

# DIMENZIONISANJE GREJNIH IZVORA U ZGRADAMA SA PROMENLJIVIM BORAVKOM LJUDI PRIMENOM DINAMIČKOG MATRIČNOG MODELA

SIZING THE HEAT SOURCE IN VARIABLE OCCUPIED BUILDINGS  
BY USING THE DYNAMIC MATRIX METHOD

CHRISTIAN GHIAUS,  
CETHIL, UMR 5008 Université de Lyon – INSA Lyon – CNRS,  
Villeurbanne, France,  
ION HAZYUK,  
CETHIL, UMR 5008 Université de Lyon – INSA Lyon – CNRS,  
Villeurbanne, France, i  
Technical University of Cluj-Napoca,  
Cluj-Napoca, Romania

*U cilju dimenzionisanja opreme za grejanje u zgradama, određeno je grejno opterećenje u stacionarnom stanju, a zatim je pomnoženo empirijski dobijenim koeficijentom. Međutim, zgrada je u termodinamičkoj neravnoteži usled promene opterećenja i zadate temperature u prostorijama. Cilj ovog rada je da se odredi potrebna toplotna snaga u dinamičkom režimu simulacijom algoritma upravljanja bez ograničenja, i da se dimenzioniše izvor pri maksimalnoj vrednosti potrebne grejne snage.*

*Algoritam upravljanja koristi "feed-forward" za kompenzaciju vremenskih uslova i prediktivno upravljanje "Model Predictive Control" za kompenzaciju slobodnih dobitaka i praćenje zadate temperature u prostoriji. Ovaj metod se može koristiti u fazi projektovanja zgrade, pod pretpostavkom da su u svakom trenutku poznati vremenski uslovi i raspored boravka ljudi u zgradi. Veličina grejnog izvora zavisi od "set-back" vremena temperaturu u prostoriji (vremena kada se može dozvoliti temperatura niža od zadate): što je kraće*

*In order to size heating equipments for buildings, the heating load is estimated in steady state and then it is multiplied by an empirical coefficient. However, the building is in thermodynamic non-equilibrium due to changing load and indoor temperature set-point. The idea of this paper is to evaluate the needed heat power in dynamical regime by simulating a control algorithm without constraints and to size the source at the maximal value of the required heating power. The control algorithm uses feed-forward to compensate the weather conditions and Model Predictive Control to compensate free gains and follow the indoor temperature set-point. The method can be used in the design stage of the building supposing that weather conditions and occupational program are known for every moment. The size of the heating source depends on the set-back time of the indoor temperature: smaller the set-back*

*set-back vreme, to je veći grejni izvor, ali manja potrošnja energije.*

*time, larger the heating source, but lesser energy consumption.*

**Ključne reči:** *grejni izvor; dinamički matrični; metod; algoritam upravljanja; temperatura u prostoriji*

**Key words:** *heat source; dynamic matrix method; control algorithm; indoor temperature*

## 1. Uvod

Regulacija temperature se tretira kao ključni faktor za uštedu energije u zgradama (Chen, 2009). Za projektovanje algoritma upravljanja potreban je model zgrade i sistema KGH (tj. proces) i specifikacija raspoložive energije (tj. maksimalna ulazna vrednost). U ovom trenutku, u izradi upravljačkih algoritama, i “proces” i maksimalna raspoloživa energija smatraju se “datim” vrednostima, iako se one mogu projektovati sa ciljem postizanja boljeg upravljanja.

Dimenzionisanje sistema za KGH za ostvarenje toplotne ugodnosti zasniva se na toplotnom opterećenju zgrade, koja se procenjuje ili za stacionarno stanje (Recknagel, 2005), ili primenom dinamičke simulacije za toplotu zgrade. Toplotno opterećenje zavisi od dobitaka i gubitaka toplote u zgradi usled vremenskih uslova, unutrašnjih dobitaka i temperature vazduha u zgradi. Dobici i gubici toplote nastaju usled prenosa toplote kroz omotač zgrade, a unutrašnji dobitci toplote nastaju od lica koja u prostorijama borave i unutrašnjih izvora (uglavnom električnih aparata). Budući da je vreme boravka u većini zgrada promenljivo, toplotni propisi za zgrade zahtevaju različite zadate temperature u prostorijama za periode kada se u zgradi boravi i kada se u zgradi ne boravi (BS EN ISO 13788:2002, RT-2005).

## 2. Sadašnje metode za dimenzionisanje grejnih izvora

Metode koje se koriste za dimenzionisanje sistema za grejanje zasnovane su na određivanju odnosno proceni opterećenja primenom pravila iz prakse, toplotnoj ravnoteži u stacionarnom stanju ili dinamičkoj simulaciji. Glavni postupci koji se danas koriste za dimenzionisanje grejne snage su sledeći:

- proporcija sa površinom ili zapreminom prostora u kojem se boravi,
- proračun toplotnog opterećenja u stacionarnom stanju,
- određivanje toplotnog opterećenja iz dinamičke simulacije.

Raspitujući se kod stručnjaka, zaključili smo da se grejni izvori (prvenstveno kotlovi) ponekad dimenzionišu na osnovu stručnog mišljenja, iskustvenog pravila, ili na osnovu kvadrature: preduzimač vas pita kolika je kvadratura vašeg stana i proceni veličinu kotla koja vam je potrebna. Kao što se može očekivati, možete da dobijete različite odgovore od različitih preduzimača koji koriste ovu tehniku. Slično tome, “stručnom” metodom se procenjuju površina i stepen izolacije, te se određuje kategorija kojoj zgrada pripada. Zatim se uzima u obzir grejno opterećenje za tu kategoriju zgrade.

Dobro ustanovljen metod za određivanje grejnog opterećenja je primena toplotnog bilansa u stacionarnom stanju za normalizovane spoljašnje uslove (ASHRAE 2001, EN ISO 13790:2004, Recknagel, 2005). Još bolji pristup predstavlja određivanje grejnog opterećenja primenom dinamičke simulacije toplotnog ponašanja zgrade.

Snaga grejnog izvora dobija se množenjem grejnog opterećenja faktorom koji je izabran na osnovu stručnih pravila (Recknagel, 2005). Prema tome, problem dimenzionisanja u suštini predstavlja problem grejnog bilansa.

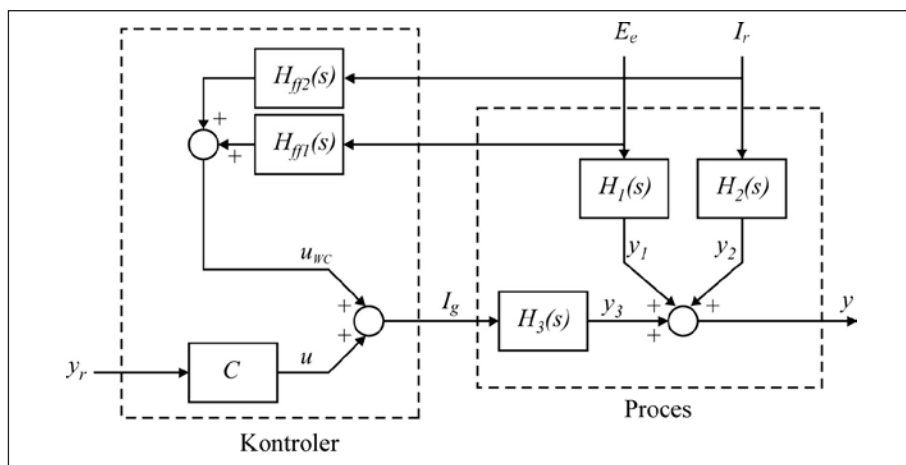
Međutim, toplotno opterećenje zgrade ne predstavlja relevantnu informaciju za dimenzionisanje sistema za grejanje u dinamičkim uslovima, zbog toga što ove metode, u stvari, koriste zadatu temperaturu, a ne temperaturu u prostorijama. To podrazumeva da temperatura u prostoriji bez greške prati svoju zadatu vrednost i da se ne uzima u obzir činjenica da, usled dinamike sistema za grejanje, zadata temperatura i stvarna temperatura u prostorijama nemaju sve vreme istu vrednost. Značaj dinamike još više podvlači činjenica da se zgrada skoro uvek nalazi u termodinamičkoj neravnoteži.

U ovom radu se predlaže metodologija dimenzionisanja grejnog izvora u zgradama u kojoj je boravak ljudi promenljiv. Ova metodologija može se primeniti u fazi projektovanja i pretpostavlja da su poznate toplotne karakteristike zgrade i sistema za grejanje kao i vremenski sled meteoroloških uslova i boravka u zgradi. Za ovakvu vrstu postupaka, generalno se prihvata linearnost dinamičkih modela za ceo opseg rada, te se može primeniti princip superpozicije.

Rad je podeljen u četiri dela. U prvom je predstavljena opšta ideja o ovoj metodi. Zatim je predstavljeno matematičko modeliranje zgrade. Potom su predstavljene osnovna teorija „feed-forward“ i prediktivno upravljanje na način na koji su primenjeni na ovaj problem. Na kraju su prikazani primeri i rezultati primene ove metode.

### 3. Kratak opis predložene metodologije

Glavna zamisao ove metode je da se problem dimenzionisanja grejnog izvora pretvori u problem upravljanja. Uzećemo u obzir zgradu i sistem grejanja kao proces koji ima vremenske uslove i unutrašnje dobitke kao nekontrolisane ulazne veličine (ili ometanja) i toplotni fluks koga dovodi izvor toplote kao kontrolisanu vrednost (komanda). Izlazna vrednost sistema je temperatura vazduha u prostorijama. Predlo-



Slika 1. Blok-dijagram predloženog sistema

ženi postupak treba da odredi optimalan program za komandovanje u cilju praćenja zadate vrednosti temperature u prostoriji. Tako će veličina izvora sistema za grejanje predstavljati maksimalnu vrednost komande. Drugim rečima, primenjuje se optimalan algoritam upravljanja bez ograničenja i utvrđujemo dimenziju izvora sistema grejanja kao vršnu vrednost komande.

Zgrada je uvek u termodinamičkoj neravnoteži zbog promenljivih ometanja (vremenske prilike i unutrašnji dobiti) i promenljive zadate temperature u zgradi. U ovoj metodi predlažemo da se prvo odredi optimalna komanda za eliminisanje ometanja, a zatim da se pronađe optimalna komanda za praćenje zadate vrednosti. Na kraju, primenom principa superpozicije, ove dve komande daju ukupnu komandu.

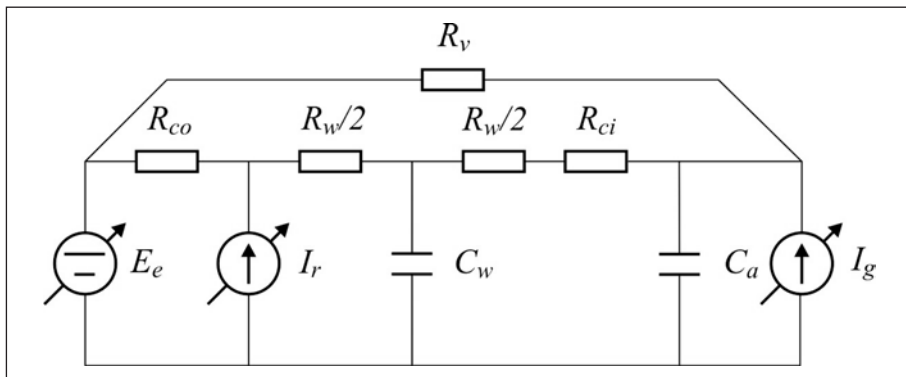
Za izračunavanje optimalne komande, potreban je dinamički model "procesa": zgrade i njenog sistema za grejanje.

#### 4. Matematičko modeliranje zgrade

Primenom prvih principa i konstitutivnih zakona, dobija se dinamički model zgrade kao skup algebarskih i diferencijalnih jednačina vrlo visokog reda. Međutim, red modela se može smanjiti. Trenutno nam evropski standard dozvoljava da dobijamo model sa sjedinjenim parametrima iz projektnih podataka (EN ISO 13790).

Na temperaturu u zgradi (prostorijama), koja predstavlja izlaznu vrednost modela,  $y$ , utiču tri različite vrste izvora: spoljašnja temperatura vazduha, sunčevo zračenje i unutrašnji izvori (slobodni dobiti kao što su ljudi koji borave u prostorijama, električni aparati i uređaj za grejanje). Treba imati u vidu da spoljašnja temperatura,  $E_e$ , sunčevo zračenje,  $I_y$ , i slobodni unutrašnji dobiti predstavljaju *ometanja* i da je uređaj za grejanje povezan sa *komandom*, grejnim izvorom, putem sistema za distribuciju. Budući da svi unutrašnji izvori predstavljaju izvore toplotnog fluksa, grupisaćemo ih u isti izvor,  $I_g$  (slika 1). Takođe treba uzeti u obzir da se u fazi projektovanja pretpostavlja da je varijacija vremena ometanja poznata.

Prihvatajući da su modeli fenomena prenosa toplote linearni, može se dobiti toplotni model zgrade putem analogije sa strujom. Na taj način, dobija se ekvivalentno električno kolo sa tri izvora.



Slika 2. Električno kolo koje odgovara zgradi

Jednostavan model za zgradu sa jednom zonom prikazan je na slici 2. Toplotni kapacitet zida je spojen u kondenzatoru ( $C_w$ ), a kapacitet unutrašnjeg vazduha u kon-

denzatoru ( $C_a$ ). Kondukcioni toplotni otpor polovine zida predstavljen je sa ( $R_w/2$ ). Otpor ( $R_{ci}$ ) predstavlja toplotni otpor usled konvekcije između zida i unutrašnjeg vazduha. Otpor ( $R_{co}$ ) predstavlja otpor usled konvekcije između zida i spoljašnjeg vazduha. Toplotni otpor ( $R_v$ ), uvodi se kako bi modelirao toplotni fluks zbog stalnog broja izmena vazduha i infiltracije spoljašnjeg vazduha. Temperatura spoljašnjeg vazduha predstavljena je kao idealan izvor napona ( $E_e$ ). Sunčevo zračenje i unutrašnji toplotni dobici predstavljeni su kao dva idealna izvora struje ( $I_y$  i  $I_g$ ).

Specifičnost ovog modeliranja leži u tome što se posebno pokazuju doprinosi koje svaki izvor daje temperaturi u prostoriji, a zatim se koristi princip superpozicije (slika 1). Način za dobijanje ovog modela je primena teoreme superpozicije za električna kola koja navodi da je reakcija u bilo kojoj grani linearnog kola, koja ima više od jednog nezavisnog izvora, jednaka algebarskom zbiru odziva koji daje svaki nezavisni izvor pojedinačno, dok sve ostale nezavisne izvore zamenjuje njihova unutrašnja impedanca. Unutrašnja impedanca idealnog izvora napona je nula, a impedanca idealnog izvora struje je neograničena; prema tome, sve izvore napona zamenjuje jedno kratko kolo, i sve izvore struje zamenjuje jedno otvoreno kolo.

Da bi se dobio odnos između temperature spoljašnjeg vazduha i temperature unutrašnjeg vazduha, u kolu prikazanom na sl. 2 zadržava se izvor napona ( $E_e$ ), i zamenjuje dva izvora struje otvorenim kolima; prema teoremi superpozicije, dobija se kolo prikazano na sl. 3. Konstitutivni zakoni za ovo kolo su:

$$i_2 = C_w \frac{dU_w}{dt} \quad (4.1)$$

$$i_4 = C_a \frac{dU_a}{dt} \quad (4.2)$$

Pisanjem drugog Kirhofovog zakona za prvu, drugu i treću petlju kola  $L_1$ ,  $L_2$  i  $L_3$ , dobija se:

$$U_w = i_5(R_{co} + R_w/2) + U_w \quad (4.3)$$

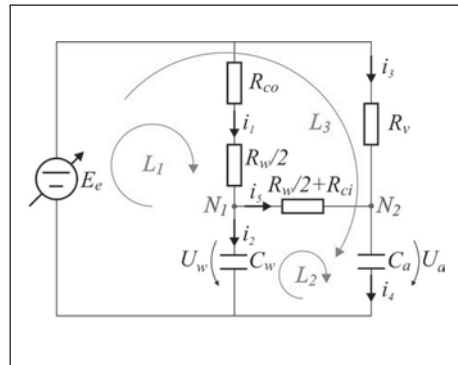
$$U_w = i_5(R_{ci} + R_w/2) + U_a \quad (4.4)$$

$$E_e = i_3 R_v + U_a \quad (4.5)$$

Pisanjem prvog Kirhofovog zakona za čvorove  $N_1$  i  $N_2$  dobija se:

$$i_1 = i_2 + i_5 \quad (4.6)$$

$$i_4 = i_5 + i_3 \quad (4.7)$$



Slika 3. Električno kolo koje odgovara doprinosu temperature spoljašnjeg vazduha

Eliminisanjem struja iz jednačina 4.3 i 4.4 primenom jednačina 4.1, 4.2, 4.5–4.7, dobija se sledeći sistem jednačina:

$$\begin{cases} \frac{dU_w}{dt} = -\frac{R_{co} + R_w + R_{ci}}{(R_{co} + R_w/2)(R_{ci} + R_w/2)C_w} U_w + \frac{1}{(R_{ci} + R_w/2)C_w} U_a + \frac{1}{(R_{co} + R_w/2)C_w} E_e \\ \frac{dU_a}{dt} = \frac{1}{R_{ci} + R_w/2} C_a U_w - \frac{R_{ci} + R_w/2 + R_v}{(R_{ci} + R_w/2)R_v C_a} U_a + \frac{1}{R_v C_a} E_e \end{cases} \quad (4.8)$$

Na osnovu sistema jednačina 4.8, moguće je definisati dinamički model kola na sl. 3u obliku stanje-prostor kao:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \mathbf{A}_1 \mathbf{x} + \mathbf{B}_1 u_1 \\ y &= \mathbf{C}_1 \mathbf{x} + \mathbf{D}_1 u_1 \end{aligned} \quad (4.9)$$

gde je vektor stanja:

$$\mathbf{x} = [U_w \ U_a]^T, \quad (4.10)$$

a ulazna vrednost je:

$$u_1 = E_e, \quad (4.11)$$

Matrice su:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_1 &= \begin{bmatrix} -\frac{R_{co} + R_w + R_{ci}}{(R_{co} + R_w/2)(R_{ci} + R_w/2)C_w} & \frac{1}{(R_{ci} + R_w/2)C_w} \\ \frac{1}{(R_{ci} + R_w/2)C_a} & \frac{R_{ci} + R_w/2 + R_v}{(R_{ci} + R_w/2)R_v C_a} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_1 &= \begin{bmatrix} \frac{1}{(R_{co} + R_w/2)C_w} \\ \frac{1}{R_v C_a} \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}_1 &= [0 \ 1], \quad \mathbf{D}_1 = 0 \end{aligned} \quad (4.12)$$

a  $y = U_a$  je izlazna vrednost sistema – temperatura vazduha u prostorijama zgrade.

Postupak za dobijanje odnosa između temperature u prostorijama i sunčevog zračenja je sličan; na sl. 2 zadržava se izvor struje, ( $I_y$ ), i zamenjuju se drugi izvori struje otvorenim kolom i izvor napona kratkim kolom kako bi se dobilo kolo prikazano na slici 4.

Primenjujući isti postupak uzimajući u obzir drugi izvor, sunčevo zračenje ( $I_y$ ), dobija se sistem jednačina:

$$\begin{cases} \frac{dU_w}{dt} = -\frac{R_{co} + R_w + R_{ci}}{(R_{co} + R_w/2)(R_{ci} + R_w/2)C_w} U_w + \frac{1}{(R_{ci} + R_w/2)C_w} U_a + \frac{R_{co}}{(R_{co} + R_w/2)C_w} I_r \\ \frac{dU_a}{dt} = \frac{1}{(R_{ci} + R_w/2)C_a} U_w - \frac{R_{ci} + R_w/2 + R_v}{(R_{ci} + R_w/2)R_v C_a} U_a \end{cases} \quad (4.13)$$

ili u obliku matrice:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \mathbf{A}_2 \mathbf{x} + \mathbf{B}_2 u_2 \\ y_2 &= \mathbf{C}_2 \mathbf{x} + \mathbf{D}_2 u_2 \end{aligned} \quad (4.14)$$

gde je vektor stanja  $\mathbf{x}$  isti kao  $\mathbf{i}$  u (4.10), ulazna vrednost je jačina sunčevog zračenja,

$$u_2 = I_y \quad (4.15)$$

a matrice su:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_2 &= \begin{bmatrix} -\frac{R_{co} + R_w + R_{ci}}{(R_{co} + R_w/2)(R_{ci} + R_w/2)C_w} & \frac{1}{(R_{ci} + R_w/2)C_w} \\ \frac{1}{(R_{ci} + R_w/2)C_a} & \frac{R_{ci} + R_w/2 + R_v}{(R_{ci} + R_w/2)R_v C_a} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_2 &= \begin{bmatrix} \frac{R_{co}}{(R_{co} + R_w/2)C_w} \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}_2 &= [0 \quad 1], \quad \mathbf{D}_2 = 0 \end{aligned} \quad (4.16)$$

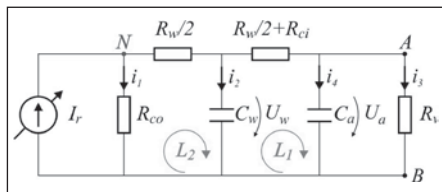
Izlazna vrednost sistema (4.14) je ista kao i gore,  $y_2 = U_a$ .

Na sličan način, da bi se dobio odnos između temperature u prostoriji i unutrašnjih izvora, zadržava se izvor struje  $I_g$  i zamenjuje se izvor struje otvorenim kolom, a izvor napona se zamenjuje kratkim kolom, pa tako kolo na sl. 2, postaje kolo prikazano na slici 5.

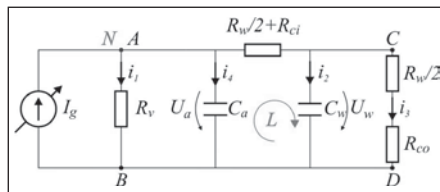
Rešavajući ovo kolo, dobija se sledeće:

$$\begin{cases} \frac{dU_w}{dt} = -\frac{R_{co} + R_w + R_{ci}}{(R_{co} + R_w/2)(R_{ci} + R_w/2)C_w} U_w + \frac{1}{(R_{ci} + R_w/2)C_w} U_a \\ \frac{dU_a}{dt} = \frac{1}{(R_{ci} + R_w/2)C_a} U_w - \frac{R_{ci} + R_w/2 + R_v}{(R_{ci} + R_w/2)R_v C_a} U_a + \frac{1}{C_a} I_g \end{cases} \quad (4.17)$$

ili, u formi matrice:



Slika 4. Električno kolo koje odgovara doprinosu sunčeve radijacije



Slika 5. Električno kolo koje odgovara doprinosu unutrašnjih dobitaka

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \mathbf{A}_3 \mathbf{x} + \mathbf{B}_3 u_3 \\ y_3 &= \mathbf{C}_3 \mathbf{x} + \mathbf{D}_3 u_3 \end{aligned} \quad (4.18)$$

gde je vektor stanja  $\mathbf{x}$  isti kao i u (4.10), a ulazna vrednost je:

$$u_3 = I_g \quad (4.19)$$

a matrice su:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_3 &= \begin{bmatrix} -\frac{R_{co} + R_w + R_{ci}}{(R_{co} + R_w/2)(R_{ci} + R_w/2)C_w} & \frac{1}{(R_{ci} + R_w/2)C_w} \\ \frac{1}{(R_{ci} + R_w/2)C_a} & \frac{R_{ci} + R_w/2 + R_v}{(R_{ci} + R_w/2)R_v C_a} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_3 &= \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{C_a} \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}_3 &= [0 \quad 1], \quad \mathbf{D}_3 = 0 \end{aligned} \quad (4.20)$$

Izlazna vrednost sistema (4.20) je ista kao gore  $-y_3 = U_a$ .

Treba imati na umu da se jedina razlika između sistema (4.12), (4.16) i (4.20) ogleda u matrici  $\mathbf{B}$ ; to ukazuje na to da se razlike između ovih sistema javljaju na način na koji je primenjena ulazna vrednost.

Primenjujući Laplasovu transformaciju na skup jednačina (4.9), (4.19), ili (4.18), ovi sistemi dobijaju ovu formu:

$$\begin{aligned} s \mathbf{x} &= \mathbf{A}_i \mathbf{x} + \mathbf{B}_i u_i \\ y_i &= \mathbf{C}_i \mathbf{x} + \mathbf{D}_i u_i \\ i &= 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (4.21)$$

Model stanje-prostor (4.21) može se izraziti funkcijom prenosa:

$$H_i(s) = \frac{y_i(s)}{u_i(s)}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (4.22)$$

eliminisanjem stanja  $\mathbf{x}$  iz skupa jednačina (4.21):

$$H_i(s) = \mathbf{C}_i (s \mathbf{I} - \mathbf{A}_i)^{-1} \mathbf{B}_i + \mathbf{D}_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (4.23)$$

Proračun funkcije prenosa  $H_i(s)$  iz (4.23) kao rezultat daje odnos dva polinoma,  $P_i(s)$  i  $Q_i(s)$ , u složenoj promenljivoj  $s$ ,

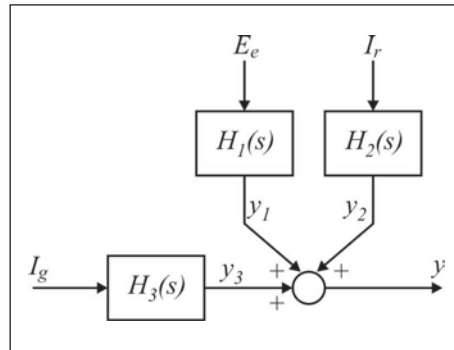
$$H_i(s) = \frac{Q_i(s)}{P_i(s)}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (4.24)$$

U ovoj situaciji, red polinoma  $Q_i(s)$  je jedan; red polinoma  $P_i(s)$  je dva.



Sabirajući izlazne vrednosti modela (4.24), dobija se model koji odgovara modelu na sl. 2, ali napisan primenom funkcija prenosa (slika 6).

Prednost prikazivanja modela kao funkcije prenosa je ta da je inverzija ovog modela mnogo lakša nego za model stanje-prostor. Inverzija funkcije prenosa vrši se zamenom polinoma  $Q(s)$  polinomom  $P(s)$  i obrnuto. Ovaj oblik modela koristiće se za određivanje snage potrebne za eliminisanje ometanja koje uvode promenljivi vremenski uslovi i da se prati varijacija zadate ulazne temperature kao funkcije boravljenja ljudi u zgradi.



Slika 6. Dinamički model zgrade dobijen superpozicijom

## 5. Kompenzacija vremenskih uslova

U ovom poglavlju predlaže se metod za procenu toplote potrebne za eliminisanje ometanja koje izazivaju vremenski uslovi. Osnovna zamisao za ovu vrstu kompenzacije smetnji je da se u pravom trenutku u zgradu dovede adekvatna količina toplote. To će u potpunosti neutralizovati efekat ometanja uz minimalnu potrebu za energijom.

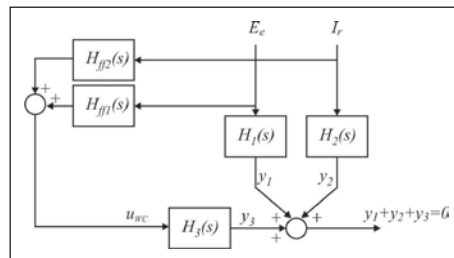
Spoljašnja temperatura i sunčevo zračenje unapred se uzimaju kao poznate veličine. Ova pretpostavka je validna zbog toga što se uzima u obzir da se ova procena vrši u fazi projektovanja za lokaciju za koju postoje raspoloživi vremenski podaci.

Predloženi postupak sastoji se, na prvom mestu, od simulacije kontinuirane evolucije promena temepratura u zgradi usled propisanih vremenskih uslova. Nakon toga, računa se komanda koja daje reakciju suprotnu onoj koja se dobija simulacijom; to se vrši inverzijom modela unutrašnjih dobitaka. Drugim rečima, prvo se rešava direktan problem, a potom inverzan problem.

Kada imamo funkciju prenosa ometanja,  $H_1$ , i signal ometanja,  $E_e$ , efekat ometanja se računa na sledeći način:

$$y_1 = H_1 E_e. \quad (5.1)$$

Jednačina (5.1) predstavlja direktan problem. Kako želimo da odbacimo efekat ovog ometanja, potrebno je da se izlazna vrednost (unutrašnja temperatura) usled ometanja (varijacija vremenskih uslova) kompenzuje izlaznom vrednošću usled komande (toplotni fluks koga dovodi sistem za grejanje):



Slika 7. Kompenzacija vremenskih uslova sa "feed-forward"

$$y_1 + y_3 = 0 \quad (5.2)$$

Da bi se pronašla ulazna vrednost koja daje izlaznu vrednost  $y_3$ , potrebno je rešiti inverzan problem: znajući model,  $H_3$ , i željenu evoluciju izlazne vrednosti,  $y_3$ , ulazna vrednost pronalazi se na sledeći način:

$$u_{wc} = H_3^{-1} y_3 \quad (5.3)$$

Kada je funkcija prenosa u obliku odnosa polinoma, njena inverzna vrednost predstavlja recipročan odnos. Međutim, inverzija odnosa polinoma ima posledice na fizički značaj modela i na njegovu numeričku stabilnost. Svi fizički procesi predstavljani su *odgovarajućim* funkcijama prenosa čiji je red imenioca veći ili je jednak redu brojioaca. Obično su funkcije *strogo odgovarajuće*, sa redom imenioca većim od reda brojioaca; fizički značaj strogo odgovarajuće funkcije prenosa predstavlja kauzalnost: efekat (to jest izlazna vrednost) vremenski sledi uzroku (to jest ulaznoj vrednosti). Problem je taj što inverzija strogo odgovarajuće funkcije predstavlja neodgovarajuću funkciju. Sa fizičke tačke gledišta, neodgovarajuća funkcija implicira da se efekat na izlaznu vrednost javlja pre varijacije ulazne vrednosti (suprotno principu kauzalnosti). Dalje, neodgovarajuća funkcija prenosa pojačava visoku frekvenciju signala ulazne vrednosti, koji su uvek prisutni u digitalizovanim signalima usled uzorkovanja.

Predlaže se izbegavanje inverzije odgovarajućih funkcija prenosa primenom onoga što se u teoriji upravljanja naziva “feed-forward”. Dobija se uvođenjem odnosa (5.1) u (5.3) sa invertovanim znakom da bi se dobilo:

$$u_{wc} = H_3^{-1} H_1 E_e \quad (5.4)$$

Na taj način, nova funkcija prenosa je:

$$Hff_1(s) = H_3^{-1}(s) H_1(s) E_e \quad (5.5)$$

Ako imenioce označimo sa  $P_i(s)$ ,  $i = 1, 3$  i brojioce sa  $Q_i(s)$ ,  $i = 1, 3$ , onda je dovoljan uslov da funkcija iz (5.4) bude odgovarajuća kao što sledi:

$$\deg(P_1(s)) + \deg(Q_3(s)) \geq \deg(P_3(s)) + \deg(Q_1(s)) \quad (5.6)$$

gde operator  $\deg(P(s))$  označava red ili stepen polinoma  $P(s)$ .

Ako se ispuni uslov (5.6), onda je funkcija prenosa “feed-forward”  $Hff_1(s)$ , odgovarajuća ili strogo odgovarajuća, te možemo da primenimo jednačinu (5.4), kako bismo izračunali evoluciju komande za kompenzaciju vremenskih uslova.

Na modelu koji je prikazan na slici 6, postoje dva izvora smetnji, spoljašnja temperatura,  $E_e$ , i sunčevo zračenje,  $I_y$ . Ukupna kompenzacija vremenskih uslova je:

$$u_{wc} = H_3^{-1} H_1 E_y + H_3^{-1} H_2 I_y \quad (5.7)$$

Na taj način, ukoliko je uslov (5.6) ispunjen, može se izračunati evolucija snage koja se uvodi za kompenzaciju vremenskih uslova.

## 6. Praćenje zadate vrednosti

Inverzija funkcije prenosa za praćenje zadate temperature kao rezultat daje neodgovarajuću funkciju prenosa. Da bi se izbegao problem neodgovarajuće funkci-

je prenosa, koristiće se algoritam prediktivnog upravljanja. Ovaj pristup je pogodan kada je poznat program (to jest razvoj u vremenu) zadate vrednosti, što je slučaj u fazi projektovanja zgrade.

### 6.1. Principi prediktivnog upravljanja (Model Predictive Control – MPC)

Algoritam prediktivnog upravljanja izračunava komandu koju treba dati sistemu u budućnosti, kako bi se smanjila buduća greška između izlazne vrednosti sistema i njene referentne vrednosti. Prva vrednost iz izračunatog niza komandi šalje se u proces i postupak se ponavlja u sledećem vremenu uzorkovanja.

Da bi se prediktivno upravljanje primenilo na sistem, potreban je dinamički model tog sistema. Prema tome kako je model predstavljen, postoji nekoliko algoritama koji pripadaju porodici prediktivnog upravljanja (Wang, 2009). Zatim, potrebno je odrediti horizont predviđanja (tj. vremenski horizont za koji će se buduća greška smanjiti) i horizont upravljanja (tj. vremenski horizont za koji će se buduća komanda izračunati). Komanda za budući vremenski horizont izračunava se smanjivanjem funkcije troškova, što prediktivno upravljanje čini optimalnom strategijom upravljanja. Funkcija troškova koja se optimizuje obično je kvadratna i kažnjava buduću grešku u izlaznoj vrednosti i budući komandni napor. Ovi ciljevi su kontradiktorni: ako bi komanda bila beskonačnost, izlaznu vrednost sistema bi trebalo odmah promeniti. Potrebni su neki faktori merenja da bi se napravio kompromis između ovih zadataka. Tako je matematički oblik funkcije troškova u uzorku vremena  $t$ :

$$J = \sum_{i=N_1}^{N_2} \delta(i) [y_r(t+i) - \hat{y}(t+i)]^2 + \sum_{i=1}^{N_u} \lambda(i) [\Delta u(t+i-1)]^2 \quad (6.1)$$

gde promenljive  $y_r$  i  $\hat{y}$  predstavljaju referentnu (ili željenu) izlaznu vrednost i određenu (procenjenu) izlaznu vrednost; a  $\Delta u$  predstavlja varijaciju ulazne vrednosti u uzorku vremena (“command effort”).

Parametri  $N_1$  i  $N_2$  predstavljaju broj vremenskih uzoraka za minimalni i maksimalni horizont predviđanja;  $N_u$  predstavlja broj vremenskih uzoraka za horizont upravljanja, dok su  $\delta$  i  $\lambda$  merni faktori za grešku u procesu i “command effort”. Ovi parametri se mogu podešavati kako bi se postigle određene karakteristike u reakciji sistema.

Vremenska varijacija željene izlazne vrednosti,  $y_r(t)$ , poznata je unapred (povezana je sa zadatom temperaturom u prostoriji kao funkcijom rasporeda boravka u zgradi). Poznajući model sistema, cilj leži u pronalaženju ulazne vrednosti koja minimizira kriterijume date u jednačini (6.1). U zavisnosti od modela koji je izabran za sistem, može se usvojiti jedan od postojećih algoritama iz porodice prediktivnog upravljanja MPC. Izabran je algoritam koji koristi model spirale zbog nekoliko elemenata koji se uzimaju u obzir.

1. Kao što smo videli, funkcija troškova iz (6.1) koristi povećanje komande kako bi se kaznio upravljački napor. Na taj način, da bi se izrazila predviđena izlazna vrednost sistema,  $\hat{y}$ , mora se integrisati uvećanje komande. Zbog toga se mora uvesti dodatni integrator u model sistema. Nasuprot drugim prikazima modela, a konvolu-

cioni model direktno koristi povećanje ulazne vrednosti, nije potrebno uvesti dodatni integrator u model procesa.

2. Da bi se minimizirao odnos (6.1), potrebna je inverzija nekih matrica, čija veličina zavisi od dužine horizonta upravljanja i predviđanja. Budući da želimo da izračunamo dugi niz koji se tiče upravljanja, u danima, biće potrebna inverzija velikih matrica. I zbog toga što u modelima stanje-prostor i prenosne funkcije moramo da uvedemo integrator, uslovni broj ovih matrica postaje vrlo veliki (Liuping, 2008). Za konvolucione modele, uslovni broj je manji.

3. Konvolucionni model se lako može dobiti pomoću simulacije. Štaviše, kada ne postoji matematički model, ovaj model se može dobiti iz koraka ili impulsne reakcije stvarnog sistema.

Algoritam prediktivnog upravljanja koji koristi konvolucione modele je dinamičko upravljanje matricama (Dynamic Matrix Control).

### 6.2. Principi dinamičkog upravljanja matricom (Dynamic Matrix Control – DMC)

Uzimajući u obzir odziv sistema u koracima koji je dat u sledećem nizu:

$$\{0, s_1, s_1, \dots, s_n, s_n, \dots\} \quad (6.2)$$

gde  $n$  predstavlja broj vremenskih uzoraka posle kojih se sistem sredi. Može se izraziti izlazna vrednost sistema za svaki niz ulaznih vrednosti kako sledi:

$$y(k) = \sum_{i=1}^n s_i \Delta u(k-i) + s_n u(k-n) \quad (6.3)$$

Na ovaj način, niz iz (6.2) u stvari predstavlja model sistema. Ako uzmemo u obzir nulte početne uslove, možemo izraziti predviđenu izlaznu vrednost sistema za budući vremenski horizont  $N_y$ , u obliku matrice kao:

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{S} \mathbf{u} \quad (6.4)$$

gde je:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{y}} &\equiv \left[ \hat{y}(k+1) \quad \hat{y}(k+2) \quad \hat{y}(k+3) \quad \dots \quad \hat{y}(k+N_y) \right]^T; \\ \mathbf{u} &\equiv \left[ \Delta u(k) \quad \Delta u(k+1) \quad \Delta u(k+2) \quad \dots \quad \Delta u(k+N_y-1) \right]^T; \\ \mathbf{S} &\equiv \begin{bmatrix} s_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ s_2 & s_1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \\ s_n & s_{n-1} & s_{n-2} & \dots & 0 \\ s_n & s^n & s_{n-1} & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \\ s_n & s_n & s_n & \dots & s_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6.5)$$

Zatim se izražava funkcija troškova (6.1) u obliku matrice i zamenjuje predviđena izlazna vrednost sistema odnosom (6.4):

$$J = (\mathbf{y}_r - \mathbf{S} \mathbf{u})^T \mathbf{Q} (\mathbf{y}_r - \mathbf{S} \mathbf{u}) + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u} \quad (6.6)$$

Ovde  $\mathbf{Q}$  i  $\mathbf{R}$  predstavljaju dijagonalne matrice koje sadrže težinske elemente  $\delta$  i  $\lambda$ ;  $\mathbf{y}_r$  je vektor čiji su elementi zadate (ili referentne) vrednosti za svaki budući vremenski uzorak. Kako funkcija troškova iz (6.6) ima kvadratni oblik i kako je sistem linearan, postoji vrednost  $\mathbf{u}$  koja minimizira funkciju; ovaj minimum će predstavljati optimalno uvećanje komande za sistem. Da bismo pronašli minimum, izražavamo izvedenu vrednost funkcije troškova i izjednačavamo je sa nulom. Na taj način, optimalno uvećanje komande je:

$$\mathbf{u}^* = (\mathbf{S}^T \mathbf{Q} \mathbf{S} + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{S}^T \mathbf{Q} \mathbf{y}_r \quad (6.7)$$

pri čemu je:

$$\mathbf{u}^* \equiv [\Delta u^*(k) \quad \Delta u^*(k+1) \quad \Delta u^*(k+2) \quad \dots \quad \Delta u^*(k+N_y-1)]^T \quad (6.8)$$

Kada dobijemo optimalnu uvećanu komandu koja optimizuje funkciju troškova (6.6), izračunavamo niz komandi na sledeći način:

$$u(k) = \sum_{i=1}^k \Delta u^*(i) \quad (6.9)$$

Na taj način, primenom odnosa (6.7) i (6.9) dobijamo optimalnu komandu za  $N_u$  budući vremenski horizont koji optimizira funkciju troškova (6.6).

### 6.3. Prilagodavanje prediktivnog upravljanja (MPC) za programiranje komande

U dva prethodna odeljka predstavljeni su principi prediktivnog upravljanja i opšta metoda DMC. U ovom odeljku predstavljena su razmatranja o tome kako se može primeniti algoritam DMC za dimenzionisanje izvora snage i kako se biraju parametri za podešavanje da bi se dobile željene karakteristike procesa.

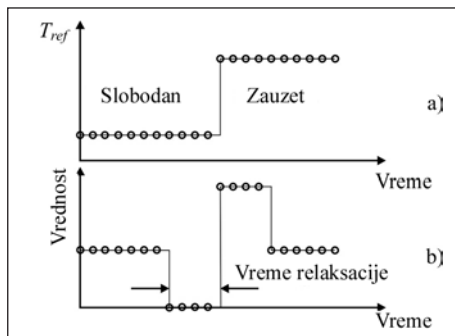
Algoritam DMC zahteva merenja stvarnog stanja sistema u svakom trenutku uzorkovanja, izračunava prediktivnu komandu i šalje u proces prvu vrednost iz niza. Pored toga, u skoro svim praktičnim situacijama postoje fizička ograničenja na maksimalnoj i minimalnoj vrednosti i/ili brzini promene komande. Ta ograničenja se takođe mogu uključiti i u funkciju optimizacije primenom Lagranžovih multiplikatora (Liuping, 2008). Tada izračunavanje optimalne komande postaje iterativni algoritam (koji nije predstavljen u ovom radu). Ali, ovaj rad se bavi dimenzionisanjem snage grejanja a ne njenim upravljanjem. Stoga, prva i najvažnija razlika između aplikacija upravljanja MPC i ove metode je što se na komandu ne stavljaju nikakva ograničenja. Izračunava se evolucija komande kako bi se pronašla maksimalna potrebna snaga za optimalno upravljanje sistema za grejanje za dati scenario boravljenja u zgradi. Druga razlika je u horizontu upravljanja: budući da smo u aplikacijama upravljanja zainteresovani samo za jedan element u izračunatom nizu upravljanja, ne uzimaju se veliki horizonti upravljanja i zadržava se samo prvi element, dok se preostali niz zanemaru-

je. Suprotno tome, ovde se izračunava optimalan niz upravljanja samo jednom i zadržavaju se svi elementi niza, zato što se uzimaju u obzir ometanja (vremenski uslovi) kao poznata i nepostojanje grešaka u modelu zgrade. Konačno, u aplikacijama upravljanja horizont upravljanja je obično manji nego horizont predviđanja. U našem slučaju, uzima se da je horizont upravljanja jednak horizontu predviđanja.

Poslednji elementi koji se moraju definisati za primenu algoritma DMC jesu merni matrice  $\mathbf{Q}$  i  $\mathbf{R}$ . Obično je to jedinična matrica pomnožena skalarom. Svaki element dijagonale matrice odgovara modelu povećanja greške i komande za svaki vremenski uzorak. Pošto su one težinske matrice, može se reći da veće kažnjavanje prvog ili drugog člana iz funkcije troškova (6.6) nije dato kao apsolutna vrednost elemenata matrice već kao njihov odnos. Stoga se jedna matrica tretira kao konstantna a drugom se manipuliše, kako bi se dobili različiti efekti na reagovanje sistema. Radi jednostavnosti, konstantna matrica se uzima kao jedinična matrica.

Budući da želimo da izračunamo niz komandi za ceo horizont predviđanja, lakše je podesiti težinsku matricu komande  $\mathbf{R}$ , u cilju identifikacije matrice. U međuvremenu, elementi matrice za merenje greške,  $\mathbf{Q}$ , biće prikladno podešeni kako bi se nametnula različita kažnjavanja za dva cilja. Na taj način, ako želimo da sistem reaguje tako da strogo poštuje referentne vrednosti, merna matrica  $\mathbf{Q}$  će imati veće elemente. Shodno tome, kada se referentna temperatura naglo promeni, komanda će biti veća. Pošto veličina snage grejanja odgovara najvećoj vrednosti komande, to vodi povećanju izvora. Na granici, komanda će biti Dirac-ov impuls. Stoga se savetuje da se toleriše greška u zoni uključivanja referentnih vrednosti. Ovo popuštanje postiže se tako što se elementi matrice  $\mathbf{Q}$  podešavaju na nulu, što odgovara tom vremenskom intervalu. Prema tome, budući da se u tom vremenskom okviru reagovanje sistema ne kažnjava, komanda će biti ujednačenija i vršna vrednost će biti manja; što je duže vreme popuštanja, to je manja vršna vrednost komande.

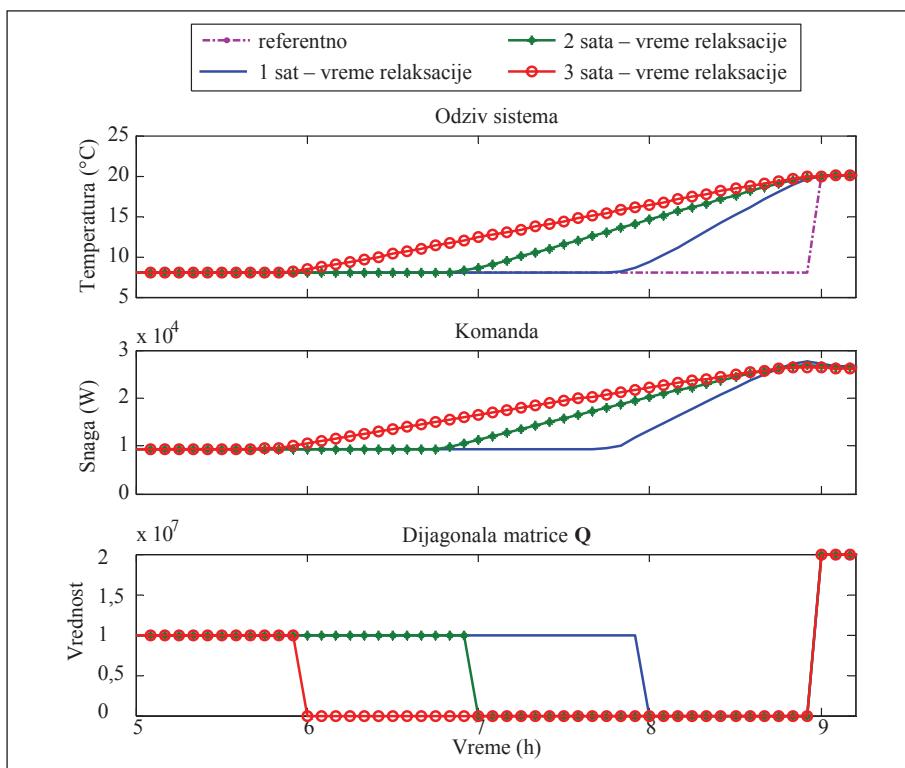
Tolerisanje greške pokreće pitanje vremenskog intervala na koji se greška toleriše. Putokaz je dat većom preciznošću koja se postiže tokom perioda kada se u zgradi boravi za razliku od perioda kada se u zgradi ne boravi. Na taj način, može se ublažiti ograničenje na preciznost temperature u prostoriji pre perioda kada se u njoj boravi. Ako želimo da ta preciznost bude velika na početku perioda kada se u zgradi boravi, može se povećati vrednost elemenata matrice  $\mathbf{Q}$  (sl. 8).



Slika 8. a) zadata (referentna) vrednost temperature vazduha; b) elementi merni matrice  $\mathbf{Q}$

Prednost povećanja vremena relaksacije je ta što će snaga izvora biti manja; mana je ta što će biti veći gubitak energije jer će temperatura u zgradi biti veća nego što je to potrebno (slika 9). Prema tome, izbor vrednosti merni matrice  $\mathbf{Q}$  je problem optimizacije koja pokušava da smanji ukupne troškove praveći kompromis između troškova ulaganja (veličina izvora snage) i operativnih troškova (gubitak energije usled više temperature u prostorijama).

Međutim, u ovom radu se ne razmatra problem izbora vrednosti elemenata matrice  $\mathbf{Q}$ .



Slika 9. Ilustracija reagovanja sistema za različite vremenske periode relaksacije

Tabela 1. Postupci za dimenzionisanje sistema KGH

Korak	Aktivnost
1	Numerički izraziti dinamički model zgrade i dobiti sve tri funkcije prenosa.
2	Ustanoviti profil reprezentativnih vremenskih uslova i referentnih vrednosti temperature u prostorijama.
3	Pronaći početne uslove ponavljanjem simulacije za isti interval od 24 sata dok se ne postigne stalni režim.
4	Izračunati evoluciju potrebne energije za kompenzaciju vremenskih uslova koristeći feed-forward (jednačina (5.7)).
5	Izabrati mernu matricu $Q$ (sl. 8).
6	Primeniti MPC za proračun evolucije snage potrebne za praćenje referentne temperature – odnosi (6.7) i (6.9).
7	Sabrati vremenske nizove grejne snage (tj. niz komandi) za kompenzaciju vremenskih uslova sa vremenskim nizom grejne snage (tj. nizom komandi) za praćenje zadate vrednosti za dobijanje ukupne snage.
8	Izabrati maksimalnu vrednost iz dobijenog niza komandi.

## 7. Primeri i razmatranja

Postupak prikazan u prethodnom odeljku predstavljen je u tabeli 1. Kao primer, možemo razmotriti jednu trospratnu zgradu koja u osnovi ima 100 m<sup>2</sup>. Vrednosti toplotnih parametara određenih tokom projektovanja zgrade navedene su u tabeli 2.

Tabela 2. Karakteristike probne zgrade

Parametri	Simbol na sl. 2	Vrednosti
Kapacitet zidova [J/K]	$C_w$	$40 \cdot 10^6$
Kapacitet unutrašnjeg vazduha [J/K]	$C_a$	$72 \cdot 10^4$
Toplotna otpornost zidova [K/W]	$R_w$	$1,9 \cdot 10^{-3}$
Toplotna otpornost prozora i ona usled gubitaka od ventilacije [K/W]	$R_v$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
Otpor spoljašnje konvekcije [K/W]	$R_{co}$	$0,14 \cdot 10^{-3}$
Otpor unutrašnje konvekcije [K/W]	$R_{ci}$	$0,37 \cdot 10^{-3}$

Uvodeći vrednosti iz table 2 u modele izražene u jednačinama (4.12), (4.16) i (4.20) i primenom jednačine (4.23), dobijaju se funkcije prenosa:

$$H_1(s) = \frac{1,009 \cdot 10^{-3}s + 6,637 \cdot 10^{-8}}{s^2 + 2,103 \cdot 10^{-3}s + 6,637 \cdot 10^{-8}}, \quad (7.1)$$

$$H_2(s) = \frac{3,379 \cdot 10^{-12}}{s^2 + 2,103 \cdot 10^{-3}s + 6,637 \cdot 10^{-8}}, \quad (7.2)$$

i:

$$H_3(s) = \frac{1,389 \cdot 10^{-6}s + 5,816 \cdot 10^{-11}}{s^2 + 2,103 \cdot 10^{-3}s + 6,637 \cdot 10^{-8}}. \quad (7.3)$$

Zadajemo temperaturu ugodnosti od 20°C za period u kojem se u zgradi boravi od 9.00 h do 18.00 h i 8°C za preostali deo dana. Da bismo pronašli početne uslove (početne vrednosti promenljivih vrednosti stanja, tj.  $U_w$  and  $U_a$ ), simulirali smo isti scenario za nekoliko dana i uzeli rezultate od poslednja dva dana. Tako period simulacije mora da bude najmanje dva dana duži od vremena potrebnog da sistem uđe u stalni režim.

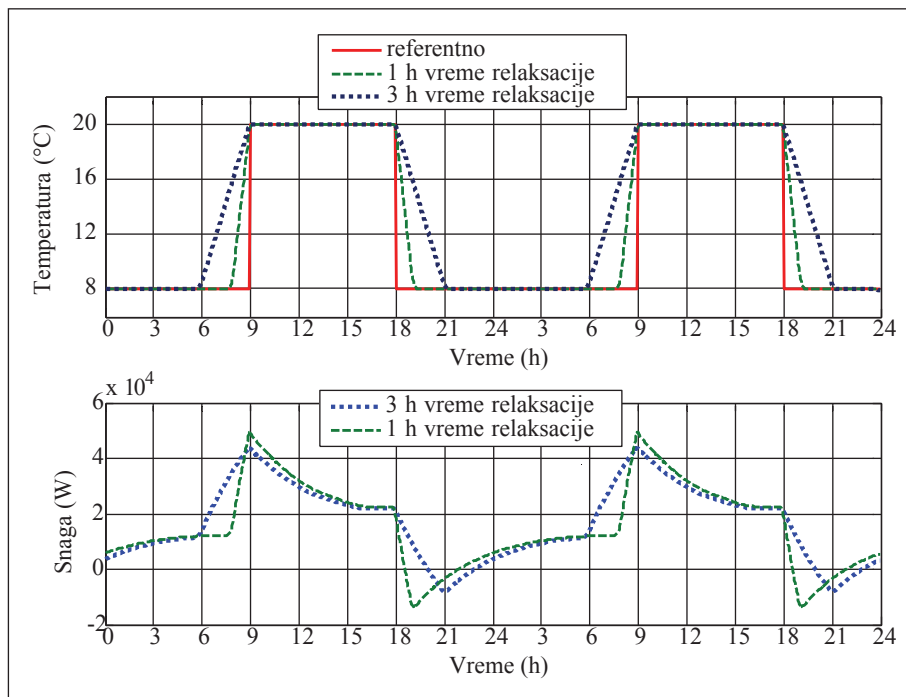
Primenom predloženih metoda, dobijeni su rezultati prikazani na sl. 10. Simulirali smo dva slučaja sa dva različita vremena relaksacije, 1 h i 3 h. Simulirani vremenski uslovi su oni na sl. 11. Kada je vreme relaksacije kraće, maksimalna potrebna snaga je veća. Takođe, iz evolucije komande može se videti da za početak perioda kada se u zgradi ne boravi, moramo uvesti negativnu snagu koja je ekvivalent hlađenju. Logično je da ćemo, čak iako na osnovu optimalne komande proizlazi da je



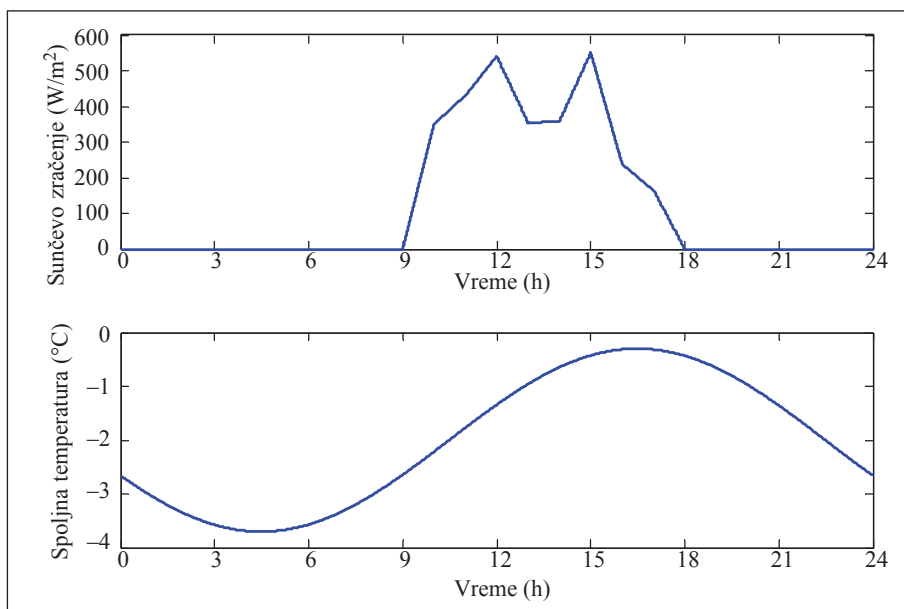
potrebno hlađenje, jednostavno isključiti komandu. Stoga, u ovoj situaciji nije moguće proceniti uštedu energije. Da bismo procenili uštedu energije koja nastaje smanjenjem vremena relaksacije, uzimamo u obzir primer sa sl. 12. Ovde smo izračunali dve mogućnosti za programiranje komande koji podiže temperaturu u prostoriji sa 8°C na 20°C sa rasponom vremena relaksacije od 1 h i 3 h. Posle 18 h, grejanje se isključuje. U oba slučaja komanda za odbacivanje ometanja je ista.

Za procenu uštede energije nije dovoljno samo izračunati komandu za praćenje referentnih vrednosti. Na taj način, ovde se može primetiti isti trend kao što je gore pomenuto: za manji raspon vremena relaksacije dobija se veća veličina sistema za grejanje. Za vreme relaksacije od 3 h, dobija je sistem za grejanje sa dimenzijama koje su veće za 80% u poređenju sa stacionarnim stanjem, dok za vreme relaksacije od 1 h dimenzije su veće za 105%. Ali, razlika utrošene energije između obe situacije iznosi 3,5 kWh. To znači da ako je za ovu zgradu sistem za grejanje veći za 105%, moguće je uštedeti 3,5 kWh u jednom jedinom prelasku sa 8°C na 20°C. Predimenzionisanje je urađeno za spoljašnju srednju temperaturu od nula stepeni i bez uzimanja u obzir sunčevog zračenja. Ako uzmemo u obzir druge vremenske uslove, može se promeniti procenat predimenzionisanja, ali će količina uštedene energije biti ista – 3,5 kWh.

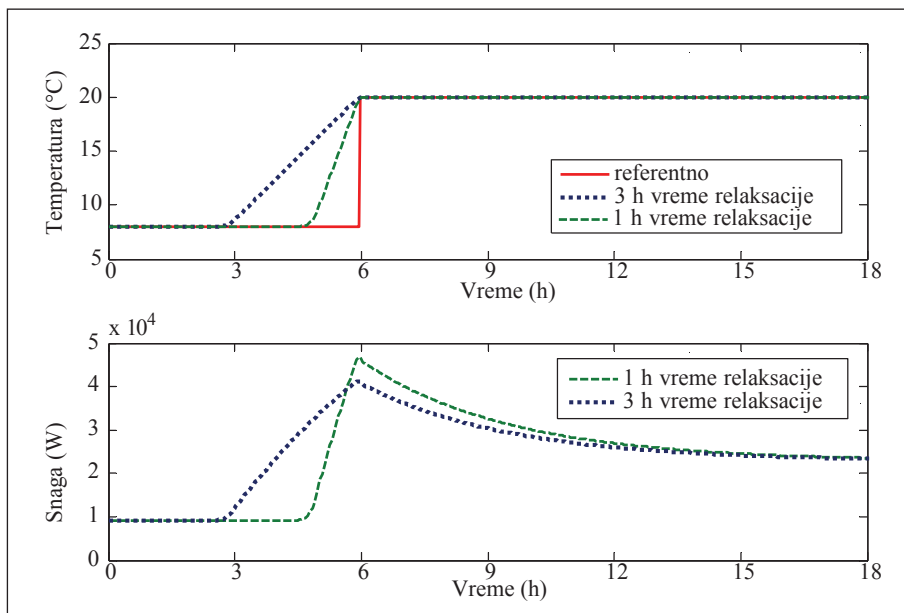
Do sada smo posebno procenili toplotne potrebe za kompenzaciju vremenskih uslova i praćenje referentnih vrednosti. Ukupna toplotna snaga dobija se sabiranjem dveju komandi.



Slika 10. Reagovanje sistema (gore) i optimalna komanda (dole) za dva različita raspona vremena relaksacije (simulacija za 2 dana)



Slika 11. Vremenski uslovi. Sunčevno zračenje (gore) i spoljašnja temperatura (dole)



Slika 12. Reagovanje sistema (gore) i optimalna komanda (dole) za dva različita raspona vremena relaksacije. Podešavanje uslova ugodnosti za period kada se u zgradi boravi

## 8. Zaključak

Dimenzije izvora snage u zgradi koja se greje sa prekidima treba da budu izabrane tako da temperatura u zgradi, koju reguliše sistem za grejanje, prati zadate vrednosti temperature. Dimenzije izvora snage utiču na troškove ulaganja i operativne troškove. Što je veći izvor, veći su troškovi ulaganja, a manji operativni troškovi.

Tokom završnih faza projektovanja zgrade, dostupan je dinamički model toplotnog ponašanja zgrade (u nekim zemljama je obavezan po zakonu). Ovaj model može se svesti na linearan dinamički model drugog reda na koji se može primeniti princip superpozicije. Tada se može obezbediti veličina izvora snage prema maksimalnoj potrebnoj snazi pomoću algoritma upravljanja da bi se eliminisala ometanja i da bi se pratile referentne vrednosti temperature u zgradi.

Ometanja temperature u zgradi od strane vremenskih uslova (spoljašnja temperatura i sunčevo zračenje) može se odbaciti algoritmom “feed-forward”. Za praćenje referentnih vrednosti, predlaže se algoritam izveden iz prediktivnog upravljanja (MPC), konkretno od dinamičkog upravljanja matricama (DMC).

Metoda predstavljena u ovom radu daje osnove za objektivn postupak dimensionisanja izvora snage. Međutim, potreban je dalji razvoj, naročito u pogledu izbora merne matrice i “reprezentativnih” vremenskih uslova.

## 9. Literatura

- [1] \*\*\* ASHRAE (2001). *Residential Cooling and Heating Load Calculations*. In: ASHRAE Handbook of Fundamentals 2001. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
- [2] \*\*\* EN ISO 13788:2002. *Hygrothermal performance of building components and building elements. Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation. Calculation methods*.
- [3] \*\*\* EN ISO 13790:2004. *Thermal Performance of buildings. Calculation of energy use for space heating*.
- [4] **Camacho, F. E. and C. Bordons** (1999), *Model Predictive Control*, Springer-Verlag, London.
- [5] **Grondzik, W. T., Ed.** (2007), *Air-Conditioning System Design Manual*, 2<sup>nd</sup> edition. Butterworth-Heinemann.
- [6] **Liuping, W.** (2008), *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB*. Springer, Melbourne.
- [7] **Recknagel, H., E. Sprenger, E. R. Schramek** (2005), *Calcul et dimensionnement des installations de chauffage*. In: Génie Climatique. Translated from German, Oldenbourg Industrieverlag.
- [8] \*\*\* RT-2005. *Règlementation Thermique 2005*. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Paris.
- [9] **Rutkowski, H.** (2002), *Manual J – Residential Load Calculation*, 8<sup>th</sup> edition. Air-Conditioning Contractors of America, Arlington.
- [10] **Chen, A.** (2009), *Working toward the very low energy consumption building of the future*, Feature story June 2, 2009, News Center, LBL ([link](#))
- [11] **Cellier, F.** (1991), *Continuous systems modeling*, Springer-Verlag.
- [12] **Wang, L.** (2009), *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB®*, Springer, London.