

Optimalizácia teplotných útlmov pri vykurovaní budov

Richard Rác, Aneta Dienová, Anton Kachaňák

V príspevku sú analyzované otázky optimálnych teplotných útlmov pri vykurovaní budov z hľadiska znižovania finančných nákladov na vykurovanie. Na príklade reálneho objektu je ukázané, že v závislosti od konkrétnych podmienok vykurovacej sústavy existujú optimálne hodnoty nočných, resp. dlhodobých teplotných útlmov, pri ktorých sa dosahujú minimálne finančné náklady na vykurovanie.

Úvod

V súčasnosti je v súvislosti so zvyšovaním cien palív a energií veľmi aktuálne optimálne nastavenie riadenia vykurovacích technológií, resp. systémov vykurovania, vetrania a klimatizácie (HVAC), a to v rodinných domoch aj pri veľkých obytných, administratívnych a občianskych budovách s lokálnym vykurovaním alebo systémami centrálného zásobovania teplom (CZT). Vo všetkých prípadoch treba dosiahnuť maximálnu hospodárnosť pri využívaní tepelného zdroja a súčasnom akceptovaní požiadaviek na tepelnú pohodu v jednotlivých miestnostiach, resp. zónach budovy. Pri riadení rôznych tepelných sústav sa v tzv. procesnej úrovni riadenia najčastejšie používajú dva typy regulácie, a to dvojpolohová a ekvitermická regulácia. V príspevku budú najskôr stručne charakterizované teoretické princípy, výhody a nevýhody, ako aj vhodné oblasti použitia uvedenej regulácie.

Je známe, že základný predpoklad optimálnej prevádzky vykurovacej technológie tvorí jej najvýhodnejší návrh a hydraulické vyregulovanie. Iným významným zdrojom tepelných úspor je správne nastavenie teploty vykurovania, nakoľko zníženie teploty vo vykurovanom priestore o 1 °C umožňuje dosiahnuť až 5 – 6 % zníženie spotreby energie. S tým súvisí v závislosti od konkrétnych podmienok a požiadaviek používateľa vykurovacej technológie nastavenie nočných, resp. dlhodobých teplotných útlmov. Je tiež známe, že úplné vypínanie vykurovania budovy alebo jej časti nie je hospodárne, pretože vyžaduje značnú spotrebu energie na opätovné dosiahnutie pôvodného teplotného režimu v budove v dôsledku jej veľkej tepelnej kapacity. Z uvedených dôvodov bude preto zaujímavé zistiť optimálne teplotné útlmy napr. rekreačného objektu, ktorý je temperovaný mimo obdobia obývania na teplote, ktorá je nad teplotou mrazovej ochrany a zabráňuje nežiaducejmu rastu vlhkosti v interiéri budovy. Teplota dlhodobých útlmov bude v tomto prípade závisieť od výšky vonkajšej teploty a počtu návštev objektu počas víkendov v priebehu zimného obdobia. Iným prípadom je napr. určenie optimálneho nočného teplotného útlmu v budove, ktorá nie je v nočných hodinách obývaná, napr. v administratívnej budove. Uvedené prípady určenia optimálnych teplotných útlmov boli za určitých zjednodušujúcich predpokladov kvantitatívne overené na príklade čiastočne obývaného domu s lokálnym vykurovaním zemným plynom.

1. Dvojpolohová regulácia

Dvojpolohová regulácia sa v praxi používa pre svoju jednoduchosť, nakoľko regulátor nevyžaduje zložitý zosilňovač. Táto regulácia patrí do kategórie nespojitých regulácií, kde regulačný orgán nadobúda iba dve polohy $u_{\min}$, $u_{\max}$, resp. akčná veličina má tvar periodickej postupnosti obdĺžnikových impulzov so šírkovou moduláciou. Dvojpolohová regulácia je vhodná pre regulované sústavy, pre ktoré je kapacitné oneskorenie podstatne väčšie ako dopravné oneskorenie, t. j. platí $T_s \gg T_d$, resp. $T_n \gg T_u$, kde T_s je dominantná časová konštanta regulovanej sústavy, T_d – dopravné oneskorenie, T_u – doba prietahu, T_n – doba náběhu. Regulátor má

reléovú charakteristiku s hystereziou, resp. necitlivosťou, kde Δy je zmena regulovanej veličiny potrebná na prepnutie relé. Nevýhodou dvojpolohovej regulácie je, že pri väčšom priemere potrubí môžu pri náhlých zmenách akčnej veličiny vzniknúť hydraulické rázy spojené s vyššou hlučnosťou. Ak zohľadníme ďalšie požiadavky na kvalitu regulácie, napr. pomer maximálneho a minimálneho tepelného výkonu, ekologické požiadavky a pod., bude regulácia so spojitou moduláciou tepelného výkonu vhodnejšia, aj keď bude zložitejšia a tým aj finančne náročnejšia. Realizácia dvojpolohového regulátora môže byť veľmi jednoduchá pri tzv. nivostatoch, manostatoch a termostatoch až po programovú realizáciu dvojpolohovej regulácie v číslicových riadiacich a signalizačných systémoch.

Na analýzu kvality dvojpolohovej regulácie vyjadríme pre regulovanú sústavu bezrozmerné parametre

$$\lambda = \frac{T_d}{T_s} \approx \frac{T_u}{T_n} \quad \eta = \frac{y_{\max}}{w} = K_s \frac{u_{\max}}{w}$$

kde K_s je zosilnenie regulovanej sústavy a w žiadaná hodnota regulovanej veličiny. Pre regulátor vyjadríme pomernú necitlivosť bezrozmerným parametrom $\sigma = \Delta y/w$. Schéma regulačného obvodu s dvojpolohovým regulátorom je na obr. 1. Regulovaná sústava je opísaná diferenciálnou rovnicou s posunutým argumentom

$$T_s \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = u(t - T_d)$$

Riešením uvedenej diferenciálnej rovnice pre akčnú veličinu u v tvare periodickej funkcie s periódou T dostaneme periodický priebeh regulovanej veličiny, pre ktorý definujeme tzv. ukazovatele dvojpolohovej regulácie ako nelineárne funkcie parametrov regulovanej sústavy λ , η a parametra regulátora σ .

1. Pomerná amplitúda kmitov:

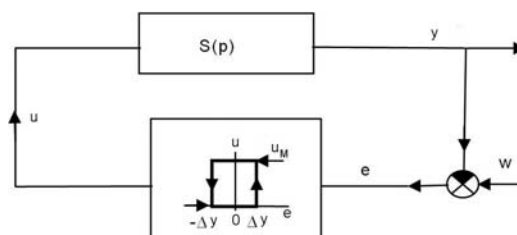
$$\alpha = \frac{y_i - y_{i+1}}{2w} = f_1(\lambda, \eta, \sigma) = \frac{\eta}{2} + \left(\sigma - \frac{\eta}{2} \right) e^{-\lambda}$$

2. Pomerné posunutie strednej hodnoty kmitov od žiadanej hodnoty w :

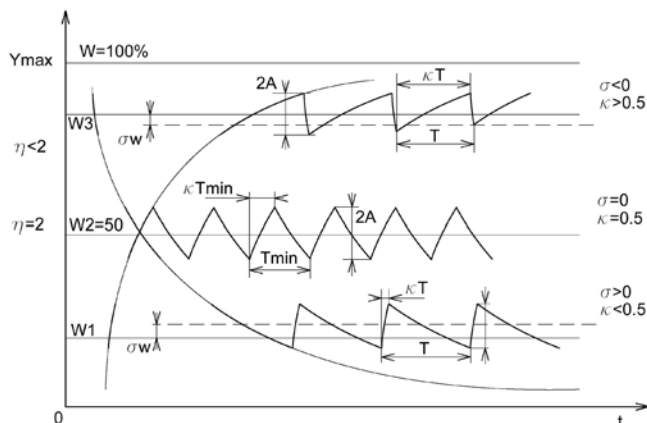
$$\delta = \frac{y_i + y_{i+1}}{2} - w = f_2(\lambda, \eta, \sigma) = (1 - e^{-\lambda}) \left(\frac{\eta}{2} - 1 \right)$$

3. Pomerná perióda kmitov:

$$\tau = \frac{T}{T_s} = f_3(\lambda, \eta, \sigma)$$



Obr.1 Regulačný obvod s dvojpolohovým regulátorom



Obr.2 Regulačné pochody pri dvojpohlovej regulácii

4. Pomer doby zapnutia akčnej veličiny a periódy kmitov

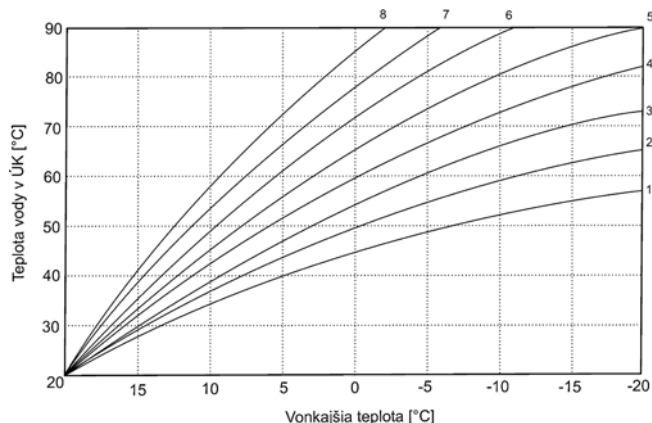
$$\kappa = f_4(\lambda, \eta, \sigma)$$

Z uvedených vzťahov vyplýva, že pre $w = y_{\max}/2$ platí $\delta = 0$, $\kappa = 0,5$ a $T_{\min} = 4T_d$.

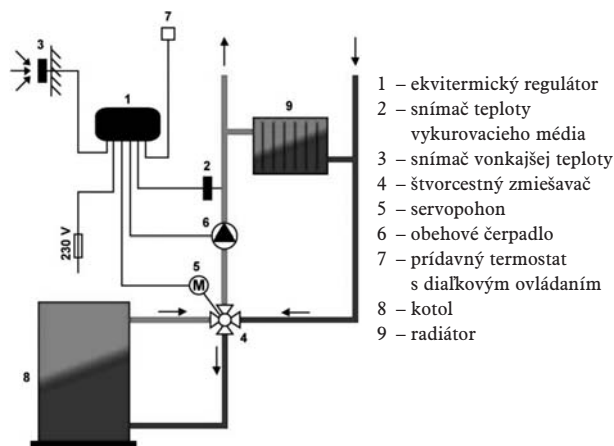
Z požiadavky minimálnej amplitúdy kmitov $\alpha \ll 1$ vyplýva tiež požiadavka na regulovanú sústavu $\lambda \ll 1$, ktorá ukazuje podmienku vhodnosti použitia dvojpohlovej regulácie. Pomer doby zapnutia akčnej veličiny a periódy kmitov sa v praxi volí $\kappa \approx 1/3$. Typické priebehy regulačných pochodov pri dvojpohlovej regulácii pre rôzne úrovne žiadanej hodnoty regulovanej veličiny sú znázornené na obr. 2.

2. Ekvitermickej regulácia

Riadenie tepelných procesov na báze ekvitermickej regulácie patrí medzi štandardné typy regulácie, a to na strane tepelných zdrojov aj spotrebiteľov tepla pri vykurovaní budov. V praxi sa realizovala kompaktnými analógovými regulačnými systémami, napr. KOMEXTERM, ako aj pri číslicovej realizácii ekvitermickej regulácie pri riadení vykurovania väčších obytných a občianskych budov; v súčasnosti sa využíva aj pri regulácii vykurovania rodinných domov. Princíp ekvitermickej regulácie vychádza z praktických skúseností. Dôvodom použitia ekvitermickej regulácie pri vykurovaní budov bolo veľké oneskorenie medzi tepelným príkonom do miestnosti, resp. vykurovacej zóny budovy a zmenou teploty v miestnosti, resp. referenčnej miestnosti vykurovacej zóny. Použitie spätnoväzbovej regulácie podľa teploty miestnosti by viedlo pri použití štandardných PI, PID regulátorov k nestabilným regulačným pochodom. Na druhej strane kompenzácia oneskorenia v regulovanej sústave by vyžadovala získanie dynamického modelu regulovanej sústavy, čo je spravidla vzhľadom na zložitosť regulovanej sústavy ťažko realizovateľné. Ekvitermickej regulácia je v podstate vlečná regulácia podľa vonkajšej teploty, podľa ktorej sa nastavuje teplota vykurovacej vody do vykurovacej sústavy. Závislosť medzi vonkajšou teplotou a teplotou vykurovacej vody je daná súborom tzv. ekvitermických kriviek, ktoré môžu byť parametrizované teplotou v miestnosti (obr. 3). Tieto krivky sú nelineárne a dané tepelnoizolačnými vlastnosťami vykurovaného objektu a výkonnosťou vykurovacieho systému. Klasická ekvitermickej regulácia pri správnom návrhu zabezpečí rovnováhu medzi dodávaným tepelným príkonom do vykurovacieho priestoru a tepelnými stratami objektu. Pri ekvitermickej regulácii s korekciou na referenčnú teplotu možno navyše zabezpečiť kompenzáciu ostatných tepelných ziskov alebo strát vo vykurovacom priestore. Kvalitu ekvitermickej regulácie možno zlepšovať zohľadnením vonkajších poveternostných vplyvov, akými sú slnečné žiarenie, vietor, vlhkosť, a to priebežnou korekciou merného vonkajšej teploty v kladnom alebo zápornom smere. Túto korekciu možno realizovať manuálne na základe skúseností operátorom (kuričom) alebo automaticky na základe merania vonkajších



Obr.3 Ekvitermické krivky



Obr.4 Schéma ekvitermickej regulácie

vplyvov vhodnými senzormi žiarenia a vetra a použitím napr. neuro-fuzzy systémov s využitím princípov učenia. Podobne možno zohľadňovať vnútorné poruchy vo vykurovanom objekte. Značné úspory tepelnej energie možno získať realizáciou tzv. nočných, víkendových, resp. dlhodobých útlmov teploty vo vykurovaných priestoroch. Aj to možno dosiahnuť nastavením tzv. fiktívnej vonkajšej teploty ekvitermickej regulácie, resp. posuvom ekvitermickej krivky v kladnom smere.

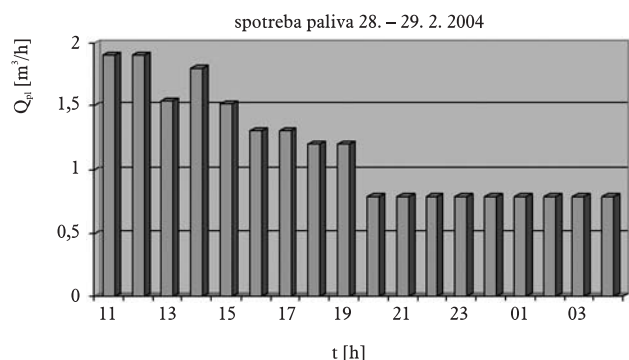
Ak označíme skutočnú vonkajšiu teplotu T_v^{sk} , nastavená hodnota vonkajšej teploty na ekvitermickom regulátore bude:

$$T_v = T_v^{sk} + (+) \text{ útlm} + (+) \text{ slnko} + (-) \text{ vietor} + (-) \text{ vlhkosť}.$$

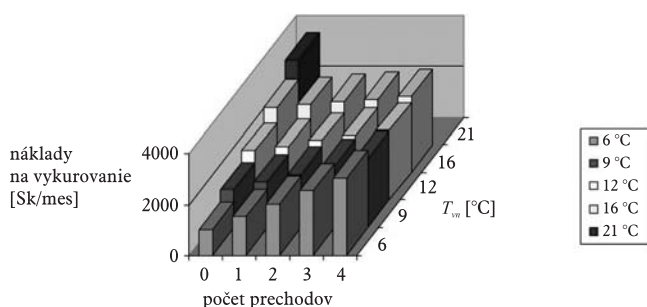
Súčet uvedených posunutí, tzv. bias zabezpečí zachovanie tepelnej pohody vo vykurovanom priestore napriek náhodným vonkajším vplyvom pri súčasnom splnení požiadavky na úsporu tepelnej energie pri vykurovaní. Zohľadnenie tepelnej kapacity vykurovaného objektu sa dosiahne zmenou strmosti ekvitermickej krivky. Strmosť ekvitermickej krivky by mala byť tým menšia, čím je objekt lepšie tepelne izolovaný a tiež čím väčší je pomer plochy vykurovacích telies a plochy vonkajších stien objektu. V prípade objektov s vysokým stupňom zateplenia, napr. s termofasádou nebude ekvitermickej regulácia najvhodnejším spôsobom regulácie teploty vykurovania budovy a bude možné uvažovať o alternatívnych spôsoboch regulácie, napr. s kompenzáciou tepelných ziskov vo vykurovacej sústave. Typická realizácia ekvitermickej regulácie je s využitím trojcestných, resp. štvorcestných zmenšovacích ventilov na miešanie vykurovacej a vratnej vody (obr. 4).

3. Dlhodobé teplotné útlmy v obytnej budove

Na analýzu nastavenia dlhodobých teplotných útlmov sa zvolil obytný dom využívaný na rekreačné účely, ktorý je v zimnom období temperovaný a navštevovaný 1 až 4-krát mesačne počas víkendov. Dom je vykurovaný závesným kotlom LAMBORGHINI



Obr.5 Spotreba paliva pri vykurovaní pre dlhodobé teplotné útlmy

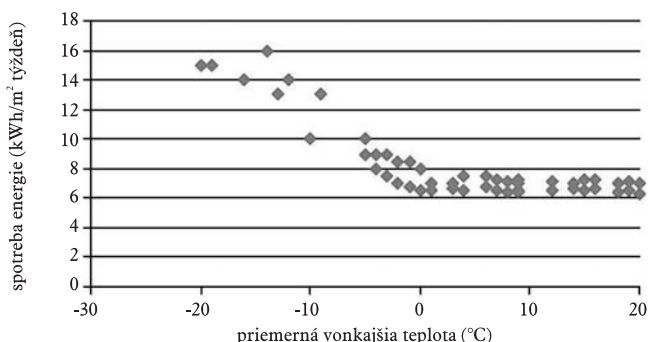


Obr.6 Graf mesačných nákladov na vykurovanie pre dlhodobé teplotné útlmy

p.p.	0	1	2	3	4
T_{vn}					
6	1027,8	1519,3	2039,7	2545,6	3051,6
9	1491,5	1800,6	2106,6	2414,0	2719,5
12	1955,2	2117,5	2354,0	2553,3	2752,7
16	2573,4	2679,7	2788,2	2892,2	2998,46
21	3346,2	—	—	—	—

Tab.1 Mesačné náklady na vykurovanie pri dlhodobých teplotných útlmoch

MCS-WTOP-TURBO na zemný plyn s tepelným výkonom maximálne 23,3 kW a minimálne 10,9 KW. Vykurovacia sústava ústredného kúrenia bola regulovaná dvojpolohovou reguláciou s využitím číslicového priestorového termostatu LANDI&STAEFA. Pri experimentoch sa dlhodobo sledovala teplota v referenčnej miestnosti, ako aj spotreba zemného plynu. Pre zjednodušený modelový príklad sa uvažovalo s vonkajšou teplotou $T_v = 0^\circ\text{C}$ a lineárnym nárastom tepelných strát, ktoré boli úmerné rozdielu vnútornej teploty $T_{vn} = 6, 9, 12, 16^\circ\text{C}$ a vonkajšej teploty T_v . Experimentálne sa sledovala spotreba plynu pri temperovaní budovy aj pri vykurovaní počas víkendov na teplotu 21°C . Počas mesiaca sa uvažovalo s 0, 1, 2, 3, 4 prechodmi z teploty temperovania na teplotu vykurovania. Spotreba plynu bola prepočítaná na finančné náklady na vykurovanie podľa aktuálnej ceny plynu v zimnom období roku 2004. Pribeh spotreby plynu pri prechode z teploty temperovania 12°C na teplotu 21°C je znázornený na obr. 5. V tab. 1 a na obr. 6 sú uvedené náklady na vykurovanie



Obr.7 Krivka ET

v závislosti od počtu prechodov 0, 1, 2, 3, 4. Z uvedených výsledkov vyplýva, že existujú optimálne teploty temperovania objektu v závislosti od počtu prechodov. Extrémne hodnoty v nákladoch na vykurovanie sú $\approx 1\,030$ Sk/mesiac pri temperovaní na 6°C bez prechodov a $\approx 3\,350$ Sk/mesiac pri trvalom vykurovaní objektu na 21°C . Pri troch prechodoch je optimálna teplota útlmu 9°C pri štyroch prechodoch 12°C . Pri znižovaní teploty okolia bude spotreba energie na vykurovanie narastať podľa tzv. krivky ET (obr. 7) a tým budú narastať aj finančné náklady na vykurovanie. Charakter závislosti spotreby od počtu prechodov však zostane zachovaný.

4. Nočné útlmy vykurovania v administratívnych a občianskych budovách

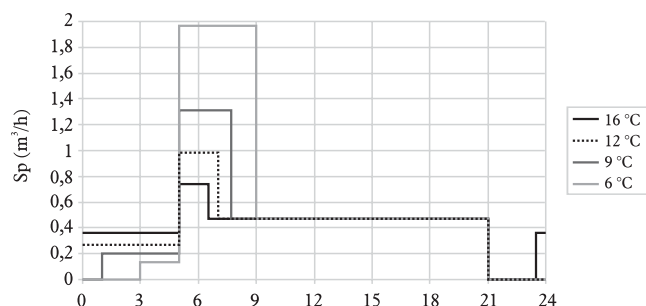
V prípade administratívnych budov je potreba dlhodobých útlmov opačná ako v prípade rekreačných objektov. Útlmy sú potrebné počas víkendov, ale tiež v počas nocí, keď vhodným nastavením teploty nočného útlmu možno dosiahnuť až 20 % zníženie nákladov na vykurovanie. Aj keď objekt analyzovaný v časti 3 nie je typickým príkladom na tieto účely, môže poslúžiť ako modelový príklad aj na hľadanie optimálnych nočných útlmov. Budeme opäť uvažovať, že tepelné straty objektu budú úmerné rozdielu vnútornej teploty v referenčnej miestnosti a teploty okolia a náklady na vykurovanie budú priamo závisieť od spotreby plynu v uvažovanom objekte. Uvažovalo sa s tromi alternatívami:

- 7x v týždni nočný útlm na $X^\circ\text{C}$ od 21.00 hod. do 5.00 hod.,
- 6x v týždni nočný útlm na $X^\circ\text{C}$ od 21.00 hod. do 5.00 hod., v nedeľu celý deň,
- 5x v týždni nočný útlm na $X^\circ\text{C}$ od 21.00 hod. do 5.00 hod., v nedeľu a sobotu celý deň.

Výsledky analýzy pre teplotné útlmy 6, 9, 12, 16 sú uvedené v tab. 2. Z výsledkov vyplýva, že pre teplotu okolia 0°C bola vo všetkých troch alternatívach optimálna teplota nočného útlmu 12°C . Pribeh spotreby plynu pre jednotlivé nočné útlmy sú uvedené na obr. 8.

Na záver treba poznamenať, že pri vykurovaní veľkých obytných budov, administratívnych a občianskych budov, keď sa spravidla používa ekvitermická regulácia, sú okrem nastaviteľných útlmov podľa požiadaviek používateľa aj ďalšie možnosti znižovania energetickej náročnosti budov. Je to napr. zohľadnenie poveternostných podmienok (vietor, slnko, vlhkosť) pri priebežnom ladení ekvitermickej regulácie.

Toto ladenie môže realizovať skúsený operátor (kurič) zavedením fiktívnych hodnôt teploty okolia v závislosti od uvedených fakto-



Obr.8 Spotreba paliva pri vykurovaní pre nočné teplotné útlmy

$T_v(^{\circ}\text{C})$	Temp	Alt.:1	Alt.:2	Alt.:3
6	1027,8	4105,5	3198,52	3287,87
9	1491,5	3181,42	2950,55	2735,42
12	1955,18	2976,73	2843,61	2710,49
16	2573,42	3007,54	2953,73	2900,02
21	3346,22			

Tab.2 Priebeh spotreby paliva pri vykurovaní pre nočné teplotné útlmy

rov alebo automatizovane použitím vhodných senzorov a posuvom alebo nakláňaním ekvitermických kriviek [3]. Ďalšou možnosťou je zohľadnenie vnútorných tepelných ziskov spôsobených napr. obsadením miestnosti. V neposlednom rade má na hospodárnosť pri riadení vykurovania administratívnych budov značný vplyv zabezpečenie prevádzky a údržby riadiacich systémov kvalifikovanou obsluhou.

Záver

V predložennom článku sú opísané dve najrozšírenejšie metódy regulácie vykurovacích procesov – dvojpohodová a ekvitermická regulácia. Uvedené sú základné teoretické princípy, ako aj výhody a nevýhody uvedených spôsobov regulácie. Ďalej sa uvádza postup pri optimalizácii nočných víkendových a dlhodobých teplotných útlmov pri vykurovaní, ktoré majú značný význam pri znižovaní energetickej náročnosti vykurovania. Výsledky, ktoré boli získané experimentálne na reálnom objekte vykurovania zemným plynom, kvantitatívne potvrdili predpoklady, že v závislosti od konkrétnych podmienok vykurovania možno optimalizovať hodnoty teplotných útlmov. Napriek tomu, že výsledky boli získané za určitých zjednodušujúcich predpokladov (pri jednej vonkajšej teplote), potvrdili skutočnosť a nevýhodnosť vypínania vykurovania, resp. nastavovania veľmi nízkych teplôt útlmov vykurovaného objektu alebo jeho častí z hľadiska v súčasnosti veľmi aktuálnej požiadavky znižovať finančné náklady na vykurovanie budov.

Literatúra

- [1] KACHAŇÁK, A.: Meranie a regulácia II – Základy regulácie. Bratislava: Ed. stredisko SVŠT, SjF SVŠT, 1978.
- [2] KACHAŇÁK, A.: Automatické riadenie II. Bratislava: Ed. stredisko SVŠT, SjF SVŠT 1987, 1990.
- [3] KACHAŇÁK, A., HOLIŠ, M.: Aplikácia hybridného neuro-fuzzy systému pre optimalizáciu kontinuálneho procesu. In: Automatizace, 7, 2002, s. 400 – 408.
- [4] PYTEL, J.: Riadenie vykurovania na báze ekvitermickej regulácie. In: AT&P journal, č. 3, 2004, s. 39 – 41.
- [5] RÁC, R.: Analýza vlastností ekvitermickej regulácie. Bakalárska práca, 2004, KAM SjF STU Bratislava.
- [6] DIENOVÁ, A.: Návrh dvojpohodovej regulácie. Bakalárska práca, 2004, KAM SjF STU Bratislava.

doc. Ing. Anton Kachaňák, CSc.
Bc. Richard Rác
Bc. Aneta Dienová

Katedra automatizácie a merania
Strojnícka fakulta STU Bratislava
Mýtna 36, 812 31 Bratislava 1
Tel.: 02/57 29 45 50
e-mail: kachanak@kam.vm.stuba.sk

54