

Kompiuterizuoto būsto šiluminio balanso modeliavimas naudojant MATLAB

Antanas Mikuckas

Kauno technologijos universiteto docentas,
daktaras
Kaunas University of Technology, Assoc. Prof., PhD
Tel. (8 37) 30 03 95
El. paštas: antanas.mikuckas@ktu.lt

Irena Mikuckienė

Kauno technologijos universiteto docentė,
daktarė
Kaunas University of Technology, Assoc. Prof., PhD
Tel. (8 37) 30 03 95
El. paštas: irena.mikuckiene@ktu.lt

Egidijus Kazanavičius

Kauno technologijos universiteto profesorius,
daktaras
Kaunas University of Technology, Prof. PhD
Tel. (8 37) 30 03 86
El. paštas: ekaza@ifko.ktu.lt

Jonas Čeponis

Kauno technologijos universiteto docentas,
daktaras
Kaunas University of Technology, Assoc. Prof., PhD
El. paštas: cepojona@ifko.ktu.lt

Labai svarbu, kad šildymo sistema ne tik garantuotų komfortą, bet ir būtų ekonomiška. Šildymo sistemos ekonomiškas priklausos ne tik nuo jos valdymo algoritmu, bet ir nuo radiatorių galingumo paskirstymo patalpose. Pasiūlytas pastato šiluminio balanso modelis, realizuotas naudojant MATLAB įrankį „Simulink“, leidžia analizuoti procesus šildymo sistemoje ir optimaliai paskirstyti šildymo elementų galingumą atskirose patalpose. Pateikiami modeliavimo rezultatai ir išvados.

Įvadas

Energijos suvartojimo mažinimas eksploatuojant būstą yra svarbi problema, kuriai skiriama daug dėmesio (pavyzdžiui, būsto renovacijos programa). Užtikrinant darnų pastato sistemų veikimą reikia spręsti tiek architektūrinės, tiek inžinerines problemas. Joms spręsti taikomas termodinaminės analizės metodas. Sudaromas pastato šiluminio balanso modelis.

Kiekvieną pastatą galima nagrinėti kaip termodinaminę sistemą, kuriai galioja pirmas termodinamikos dėsnis:

$$E_s = E_p + E_g - E_a; \quad (1)$$

čia E_s – pastato sukaupta energija, E_g – pastato energija, kurią pastatas gauna iš saulės radiacijos, būste esančių žmonių išspinduliuojamos energijos, įvairių veikiančių buitinių prietaisų išskiria-

mos energijos, E_a – pastato atiduodama į aplinką energija, E_p – tiekiamą į pastatą energija.

Taupant energijos išteklius reikia minimizuoti tiekiamą į pastatą energiją E_p išlaikant pastovią sukaupią pastato energiją E_s . Kaip matyti iš formulės (1), vienintelis energijos taupymo būdas – mažinti pastato atiduodamą energiją, nes pastato gaunama energija dažniausiai yra atsitiktinis ir neprognozuojamas dydis.

Pastato sunaudojamą energiją galima mažinti gerinant atitvarų šiluminę varžą arba mažinant nuostolius inžinerinėse sistemose. Darbe nagrinėjamas vandeniui šildomas pastatas. Atiduodamos pastatui energijos kiekį galima sumažinti mažinant šilumos nuostolius vamzdynuose, gerinant šildymo katilo efektyvumą ir naudojant nestacionarųjį šildymą. Nestacionarusis šildymas retai naudojamas gyvenamosioms patalpoms, nes tokiu metodu sunku išlaikyti reikiamą komforto

lygi, be to, pastatuose, kurių šiluminė talpa didelė, trumpalaikis šildymo atjungimas neleidžia sutaupyti daug šilumos energijos (Mikuckas, et al, 2007). Žinomi darbai, nagrinėjantys nestacionarų šildymą, kai pastatas apšildomas elektra, ir ekonomija gaunama ne taupant šildymui sunaudotą energiją, bet remiantis skirtumais tarp elektros energijos dieninio ir naktinio tarifų (Hämäläinen, Mäntysaari, 2002). Lietuvoje atlikti nestacionariojo šildymo tyrimai parodė menką šio metodo efektyvumą dėl didesnio energijos kiekio, reikalingo pašildyti pastatą iki reikiamos temperatūros nustatytam laiko momentui. Be to, pastebėta, kad tokiuose pastatuose mikroklimato sąlygos dažnai neatitinka higienos reikalavimų, o energija kartais taupoma žmonių sveikatos sąskaita (Valančius, Stankevičius, 2008).

Vandenių šildomųjų sistemų šiluminis balansas

Vandenių šildomuose pastatuose šilumą patalpoms perduoda radiatoriai arba grindyse pakloti vamzdžiai. Radiatoriaus patalpai atiduodamos šilumos kiekį galima skaičiuoti naudojantis išraiška (Mikuckas ir kt., 2008):

$$q = fl \cdot cp \cdot (ts - tr); \quad (2)$$

čia q – radiatoriaus atiduodamas šilumos kiekis (W), fl – vandens srautas (kg/s), cp – vandens šiluminė talpa (J/kg °C), ts – tiekiamo į radiatorių vandens temperatūra (°C), tr – iš radiatoriaus grįžtančio vandens temperatūra (°C).

Kaip matyti iš (2) lygties, atiduodamos šilumos kiekį galima keisti keičiant vandens srautą per radiatorių arba tiekiamo į radiatorių vandens temperatūrą. Analogiškai galima reguliuoti atiduodamos šilumos kiekį ir naudojant grindų šildymo sistemą.

Šiluminiai nuostoliai vamzdyne, priklausantys nuo tiekiamo vandens temperatūros ir srauto per vamzdžius, skaičiuojami naudojantis išraiška

$$q = cp \cdot fl \cdot \left(ts - \left(tg + (ts - tg) \cdot e^{-\frac{Up \cdot l}{fl \cdot cp}} \right) \right); \quad (3)$$

čia q – vamzdyno šilumos nuostoliai (W), cp – vandens šiluminė talpa (J/kg °C), fl – vandens

srautas (kg/s), ts – tiekiamo vandens temperatūra (°C), tg – aplinkos temperatūra (°C), Up – vamzdžio šilumos nuostolių koeficientas (W/°C), l – vamzdyno ilgis (m).

Išnagrinėjus (2) ir (3) išraiškas matoma, kad šilumos nuostolius vamzdyne galima minimizuoti taip reguliuojant tiekiamo į radiatorius vandens temperatūrą, kad srautas per radiatorius būtų maksimalus. Tradicinėse šildymo sistemose paprastai termostatas valdo srautą per radiatorius, o vandens temperatūra pagal oro temperatūrą nustatoma rankiniu būdu. Tačiau reguliuojant į radiatorius tiekiamo vandens temperatūrą pagal oro temperatūrą nepasiekiami reikiami tikslumo, nes pastato šiluminius nuostolius lemia ne tik lauko temperatūra, bet ir drėgmė, vėjo greitis ir kryptis.

Geriausiai reguliuoti katilo vandens temperatūrą T_k (o kartu ir tiekiamo į radiatorius vandens temperatūrą) atsižvelgiant į vandens srautą per radiatorius dydį (Mikuckas ir kt., 2008):

$$T_k [n+1] = T_k [n] + \text{sgn}(\Phi_{s/1} - \Phi_{\max}) \frac{1 + \text{sgn}(\Phi_{s/1} - \Phi_{\max})}{2} \Delta T_k + \text{sgn}(\Phi_{\max} - \Phi_{s/2}) \frac{1 - \text{sgn}(\Phi_{\max} - \Phi_{s/2})}{2} \Delta T_k; \quad (4)$$

čia Φ_{\max} – maksimalus iš visų tuo laiko momentu per radiatorius tekančių srautų, $\Phi_{s/1}$ ir $\Phi_{s/2}$ – nustatytos slenkstinės srautų reikšmės, n – diskreti laiko atskaita, ΔT_k – katilo vandens temperatūros pokytis. Kiekvieno radiatoriaus srautą reguliuoja atskiras reguliatorius.

Energijos taupymas reguliuojant į šildymo sistemą tiekiamo vandens temperatūrą yra tuo efektyvesnis, kuo tolydžiau paskirstyti vandens srautai per radiatorius įvairiose būsto patalpose.

Pastato šiluminio balanso modelis

Sprendžiant šildymo sistemos valdymo klausimus, parenkant valdymo algoritmus ir įvertinant jų efektyvumą, sudarytas būsto šildymo modelis. Modelis įvertina atitvarų šiluminę varžą, pastato sandarumą, šildymo katilo našumą, vėjo krypties ir stiprumo įtaką šilumos nuostoliams.

Pastato šiluminį balansą galima modeliuoti naudojant makromodelį (Clarke et al., 2001) arba detalesnį modelį (Pagojus, 2005; Andersen, Poulsen, 1999). Makromodelis visą pastatą nagrinėja kaip vieną zoną, kurios temperatūra ta pati. Tokie modeliai tinka paprastiems namams be langų (pavyzdžiui, sandėliams) arba pastatams, kuriuose veikia galingos mechaninės ventiliacijos sistemos. Sudėtingesniems pastatams reikia naudoti detalesnį modelį, kai pastatas suskirstytas į kelias zonas.

Šildymo sistemai tyrinėti buvo sudarytas gyvenamojo namo zoninis modelis, kurio planas parodytas 1 pav. Pastatas suskirstytas į aštuonias zonas: trijuose kambariuose įrengtas radiatorinis šildymas, pagalbinėse patalpose – grindinis šildymas (Mikuckas ir kt., 2007).

Šiluminis balansas sudaromas kiekvienai zonai atskirai. Be to, įvertinami šiluminiai srautai tarp zonų:

$$Q_{ij} = \frac{T_i - T_j}{R_{ij}} ; \quad (5)$$

čia T_i – temperatūra i -ojoje zonoje, T_j – temperatūra j -ojoje zonoje, R_{ij} – šiluminis laidumas tarp zonų.

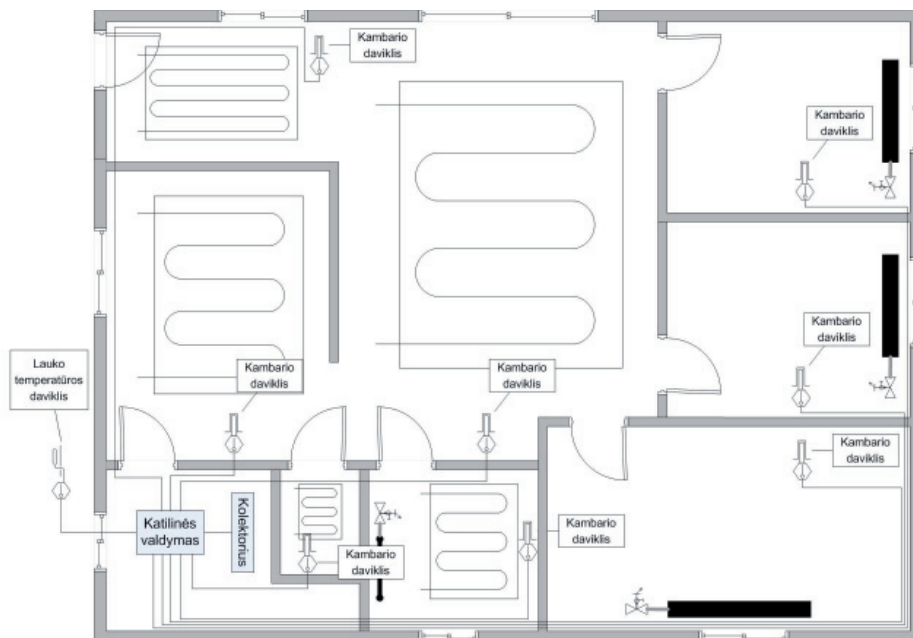
Šilumos srautas yra temperatūrų skirtumo ir šilumos perdavimo koeficiento sandauga.

Temperatūrų skirtumai tarp pastato zonų esti nedideli – keletas Kelvino laipsnių, antraip bus sulaukta nusiskundimų dėl komforto.

Tačiau net ir tuo atveju, kai visose pastato patalpose palaikoma tokia pati temperatūra, zoninė analizė yra naudinga, nes galima įvertinti skirtingose zonose gaunamą energiją ir nuostolius. Pavyzdžiui, turime pastatą su dideliais langais į pietus ir į šiaurę. Saulėta žiemos diena. Imkime hipotetinį atvejį, kai pastato gaunamas šilumos kiekis dėl saulės radiacijos pietų pusėje lygus pastato šiluminiais nuostoliams. Tuomet panaudoję makromodelį (modelį su viena zona) apskaičiuosime, kad šildymo nereikia. Tačiau jeigu atskiros zonos atskirtos pertvaromis, pietinėje namo pusėje bus per šilta, o šiaurinėje per šalta.

Į zonas tikslinga skirstyti ir tuomet, kai į patalpas šiluma tiekama skirtingu būdu. Pavyzdžiui, kai to paties pastato vienos patalpos apšildomos radiatoriais, o kitos patalpos – grindyse išvedžiotais vamzdžiais, kuriuose cirkuliuoja vanduo arba naudojamas elektrinis grindų šildymas.

Šilumos perdavimo koeficientai tarp zonų, jeigu jos atskirtos sienomis, yra nepakankami efektyviam šilumos persiskirstymui. Pagrindinis skirstymo į zonas tikslas – užtikrinti komfortą



1 pav. Modeliuojamo namo planas

visose zonose. Projektuojant zonas svarbu suderinti atskirų zonų gaunamus ir prarandamus šilumos kiekius. Paprastai zonų viduje sąlygos nesikeičia, tačiau zonų išorinį perimetrą veikia besikeičianti aplinka. Šiame modelyje kiekviena patalpa yra atskira zona. Jame įvertinama kiekvieno fasado įtaka.

Paprastai statiniai pastato šiluminio balanso modeliai naudojami pradinėse pastato projektavimo stadijose skaičiuojant maksimalią šildymo sistemos apkrovą (Biekša, Martinaitis, 2007).

Pastato ir šildymo elementų šiluminės inercijos įvertinimas

Naudojant dinaminį pastato šiluminio balanso modelį įvertinama pastato šiluminė inercija. Tik tai atlikus galima nustatyti šildymo sistemos valdymo efektyvumą, įvairius energijos taupymo metodus.

Vienas svarbiausių veikiančių šilumos balansą faktorių yra srautai per pastato atitvaras. Jie skaičiuojami taip (Mikuckas ir kt., 2008):

$$\dot{Q} = \sum_k U_k A_k (T_i - T_o); \quad (6)$$

čia A_k – atitvaros plotas, U_k – šiluminis laidumas, T_i – vidaus temperatūra, T_o – lauko temperatūra.

Kai kuriuose modeliuose skaičiuojamas bendras šilumos nuostolių koeficientas k_l :

$$k_l = \sum_k U_k A_k. \quad (7)$$

Tuomet nuostoliai skaičiuojami naudojant formulę

$$Q_{loss} = k_l (T_i - T_o). \quad (8)$$

Pagal šią išraišką galima skaičiuoti bendrą šildymo sistemos apkrovimą, tačiau sunku įvertinti netolygų šildymo paskirstymą, taip pat vėjo įtaką. Todėl mūsų modelyje kiekvienai zonai naudojama (6) formulė šilumos nuostoliams skaičiuoti ir radiatoriaus modelis tiekiamai šilumai skaičiuoti (2).

Pastate naudojami proporciniai integriniai reguliatoriai, kurie valdo tiekiamo į radiatorius vandens masę:

$$m = k_p (T_{ir} - T_i) + k_i \int_0^t (T_{ir} - T_i) dt; \quad (9)$$

čia k_p – valdiklio stiprinimas ((kg/s)/°C); T_{ir} – nustatyta tai zonai temperatūra, T_i – temperatūra zonoje; k_i – valdiklio integravimo koeficientas.

Naudojanti proporcinį integrinį reguliatorių šildymo sistema aprašoma būsenų lygtimi:

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_i}{dt} \\ \frac{dm}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{k_l}{C} & \frac{c_p(T_s - T_r)}{C} \\ \frac{k_p k_l}{C} - k_i & -\frac{k_p c_p (T_s - T_r)}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_i \\ m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{k_l}{C} & 0 \\ -\frac{k_p k_l}{C} & k_i T_{iref} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_o \\ 1 \end{bmatrix},$$

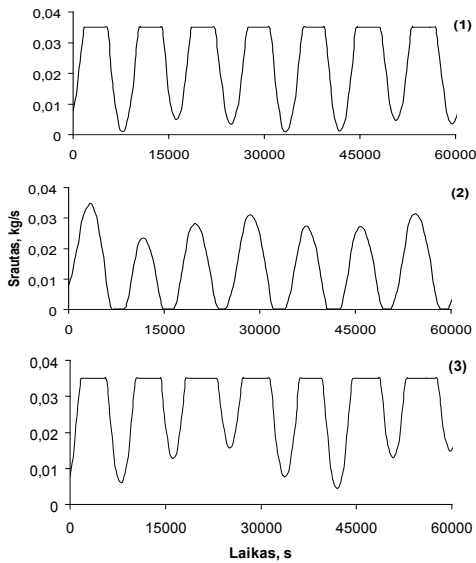
$$m = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} T_i \\ m \end{bmatrix}, T_i = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} T_i \\ m \end{bmatrix}; \quad (10)$$

čia C – atitvarų šiluminė talpa, m – vandens srautas (kg); c_p – vandens šiluminė talpa, T_s – tiekiamo į radiatorius vandens temperatūra (°C); T_r – grįžtančio iš radiatoriaus vandens temperatūra (°C).

Modeliavimo rezultatai

Modeliavimui naudotas MATLAB įrankis „Simulink“. Sudarytame modelyje atitvarų šiluminė talpa skaičiuojama atsižvelgiant į pastato konstrukciją (sienų storį, geometriją, medžiagas). Taip pat įvertinama langų konstrukcija (šilumos nuostoliai per langus). Buvo siekiama rasti sąlygas, kuriomis nuostoliai vamzdynuose minimalūs. Antrame paveiksle parodyti vandens srautai per radiatorius, kai radiatorių sekcijų kiekis pirmajame (1), antrajame (2) ir trečiajame (3) kambaryje proporcingas kambario plotui ir yra atitinkamai lygus septyniolikai, keturiolikai ir dvidešimt penkioms sekcijoms. Temperatūra lauke keičiasi nuo –20 °C naktį iki –10 °C dieną. Modeliavimo laikas – viena savaitė, skaičiavimai atliekami ir valdymo signalai sistemoje sklinda kas 2,5 s.

Gauti rezultatai rodo, kad vandens srautai per radiatorius nevienodi, nes antrajame kambaryje mažesnis sienos, išeinančios į lauką, plotas.

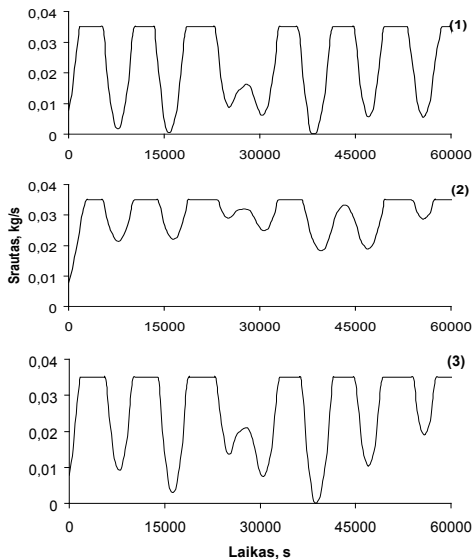


2 pav. Srautai per radiatorius kambariuose, kai radiatorių galinumas proporcingas kambario plotui

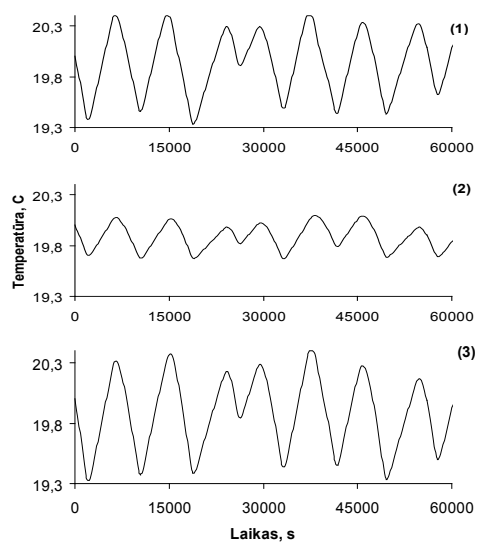
Siekiant suvienodinti srautus per radiatorius buvo pakeisti radiatorių galinumai kambariuose.

Modeliavimo rezultatai sumažinus antrajame kambaryje sekcijų skaičių iki dvylikos pateikiami 3 paveiksle.

Šiuo atveju srautai per radiatorius pirmajame kambaryje Φ_1 , antrajame kambaryje Φ_2 ir trečiajame kambaryje Φ_3 susibalansuoja. Bendras van-



3 pav. Vandens srautai per radiatorius pakeitus sekcijų skaičių antrajame kambaryje

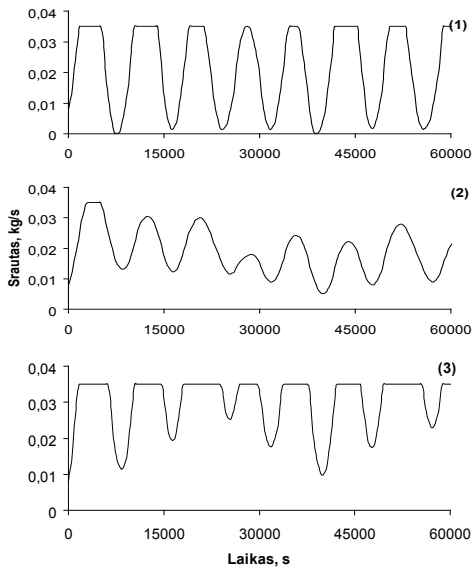


4 pav. Temperatūra kambariuose

dens srautas per radiatorius $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3$ pasidarė didesnis, palyginti su pirmuoju atveju. Tai turi įtakos ir šildymui sunaudojamos energijos kiekiui. Pirmuoju atveju buvo sunaudota 298 kWh energijos, antruoju atveju – 285 kWh energijos. Kaip parodyta 4 pav., radiatorių galinumo sumažinimas antrajame kambaryje neturi įtakos komfortui, nes tuomet per radiatorių tekant didesniai srautai atiduodamas šilumos kiekis nesumažėja.

Temperatūra kambariuose svyruoja nuo 19,3 °C iki 20,4 °C. Nors radiatorių galinumas kambariuose subalansuotas, tai negarantuoja, kad visais atvejais srautai per radiatorius bus sulyginti. Penktame paveiksle parodytas atvejis, kai vėjas 15 m/s greičiu pučia į fasadą, kuriame yra didžiausio kambario langas.

Šiuo atveju šildymui sunaudojama 305 kWh energijos. Šį sunaudojamos energijos padidėjimą veikia ne tik vandens srautų per radiatorius išsibalansavimas, bet ir padidėjęs šilumos kiekis, atiduodamas aplinkai. Idealiu atveju naudojant šį modelį galima nustatyti tokių radiatorių galinumą kambariuose, kad sunaudojamos energijos kiekis būtų minimalus. Tam reikia žinoti vėjo kryptis ir stiprumą per visą šildymo sezoną. Iš tikrųjų to žinoti neįmanoma, todėl siūloma išbalansuoti radiatorių galinumus nesant vėjo ir truputį padidinti radiatorių galinumus kambariuose prie namo sienos, į kurią pučia vyraujančios krypties vėjai.



5 p a v. Srautai per radiatorius pučiant 15 m/s vėjui

LITERATŪRA

ANDERSEN, Klaus Kaae; POULSEN, Henrik (1999). Building Integrated Heating Systems. Iš *Proc. of Building Simulation '99*, vol. 1, p. 105–112.

BIEKŠA, Darius; MARTINAITIS, Vytautas (2007). Pastato inžinerinių sistemų tyrimas taikant eksperimentinį sistemų vertinimo metodą. *Energetika*, t. 53, nr. 4, p. 84–89.

CLARKE, J. A.; COCKROFT, J.; CONNER, S.; HAND, J. W.; KELLY, N. J.; MOORE, R.; O'BRIEN, T.; STRACHAN, P. (2001). Control in Building Energy Management Systems: the Role of Simulation. Iš *Proc. 7th International IBPSA Conf.*, Rio de Janeiro, Brazil, 2001, p. 99–108.

HÄMÄLÄINEN, Raimo P.; MÄNTYSAARI, Juha (2002). Dynamic multi-objective heating optimization. *European Journal of Operational Research*, vol. 142, p. 1–15.

SMART HOUSE HEAT BALANCE MODELING USING MATLAB

Antanas Mikuckas, Irena Mikuckienė, Egidijus Kazanavičius, Jonas Čeponis

Summary

The purpose of heating system is to create the best environment possible and to minimize energy consumption. Energy consumption in heating system depends not only on control algorithms of heating system, but also on power of heating units' distribution.

Išvados

Šildymo sistemos efektyvumo analizei reikia naudoti dinaminis modelius, statiniai modeliai paprastai tinka tik būsto projektavimo etape skaičiuojant maksimalią šildymo sistemos apkrovą. Sudarytas dinaminis į kelias zonas padalyto būsto šildymo modelis realizuotas MATLAB sistema.

Šis modelis leidžia įvertinti konstrukcinius namo ypatumus (sienų storį, langų konstrukciją, infiltracijos greitį), šildymo sistemos parametrus ir klimato sąlygas (pavyzdžiui, vėjo kryptį ir greitį).

Nustatyta, kad mažiau energijos šildymui sueikvojama, kai vandens srautai per radiatorius subalansuoti. Parodyta, kad parinkę radiatorių galingumą proporcingai kambarių plotui, negauname subalansuotų vandens srautų per radiatorius. Pateiktas modelis leidžia apskaičiuoti optimalų radiatorių galingumo paskirstymą.

MIKUCKAS, Antanas; MIKUCKIENĖ, Irena; KAZANAVIČIUS, Egidijus (2008). Control of building integrated heating system. *Systemy wspomaganie w zarządzaniu środowiskiem : monografia*. Zabrze : [s. n.], p. 201–209.

MIKUCKAS, Antanas; MIKUCKIENĖ, Irena; KAZANAVIČIUS, Egidijus.; ČEPONIS, Jonas (2007). Pastato termofizinių savybių modeliavimas naudojant „Simulink“. *Informacijos mokslai*, t. 42–43, p. 121–127.

PAGOJUS, Jonas (2005). Pastato kintamo šiluminio režimo modeliavimas *Energetika*, nr. 1, p. 67–72.

VALANČIUS, Kęstutis; STANKEVIČIUS, Vytautas (2008). Nestacionarios pastato šiluminės būklės įtaka patalpų šilumos poreikiams. *Energetika*, t. 54, nr. 2, p. 49–53.

Heat balance model was developed using MATLAB. This model allows finding out optimal distribution of heating elements power. The results for residential house are shown. The heat consumption for a specified time period was calculated.