

Ing. Jan ŠIROKÝ, Ph.D.¹⁾
Ing. Jiří CIGLER, Ph.D.²⁾

¹⁾ Energocentrum Plus, s.r.o.

²⁾ Feramat Cybernetics, s. r. o.

Automatizovaná kontrola režimů vytápění na základě provozních dat

Automated Control of Heating Modes Based on Operational Data

Recenzent
prof. Ing. Jiří Bašta, Ph.D.

Článek představuje přístup k optimalizaci provozu technického zařízení budov (TZB) na základě analýzy měřených provozních dat. V posledních letech je zřejmý nastupující trend nástrojů a služeb zaměřených na analýzu dat TZB. Nejedná se o klasické dispečerské systémy (SCADA), ale o nadstavby, které analyzují data zaznamenaná systémy měření a regulace. V článku je tento přístup k optimalizaci provozu TZB demonstrován na konkrétních příkladech. Pozornost je zaměřena na analýzu režimů vytápění. Pro posouzení režimů vytápění jsou využity principy prediktivního řízení s modelem. Výstupy jsou ilustrovány na příkladu dvou reálných budov.

Klíčová slova: technická zařízení budov, analýza naměřených dat, optimalizace provozu, prediktivní řízení

The article presents an approach to optimizing the operation of a building heating ventilation and air conditioning systems (so-called HVAC) based on an analysis of measured operational data. In recent years, there is evidently emerging a trend of tools and services focused on the analysis of HVAC data. These are not classical supervisory (SCADA), but extensions, which analyze data recorded by measurement and control systems. The article demonstrates this approach to optimizing HVAC operation on specific examples. Attention is focused on the analysis of heating regimes. The principles of predictive control with a model are used to assess heating modes. The findings are demonstrated on the example of two real buildings.

Keywords: HVAC, analysis of measured data, operation optimization, predictive control

ÚVOD

Chybným způsobem provozu TZB je vyplýváno až 30 % spotřebované energie [1]. Klasickým příkladem je provozování technologií v době, kdy budova není využívána (obsluha je spokojena, neboť si „nikdo nestěžuje“). Zmíněná vyplývaná energie bývá často velmi dlouhou dobu neodhalena. Příčinou tohoto stavu je jednak čím dál větší komplexnost technologií TZB a jejich automatizace, jednak tlak na snižování personálních nákladů na obslužný personál. Často pozorovaným důsledkem je, že technologie jsou pouze udržovány v provozuschopném stavu bez snahy o optimalizaci provozu.

Základem pro optimalizaci provozu je důsledné ukládání provozních dat a následná práce s nimi. Pro větší množství budov je ale manuální kontrola provozu velmi zdoluhavá, případně až nereálná, a to především z časových důvodů. Řešením je automatizace provádění kontrol způsobu provozu TZB. Tento koncept má významnou přidanou hodnotu zejména pro síťové zákazníky, kteří vlastní větší množství budov. Díky tomu je nastaveno transparentní prostředí, kdy mají všichni zúčastnění (provozovatel budovy, majitel budovy, energetik...) trvalou kontrolu nad způsobem provozu TZB.

Detekce režimů vytápění

Správné nastavení režimů vytápění, zejména útlumových režimů, je jednou z klíčových otázek v oboru TZB a předmětem mnoha debat. Předkládaný postup si neklade za cíl podat vyčerpávající odpověď na tuto komplexní otázku. Cílem je umět detekovat nesprávné nastavení útlumů, odhadovat možné úspory energií a dát doporučení pro optimalizaci režimů vytápění. Výstupem pro zákazníka je pak přehled nalezených problémů seřazený dle odhadované potenciální úspory množství dodané energie. Report může být generován i na denní bázi. Díky tomu může mít zákazník i se stovkami budov velmi detailní přehled o způsobu provozu svých budov (v angličtině bývá tento typ dohledu provozu označován jako „continuous commissioning“).

Při ladění nastavení systému vytápění si technik-programátor klade (nebo by si měl klást) tyto otázky:

- ☐ Jsou režimy správně nastaveny?
- ☐ Pokud nejsou správně nastaveny, kolik energie lze ušetřit lepším nastavením režimů vytápění?
- ☐ Jaká je optimální útlumová teplota, při které je dosaženo největší úspory energií?
- ☐ S jakým předstihem má být spuštěn systém vytápění, aby bylo dosaženo požadovaných parametrů?

Představujeme přístup, kdy jsou tyto otázky zodpovězeny na základě analýzy měřených dat, založený na identifikaci zjednodušeného matematického modelu systému vytápění. S využitím modelu jsou prováděny simulace, díky nimž se získávají požadované parametry pro každý otopný okruh.

V článku se dále zaměřujeme na požadovanou teplotu vzduchu ve vnitřním prostoru. V případě ekvitermní regulace je nutné tyto požadavky přenést do nastavení ekvitermních křivek. Toto téma je podrobně popsáno v [2], proto se jím v článku nezabýváme a soustředujeme pozornost pouze na nastavení požadované teploty vnitřního vzduchu.

V textu jsou použity příklady založené na reálných datech ze dvou budov, označených A a B.

MODEL

Při modelování dynamiky systému vytápění vycházíme z některých zjednodušení. Je nutné mít na paměti, že náročnost přípravy musí odpovídat možnému úspoře energií a závisí na tom, jaké informace je reálně možné o provozovaných budovách získat. Není proto možné předpokládat například detailní znalost skladby vnějších stěn pro detailní výpočet tepelných ztrát budovy. Při tvorbě modelu jsou využita pouze měřená data. Dynamika systému vytápění je popsána diskretizovanou lineár-

ní diferenciální rovnici popisující změnu teploty vnitřního vzduchu jako funkci teploty vnitřního vzduchu, teploty venkovního vzduchu a množství dodaného tepla.

Ve většině případů není k dispozici měření množství dodaného tepla s vhodnou periodou záznamu (maximálně 15 minut). Značná pozornost byla proto věnována otázce využití údajů o teplotě otopné vody a dalších běžně měřených veličin k odhadu množství dodané energie. Jedná se o využití tzv. virtuálního senzoru, kdy je hodnota veličiny, která není přímo měřena, odhadnuta na základě jiných měřených veličin. Díky tomu je možné v některých případech nahradit přímé měření kalorimetrem měřením teplot otopné vody (přívod, zpátečka) a chodu čerpadla. Je zřejmé, že se tím snižuje přesnost výpočtu, zejména potenciální úspory.

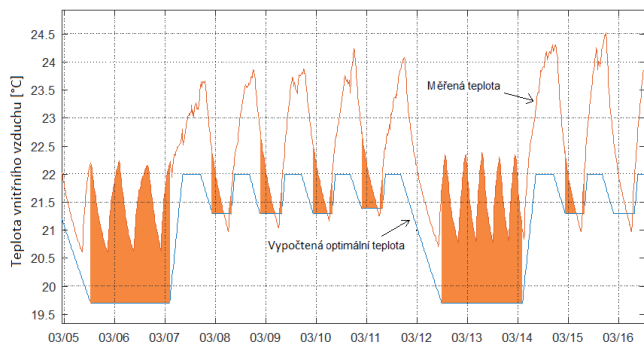
Odhad potenciální úspory

Díky znalosti matematického modelu je možné porovnat způsob provozování dle historických dat s numerickou simulací. V případě simulace je formulována optimalizační úloha, která je vyřešena pomocí numerického řešitele. Jedná se o přístup, jenž bývá označován jako prediktivní řízení s modelem (model predictive control – MPC) [3]. Díky tomu je získán průběh teplot vnitřního vzduchu, při kterém jsou respektovány veškeré požadavky na vytvoření požadovaného stavu vnitřního prostředí, a zároveň je minimalizováno množství dodané energie. Tento optimální průběh je poté porovnán s měřenými historickými daty.

Při porovnání je použit zjednodušující předpoklad, že množství energie nutné pro návrat z útlumové teploty vnitřního vzduchu na provozní (denní) teplotu vnitřního vzduchu není větší než množství energie, které bylo ušetřeno po dobu, kdy teplota vnitřního vzduchu klesala na útlumovou teplotu. Na základě tohoto předpokladu je úspora počítána dle spotřeby energie pro udržení dané útlumové teploty vzduchu. Postup bude ilustrován na příkladu.

Uvažujme, že je při teplotě venkovního vzduchu 4 °C realizován noční útlum na vnitřní teplotu vzduchu 20 °C. Dle MPC simulace je spočítáno, že optimální teplota vnitřního vzduchu při nočním útlumu (dále útlumová teplota) pro danou budovu je 18 °C (viz dále). Tím se sníží rozdíl mezi teplotou venkovního a vnitřního vzduchu z 16 K na 14 K. Množství energie nutné pro kompenzování tepelných ztrát je přímo úměrné rozdílu teploty venkovního a vnitřního vzduchu. Díky tomu lze očekávat úsporu 12,5 % dodaného tepla po dobu, kdy je udržována útlumová teplota vnitřního vzduchu 18 °C. Pokud bude dosahováno útlumové teploty vzduchu 10 hodin denně, představuje to 42 % času z celého týdne. Výsledná očekávaná úspora je tak 5,2 %.

Princip výpočtu potenciální úspory je zachycen také na obr. 1, kde je znázorněn trochu komplikovanější příklad s reálnými daty než ve zjed-



Obr. 1 Ukázka porovnání měřené a vypočítané optimální teploty vnitřního vzduchu pro budovu B; oranžově vyplněná část indikuje princip výpočtu potenciální úspory

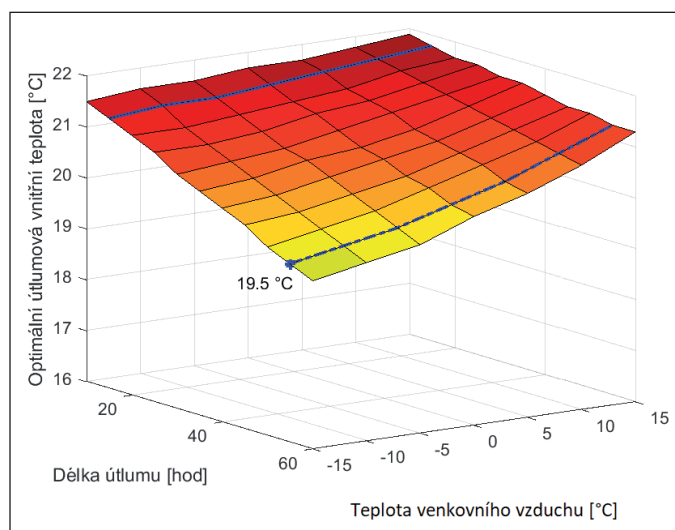
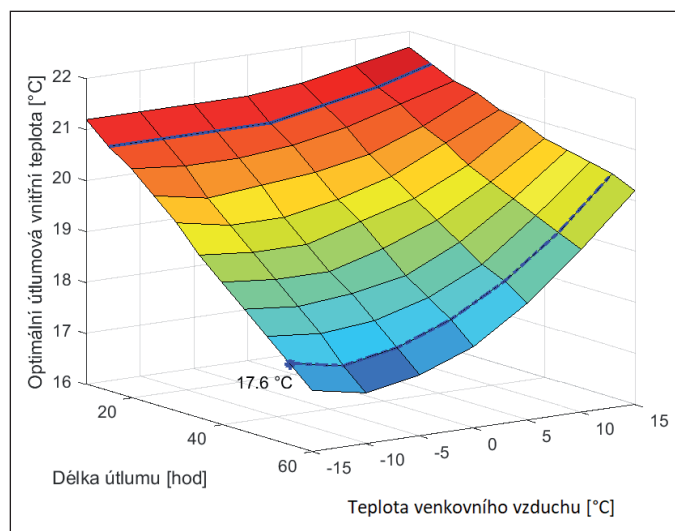
Fig. 1 Sample comparison of measured and calculated optimal indoor air temperature for building B; the orange-filled section indicates the principle of potential savings calculation

nodušeném příkladu popsaném výše. Je vidět, že úspora je počítána pouze z části, kdy je dle modelu dosažena požadovaná útlumová teplota (barevně vyplněná část).

Z obrázku je patrné, že o víkendech je měřen pouze malý útlum teploty vnitřního vzduchu. Dle modelu by o víkendu měla být teplota vnitřního vzduchu o přibližně 1,5 K nižší. Během týdne je útlumový režim spouštěn zbytečně pozdě, bylo by možné přejít do útlumového režimu o několik hodin dříve. Pokud je spočítaná potenciální úspora pro majitele nebo provozovatele budovy ekonomicky zajímavá, posouváme se k dalšímu kroku; tím je vlastní optimalizace režimů vytápění.

Optimální útlumová teplota

S využitím matematického modelu je proveden výpočet optimální útlumové teploty vnitřního vzduchu pro různé teploty venkovního vzduchu



Obr. 2 Optimální útlumová teplota vnitřního vzduchu v závislosti na teplotě venkovního vzduchu a době útlumu: budova A (nahoru), budova B (dole); modrá plná čára značí průběh optimálních útlumových teplot pro noční útlum (útlum po dobu 15 hodin), zatímco modrá čerchovaná čára značí průběh optimálních útlumových teplot pro víkendový útlum (55 hodin); v rámci lepší čitelnosti je explicitně uvedena doporučená útlumová víkendová teplota vnitřního vzduchu pro případ, kdy je teplota venkovního vzduchu rovna -15 °C

Fig. 2 Optimal setback temperature of indoor air depending on outside air temperature and damping time: building A (up), building B (bottom); the blue full line indicates the course of optimal damping temperatures at night (damping for 15 hours), while the blue dashed line indicates the course of optimal setback temperatures for weekend damping (55 hours); in the context of better readability, the recommended damping weekend indoor air temperature is explicitly stated for the outdoor air temperature is -15 °C

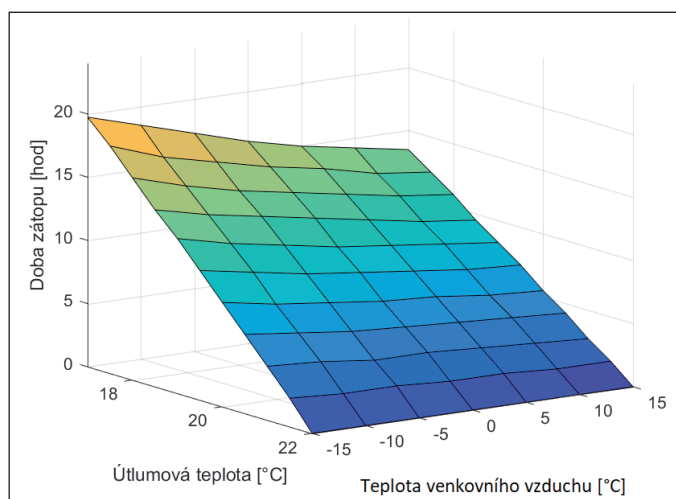
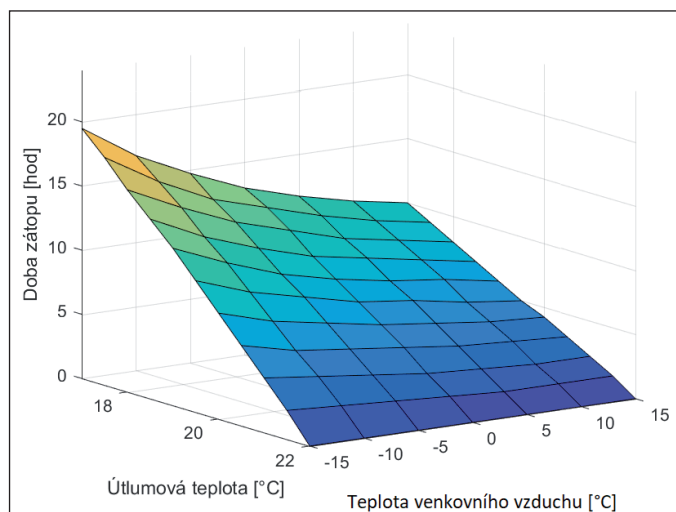
a délky útlumu. Je zřejmé, že optimální útlumová teplota vzduchu během nočního útlumu bude jiná než optimální víkendová útlumová teplota vzduchu. Tomu odpovídá i dobrá praxe programování systémů měření a regulace, kdy jsou tyto dva útlumové režimy rozlišovány při definici časového programu vytápění.

Pro každou kombinaci teploty venkovního vzduchu a délky útlumu je pomocí MPC vypočítána optimální útlumová teplota vnitřního vzduchu. Výstup pro dvě demonstrační budovy je zachycen na obr. 2.

Na obr. 2 je u budovy A (horní graf) vidět, že jsou doporučovány nižší teploty vnitřního vzduchu než v případě budovy B (spodní graf). Zajímavý je zejména víkendový útlum u budovy A (čerchovaná čára), kdy se snižující se teplotou venkovního vzduchu se snižují i doporučené teploty vnitřního vzduchu až do $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ teploty venkovního vzduchu. Pro velké mrazy ($-15\text{ }^{\circ}\text{C}$) je doporučována o něco vyšší útlumová teplota vzduchu, jelikož návrat z útlumu na komfortní teplotu trvá velmi dlouho; tím je úsek, kdy je udržována útlumová teplota vzduchu, kratší a jednoznačně dochází k úspoře. V případě budovy B je vztah jednodušší a doporučená útlumová teplota vnitřního vzduchu se téměř lineárně snižuje se snižující se teplotou venkovního vzduchu a celkově je doporučená útlumová teplota vyšší než v případě budovy A.

Optimální doba zátoku

Pro zajištění požadovaných parametrů tepelného stavu prostředí po



Obr. 3 Očekávaná doba zátoku v závislosti na teplotě venkovního vzduchu a dosažené útlumové teplotě vnitřního vzduchu: budova A (nahore), budova B (dole)

Fig. 3 Expected heat-up time depending on the outside air temperature and achieved setback temperature of indoor air: building A (up), building B (bottom)

celou dobu využívání objektu je klíčové správné načasování začátku vytápění. Pro jeho určení je opět využit matematický model, kdy je pro kombinace teploty venkovního vzduchu a útlumové teploty vnitřního vzduchu vypočítána doba předstihu začátku vytápění.

Na obr. 3 je vidět, že při teplotě venkovního vzduchu $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ je doba zátoku téměř shodná pro obě budovy. V případě budovy A (horní graf) se výrazně snižuje doba zátoku s rostoucí teplotou venkovního vzduchu. V případě budovy B je závislost na teplotě venkovního vzduchu méně výrazná.

Způsob úpravy regulačního algoritmu

Jedna z možností, jak přenést výsledky výše popsané analýzy, je nasazení MPC, který bude počítat optimální nastavení otopného systému online (viz [3]). V mnoha případech je nasazení MPC neúměrně náročné v porovnání s potenciální úsporou, a proto stručně představíme i jednodušší aplikovatelnou metodiku. Ta je založena na odvození parametrů nastavení režimů vytápění, které jsou přeneseny do řídicího algoritmu. Jednou z možností je, že je plocha v grafech výše prezentovaných popsána jako nakloněná rovina, tudíž lineární funkce dvou parametrů. Například požadovaná doba zátoku je tak spočítána jako lineární funkce teploty venkovního vzduchu a aktuální teploty vnitřního vzduchu. Většinou tento postup vyžaduje pouze drobnou úpravu řídicí logiky ve stávajícím regulátoru.

ZÁVĚR

V článku byl prezentován inovativní přístup k analýze provozu TZB, kdy hlavní roli hraje analýza měřených dat. Díky automatizaci je možné analýzu provádět plošně na širokém portfoliu budov. Expert pak řeší pouze automaticky detekované problémy. Tím se stává dohled nad provozem TZB velmi efektivním a systematickým. Největší přidanou hodnotu má tento postup u rozsáhlých systémů TZB nebo většího množství budov, kdy je pravidelná kontrola režimů expertem zdlouhavá, nebo dokonce nereálná.

Režimy vytápění jsou analyzovány na základě dynamického modelu identifikovaného z měřených provozních dat. Pro každý otopný okruh je identifikován dynamický model, který postihuje hlavní charakteristiky dané otopné soustavy. Na základě modelu jsou poté provedeny simulace, které umožní odhadnout potenciální úsporu energií, případně rovnou podávají doporučení pro nastavení řídicího algoritmu vytápění.

Je ovšem nutné mít na paměti, že výstup je tak kvalitní, jak jsou kvalitní vstupní data. Pokud je měření nevěrohodné (například je-li senzor vnitřní teploty vzduchu chybně umístěn nad kancelářskou technikou či obecně tam, kde na něj působí tepelné zisky), pak jsou i výsledky provedené analýzy nevěrohodné. Proto je nutným předpokladem pro úspěšné nasazení prezentované metodiky dobře navržený, instalovaný a udržovaný systém měření a regulace, zejména měření teplot.

Kontakt na autory: jan.siroky@energocentrum.cz, cigler@feramat.com

Použité zdroje:

- [1] Report Energy Star: Building. Bottom Line. World [online]. [citováno 27. 2. 2017]. Dostupné z: https://www.energystar.gov/ia/partners/publications/pubdocs/C+I_brochure.pdf
- [2] HAVLÍK, I. Ekvitermní regulace a přerušované vytápění. *Topenářství a instalace*. 2007, č. 7, str. 28–35.
- [3] CIGLER, J., ŠIROKÝ, J. Zkušenosti s nasazováním prediktivní regulace pro energeticky hospodárné provozování budov. *Vytápění, větrání, instalace*. 2014, č. 3, str. 102–106.