ISSN 0350-218 X  
UKD 621

Jugoslovensko društvo termičara  
Journal of the Yugoslavian Society of the Heat Transfer Engineers



TERMOTEHNIKA GODINA XIX BROJ 3—4 STR. 201—348 BEOGRAD 1993

**OPTIMIZACIJA ENERGETSKIH SISTEMA INDUSTRIJSKIH ZGRADA**  
**OPTIMISATION THE ENERGY SYSTEM OF INDUSTRIAL BUILDINGS**

**Nebojša Lukiš, Milorad Bojiš**  
**Mašinski fakultet, Univerzitet u Kragujevcu**

*U ovom radu modelira se nelinearni energetski sistem industrijskih zgrada sa ugradjenim rekuperatorom i većim brojem raspoloživih tokova otpadne energije. Kao rezultat metoda linearnog programiranja daje optimalne scenarije rada sa energetskim sistemom, koji daju minimum energetske potrošnje.*

*In this paper the nonlinear energy system of industrial buildings are modeled by the linear programing method. In this energy system energy is recovered from more available flows of the wasted heat. The optimal scenarios who give minimum energy costs are shown as result of the applied method.*

**1 Uvod**

*Rekuperacija energije u termički teškim zgradama, industrijskim sistemima sa znatnim iznosima otpadne energije predstavlja najčešće isplativu investiciju. U koliko u takvoj termički teškoj zgradi postoji više raspoloživih tokova otpadne energije, različitih energetskih sadržaja (protoci i temperature), postavlja se opravdano pitanje koje tokove ili delove tokova uključiti u razmenu toplote u rekuperatoru kako bi se dobila minimalna potrošnja, odnosno maksimalna ušteda energije u sistemu. Pitanje je da li se i kako vrednost optimalnog toka kroz rekuperator menja sa promenom karakteristika posmatranog energetskog sistema, kao i koji rekuperator izabrati da bi se dobio minimum potrošnje energije.*

*Odgovori na postavljena pitanja traže se rešavanjem formiranog matematičkog modela industrijske zgrade metodom linearnog programiranja.*

## 2 Linearno programiranje i termotehnika

### 2.1 Primena linearnog programiranja u energetskim sistemima

Linearno programiranje (u daljem tekstu LP) na modelima sa i bez nelinearnih članova u pregledanoj literaturi korišćeno je za optimizaciju u parokondenznim sistemima-energanama [1], elektranama [2] i metalurškim kombinatima [3].

Kao što se primećuje, LP metoda rešavanja u energetskim sistemima, se primenjuje najčešće na sistemima za produkciju toplote i snage (paro-kondenzni sistemi), kao veoma pogodna i efikasna metoda za iznalaženje njihovih optimalno dizajniranih konfiguracija ili najispativijih output-a u vidu toplote ili snage.

### 2.2 LP softver

Za realizaciju LP rešenja uzet je iz [4] jedan od standardnih softverskih LP paketa (LP dualna simpleks metoda). Kako standardni LP paketi nemaju mogućnost rešavanja Tajlorovim redom transformisanih nelinearnih modela, formiran je softver koji omogućuje rekurzivno rešavanje LP modela. Sve je to objedinjeno finalnim softverom LINE04 koji omogućuje upravljanje LP rešavanjem i prezentacijom rešenja.

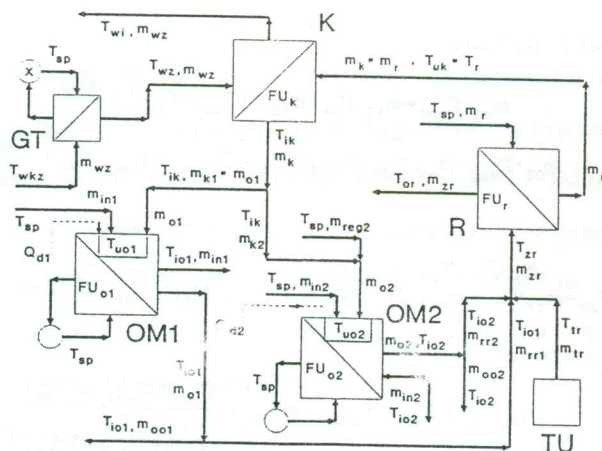
## 3. Matematički model

Usvojeni matematički model treba da sadrži sve značajne (izučavane) energetske elemente tipične industrijske zgrade (vidi [5]) koji svojom interakcijom dovode do višeznačnog uticaja odredjenih veličina na ciljnu funkciju energetskog sistema.

### 3.1 Energetska šema

Na slici 1 prikazana je energetska šema termički teške, industrijske zgrade sa sistemom rekuperacije. Elementi zgrade su predstavljeni u vidu razmenjivača toplote, prema [6].

Slika 1



Model se sastoji iz dve grupe prostorija zgrade koje zahtevaju održavanje različitih nivoa temperature (OM1 i OM2). U prostorijama se naznačeni temperaturni nivoi održavaju konstantnim. Svež vazduh se zagreva u rekuperatoru (R) i to sa jednim, dva ili tri raspoloživa toka otpadnog vazduha: tokom iz tehnoloških uređaja (TU) van zgrade i tokovima izradjenog vazduha iz zgrade. Potrebnu temperaturu za zagrevanje prostorija vazduh dostiže u kaloriferu (K) koji se greje toplom vodom. Gubici tople vode pri transportu do kalorifera koncentrisani su u razmenjivaču (GT). Sve označene veličine date su i objašnjene u nomenklaturi.

Usvojeno je da se pri promeni veličina sistema uvek zadržava odnos  $T_{tr} > T_{io1} > T_{io2}$  i  $m_{o1} > m_{o2} > m_{tr}$ .

### 3.2 Jednačine matematičkog modela industrijske zgrade sa rekuperacijom

Prema usvojenom matematičkom modelu sa slike 1, formiraju se jednačine materijalnog, energetskog i bilansa razmenjivača toplote industrijske zgrade sa procesom rekuperacije i to za materijalni bilans

$$m_{k1} - m_{o1} ; m_{o2} - m_{k2} + m_{reg2} ; m_k - m_{k1} + m_{k2} \quad (1)$$

$$m_k - m_r ; m_{o1} - m_{oo1} + m_{rr1} ; m_{o2} - m_{oo2} + m_{rr2} ; m_{zr} - m_{rr1} + m_{rr2} + m_{tr} \quad (2)$$

za energetski bilans

$$\begin{aligned} m_{o1} \cdot T_{uo1} - m_{k1} \cdot T_{ik} + m_{in1} \cdot (T_{sp} - T_{io1}) + \frac{Q_{d1}}{C_p} ; \\ m_{o2} \cdot T_{uo2} - m_{k2} \cdot T_{ik} + m_{in2} \cdot (T_{sp} - T_{io2}) + m_{reg2} \cdot T_{sp} + \frac{Q_{d2}}{C_p} , \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} m_k \cdot C_p \cdot (T_{ik} - T_{sp}) - m_{wz} \cdot C_w \cdot (T_{wz} - T_{wi}) ; T_{uk} = T_r ; \\ m_{zr} \cdot T_{zr} - m_{tr} \cdot T_{tr} + m_{xr1} \cdot T_{io1} + m_{xr2} \cdot T_{io2} ; m_{zr} \cdot (T_{zr} - T_{or}) - m_r \cdot (T_r - T_{sp}) , \end{aligned} \quad (4)$$

za bilans razmene toplote

$$\begin{aligned} m_{o1} \cdot C_p \cdot (T_{uo1} - T_{io1}) - FU_{o1} \cdot \left( \frac{T_{uo1} + T_{io1} - 2 \cdot T_{sp}}{2} \right) ; \\ m_{o2} \cdot C_p \cdot (T_{uo2} - T_{io2}) - FU_{o2} \cdot \left( \frac{T_{uo2} + T_{io2} - 2 \cdot T_{sp}}{2} \right) , \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} m_{wz} \cdot C_w \cdot (T_{wz} - T_{wi}) - FU_k \cdot \left( \frac{T_{wz} + T_{wi} - T_{uk} - T_{ik}}{2} \right) ; \\ m_r \cdot C_p \cdot (T_r - T_{sp}) - FU_r \cdot \left( \frac{T_{zr} + T_{or} - T_r - T_{sp}}{2} \right) ; \\ m_{wz} \cdot C_w \cdot (T_{wkz} - T_{wz}) - X \cdot \left( \frac{T_{wkz} + T_{wz} - 2 \cdot T_{sp}}{2} \right) . \end{aligned} \quad (6)$$

Radi uprošćenja LP modela u jednačinama (5) i (6) umesto srednje logaritamske razlike temperatura razmene toplote korišćena je srednja aritmetička razlika temperatura. Ovo uprošćenje je uvedeno radi izbegavanja veoma složenih nelinearnih članova u obliku logaritamskih razlika temperatura. Isključujući ekstremno male i velike masene protoke (koji uzrokuju značajne razlike temperatura) u razmenjivačima ovakva uprošćenja mogu biti sasvim opravdana i bez bitnijeg uticaja na tačnost rezultata. Ukoliko je odnos razlika temperatura na toplom i hladnom kraju razmenjivača toplote manji ili jednak 2, relativna greška pomenutog uprošćenja ne prelazi 4%. Realni opsezi protoka i temperatura posmatranog matematičkog modela opravdavaju usvojeno uprošćenje.

Sistem jednačina koje opisuju model sa slike 1 je neodredjen sistem, što čini osnovnu pretpostavku za izučavanje LP metodom.

S druge strane iz jednačina (1), (3) i (5), preko usvojenih konstantnih veličina, izračunavaju se veličine  $m_{o1}$ ,  $m_{o2}$ ,  $m_k$ ,  $m_{k1}$ ,  $m_{k2}$ ,  $m_{reg2}$  i  $T_{ik}$ . Ove veličine su, nakon izračunavanja konstantne veličine LP modela. Odabrana ciljna funkcija je minimalna potrošnja energije sistema sa rekuperacijom. Ona obuhvata gubitak toplotne energije na transportu i potrošnju toplotne energije kalorifera, što je ukupna potrošnja sistema sa rekuperacijom  $Q_R$  (kW). Ova ciljna funkcija je prikazana jednačinom

$$F - Q_R - m_{wz} \cdot C_w \cdot (T_{wkz} - T_{wi}) \quad (7)$$

### 3.3 Ograničenja LP modela industrijske zgrade sa rekuperacijom

LP metoda rešavanja nije u stanju da sledi u svojim rešenjima prirodu razmene toplote u zgradi, već matematičko rešenje pri kome je ciljna funkcija minimalna ili maksimalna. Samim tim formirane bilansne jednačine nisu dovoljne da bi ograničenje LP modela bilo potpuno. Potrebno je dodatnim nejednačinama (gornje i donje granice fizičkih veličina modela) u LP modelu isključiti moguća nerealna rešenja. Potrebne ograničavajuće nejednačine za model prikazan na slici 1 su :

$$\begin{aligned} T_{zr} - T_{or} &\geq 0 ; T_{wz} - T_{wi} &\geq 0 ; T_{or} - T_{sp} &\geq 0 ; \\ T_{zr} &\geq \frac{m_{o1} \cdot T_{io1} + m_{o2} \cdot T_{io2} + m_{tr} \cdot T_{tr}}{m_{o1} + m_{o2} + m_{tr}} \end{aligned} \quad (8)$$

LP model se usmerava ka realnim rešenjima, formiranim nejednačinama i LP skup ograničenja dobija konačni izgled.

#### 3.1.5 Bezdimenzijske veličine promena karakteristika energetskog modela termički teške zgrade

U poglavlju 3 će biti pokazani rezultati dobijeni ispitivanjem industrijske zgrade LP metodom.

Na prikazanim dijagramima pojaviće se bezdimenzijske veličine koje karakterišu konkretni model termički teške zgrade. Da bi se dobio bezdimenzijski oblik fizičkih veličina formirani su odnosi sa veličinama koje karakterišu fiksni model zgrade bez rekuperatora. Ove veličine su date u zagradama sa indeksom p

$$R_{fur} = \frac{FU_r}{(FU_r)_p} ; R_{mtr} = \frac{m_{tr}}{(m_{tr})_p} ; R_{ctr} = \frac{T_{ctr}}{(T_{ctr})_p} ; R_{min} = \frac{m_{zr}}{m_{tr}}, \quad (9)$$

$$R_x = \frac{x}{(x)_p} ; R_{fuk} = \frac{FU_k}{(FU_k)_p} ; R_{mwz} = \frac{m_{wz}}{(m_{wz})_p} ; R_{fu01} = \frac{FU_{01}}{(FU_{01})_p}, \quad (10)$$

$$R_{fu02} = \frac{FU_{02}}{(FU_{02})_p} ; R_{tio1} = \frac{T_{io1}}{(T_{io1})_p} ; R_{tio2} = \frac{T_{io2}}{(T_{io2})_p} ; R_{tsp} = \frac{(T_{io1})_p - T_{sp}}{(T_{io1})_p - (T_{sp})_p}, \quad (11)$$

$$ETE = \frac{Q_{BR} - Q_R}{Q_{BR}} ; R_{gr} = \frac{Q_R}{Q_{BR}}, \quad (12)$$

Veličina ETE (-) predstavlja relativnu uštedu energije sistema sa rekuperacijom u odnosu na sistem bez nje. Veličina  $Q_{BR}$  se izračunava kao i  $Q_R$  preko jednačine (7) ali sa veličinama koje su izračunate za sistem bez rekuperacije (kada se sa slike 1 ukloni rekuperator, matematički model zgrade sa usvojenim veličinama postaje odredjen).

#### 4 Rezultati

Posle uspešno sprovedene opisane procedure dobijeni su i obradjeni odgovarajući rezultati.

Usvojene vrednosti konstantnih veličina polaznog modela zgrade, prikazanih na slici 1 su :

$$C_p = 1,005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}; C_w = 4,18 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}; m_{in1} = 0,5 \text{ kg/s}; m_{in2} = 0,3 \text{ kg/s};$$

$$Q_{d1} = 5 \text{ kW}; Q_{d2} = 3 \text{ kW}; FU_{01} = 10 \text{ kW/K}; FU_{02} = 6 \text{ kW/K}; FU_k = 20 \text{ kW/K};$$

$$FU_r = 25 \text{ kW/K}; m_{wz} = 15 \text{ kg/s}; m_{tr} = 10 \text{ kg/s}; x = 0,155 \text{ kW/K}; T_{sp} = 277 \text{ K};$$

$T_{uo1}=298$  K;  $T_{io1}=295$  K;  $T_{uo2}=293$  K;  $T_{io2}=290$  K;  $T_{tr}=310$  K.

Rešenja matematičkog modela industrijske zgrade dobijena su za niz usvojenih veličina koje su date na slikama 2 i 3.

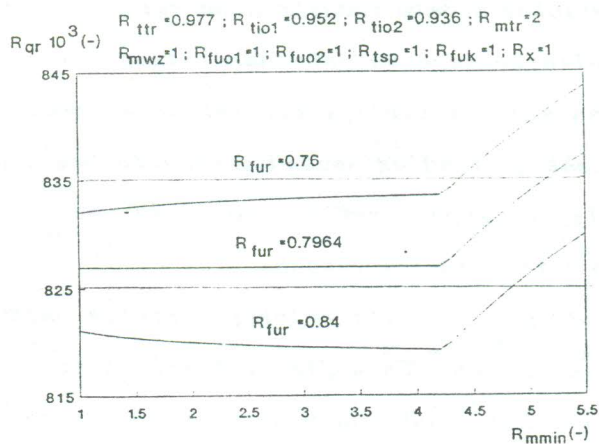
Kako se vidi sa slike 1 topliji tok rekuperatora može se sastojati od tehnološkog otpadnog vazduha, tehnološkog otpadnog vazduha plus deo ili celokupni protok vazduha iz omotača 1 industrijske zgrade i tehnološkog vazduha plus vazduh iz omotača 1 industrijske zgrade plus deo ili celokupni protok vazduha iz omotača 2 industrijske zgrade. Sa kojim protokom će se ići u rekuperator diktira ciljna funkcija-minimum potrošnje energije sistema. Bezdimenzijske veličine  $R_{min}$  i  $SL$  (predstavlja tri najčešća slučaja optimalnog protoka toplijeg fluida kroz rekuperator pri bilo kojim vrednostima veličina sistema) objašnjene su u tabeli 1.

Tabela 1 Sastav protoka toplijeg fluida kroz rekuperator

Vrednost $R_{min}$ (-) (za $R_{mtr}=2$ ) Vrednost $SL$ (-)	Sastav toplijeg toka vazduha kroz rekuperator
$R_{min}=1$ ; $SL=1$	Protok otpadnog tehnološkog vazduha
$1 < R_{min} < 4,2$	Protok otpadnog tehnološkog vazduha plus deo protoka vazduha iz omotača 1
$R_{min}=4,2$ ; $SL=2$	Protok otpadnog tehnološkog vazduha plus protok vazduha iz omotača 1
$4,2 < R_{min} < 5,6$	Protok otpadnog tehnološkog vazduha plus protok vazduha iz omotača 1 plus deo protoka vazduha iz omotača 2
$R_{min}=5,6$ ; $SL=3$	Protok otpadnog tehnološkog vazduha plus protok vazduha iz omotača 1 plus protok vazduha iz omotača 2

Na sici 2 prikazana je promena potrošne energije industrijske zgrade ( $R_{qr}$ ) u zavisnosti od protoka kroz rekuperator ( $R_{min}$ ), za tri različite vrednosti totalne prolaznosti rekuperatora ( $R_{fur}$ ).



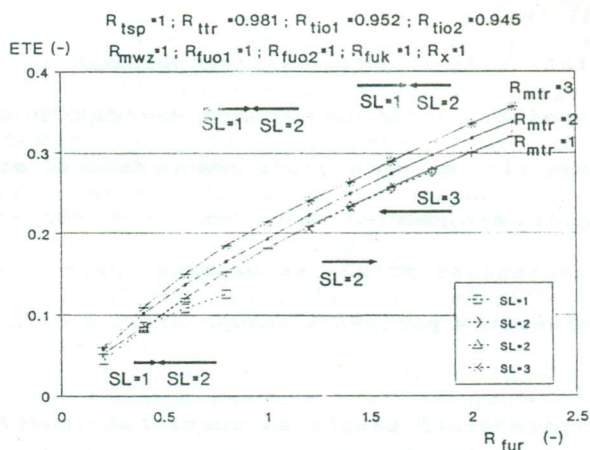


Slika 2

Primećuje se da je za određenu vrednost totalne prolaznosti rekuperatora ( $R_{fur} = 0.7964$ ) potrošnja energije sistema ista bez obzira što se protok toplijeg fluida kroz rekuperator povećava do  $R_{min} = 4,2$ . Sa uključivanjem u taj protok izradjenog vazduha iz omotača 2 potrošnja energije sistema raste.

Za veće ili manje vrednosti totalne prolaznosti rekuperatora minimum potrošnje energije sistema je jasno definisan u tački  $R_{min} = 4,2$  ili  $R_{min} = 1$ . Pri promeni uticajnih veličina sistema na potrošnju energije (u ovom slučaju  $R_{fur}$ ) LP model prati minimum potrošnje energije tako što sa jednog raspoloživog protoka kroz rekuperator prelazi na drugi. Drugim rečima za jedno stanje sistema samo jedna varijanta protoka toplog otpadnog vazduha kroz rekuperator daje minimum potrošnje energije, a za drugo stanje druga varijanta. Na prelazu između ova dva stanja sistema pojavljuje se stanje kada i jedna i druga varijanta protoka kroz rekuperator daje istu potrošnju energije sistema. Ova tačka se formira u preseku krivih potrošnje energije sistema za pomenuta dva protoka toplog otpadnog vazduha kroz rekuperator. Konkretno za  $R_{fur} = 0,7964$  nastaje ta prelazna tačka režima rada rekuperatora ili tačka diskontinuiteta.

LP model formira obvojnica dve ili više krivih koje daju minimum potrošnje energije sistema, pa se ova tačka pojavljuje kao primetan diskontinuitet obvojnice-krive minimuma potrošnje energije sistema. Primer za ovu tvrdnju je dat na slici 3.



Slika 3

Na slici 3 je prikazana ušteta energije industrijske zgrade ETE u zavisnosti od promene totalne prolaznosti rekuperatora ( $R_{fur}$ ) za tri različite vrednosti raspoloživog protoka otpadnog tehnološkog vazduha ( $R_{ttr}$ ). Na slici su označene tačke diskontinuiteta za sve tri krive. Kada protok otpadnog tehnološkog vazduha raste (tok sa najvišom temperaturaom) tačke prelaznog režima se postižu za više vrednosti totalne prolaznosti rekuperatora. Kriva maksimalne uštete energije sistema dobijena LP metodom je obvojnica krivih uštete energije fiksnih protoka kroz rekuperator. Ove krive, u slučaju kada ne daju maksimum uštete energije sistema obeležene su isprekidanim linijama.

### 5 Zaključak

Prednosti izučavanja problema LP metodom su u mogućnosti dobijanja veličina sistema prema odabranoj ciljnoj funkciji (na primer minimumu potrošnje energije ili novca).

Broj promenljivih veličina u odnosu na broj jednačina koje opisuju model pri tome je nebitan.

U pregledanoj literaturi nije pronadjen primer gde se model termički teške zgrade tretira LP metodom, što daje dodatnu težinu ovom radu.

Rezultati rada izmedju ostalog pokazuju da se sistemom razvoda raspoloživih tokova otpadne energije u termički teškoj zgradi, prema ili van ugradjenog rekuperatora, može ostvarivati stalni (mogući) minimum potrošnje energije. Korišćenjem LP metode može se reagovati na primer na promenu temperature okoline i izmeniti struktura protoka u rekuperatoru u cilju željene uštede energije.

Opseg primene LP metode na energetske modele nije jasno definisan. Što je model složeniji, LP metoda zahteva veća uprošćenja koja sugurno utiču na tačnost rezultata. Osnovni problem primene LP metode na nelinearne modele je u mogućnosti ili nemogućnosti konvergencije modela ka željenom rešenju.

Analizom izučavanog problema i traženih rezultata može se proceniti opravdanost primene LP metode.

#### Nomenklatura

- $C_P$  - Specifična toplota pri konstantnom pritisku vazduha (kJ/kg·K),
- $C_w$  - Specifična toplota vode (kJ/kg·K),
- $E_{TE}$  - Relativna ušteda energije sistema sa rekuperacijom u odnosu na sistem bez rekuperacije (-),
- $FU_k$  - Totalna prolaznost kalorifera (Totalna prolaznost predstavlja proizvod površine i toplotne prolaznosti objekta F·U. Ona predstavlja razmenjenu količinu toplote u jedinici vremena po Kelvinu temperaturske razlike medija koji razmenjuju toplotu.) (kW/K),
- $FU_{o1}$  - Totalna prolaznost omotača 1 (Omotać zgrade predstavlja zbir svih materijala koji dele unutrašnost zgrade od okoline. Kako su ti materijali različiti za totalnu prolaznost omotača se uzima zbir totalnih prolaznosti pojedinačnih materijala.) (kW/K),
- $FU_{o2}$  - Totalna prolaznost omotača 2 (kW/K),
- $FU_r$  - Totalna prolaznost rekuperatora (kW/K),

- GT - Gubici toplote pri transportu tople vode za potrebe kalorifera,
- K - Kalorifer namenjen za grejanje vazduha u zgradi,
- $m_{in1}$  - Maseni protok infiltriranog vazduha u omotač 1 (kg/s),
- $m_{in2}$  - Maseni protok infiltriranog vazduha u omotač 2 (kg/s),
- $m_k$  - Maseni protok vazduha kroz kalorifer (kg/s),
- $m_{k1}$  - Maseni protok vazduha iz kalorifera prema omotaču 1 (kg/s),
- $m_{k2}$  - Maseni protok vazduha iz kalorifera prema omotaču 2 (kg/s),
- $m_{oo1}$  - Maseni protok vazduha iz omotača 1 ka okolini (kg/s),
- $m_{oo2}$  - Maseni protok vazduha iz omotača 2 ka okolini (kg/s),
- $m_{o1}$  - Maseni protok vazduha kroz omotač 1 (kg/s),
- $m_{o2}$  - Maseni protok svežeg vazduha kroz omotač 2 (kg/s),
- $m_r$  - Maseni protok vazduha kroz rekuperator (kg/s),
- $m_{reg2}$  - Maseni protok spoljnog vazduha prema omotaču 2 (Kako je usvojeno da je uvek temperatura u omotaču 1 zgrade veća od temperature u omotaču 2, zagrejani vazduh iz kalorifera prilagođen potrebama omotača 1 se hladi-reguliše protokom  $m_{reg2}$  za potrebe omotača 2.)(kg/s),
- $m_{rr1}$  - Maseni protok vazduha iz omotača 1 ka rekuperatoru (kg/s),
- $m_{rr2}$  - Maseni protok vazduha iz omotača 2 ka rekuperatoru (kg/s),
- $m_{tr}$  - Maseni protok otpadnog tehnološkog vazduha prema rekuperatoru (kg/s),
- $m_{wz}$  - Maseni protok tople vode kroz kalorifer (kg/s),
- $m_{zr}$  - Maseni protok otpadnog vazduha kroz rekuperator (kg/s),
- OM1 - Omotač zgrade 1 sa jednom ambijentalnom temperaturom,
- OM2 - Omotač zgrade 2 drugom ambijentalnom temperaturom,
- $Q_{BR}$  - Potrošnja energije sistema bez rekuperacije (kW),
- $Q_{d1}$  - Toplotni dobici unutar omotača 1 (kW),
- $Q_{d2}$  - Toplotni dobici unutar omotača 2 (kW),
- $Q_R$  - Potrošnja energije sistema sa rekuperacijom (kW),
- R - Rekuperator za iskorišćavanje toplote otpadnog vazduha,
- $R_{fuk}$  - Bezdimenzijska totalna prolaznost kalorifera (-),
- $R_{fuo1}$  - Bezdimenzijska totalna prolaznost omotača 1 (-),
- $R_{fuo2}$  - Bezdimenzijska totalna prolaznost omotača 2 (-),
- $R_{fur}$  - Bezdimenzijska totalna prolaznost rekuperatora (-),
- $R_{mmin}$  - Bezdimenzijski maseni protok toplijeg vazduha kroz rekuperator (-),
- $R_{mtr}$  - Bezdimenzijski maseni protok otpadnog tehnološkog vazduha (-),
- $R_{mwz}$  - Bezdimenzijski maseni protok tople vode kroz kalorifer (-),
- $R_{qr}$  - Relativna potrošnja energije sistema sa rekuperacijom (-),
- $R_{tio1}$  - Bezdimenzijska temperatura vazduha iz omotača 1 (-),
- $R_{tio2}$  - Bezdimenzijska temperatura vazduha iz omotača 2 (-),
- $R_{tsp}$  - Bezdimenzijska razlika spoljne i temperature u omotaču 1 (-),
- $R_{ttr}$  - Bezdimenzijska temperatura otpadnog tehnološkog vazduha (-),
- $R_x$  - Bezdimenzijski gubici na transport tople vode (-),
- SL - Oznaka sadržaja optimalnog protoka toplijeg vazduha kroz rekuperator (-),
- $T_{ik}$  - Izlazna temperatura svežeg vazduha iz kalorifera (K),
- $T_{io1}$  - Temperatura vazduha koji izlazi iz omotača 1 (K),
- $T_{io2}$  - Temperatura vazduha koji izlazi iz omotača 2 (K),
- $T_{or}$  - Izlazna temperatura otpadnog vazduha iz rekuperatora (K),
- $T_r$  - Izlazna temperatura svežeg vazduha iz rekuperatora (K),
- $T_{sp}$  - Konstantna temperatura okoline (K),
- $T_{tr}$  - Temperatura otpadnog tehnološkog vazduha (K),

- $T_{uk}$  - Temperatura vazduha na ulazu u kalorifer (K),  
 $T_{uo1}$  - Temperatura svežeg vazduha koji ulazi u omotač 1 (K),  
 $T_{uo2}$  - Temperatura svežeg vazduha koji ulazi u omotač 2 (K),  
 $T_{wi}$  - Temperatura tople vode na izlazu iz kalorifera (K),  
 $T_{w kz}$  - Temperatura tople vode pre gubitaka u transportu (K),  
 $T_{wz}$  - Temperatura tople vode na ulazu u kalorifer (K),  
 $T_{wz}^{ZF}$  - Ulazna temperatura otpadnog vazduha u rekuperator (K),  
 $TU^{ZF}$  - Tehnološki uređaj koji generiše topli, otpadni vazduh,  
 $x$  - Gubici toplote pri transportu tople vode u cevovodu (kW/K).

#### Literatura

- [1] Clark, J.K., Helmick, N.E., How to Optimize the Design of Steam Systems, Process Energy Conservation, from Greene, R., Mc Graw Hill, New York, 1982.
- [2] Gustafsson, S.I., Karlsson, B.G., Linear Programming Optimization in CHP Networks, Heat Recovery Systems & CHP, Vol. 11, No. 4, 1991.
- [3] Ziebig, A., Primena Bilansnih Matematičkih Modela Racionalnog Rada sa Energijom u Industriji Radi Upravljanja Pomoću Mikrokomputera, Toplota u industriji, Br. 3, Mašinski fakultet u Kragujevcu, 1988.
- [4] Banks, J., Spoerer, J.P., Collins, R.L., IBM PC Applications for the Industrial Engineer and Manager, Reston Book, Published by Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986.
- [5] Spielvogel, L., Building Envelope, Energy Management Handbook, from Turner, W., John Wiley and Sons, 1982.
- [6] Bojić, M., Mathematical Model of Heat Recovery in a Space-Heating and Ventilation System, Energy, Vol. 18, No. 1, 1993.