

Efektívne riadenie zákuru

Takmer každá budova (v našich zemepisných šírkach) musí byť vykurovaná, pričom existuje mnoho prípadov, keď sa nevyžaduje nepretržitá prevádzka vykurovacieho systému, resp. nie vo všetky dni v týždni sú vykurované priestory využívané. Typickými predstaviteľmi takýchto budov sú školy, kancelárie, chaty a pod. Tu sa otvára priestor na riadenie a optimalizáciu vykurovania tak, aby sa počas nevyužívania priestorov minulo čo najmenej energie, pričom by sa dosiahli predpísané tepelné podmienky v čase, keď to je potrebné.

Chata vs. škola

Chatové a školské objekty sú typickými predstaviteľmi stavieb, ktorých vykurovacie systémy nemusia ísť nepretržite (počas vykurovacej sezóny). Víkendové využitie chaty vystrieda „voľný“ pracovný týždeň oproti presne opačnému režimu školy, t. j. využitia v pracovnom týždni a víkendového nevyužívania školských priestorov. Keďže tieto prechodné obdobia (medzi zapnutým a vypnutým vykurovaním) môžu výrazne ovplyvniť energetickú spotrebu, na mieste je otázka, ako efektívne riadiť zákur z hľadiska času aj výkonu vykurovacej sústavy.

Efektívne riadenie zákuru

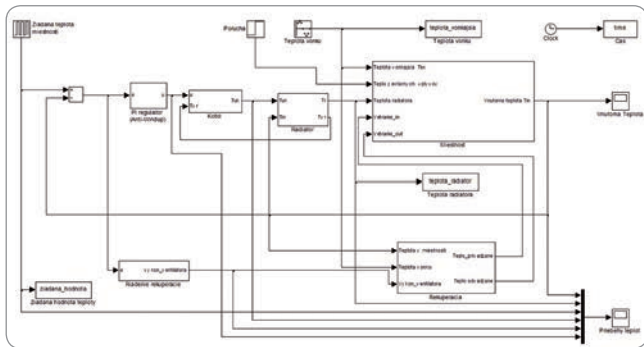
V zásade máme dve možnosti, ako zistiť efektívne riadenie zákuru, a to pozorovaním alebo počítačovou simuláciou. Mnohí z nás zo skúseností vedia, že ak chceme ísť v piatok na chatu, je dobré spustiť vykurovanie o deň skôr, pričom sa ukazuje, že nezáleží až tak na výkone VS, skôr na tom, ako dlho je spustená (pri rýchlom zákure sa prejaví vo väčšej miere asymetrické sálanie). Takéto pozorovanie však síce vypovedá niečo o dynamike vykurovania objektu, ale ak sa bavíme o optimálnosti alebo efektívite, na rad prichádza počítačová simulácia [1, 2].

Tvorba modelu vykurovacej sústavy – škola

Ako demonštračný príklad sme zvolili riadenie vykurovacieho systému školy v období medzi časom využívania a temperovania, t. j. od piatku poobedia do pondelka rána. Na to (modelovanie pomocou počítačovej simulácie) treba vytvoriť model reprezentujúci reálny objekt. Bloková schéma modelovaného systému vytvorená v prostredí Simulink pozostáva z viacerých blokov a subsystémov, ktoré sú medzi sebou prepojené a predstavujú jeden celistvý systém vykurovacej sústavy.

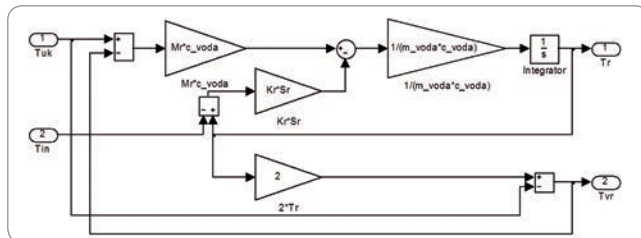
Bloky systému sú zobrazené na obr. 1:

- Kotel,
- vykurovacie teleso – radiátor,
- miestnosť (rozmery, fyzikálne vlastnosti atď.),
- systém rekuperácie,
- PI regulátor (s Anti-Windupom).



Obr. 1 Bloková schéma (Simulink) – bloky vykurovacej sústavy (rekuperácia nie je zahrnutá do procesu riadenia VS, resp. v skúmanom prípade je vypnutá).

Každý blok predstavuje zložitejšiu štruktúru, ktorej opis by presiahol rámec článku, preto sa im nebudeme bližšie venovať. Na ilustráciu načrtneme postup vytvorenia vnútornej štruktúry bloku radiátora, znázornenej na obr. 2.



Obr. 2 Vnútorňa štruktúra bloku radiátora

m_{voda} – hmotnosť vody v radiátore [kg], c_{voda} – špecifické merné teplo vody [$Jkg^{-1}K^{-1}$], T_r – teplota vody v radiátore [K], M – hmotnostný prietok vody v radiátore [kgs^{-1}], T_{uk} – teplota vody vstupujúcej do radiátora [K], T_{vr} – teplota vody vystupujúcej z radiátora [K], T_{in} – teplota v miestnosti [K], K_r – konštanta radiátora, koeficient prenosu tepla medzi dvoma materiálmi s rozdielnou teplotou, vzduch – kov (miestnosť – radiátor) [$Js^{-1}m^2K^{-1}$], S_r – teplo-výmenná plocha radiátora [m^2].

Tento blok reprezentuje jednoduchú diferenciálnu rovnicu opisujúcu radiátor.

$$m_{voda}c_{voda} \frac{dT_r}{dt} = 2M_r c_{voda} T_{uk} - M_r c_{voda} 2T_r - K_r S_r T_r + K_r S_r T_{in}$$

Laplaceova transformácia

$$T_r(s)(2M_r c_{voda} + K_r S_r + m_{voda}c_{voda}s) = 2M_r c_{voda} T_{uk}(s) + K_r S_r T_{in}(s)$$

Jednoduchým odvodením dostávame vzťah pre prenos radiátora a jeho časovú konštantu:

$$T_r(s) = \frac{2M_r c_{voda} T_{uk}(s) + K_r S_r T_{in}(s)}{2M_r c_{voda} + K_r S_r + m_{voda}c_{voda}s} \quad \tau_r = \frac{m_{voda}c_{voda}}{2M_r c_{voda} + K_r S_r}$$

Analogickým postupom boli vytvorené všetky ostatné funkčné prvky vykurovacej sústavy.

Model vs. realita

Každý model tvorí zjednodušenú (a hlavne v prvej fáze nepresnú) verziu reality, preto je vždy dôležité verifikovať vytvorený model, t. j. overiť, či simulačné výsledky reflektujú reálne namerané hodnoty. Verifikácia sa vykonala s reálne nameranými dátami získanými zo ZŠ v Hlohovci a zistila sa najväčšia odchýlka 1,9 °C, teda model zatiaľ nespĺňa požadovanú presnosť, preto musí byť nakalibrovaný. Modifikáciu parametrov modelu (kalibrovanie) sme vykonali pomocou genetického algoritmu (rozsah génov $\pm 5\%$ z pôvodných hodnôt). Po tejto adaptácii koeficientov modelu a následnej verifikácii pomocou druhého súboru verifikačných dát vykazoval model najväčšiu chybu 0,3 °C, čo je na účely simulácie zákuru dostatočné.

Riadenie zákuru

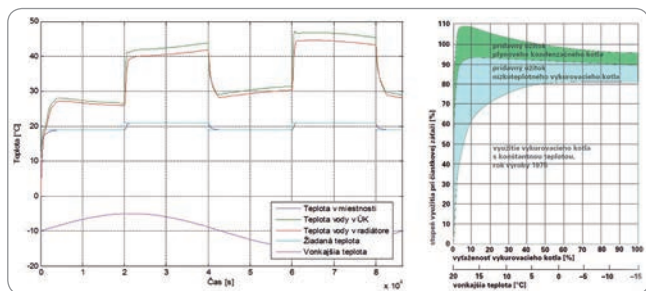
Vytvorený model vykurovania reprezentuje reálny vykurovací systém, t. j. na základe nastavenia výkonu radiátora (vykurovacej sústavy) a vonkajšej teploty vieme určiť vnútornú teplotu v miestnosti. My však potrebujeme zistiť priebeh teploty vykurovacej vody v priebehu cca 66 hodín (piatok 12:00 – pondelok 7:00) tak, aby v pondelok o 7.00 bolo v miestnosti 21 °C pri požiadavke minimálnej spotreby energie. Keďže neexistuje žiadna deterministická metóda, ktorá by našla zmienené riešenie, rozhodli sme sa využiť výhody evolučných metód, konkrétne sme ako pri kalibrácii modelu implementovali genetický algoritmus, ktorý daný problém vyrieši.

Genetický algoritmus

Princípom práce genetického algoritmu^[3] je postupná tvorba rôznych riešení daného problému. Pri riešení sa uchováva tzv. populácia, ktorej každý jedinec predstavuje jedno riešenie daného problému. Ako populácia prebieha evolúciou, riešenia sa zlepšujú. Typicky je na začiatku GA (v prvej generácii) populácia zložená z úplne náhodných členov. Pri prechode do novej generácie je pre každého jedinca vypočítaná tzv. fitness, ktorá vyjadruje kvalitu riešenia reprezentovaného týmto jedincom. Podľa tejto kvality sa rôznymi spôsobmi (stochastickým, náhodným...) vyberajú jedinci, ktorí sú modifikovaní (pomocou mutácie a kríženia), čím vznikne nová populácia. Tento postup sa iteratívne opakuje, čím sa kvalita riešenia v populácii postupne vylepšuje. Algoritmus sa obvykle zastaví pri dosiahnutí požadovanej kvality riešenia, prípadne po určenom čase.

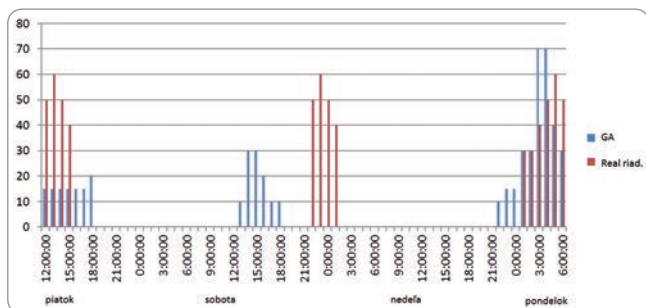
Vytvorenie genetického algoritmu

Genetickým algoritmom sme sa rozhodli nájsť postupnosť teplôt vykurovacích telies v miestnosti, resp. časový a výkonový priebeh zdroja tepla – kotla. Účelová funkcia genetického algoritmu teda predstavuje minimalizačnú úlohu spotreby energie pri uvažovaní účinnosti kotla pri rôznych výkonových stupňoch (teplotách kotlovej vody). Táto funkcia je multikriteriálna, t. j. obsahuje tri zložky. Prvá reprezentuje spotrebu energie, čím sa kvalita riešenia v populácii predpísanej teploty (v pondelok ráno) a posledná zložka sleduje priebeh temperovania, aby teplota v miestnosti nepoklesla pod predpísanú teplotu.



Obr. 3 Priebeh jednotlivých teplôt v miestnosti – verifikácia (vľavo), stupne využitia pri rôznom zaťažení kotla (pri starom, nízkoteplotnom a kondenzačnom kotle (vpravo)

Uvažujeme o hodinovom minimálnom intervale, t. j. kotol je zapnutý minimálne jednu hodinu. Z tohto predpokladu vyplýva štruktúra jedinca genetického algoritmu. Keďže hľadáme priebeh výkonu kotla v čase 66 hodín, bude mať jeden jedinec GA 66 génov. Každý gén môže nadobúdať hodnoty 0 až 100, čo predstavuje výkon kotla. V našom algoritme bola použitá mutácia (náhodná a aditívna, miera 0,1) aj kríženie (dvojbodové). Genetický algoritmus bol ukončený po 10 000 generáciách. Suboptimálne riešenie je znázornené na obr. 4.



Obr. 4 Porovnanie výkonu vykurovacej sústavy riešeni genetickým algoritmom a reálnym suboptimálnym riešením riadenia časovej optimalizácie vykurovania

Energetické úspory

Porovnanie oboch riešení temperovania a zákuru (obr. 4) vykazuje úsporu energií na úrovni 17 %. Treba však zdôrazniť, že reálne riešenie použité v škole už predstavuje akési „čistočne optimalizované“ riešenie skúseného kotolníka. Oproti „tvrdému“ zákuru

tak riadenie zákuru optimalizovaného genetickým algoritmom môže vykazovať omnoho vyššiu úsporu energií.

Optimálne riešenie a jeho úskalia

Veľké úspory spojené s takmer optimálnym riadením zákuru a temperovania sú pekne demonštrované na zmienenom príklade, avšak jedným dychom treba hneď zdôrazniť, že tento prístup má aj svoje veľké úskalia. V našom príklade sme uvažovali o symetrickej teplotnej vlne (vonkajšej teploty $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$), čo nám uľahčilo výpočet, keďže sme systém v okolí tohto pracovného bodu mohli linearizovať; inými slovami pre celý rozsah zimných teplôt by sme museli vytvoriť aspoň ďalšie štyri riešenia (výpočtový krok $5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ďalšie zjednodušenie sa týka premenlivého počasia v jednotlivých dňoch (napr. priemerná denná teplota v piatok $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$, sobotu $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, nedeľu $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$), čo rozširuje dimenziu riešení o jeden rád. Pre efektívne riadenie zákuru a temperovania je preto nevyhnutné vytvoriť maticu možných scenárov riadení vykurovacej sústavy. Keďže výpočet prezentovaného (relatívne jednoduchého) riešenia trvá rádovo desiatky hodín, proces vytvorenia všetkých scenárov môže trvať niekoľko týždňov. Výhodou však je, že sa tento výpočet vykoná len raz. Rovnako treba zdôrazniť, že tento prístup sa dá aplikovať len na existujúce budovy, z ktorých môžeme získať dáta na verifikáciu modelu, resp. nemožno vytvoriť riadiaci systém v projektovej fáze stavby.

Záver

Na uvedenom príklade simulácie riadenia zákuru, resp. optimalizácie vykurovania v čase nevyužívania objektu, boli demonštrované možnosti použitia evolučných metód pre danú oblasť. Pre daný reálny systém vykazuje nájdené riešenie úspory približne 17 %, pričom referenčné riešenie vykurovania je založené na časovom scenári riadenia vykurovacej sústavy s preddefinovanými hodnotami riadenia zákuru a automatického riadenia temperovania. Obdobný prístup možno využiť na simuláciu a následné nájdenie optimálneho scenára riadenia vykurovania pre všetky objekty, kde možno časové riadenie vykurovania použiť. Experimenty ukazujú, že reálna úspora oproti bežnému temperovaniu a zákuru môže dosiahnuť až 31 % z vykurovacích nákladov.

Literatúra

- [1] Števo, Stanislav – Dorner, Jozef: Stupne optimalizace vytápění. (<http://vetrani.tzb-info.cz/rekuperace-tepla/8302-stupne-optimalizace-vytapeni>). In: TZB-info, február 2012. ISSN 1801-4399.
- [2] Števo, Stanislav: Riadenie zákuru – zdroj energetických úspor. In: Facility management 2012. Zborník prednášok z 10. konferencie so zahraničnou účasťou. Bratislava, 26. – 27. 9. 2012. Bratislava: Slovenská spoločnosť pre techniku prostredia, 2012. s. 116. ISBN 978-80-89216-49-9.
- [3] Genetic algorithm. From Wikipedia, the free encyclopedia, september 2012, http://en.wikipedia.org/wiki/Genetic_algorithm.
- [4] Števo, Stanislav: Optimalizácia vykurovania podľa vonkajších teplotných podmienok. In: Technical Computing Prague 2009: 17th Annual Conference Proceedings. Prague, Czech Republic, 19. 11. 2009. Prague: Humusoft, Ltd., 2009. CD-Rom. ISBN 978-80-7080-733-0.

Ing. Stanislav Števo, PhD.

stanislav.stevo@stuba.sk
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky