

Milan Vasić, dipl. inž.,
 dr Milorad Bojić,
 dipl. inž., mr Nebojša
 Lukić, dipl. inž.,
 Mašinski fakultet,
 Sestara Janjić 6,
 34000 Kragujevac

Rekuperacija energije u termički teškim zgradama, industrijskim sistemima sa znatnim količinama otpadne energije, predstavlja najčešće isplativu investiciju. Ukoliko u takvoj termički teškoj zgradi postoji više raspoloživih tokova otpadne energije, različitih energetske sadržaja (protoci i temperatura), postavlja se opravdano pitanje koje tokove ili delove tokova uključiti u razmenu toplote u rekuperatoru, kako bi se dobila minimalna potrošnja odnosno maksimalno uštedela energija u sistemu. Odgovori na postavljena pitanja se dobijaju rešavanjem matematičkog modela industrijske zgrade metodom linearnog programiranja.

Optimizacija uštede energije u industrijskim energetskim sistemima primenom linearnog programiranja

1. Uvod

Rekuperacija energije u termički teškim zgradama, industrijskim sistemima sa znatnim količinama otpadne energije, predstavlja najčešće isplativu investiciju. Ukoliko u takvoj termički teškoj zgradi postoji više raspoloživih tokova otpadne energije, različitih energetske sadržaja (protoci i temperatura), postavlja se opravdano pitanje koje tokove ili delove tokova uključiti u razmenu toplote u rekuperatoru da bi se dobila minimalna potrošnja, odnosno maksimalno uštedela energija 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 i kalorifer izabrati da bi se dobio minimum potrošnje energije i troškova.

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

2. Energetika i linearno programiranje

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

LP metoda rešavanja u energetskim sistemima, se primenjuje najčešće na sistemima za produkciju toplote i snage (parokondenzni sistemi), kao veoma pogodna i efikasna metoda za iznalaženje njihovih optimalno dizajniranih konfiguracija, ili najisplativijih autputa u vidu toplote ili snage.

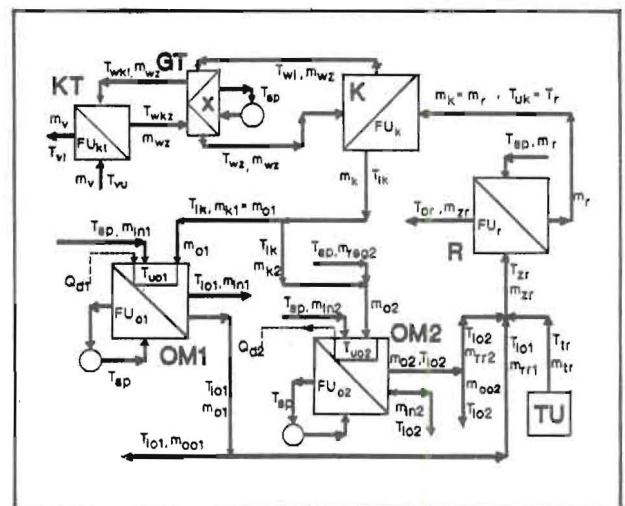
Za realizaciju rešenja LP uzet je iz [4] jedan od standardnih softverskih paketa LP (dualna simpleks metoda LP). Kako standardni paketi LP nemaju mogućnost rešavanja Tajlorovim redom transformisanih nelinearnih modela, što energetski modeli redovno jesu, formiran je softver koji omogućuje rešavanje nelinearnog modela LP. Sve je to objedinjeno finalnim softve-

rom LINEO 4 realizovanim u [5], 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 [6]), koji svojom interakcijom dovode do višeznačnog uticaja određenih veličina na ciljnu funkciju energetskog sistema.

Na slici 1 prikazana je energetska šema termički teške, industrijske zgrade sa sistemom rekuperacije. Elementi zgrade su predstavljeni u vidu razmenjivača toplote, prema [7].



Slika 1. Energetska šema industrijske zgrade sa rekuperacijom

Model se sastoji iz dve grupe prostorija zgrade koje zahtevaju održavanje različitih nivoa temperature (OM1 i OM2). U pros-

torijama se naznačeni temperaturski nivoi održavaju konstantnim. Sveži vazduh se zagreva u rekuperatoru (R) i to sa jednim, dva ili tri raspoloživa toka otpadnog vazduha: tokom iz tehnoloških uređaja (TU – kompresorska stanica, topli preserski alati i dr.) van zgrade i tokovima izgrađenog vazduha iz zgrade. Potrebnu temperaturu za zagrevanje prostorija vazduh dostiže u kaloriferu (K), koji se greje toplom vodom koju daje kotao (KT). Gubici tople vode pri transportu od i do kalorifera koncentrisani su u razmenjivačima (GT). Sve označene veličine date su i objašnjene u nomenklaturi.

Usvojeno je da se pri promeni veličina sistema uvek zadržava odnos $T_{tr} > T_{i01} > T_{i02}$ i $m_{01} > m_{02} > m_{tr}$.

Prema usvojenom matematičkom modelu na slici 1, formiraju se jednačine materijalnog i energetskog bilansa industrijske zgrade, kao i potrebne nejednačine – ograničenja modela LP.

U usvojenom modelu LP, umesto srednje logaritamske razlike temperatura razmene toplote, korišćena je srednja aritmetička razlika temperatura. 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 koji opisuje model na slici 1 usvaja se kao neodređeni sistem, što čini osnovnu pretpostavku za izučavanje metodom LP. Odabrana ciljna funkcija je minimalna potrošnja energije tople vode sistema sa rekuperacijom. Ona obuhvata gubitak toplotne energije u transportu i potrošnju toplotne energije kaloriferom i označena je kao Q_R (kW). Izražena je jednačinom (1):

$$F = Q_R = m_{wz} \cdot C_w \cdot (T_{wkz} - T_{wki}) \quad (1)$$

U poglavlju 4 će biti pokazani rezultati dobijeni ispitivanjem industrijske zgrade metodom LP. Na prikazanim dijagramima pojavice 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 polazni model zgrade bez rekuperatora. Ove veličine su date u zgradama sa indeksom p.

$$R_{fur} = \frac{FU_r}{(FU_r)_p}; \quad R_{mtr} = \frac{m_{tr}}{(m_{tr})_p}$$

$$R_{trr} = \frac{T_{tr}}{(T_{tr})_p}; \quad R_{fuk} = \frac{FU_k}{(FU_k)_p} \quad (2)$$

$$R_{isp} = \frac{T_{sp}}{(T_{sp})_p}; \quad R_{i01} = \frac{T_{i01}}{(T_{i01})_p}; \quad R_{dc} = \frac{(T_{i01} - T_{i02})}{(T_{i01} - T_{i02})_p} \quad (3)$$

$$ete = \frac{Q_{br} - Q_R}{Q_{BR}}; \quad efk = \frac{1}{1 + \frac{T_{vi} - T_{sp}}{T_{vu} - T_{vi}}} \quad (4)$$

$$Tu = C_E \cdot m_{wz} \cdot C_w \cdot (T_{wkz} - T_{wki}) + CVR \cdot FU_r + CVK \cdot FU_k \quad (5)$$

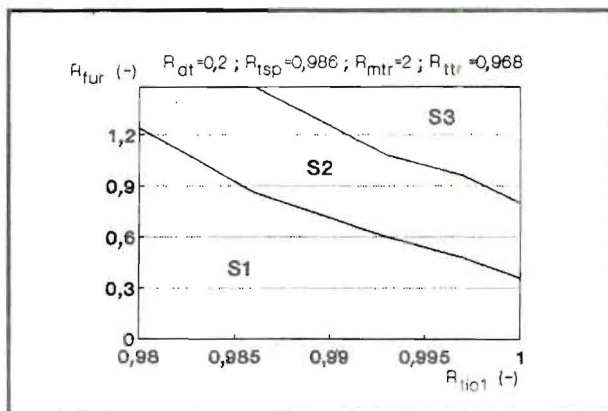
Veličina ete predstavlja relativnu uštedu energije sistema sa rekuperacijom u odnosu na sistem bez nje. Veličina Q_{BR} se izračunava kao i Q_R , ali sa veličinama koje su izračunate za sistem bez rekuperacije (kada se na slici 1 ukloni rekuperator, matematički model zgrade sa usvojenim veličinama postaje određen). Veličina Tu iz jednačine (5) predstavlja trošak živog ciklusa rekuperatora i kalorifera sveden na jedan čas amortizacionog perioda rekuperatora i kalorifera od 20 godina.

4. Rezultati

Posle uspešno sprovedene opisane procedure, dobijeni su i obradeni odgovarajući rezultati.

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

$C_p = 1,005$ kJ/kgK; $C_w = 4,18$ kJ/kgK; $m_{in1} = 0,5$ kg/s; $m_{in2} = 0,3$ kg/s; $Q_{d1} = 5$ kW; $Q_{d2} = 3$ kW; $FU_{01} = 10$ kW/K; $FU_{02} = 6$ kW/K; $FU_k = 20$ kW/K; $FU_r = 25$ kW/K; $FU_{kt} = 30$ kW/K; $m_{wz} = 15$ kg/s; $m_{tr} = 10$ kg/s; $m_{kt} = 20$ kg/s; $x = 0,155$ kW/K; $T_{sp} = 277$ K; $T_{u01} = 298$ K; $T_{i01} = 295$ K; $T_{u02} = 293$ K; $T_{i02} = 290$ K; $T_{tr} = 310$ K; $T_{u01} - T_{i01} = 3$ K; $T_{u02} - T_{i02} = 3$ K.



Slika 2. Zone optimalnih režima rada rekuperatora

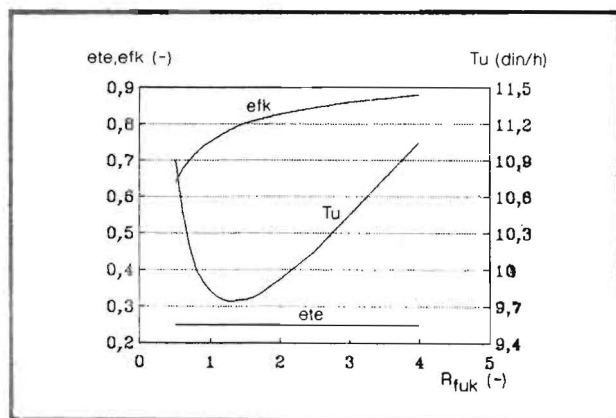
Kako se vidi na slici 1, topliji tok rekuperatora može se sastojati od tehnološkog otpadnog vazduha, tehnološkog otpadnog vazduha plus deo ili celokupni protok vazduha iz omotača 1 industrijske zgrade i tehnološkog vazduha plus deo ili celokupni protok vazduha iz omotača 2 industrijske zgrade. Sa kojim protokom će ići u rekuperator, diktira ciljna funkcija – minimum potrošnje energije sistema. Bezdimenzijska veličina S, koja opisuje tri najčešća slučaja optimalnog protoka toplijeg fluida kroz rekuperator, objašnjena je u tabeli 1.

Tabela 1. Sastav protoka toplijeg fluida kroz rekuperator

| Vrednost S (-) | Sastav toplijeg toka vazduha kroz rekuperator |
|----------------|---|
| S = 1 | Protok otpadnog tehnološkog vazduha |
| S = 2 | Protok otpadnog tehnološkog vazduha plus protok vazduha iz omotača 1 |
| S = 3 | Protok otpadnog tehnološkog vazduha plus protok vazduha iz omotača 1 plus protok vazduha iz omotača 2 |

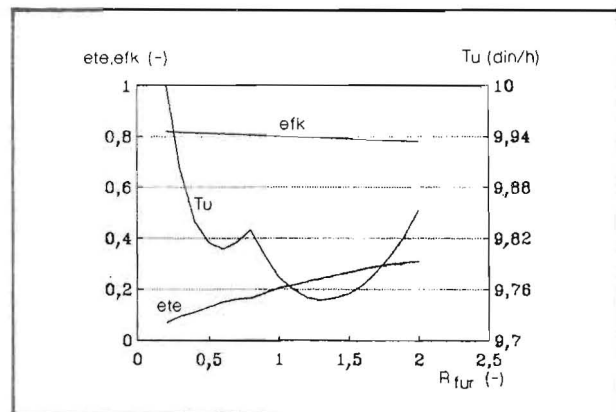
Na slici 2 prikazana su područja optimalnih režima rekuperatora (minimalna potrošnja energije), u zavisnosti od totalne prolaznosti rekuperatora FU_r i izlazne temperature vazduha iz toplijih prostorija T_{i01} . Za rekuperaciju su interesantniji i tokovi niže temperature, ukoliko temperatura toplijih prostorija i totalna prolaznost rekuperatora raste. Ovakvi dijagrami optimalnih oblasti mogu se, uz pomoć LP modela formirati i za druge uticajne veličine (T_{sp} , m_{tr} , T_{tr} ...).

Na slici 3 je prikazana zavisnost ukupnog troška živog ciklusa rekuperatora i kalorifera Tu, efikasnosti kotla efk i relativne uštede energije ete od totalne prolaznosti kalorifera. Minimum jasno definiše najisplativije karakteristike kalorifera. Realitativna ušteda energije je konstantna, jer je kalorifer sastavni element sistema i sa rekuperatorom i bez njega. Efikasnost kotla raste, jer "jači" kalorifer radi sa nižim temperaturama zagrevanja vode.



Slika 3. Neke veličine sistema u zavisnosti od totalne prolaznosti kalorifera

Na slici 4 je prikazana zavisnost Tu , efk i ete od totalne prolaznosti rekuperatora FU_r . Kako promena FU_r pri određenom stanju sistema izaziva promenu optimalnog toka u rekuperatoru (sa jedne krive potrošnje energije prelazi se na drugu), na mestu te promene javlja se diskontinuitet krive, prelazna tačka, što se jasno vidi na krivama za Tu i ete . Za troškove živog ciklusa imamo dva minimuma jer se radi o dva različita (optimalna) režima potrošnje energije. U prelaznoj tački režima sa S1 na S2 javlja se lokalni maksimum.



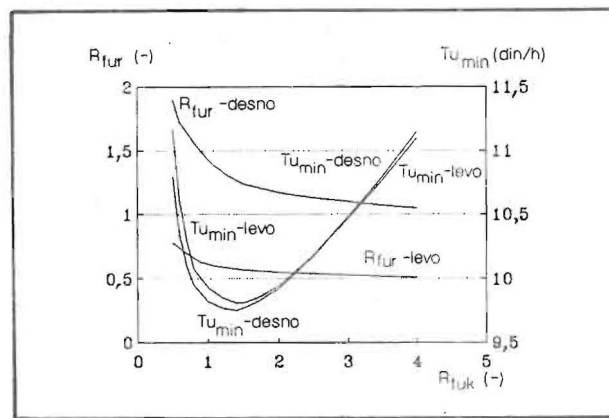
Slika 4. Neke veličine sistema u zavisnosti od totalne prolaznosti rekuperatora

Na krivoj $Tu-R_{fur}$ se ne javljaju dva minimuma već jedan, ukoliko su cena rekuperatora ili cena energije uticajnije od ove druge. Kako promena karakteristika kalorifera ne utiče značajnije na promenu optimalnog režima rekuperatora, na slici 3 postoji samo jedan minimum Tu .

Na slici 5 prikazani su levi i desni minimum Tu (Tu_{min} - levo i desno), kao i pripadajuća vrednost FU_r na slici 4 pri promeni totalne prolaznosti kalorifera. Sa porastom R_{fuk} levi minimum Tu , koji odgovara nižim vrednostima totalne prolaznosti rekuperatora, postaje niži od desnog minimuma Tu , dakle značajniji.

5. Zaključak

Prednosti izučavanja problema metodom LP 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.



Slika 5. Minimalni troškovi živog ciklusa rekuperatora i kalorifera u zavisnosti od totalne prolaznosti kalorifera

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

Rezultati rada između ostalog pokazuju da se sistemom razvođa raspoloživih tokova otpadne energije u termički teškoj zgradi, prema ugrađenom rekuperatoru ili van njega, može ostvarivati stalni (mogući) minimum potrošnje energije.

Opseg primene metode LP na energetske modele nije jasno definisan. Osnovni problem primene metode LP na nelinearne modele je u mogućnosti ili nemogućnosti konvergencije modela ka željenom rešenju.

Analizom izučavanog problema i traženih rezultata može se proceniti opravdanost primene metode LP u analizi starih i projektovanju novih energetskih postrojenja.

Nomenklatura

- C_E – cena energije (din/kWh),
- C_p – specifična toplota pri konstantnom pritisku vazduha (kJ/kgK),
- C_w – specifična toplota vode (kJ/kgK),
- CVK – troškovi kalorifera (materijal, održavanje...) po jedinici totalne prolaznosti, svedeni na časovnu potrošnju (dinK/kWh),
- CVR – troškovi rekuperatora (dinK/kWh),
- efk – 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 FU . Ona predstavlja razmenjenu količinu toplote u jedinici vremena po Kelvinu temperaturske razlike medija koji razmenjuju toplotu) (kW/K),
- FU_{kt} – totalna prolaznost kotla (kW/K),
- FU_{01} – totalna prolaznost omotača 1 (omotač zgrade predstavlja zbir svih materijala koji dele unutrašnjost zgrade od okoline) (kW/K),
- FU_{02} – totalna prolaznost omotača 2 (kW/K),
- FU_r – totalna prolaznost rekuperatora (kW/K),
- GT – gubici toplote pri transportu tople vode,
- K – kalorifer namenjen za grejanje vazduha u zgradi,
- KT – kotao namenjen za grejanje vode za potrebe kalorifera,
- 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_{001} – maseni protok vazduha iz omotača 1 ka okolini (kg/s),

m_{002} – maseni protok vazduha iz omotača 2 ka okolini (kg/s),
 m_{01} – maseni protok vazduha kroz omotač 1 (kg/s),
 m_{02} – 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 1 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_{zc} – maseni protok otpadnog vazduha kroz rekuperator (kg/s),
 m_v – maseni protok vazduha (produkata sagorevanja) kroz kotao)
 OM1 – omotač zgrade 1 sa jednom ambijentalnom temperaturom,
 OM2 – omotač zgrade 2 sa 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_{dt} – bezdimenzijska razlika izlaznih temperatura iz omotača 1 i 2 (–),
 R_{fuk} – bezdimenzijska totalna prolaznost kalorifera (–),
 R_{fur} – bezdimenzijska totalna prolaznost rekuperatora (–),
 R_{mtc} – bezdimenzijski maseni protok otpadnog tehnološkog vazduha (–),
 R_{i01} – bezdimenzijska temperatura vazduha iz omotača 1 (–),
 R_{isp} – bezdimenzijska temperatura okoline (–),
 R_{itr} – bezdimenzijska temperatura otpadnog tehnološkog vazduha (–),
 S – oznaka sadržaja optimalnog protoka toplijeg vazduha kroz rekuperator (–),
 T_{ik} – izlazna temperatura svežeg vazduha iz kalorifera (K),
 T_{i01} – temperatura vazduha koji izlazi iz omotača 1 (K),
 T_{i02} – temperatura vazduha koji izlazi iz omotača 2 (K),
 T_{0r} – izlazna temperatura otpadnog vazduha iz rekuperator

tora (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_{u01} – temperatura svežeg vazduha koji ulazi u omotač 1 (K),
 T_{u02} – temperatura svežeg vazduha koji ulazi u omotač 2 (K),
 T_{vi} – temperatura vazduha na izlazu iz kotla (K),
 T_{vu} – temperatura vazduha na ulazu u kotao (razmenjivač toplote) (K),
 T_{wi} – temperatura tople vode na izlazu iz kalorifera (K),
 T_{wki} – temperatura tople vode na izlazu iz kotla (K),
 T_{wku} – temperatura tople vode na ulazu u kotao (K),
 T_{wz} – temperatura tople vode na ulazu u kalorifer (K),
 T_{zr} – ulazna temperatura otpadnog vazduha u rekuperator (K),
 TU – ukupni troškovi živog ciklusa kalorifera i rekuperatora svedeni na časovnu potrošnju (din/h),
 T_u – minimalni ukupni troškovi živog ciklusa (din/h),
 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 Greener, R., Mc Graw Hill, New York, 1982.
- [2] Gustafsson, S. I., Karlsson, B. G.: *Linear Programming Optimization in CHP Networks*, Heat Recovery Systems & CHP, 1991, Vol. 11, No. 4.
- [3] Ziebig, A.: *Primenam bilansnih matematičkih modela racionalnog rada sa energijom u industriji radi upravljanja pomoću mikrokompjuteru*, 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, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986.
- [5] Lukić, N.: *Nelinearno ponašanje industrijskih energetskih sistema sa aspekta racionalnog rada sa energijom*, magistrska teza, Mašinski fakultet u Kragujevcu, 1992.
- [6] Spielvogel, L.: *Building Envelope*, Energy Management Handbook, from Turner, W., John Wiley and Sons, 1982.
- [7] Bojić, M.: *Mathematical Model of Heat Recovery in a Space Heating and Ventilation System*, Energy, 1993, Vol. 18, No. 1.

kgH

ПРЕДУЗЕЋЕ ЗА КОНСАЛТИНГ, ПРОЈЕКТОВАЊЕ И ИНЖЕЊЕРИНГ, Д.Д.

**МАШИНОПРОЈЕКТ
ДИЗОНРИНГ**

БЕОГРАД, ДОБРИЊСКА 8а, 011/ 646 655; телефакс 643 995; телекс 11169 YUMING