

Ing. Jan ŠIROKÝ,
Ing. Jakub KUBEČEK,
Ing. Petr KUDERA
Energocentrum Plus, s.r.o.

Vyhodnocení úspor dosažených prediktivním řízením stropního vytápění Crittall

Assessment of Savings Achieved by Predictive Control of Crittall Heating

Recenzent
Prof. Ing. Karel Hemzal, CSc.

Příspěvek uvádí metodu prediktivního řízení stropního vytápění. Zhodnocením příznivých výsledků poukazuje na přednosti prediktivního řízení zejména z hlediska dosažitelných úspor spotřeby tepla.

Klíčová slova: vytápění, Crittall, regulace, prediktivní řízení, spotřeba energie

Authors state the method of the predictive control of the ceiling heating in their contribution. They refer to priorities of the predictive control, in particular from the viewpoint of the heat consumption achievable savings, according to the evaluation of positive results.

Key words: heating, Crittall, regulation, predictive control, energy consumption

Celospolečenská poptávka po úsporách energií obrací pozornost k zapojení pokročilých řídicích algoritmů při provozování budov. Cílem tohoto článku je představení možností úspory energií prediktivním regulátorem a zhodnocení výsledků dosažených při pilotní aplikaci na budově ČVUT v Praze Dejvicích.

PREDIKTIVNÍ ŘÍZENÍ

Prediktivní regulátor využívá termodynamický model budovy a předpovědi počasí. Díky tomu je možné předpovídat vývoj vnitřních teplot v krátkodobém horizontu a na základě toho hledat nastavení parametrů regulace tak, aby byly splněny požadavky na hodnoty vnitřních teplot a přitom byla minimalizována spotřeba energie.

Jádrum algoritmu prediktivního řízení je řešení optimalizační úlohy s daným kritériem optimality a modelem procesu. Kritéria optimality jsou volena podle konkrétní řešené úlohy. V průmyslu to typicky bývá požadavek na maximalizaci objemu výroby a zisku, minimalizaci vstupních nákladů a množství vedlejších produktů apod. V případě vytápění budovy je to dodržení požadovaných vnitřních teplot a minimalizace energie spotřebované k vytápění.

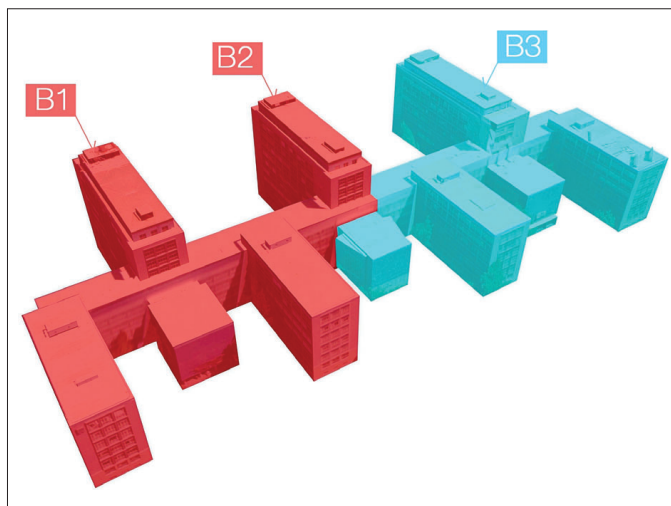
Strategie prediktivního řízení nehledá pouze akční zásah pro následující periodu vzorkování jako u jiných metod, ale hledá se celá optimální posloupnost zásahů pro daný horizont predikce. Nalezená optimální posloupnost akčních zásahů by mohla být postupně použita v časovém intervalu daným horizontem predikce. Po zavedení všech vypočítaných akčních zásahů pro celý daný časový interval by se našla nová posloupnost. Takový přístup však není praktický. Představuje řízení v otevřené smyčce, kdy nemohou být brány v úvahu, a tedy ani eliminovány poruchové veličiny působící na systém v jednotlivých periodách vzorkování. Tento nedostatek je odstraněn zavedením zpětné vazby prostřednictvím klouzavého horizontu. Při použití klouzavého horizontu se z celé vypočítané optimální posloupnosti použije pouze první akční zásah a v následující periodě vzorkování se na základě nového měření vypočítá nová posloupnost. Podrobnosti o návrhu prediktivního regulátoru lze nalézt například v [1, 2, 3, 4]. Dále se soustředíme na pilotní aplikaci v Praze Dejvicích.

Popis budovy

Budova se nachází v Praze v Technické ulici č. p. 2. Jde o budovu Fakulty strojní a Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze Dejvicích. Je rozdělenou na několik samostatných bloků. Konkrétně se jedná o tři osmipatrové bloky (B1, B1 a B3) a čtyři čtyřpatrové bloky. Toto uspořádání umožňuje porovná-



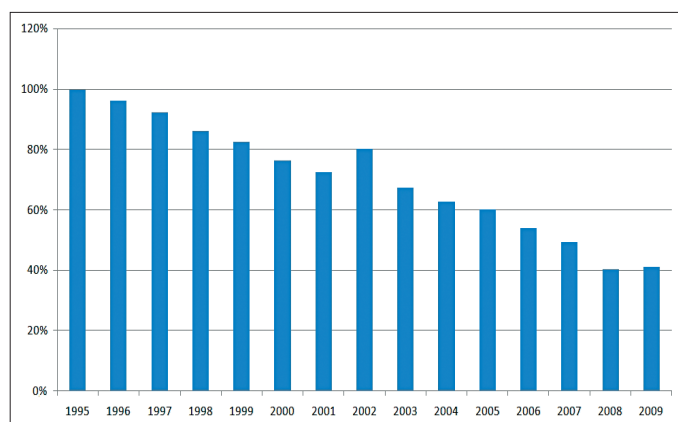
Obr. 1 Budova ČVUT v Praze



Obr. 2 Model budovy ČVUT v Praze Dejvicích

ní různých řídicích strategií. Část budovy byla zateplena, jak je zobrazeno na následujícím obrázku (zateplená část je vyznačena červeně). Tudíž je možné vyhodnocovat i vliv zateplení v závislosti na různých řídicích strategiích.

Následující graf zachycuje spotřebu tepla budovy Fakulty strojní a Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze Dejvicích v porovnání se spotřebou v roce 1995. Úspory v letech 1995 až 2004 byly dosaženy postupným zaváděním automatizace a přechodu z parního na teplovodní vytápění. V letech 2005 až 2007 došlo k postupnému zateplení pláště části monobloku. Snížení spotřeb v roce 2008 bylo dosaženo převážně díky optimalizaci stávajícího systému řízení.



Obr. 3 Graf – spotřeba tepla budovy ČVUT v Praze Dejvicích v letech 1995 až 2009

Je patrné, že byla věnována značná pozornost nalezení úspor při provozování této budovy. Řízení budovy bylo odborně nastaveno na základě dlouhodobé praxe, znalosti budovy a reprezentuje možnosti dosažitelné konvenčním způsobem řízení. Je proto validní porovnávat prediktivní způsob řízení se stávajícím řízením.

Prediktivní řízení jsme použili pro řízení vytápění. Teplovodní systém „Crittall“, který je v budově použit pro vytápění a částečně i pro chlazení, byl patentován britským profesorem Arthurem H. Bakerem v roce 1907. V roce 1909 jej od něj koupila firma Crittall (zal. 1884), která jej dále vyvíjela, viz např. patentované vylepšení podané R. G. Crittallem a J. L. Musgravem.

Systém byl ve Velké Británii populární kolem první světové války, ale opravdového celosvětového rozmachu dosáhl až po druhé světové válce, částečně zásluhou slavného amerického architekta Franka Lloyda Wrighta. Systém se používal také v Československu, v případě budovy ČVUT se jedná konkrétně o otopný, (resp. chladicí) had z kovových trubek zabudovaný v monolitickém betonovém stropě.

V případě budovy ČVUT je individuální regulace tohoto systému zcela nemožná. Regulace se proto centralizuje vždy pro jednotlivé bloky budovy. Sálavý systém vytápění (ale i chlazení) s akumulací hmotou je obecně obtížné regulovat. Umístění ve stropě není vhodné ani z důvodu přirozeného rozvrstvení vzduchu (teplý nahoře a studený dole). Dodávka tepla pro vytápění je zajištěna parním rozvodem z centrální výtopny.

HYDRAULICKÉ ZAPOJENÍ

Horká pára předává teplo v parním výměníku a ohřívá sekundární vodu na konstantní teplotu. Jde o výměník pára – teplá voda. Teplota výstupní vody z výměníku je díky regulaci vstupní páry udržována běžně na 50 °C. Voda je dále přiváděna do rozdělovače, který dodává teplou vodu pro jednotlivé otopné okruhy.

Každý samostatný okruh je vybaven trojcestným směšovacím ventilem se servopohonem. Teplota otopné vody je určena poměrem teplé vody z rozdělovače a vracející se ochlazené vody z otopného okruhu. Poměr mísení je nastaven polohou trojcestného ventilu. Pokud je ventil plně otevřen, je do otopného okruhu vháněna pouze teplá voda z rozdělovače. Pokud je ventil zavřen, není do otopného okruhu vháněna žádná teplá voda z rozdělovače. Při zavřeném ventilu okruhem cirkuluje stále stejná voda bez jakéhokoliv ohřívání.

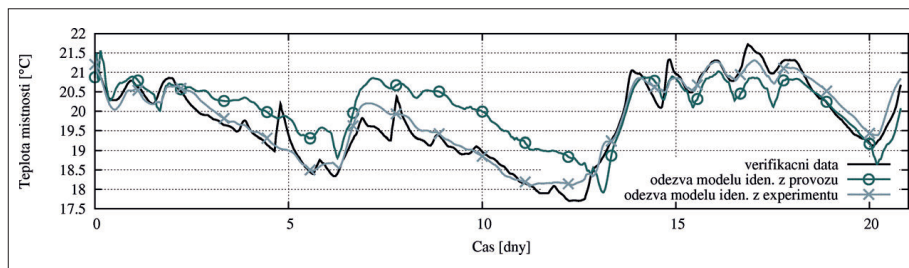
ELEKTRICKÉ PRVKY A ŘÍDICÍ ČÁST

Teploty jsou měřeny průmyslovým čidlem Sensit Ni 1000. Veškeré hodnoty jsou periodicky snímány a ukládány do databáze. Trojcestné směšovací ventily jednotlivých větví jsou poháněny servopohony Belimo. Poloha ventilu je úměrná napěťovému signálu, kterým je ventil řízen. Cirkulaci teplé vody zajišťují elektrická čerpadla značky Grundfos. Ovládání veškerých komponentů je naprogramováno systémem RcWare. Samotný regulační algoritmus je postaven na PID regulátoru. Požadavek pro PID regulátor byl původně udáván ekvitemní křivkou, během pilotního ověření byla tato hodnota získána jako výstup z prediktivního regulátoru.

IDENTIFIKACE MODELU BUDOVY

Většina identifikačních metod předpokládá data dostatečně vybuzená, ekvidistantně vzorkovaná a v minimální míře ovlivněná vnějšími vlivy. Ani jeden z těchto předpokladů nebyl v našem případě splněn. Bylo proto potřeba řešit mnoho problémů s nalezením reprezentativního úseku dat, kdy nedocházelo k nežádoucím výpadkům a kdy byla budova dostatečně „vybuzena“. Tento nedostatek jsme se pokusili kompenzovat identifikačním experimentem o vánočních svátcích, kdy nebyla budova používána. Tento přístup jistě nebyl z energetického hlediska optimální, ale ukázalo se, že identifikace z dat z tohoto období dává lepší modely než identifikace z běžných dat.

Také se ukázalo, že některá měření vnitřních teplot vypovídají více o chování uživatelů místnosti (spuštěný počítač, otevřené okno, dveře...) než o vlivu vytápění. Z dat byly vybrány souvislé úseky s výpadky kratšími než 20 minut a počtem vzorků více jak 3000. Nejdelší souvislý úsek byl použit pro identifikaci systému. Pro řízení jsme zvolili periodu vzorkování 18 minut, což je pro úlohu vytápění budovy s velkou setrvačností dostačující (v některých aplikacích prediktivního řízení bývá volena i hodinová perioda).



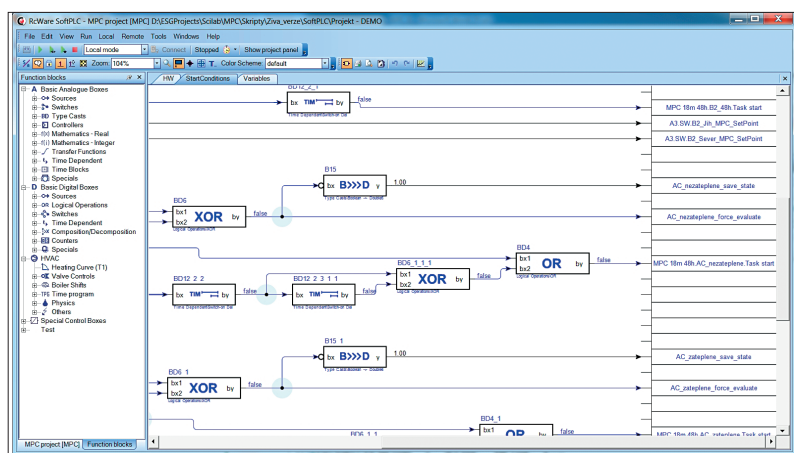
Obr. 4 Měření vnitřních teplot

PREDIKTIVNÍ REGULÁTOR

Strategie prediktivního řízení hledá celou optimální posloupnost zásahů pro daný horizont predikce. Na základě modelu se počítá budoucí předpokládaný průběh jednotlivých veličin a z těchto predikovaných budoucích trajektorií se řešením optimalizační úlohy stanovuje optimální hodnota řídicího signálu (akční zásah).

$$J_k = \sum_{i=k}^{k+T-1} (y_i - r_i)^T Q (y_i - r_i) + R u_i$$

y_i je vektor měřených hodnot výstupů modelu (teplota místnosti a teplota vratné vody), r_i je vektor požadovaných referencí a u_i je vektor hodnot vstupů modelu (předpovědi počasí a teplota otopné vody). V kritériu jsou naznačeny dvě váhové proměnné Q a R . Poměrem těchto dvou proměnných lze nastavovat důraz na sledování požadované reference (teplota místnosti) či důraz na šetření vynaložené energie. V praxi to znamená experimentálně nalézt vhodný poměr těchto dvou konstant, aby řízení pracovalo podle našich požadavků.



Obr. 5 Ukázka software RcWare

Posloupnost akčních zásahů je vypočítána tak, aby zůstala zachována všechna požadovaná omezení platná pro jednotlivé veličiny procesu.

$$u_{i\min} \leq u_i \leq u_{i\max}$$

První omezení představuje omezení vstupních veličin, což je v našem případě použito na omezení teploty otopné vody.

$$y_i \leq r_i$$

Druhé omezení je uplatněno na teplotu místnosti a zaručuje, že teplota místnosti může být libovolně nad požadovanou referencí y_i . Penalizuje se pouze vstupní veličina. Tímto přístupem je umožněno volné vychládání budovy.

$$\Delta_{\max} \geq |u_i - u_{i-1}|$$

Poslední omezení udává maximální rychlost změny otopné vody za jednu vzorkovací periodu.

Při realizaci prediktivního řízení vyvstává unikátní problém propojení systému řízení budovy s matematickými nástroji, které řeší optimalizační úlohu. K realizaci této úlohy jsme využili modulární systém RcWare. Kromě klasického řízení budov tento systém umožňuje využívat informace o předpovědi počasí, což je pro prediktivní řízení budov klíčová informace. V tomto systému bylo dále doimplementováno rozhraní, které umožňuje interakci s matematickými nástroji. Díky tomu bylo možné integrovat v jednom prostředí data měřená na reálné budově, předpovědi počasí i řízení optimalizačních výpočtů.

Zásadní je také volba vhodného výpočetního nástroje pro řešení optimalizační úlohy. Dominantní postavení na tomto trhu má program Matlab. Tento program je pro naše použití dostačující, ale jeho nevýhodou jsou značné pořizovací náklady. Toto byla základní motivace k průzkumu alternativních nástrojů. Po prozkoumání neznámějších volně dostupných programů pro numerické výpočty byli vybráni dva kandidáti: GNU Octave a Scilab.

Na základě podrobné rešerše, byl vybrán SciLab, což je volně šiřitelný program pro vědecko-technické numerické výpočty, modelování, návrhy algoritmů, počítačové simulace, analýzu a prezentaci dat, měření a zpracování signálů, návrhy řídicích a komunikačních systémů, vytvořený francouzskými vědeckými institucemi INRIA a ENPC. Tento program poskytuje dostatečné prostředky, pro námi požadované výpočty, a je tak vhodnou bezplatnou alternativou Matlabu, jak se potvrdilo i praxí.

DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

Budova je komplikovaný systém, který nemá žádný dlouhodobý „rovnovážný stav“ neboť se průběžně mění počasí, zejména teplota. Také chování a počet obyvatel budovy je proměnlivý a má nemalý vliv na energetickou bilanci budovy. To komplikuje možnosti porovnání a proto byly úspory dosažené MPC porovnány dvěma nezávislými metodami. Stávající řízení ekvitemní křivkou (EKV) využívalo tepelné akumulace budovy tím způsobem, že se v průběhu noci natápěla betonová konstrukce a vytápění se během dopoledne vypnulo. Strategie realizovaná MPC byla odlišná v tom, že přes den se vytápění úplně nevypínalo, pouze se snížilo množství dodávané energie. To mělo za důsledek výrazné snížení energetických špičkových požadavků v nočních hodinách, jak je vidět na grafu.

Bohužel nebylo k dispozici přímé měření dodaného tepla kalorimetrem. Díky konstantnímu průtoku, bylo možné množství dodané energie nepřímým změřit jako integrál rozdílu teploty topné vody vstupující do budovy a topné vody vystupující z budovy. Díky tomu, dodané teplo nemá uvedené žádné jednotky a je použito pouze pro vzájemné porovnání různých strategií řízení.

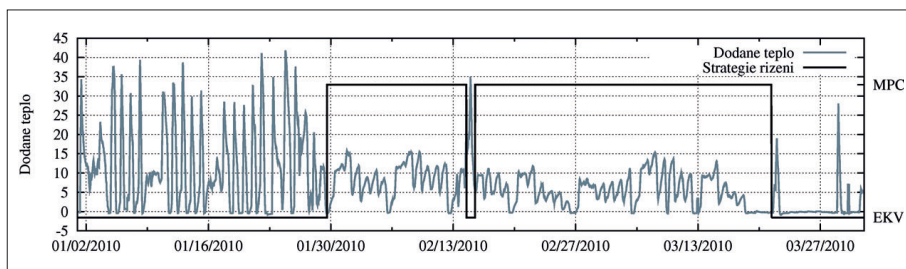
První porovnání, označené jako křížové, je založené na experimentu, kdy byly dva téměř identické bloky budovy B1 a B2 řízeny různými strategiemi. Během prvního týdne experimentu byl blok B1 řízen ekvitemně, zatímco blok B2 je řízen MPC. V dalším týdnu došlo k prohození řídicích strategií. Díky tomu jsou výrazně potlačeny nežádoucí vlivy, protože byly oba bloky

Tab. 1 Křížové porovnání

	Průměrná venkovní teplota [°C]	Použité řízení – B1	Průměrná vnitřní teplota B1 [°C]	Použité řízení – B2	Průměrná vnitřní teplota B2 [°C]	Úspory dosažené MPC
První týden	-3.37	EKV	21.36	MPC	21.14	15.54 %
Druhý týden	-1.25	MPC	21.37	EKV	20.88	19.94 %

Tab. 2 Denostupňové porovnání

Blok-řízení	Průměrná venkovní teplota [°C]	Průměrná vnitřní teplota [°C]	Počet dní v porovnávaném úseku	Úspory dosažené MPC
B1-EKV	3.80	21.62	85	28.74 %
B1-MPC	3.24	21.76	50	
B2-EKV	3.95	21.69	85	26.69 %
B2-MPC	2.99	21.71	49	
B3-EKV	3.81	20.85	85	17.67 %
B3-MPC	3.23	21.84	50	



Obr. 6 Graf – Výsledky měření

vystaveny stejnému počasí. Výsledky jsou shrnuty v následující tabulce a ukazují, že MPC bylo přibližně o 16 % úspornější.

Druhé porovnání využívá denostupňů k porovnání různých časových úseků. Denostupně jsou kvantitativní míra sloužící k vyjádření energie potřebné k vytápění budovy v závislosti na požadované teplotě a venkovní teplotě. Bohužel ani tato metodika zcela nepotlačí vliv měnících se venkovních teplot. Proto byly pro porovnání vybrány úseky s přibližně porovnatelnou průměrnou venkovní teplotou. Výsledky shrnuje tabulka 2.

Největších úspor bylo dosaženo na zateplené části budovy. Je třeba vzít v potaz zvýšení vnitřní teploty na nezatepleném bloku B3 o jeden stupeň. „Pravidlo palce“ říká, že zvýšení vnitřní teploty o jeden stupeň znamená zvýšení nákladů na vytápění o přibližně 6 %.

Výsledky obou porovnání se mírně liší. Tento rozdíl může být způsoben rozdílnou venkovní teplotou během porovnání. V případě křížového porovnání byla průměrná venkovní teplota o 5 °C nižší než během druhého porovnání. V případě vyšších venkovních teplot je větší prostor k využívání vnějších tepelných zisků. Díky znalosti předpovědi počasí je možné výrazně snížit množství dodávané energie, v situacích, kdy je jisté, že budoucí tepelné zisky budou dostačující. V případě nižších teplot je tento faktor mírně potlačen, neboť je potřeba teplo do budovy dodávat soustavně a snižuje se tak prostor pro optimalizaci.

ZÁVĚR

Pilotní aplikace ukázala, že koncept prediktivního řízení budov je v praxi realizovatelný a dosažené výsledky jsou velmi povzbuzující. Vzhledem

k tomu, že se jednalo o pilotní nasazení, bylo potřeba řešit řadu unikátních problémů, jako například propojení řídicího systému budovy s výpočetním nástrojem a předpovědi počasí. Řešení těchto problémů a identifikace matematického modelu budovy zabralo hodně času. Nicméně v dalších aplikacích bude již možné stavět na těchto řešeních a výrazně tak snížit čas realizace. Pak by poměr mezi náklady na realizaci a dosaženými úsporami byl velmi atraktivní. Lze proto předpokládat, že se v dohledné době prediktivní řízení budov stane vyhledávaným způsobem dosažení úspor při provozování větších budov a komplexů.

Kontakt na autora: jan.siroky@rcware.cz

Poděkování

Tento projekt byl realizován za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím Ministerstva průmyslu a obchodu v rámci grantu 2A-1TP1/084, „Integrace systémů budov, výzkum a aplikace inteligentních algoritmů, ovlivňujících spotřebu energií budov a obytných domů“.

Použité zdroje:

- [1] Privara, S., Šíroky, J., Ferkl, L., Cigler, J., Model predictive control of a building heating system: The first experience, Energy and Buildings, 2010
- [2] Šíroky, J., Kubeček, J., Prediktivní řízení budov – I. popis metody, TZB Haustechnik, 2/2010
- [3] Šíroky, J., Kubeček, J., Kudera, P., Prediktivní řízení budov – II. pilotní aplikace, TZB Haustechnik, 3/2010
- [4] Šíroky, J., Oldewurtel, F., Cigler, J., Privara, S., Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system, Applied Energy, Volume 88, Issue 9, September 2011

POMOK

Vzduchotechnika

Polyuretanové potrubí PITRE P₃ ductal

Originál je pouze jeden – polyuretanové potrubí P₃ ductal s patentovaným přírubovým spojem.

Široký rozsah použití ve všech odvětvích průmyslu včetně potravinářského.

POMOK - Vzduchotechnika, sdružení podnikatelů
Průmyslová 325, 285 06 Sázava
Tel.: 603 296 208, 603 443 897, e-mail: milena.kucharova@pomok.cz

P₃ductal