

Ing. Jiří CIGLER, Ph.D.¹⁾
 Ing. Jan ŠIROKÝ, Ph.D.²⁾
 Mgr. Markéta ODSTRČILOVÁ²⁾

¹⁾ Feramat Cybernetics s.r.o.

²⁾ Energocentrum Plus s.r.o.

Využití prediktivního regulátoru pro řízení vytápění s dodržením rezervovaných kapacit výkonu

Use of Predictive Controller for Heating Control in Compliance with Contracted Power Capacity

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

V článku je představena jedna z vlastností prediktivního regulátoru pro řízení vytápění budovy Fakulty elektrotechnické (FEL) a Fakulty strojní (FS) Českého vysokého učení technického (ČVUT) v Praze. Budova je charakterizována tím, že je pro vytápění využit stropní systém typu Crittall s velmi pomalou tepelnou setrvačností. Teplo je zde dodáváno dálkově z centrální výtopny. Na reálném příkladu je tak ukázáno, jak lze využít výhody prediktivního regulátoru pro plánování odběru tepla, aby byla dodržena nasmlouvaná rezervovaná kapacita dodávaného výkonu, aniž by došlo k porušení tepelného komfortu v budově. Prediktivní regulátor tak přináší úspory nejen množství dodaného tepla, ale lze jej využít i ke snížení rezervovaných kapacit výkonu, neboť se sám postará o rozprostření výkonu v čase, tj. v obdobích zvýšené potřeby energie a zajištění nepřekročení stanoveného limitu.

Klíčová slova: regulace, prediktivní řízení, rezervovaná kapacita výkonu, otopná soustava s velkou setrvačností

The article introduces one of the particularity of the predictive controller for heating control at the building of the Faculty of Electrical Engineering (FEE) and the Faculty of Mechanical Engineering (FME), Czech Technical University (CTU) in Prague. The building is characteristic by the use of ceiling heating system type Crittall, with a very slow thermal inertia. District heat is delivered from a central heating plant. On the real example is shown how to take advantage of the predictive control for scheduling of heat consumption, to ensure compliance with the contracted power capacity, without violating of thermal comfort in the building. The predictive controller yields in savings of not only supplied heat, but it can also be used to reduce reserved power capacity, because it assures spreading of the performance over the time, i.e. during periods of increased energy demand and ensures not exceeding of the contracted limits.

Keywords: egulation, predictive control, contracted power capacity, heating system with a high inertia

ÚVOD

V systémech řízení vytápění mají v současnosti stále drtivou převahu metody založené na ekvitermní regulaci, která obecně přímo-vazebně kompenzuje zvýšené tepelné ztráty při snižující se teplotě venkovního vzduchu. Mezi nevýhody tohoto způsobu regulace patří ladění „ad hoc“ a nemožnost cíleně tvarovat průběh odběru energie, neboť regulace pouze stanovuje teplotu otopné vody bez ohledu na další veličiny ovlivňující odběr energie. V posledních letech se díky výzkumu, a také na reálných aplikacích ukázalo, že pro některé typy otopných soustav a budov má smysl zabývat se modelováním tepelné dynamiky budovy a otopného systému pro účely regulace. Jedná se zejména o budovy s přerušovaným provozem a pomalou tepelnou setrvačností (typicky využívající stropní nebo podlahové vytápění), o technologické systémy obsahující velké akumulaci zásobníky nebo o komplexní zapojení více zdrojů s rozdílnými křivkami účinnosti [1]. Pro tyto systémy bylo demonstrováno, že lze využitím prediktivní regulace na bázi modelu uspořit 15 až 25 % potřebné energie na vytápění při dodržení požadovaných podmínek vnitřního prostředí pro zajištění tepelného komfortu.

V článku je ukázáno, jak lze prediktivní regulátor využít, aby zajišťoval dodržování rezervovaných výkonových kapacit. Porušení rezervovaných kapacit má za následek penalizaci, zatímco neadekvátně vysoko nastavené maximum představuje zbytečně vynaložené náklady. Jak bude ukázáno dále, lze dodávku energie rozložit v čase a minimalizovat tak špičkový odběr energie.

FORMY PAUŠÁLNÍCH PLATEB ZA ENERGIE

Paušální platby za dodávky energie jsou náklady, které nejsou ve většině případů přímo závislé na hospodárném chování v rámci regulace vytápění. Některé složky fixních plateb lze ovlivnit smlouvou, na některé nemají smluvní ujednání vliv, protože jejich výše je dána legislativou ČR (zejména cenová rozhodnutí Energetického regulačního úřadu). Tyto poplatky jsou stanoveny např. jako měsíční za odběrné místo.

U dodávek tepelné energie je celková cena stanovena platbou za odebrané množství tepelné energie a platbou paušální. Paušální platba je hrazena buď za sjednané množství (Kč/GJ), nebo za sjednaný výkon (Kč/kW). V obou těchto případech se jedná o pevnou složku ceny, kterou lze korigovat v rámci smlouvy. Konečné částky za dodávky tepelné energie jsou tvořené cenou za sjednané a odebrané množství, nebo cenou za sjednaný výkon a odebrané množství. Sjednaný rezervovaný výkon je obvykle považovaný jako průměrná hodnota odebíraného výkonu za 15 minut, ale záleží na konkrétní smluvní úpravě mezi dodavatelem a odběratelem.

Klienti dodavatelů tepelné energie se tak často potýkají s otázkou, jaký rezervovaný výkon nasmlouvat v podmínkách, kdy měření dosahovaných maxim není v současné době zpřístupněno tak otevřeně jako např. měření čtvrt hodinových maxim u odběrů elektrické energie. Navíc i v případě, že by si klienti na své náklady nainstalovali další měřič tepla, nebude tento měřič tepla mít synchronizované časové úseky, přes které se průměrný výkon počítá, a také nemusí měřit veškeré veličiny, které

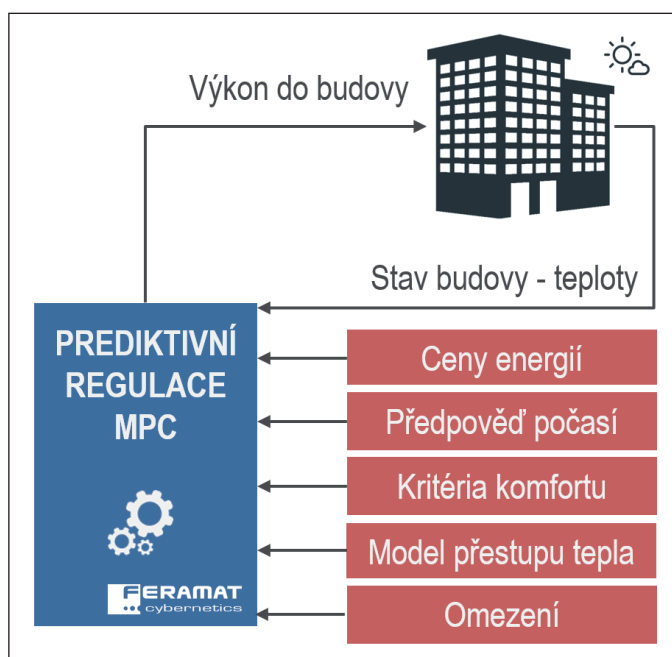
dodavatel tepla pro výpočet sjednaného výkonu využívá (např. v případě páry se operuje i s množstvím páry, kondenzátu apod.).

Další závažnou otázkou, i v případě možnosti průběhového měření a reagování na výsledky měření, pak zůstává samotná regulace, která je pro zamezení odběrových špiček u tepelné energie komplikovanější než např. v případě regulování čtvrt hodinových maxim odběrů elektrické energie. V případě regulace špiček u tepelné energie je nutné zohlednit termodynamické chování budovy tak, aby byly za všech okolností dodrženy podmínky pro tepelný komfort osob.

PREDIKTIVNÍ REGULACE MPC

Prediktivní regulace (z angl. Model based Predictive Control – MPC) se v průmyslu používá od šedesátých let 20. století, kdy byl tento přístup vyvinut na základě požadavků řízení ropných plošin. Dnes je rozšířený především v chemickém průmyslu, energetice a automobilovém průmyslu. Pod pojmem MPC chápeme metody, které pracují s matematickým modelem řízeného procesu a na jeho základě se snaží najít optimální trajektorie vstupních signálů tak, aby byla dodržena fyzikální, logická a jiná omezení. Co se týká použití metody MPC pro řízení technického zařízení budov, jedná se o nový výzkumný směr, který započal počátkem tohoto tisíciletí. Impulsem k tomu bylo dovršení teorie MPC, rozvoj výpočetního výkonu běžně dostupných počítačů, standardizace komunikačních protokolů řídicích systémů budov a vznik nových nástrojů pro simulaci termodynamického chování otopných soustav a budov.

MPC je diskretní regulátor, tj. v každém diskretním časovém kroku regulátoru je formulován a vyřešen problém optimálního řízení na konečném horizontu. Výsledkem je predikce trajektorií vstupů, stavů a výstupů systému, které respektují omezení daná dynamikou otopné soustavy a budovy a dalšími vlivy/proměnnými veličinami. Predikované trajektorie minimalizují předem zvolenou ztrátovou funkci (v případě budov například množství dodané energie). Pro technické zařízení budov toto znamená, že v každém kroku regulátoru získáme profil pro budoucí dodávku tepla či chladu, a to až na horizontu v řádu několika dní (v závislosti na dynamice soustavy a budovy). Predikce dodávky energie je samozřejmě podmíněna znalostí předpovědi počasí pro danou loka-



Obr. 1 Princip MPC regulace pro budovy

Fig. 1 Principle of MPC for HVAC control



Obr. 2 Budova ČVUT FEL a FS

Fig. 2 Building of the CTU FEE and FME

litu, která je nedílnou součástí prediktivního regulátoru. Další veličiny, které ovlivňují tepelný stav prostředí v budově, lze stejným způsobem jako předpověď počasí zanést do regulátoru. Mezi takové veličiny může patřit předpověď obsazenosti budovy, příp. predikce tepelných zisků jak vnějších, tak vnitřních. V neposlední řadě je možné také zohlednit varia- bilní cenu energie a minimalizovat nikoliv množství dodané energie, ale finální cenu dodané energie.

Máme-li k dispozici profil dodávky energie na konečný horizont do budoucna, pak strategie prediktivního regulátoru je taková, že je realizován pouze první krok z tohoto profilu a poté v dalším diskretním kroku regulátoru je znovu formulován a vyřešen problém optimálního řízení na základě aktualizovaných dat o aktuálním stavu prostředí v budově (měření teplot v místnostech či povrchových teplot konstrukcí, snímání obsazenosti místností apod.). Souhrnně je princip MPC regulace zobrazen na obr. 1.

BUDOVA FEL a FS ČVUT V PRAZE

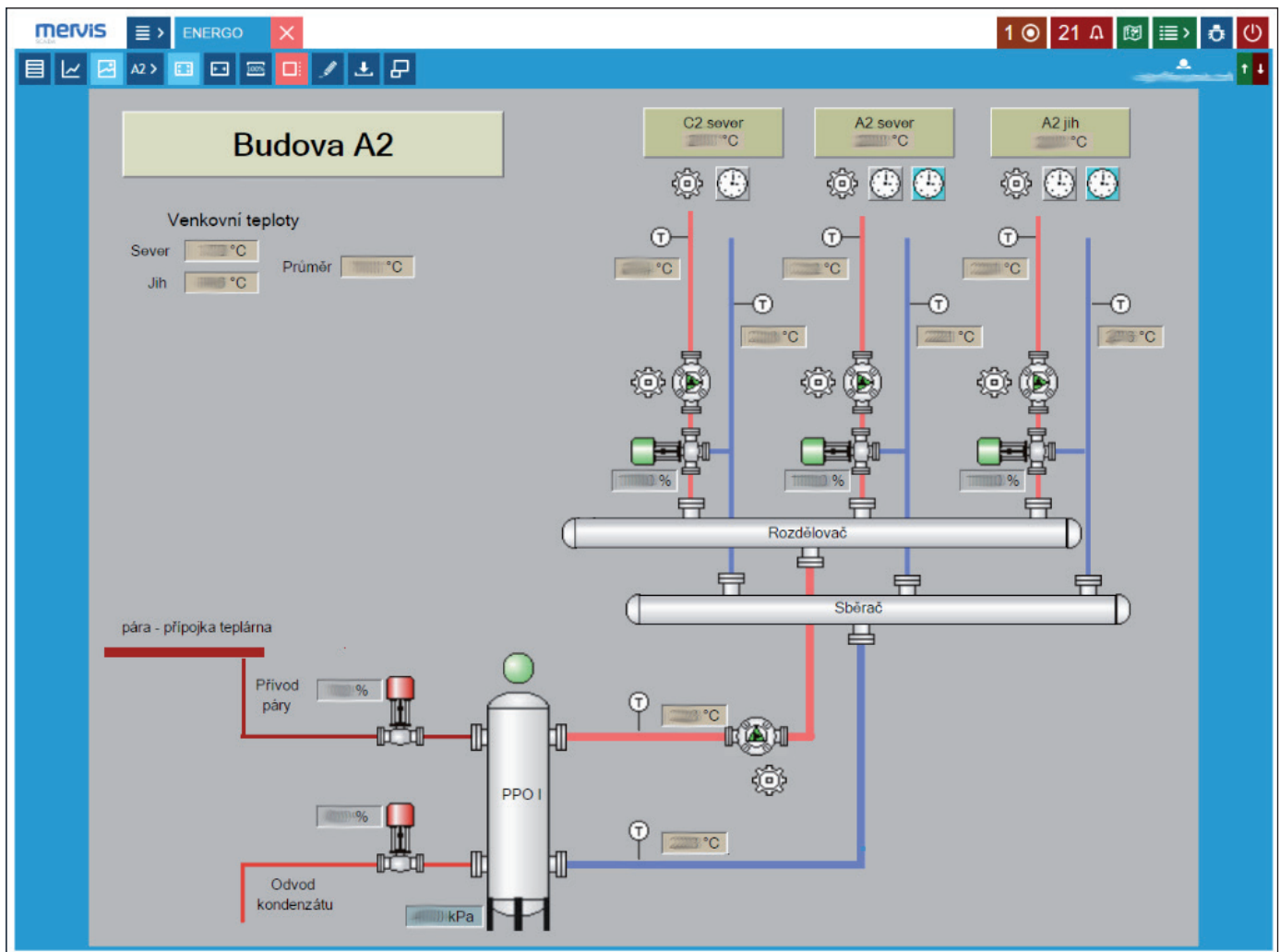
Budova se nachází v Praze 6 v areálu vysokých škol (obr. 2) a je rozdělena na tři samostatné osmipatrové a čtyři pětipatrové bloky. Pro vytápění je v budově použito stropní teplovodní vytápění typu Crittall, které je charakterizováno velmi pomalou tepelnou setrvačností. Dodávka tepla je v tomto případě zajištěna parovodem z centrální výtopy. Přes výměníky se teplo dostává v podobě teplé vody do stropních otopných ploch.

Celkem jsou v budově 4 výměňkové stanice (VS), kde každá z nich zásobuje teplem okruh teplé vody (TV), méně významné okruhy ústředního vytápění (ÚT) řízené ekvitermní regulací a dominantní okruhy ÚT řízené prediktivní regulací.

Uspořádání budovy umožňuje díky totožnosti jednotlivých částí velmi dobře porovnání různých strategií řízení. Již ve dříve publikovaných článcích byly uváděny úspory 22 % díky prediktivní regulaci v porovnání s dobře naladěnou ekvitermní regulací [1].

V následujícím textu se pro přehlednost zaměříme pouze na nejmenší VS označenou jako A2 a zde konkrétně na jeden fakturační kalorimetr, jenž měří dodávané teplo přes výměník do tří otopných větví Crittallu nazvaných A2 Jih, A2 Sever, C2 Sever. Schéma VS A2 (převzaté z dispečerského systému Mervis) je na obr. 3.

Čtvrt hodinová rezervovaná kapacita je v případě tohoto výměníku, resp. fakturačního kalorimetru, stanovena na základě dlouholeté praxe, přesto ale docházelo v několika okamžicích otopného období k překročení tohoto limitu. Maximální překročení limitu bylo zhruba o 10 %. Příčinou bylo zejména to, že regulátory jednotlivých okruhů vytápění nebyly provázané a nijak nebraly v úvahu společnou rezervovanou kapacitu. Z tohoto důvodu po delších víkendových útlumech v chladných obdobích mohlo dojít k překročení rezervované kapacity.



Obr. 3 Schéma části A2 VS

Fig. 3 Diagram of the heat exchanger in section A2

Na tomto místě je nutné podotknout, že na rozdíl od ekvitermní regulace má prediktivní regulace prostředky pro to, aby umožňovala aktivně řešit problematiku dodržování čtvrt hodinových maxim. Původně implementovaná verze regulace MPC toto omezení neřešila. Naopak u ekvitermní regulace je možné u budovy s takovou setrvačností pouze heuristickým způsobem přenastavit časové programy pro zátáp po delším útlumu a doufat, že limit bude dodržen. Případně je možné použít prosté hlídání nasmlouvaného maxima a v případě, že hrozí jeho překročení, dodávku tepla na nezbytně dlouhou dobu přerušit. Tento způsob ale může v praxi vést k nedodržení podmínek tepelného komfortu, což je v mnoha případech nepřijatelné.

MODEL PRO PREDIKTIVNÍ REGULÁTOR

Jádrum prediktivního regulátoru je matematický model popisující systém, který má řídit. Modely pro MPC jsou typicky mnohem jednodušší než modely využívané pro energetické simulace (na pozadí simulačních nástrojů typu Energy Plus, TRNSYS apod.). Požadavkem na takový model obvykle je, aby dostatečně přesně popisoval vývoj řízeného systému na několik hodin dopředu, nikoliv na celou sezónu dopředu. Dalším požadavkem je jeho co nejjednodušší struktura, neboť prediktivní regulátor ji poté dokáže využít k rychlejšímu výpočtu optimálního nastavení vstupů. V literatuře se nejčastěji setkáváme s tzv. lineárními modely s konstantními parametry, které vedou k nejmenší výpočetní náročnosti prediktivní regulace. V mnoha případech navíc správně zachycují i fyzikální

podstatu řízeného systému. Bližší informace k modelování otopných systémů pro účely prediktivní regulace lze nalézt v [2].

Řízeními vstupy jsou v tomto případě teploty otopné vody do jednotlivých okruhů ($T_{w,A2S}$, $T_{w,A2J}$, $T_{w,C2}$ [°C]), neřízeními vstupy (u kterých ovšem známe predikce) jsou venkovní teplota T_0 [°C] a sluneční osvit na danou fasádu Q_{sol} [W] (vypočítávaný na základě polohy Slunce a znalosti předpovědi slunečního ozáření horizontální roviny pro lokalitu budovy).

Výstupem modelu jsou jak teploty v referenčních místnostech (u každého otopného okruhu jedna referenční místnost $T_{i,A2S}$, $T_{i,A2J}$, $T_{i,C2}$ [°C]), tak také teploty otopné vody na zpátečce $T_{z,A2S}$, $T_{z,A2J}$, $T_{z,C2}$ [°C], které nám jednak dávají informaci o tom, kolik energie je ve stropní konstrukci naakumulováno, ale také o aktuální spotřebě energie, protože průtok v systému Crittall je konstantní. Např. pro okruh A2 Sever dostáváme:

$$\dot{Q}_{A2S} = k_{A2S} (T_{w,A2S} - T_{z,A2S}) \text{ [kW]} \quad (1)$$

V této rovnici konstanta k_{A2S} nese informaci o měrné tepelné kapacitě a průtoku otopné vody okruhem. Pro účely regulace čtvrt hodinového maxima bylo nutné tyto konstanty získat pro všechny otopné okruhy, aby bylo zřejmé, kolik energie jde do jednotlivých otopných okruhů v daný čas. Protože nebyly k dispozici kalorimetry na jednotlivých okruzích, byl změřen průtok jednotlivými větvemi jednorázově pomocí přístroje SBS 4000 Standard.

Jednotlivé tepelné výkony \dot{Q}_{A2S} , \dot{Q}_{A2J} a \dot{Q}_{C2} byly rovněž zařazeny mezi výstupy modelu. Struktura modelu byla zvolena lineární, počáteční odhad parametrů byl doladěn na základě grey-box identifikačních algoritmů s využitím reálných dat. Bližší informace o identifikaci viz [3]. Model má ve výsledku následující tvar:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Vw(k) \quad (2)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) + Ww(k)$$

kde je:

- k diskrétní čas,
- A, B, C, D, V, W konstantní matice parametrů o příslušných rozměrech,
- x stavový vektor (obsahuje teploty ve všech referenčních místnostech a teploty vody na zpátečkách),
- u vektor výše uvedených řízených vstupů,
- w vektor výše uvedených neřízených vstupů,
- y výstupní vektor, který je shodný jako stavový, jen obsahuje navíc aktuální tepelné výkony.

Krok tohoto modelu je 30 minut, což je adekvátní volba při zohlednění tepelné setrvačnosti tohoto systému.

FORMULACE PREDIKTIVNÍHO REGULÁTORU

Jak bylo zmíněno výše, prediktivní regulace je založena na opakovaném řešení optimalizační úlohy. Při návrhu prediktivního regulátoru je nutné matematicky formulovat regulační problém do standardního tvaru – typicky lineární nebo kvadratické programování – potom již existují nástroje na řešení problémů ve standardizovaném tvaru. V tomto případě lze problém formulovat následovně.

Ztrátová funkce:

$$\min_{T_{w,j}} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_j \dot{Q}_j(k) + \alpha (T_{i,j}(k) - z_{i,j}(k))^2 \quad (3)$$

$$j = \{A2S, A2N, C2\}$$

Omezení:

Soustava rovnic (2)

$$x(0) = x_{init}$$

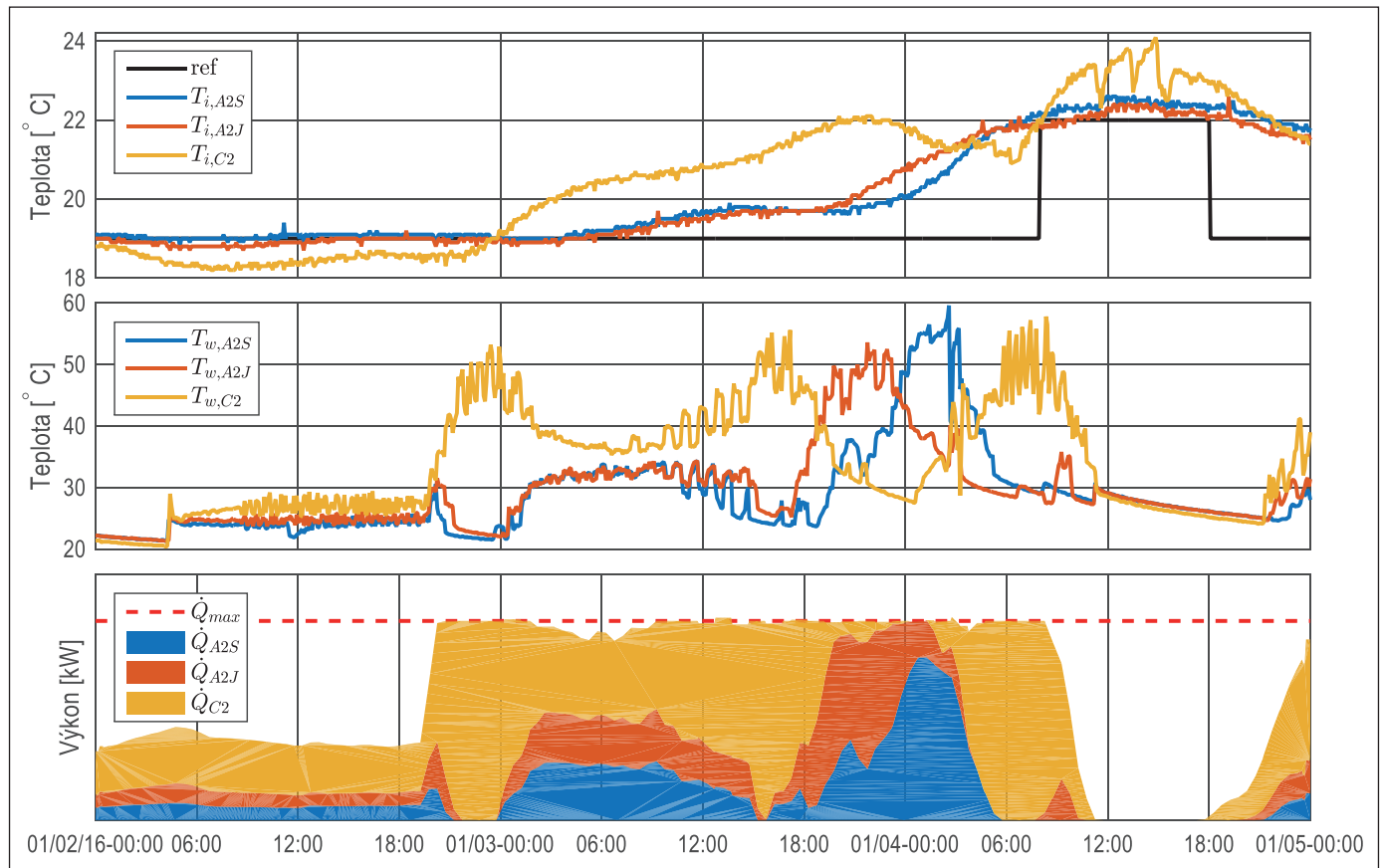
$$z_j(k) \geq ref_j(k)$$

$$0 \leq \sum_j \dot{Q}_j(k) \leq \dot{Q}_{max}, k = \{0, 1, \dots, N-1\}$$

kde je:

- ref vektor požadované minimální teploty v referenčních místnostech (pro každý okruh vlastní),
- z_j tzv. pomocná proměnná (v anglické literatuře nazývaná slack-variable), která zajišťuje, aby vnitřní teplota byla v pracovní době těsně nad požadovanou referencí a mimo pracovní dobu byla dodržena minimální útlumová vnitřní teplota,
- x_{init} aktuální stav budovy,
- \dot{Q}_{max} čtvrt hodinový rezervovaný výkon,
- N horizont predikce, na kterém prediktivní regulátor plánuje.

Důležitým prvkem této formulace je poslední rovnice, která spojuje spotřeby energie na jednotlivých okruzích a omezuje jejich součet na hod-



Obr. 4 Průběh teplot vnitřního vzduchu a odebíraných výkonů po vánočním útlumu

Fig. 4 Time course of the indoor air temperature and power demand after Christmas downtime

notu čtvrt hodinového rezervovaného výkonu \dot{Q}_{max} . Zde je nutné zmínit, že díky 30minutovému kroku modelu je vypočítán průměrný výkon za tuto dobu a ten je dodržen jak v první čtvrt hodině, tak ve druhé.

DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

Systém prediktivní regulace obsahující regulaci čtvrt hodinového odběru energie byl v provozu od začátku otopného období 2015/2016. Při zpětné analýze dat za toto otopné období se ukázalo, že k porušení rezervované kapacity nedošlo ani v jednom případě na tomto sledovaném výměníku.

Budova je pravidelně na vánoční svátky uváděna do delšího útlumu, kdy se teplota v jednotlivých částech budovy pohybuje okolo 18-19 °C. Přechod na komfortních 22 °C představuje v případě této budovy operaci trvající více než 24 hodin. Po tuto dobu je zvýšené riziko překročení čtvrt hodinového maxima, neboť budova potřebuje násobně více energie než při běžném víkendovém útlumu. A právě po tomto vánočním útlumu došlo k nejzajímavějšímu průběhu, který je zobrazen na obr. 4.

Prediktivní regulátor již v předstihu v sobotu 2. ledna 2016 v 20.00 hod. zjistil, že bude potřeba veškeré kapacity k tomu, aby přivedl budovu z útlumového stavu do komfortního stavu nejpozději do pondělí 4. ledna 2016 do 8.00 hod. Během těchto 36 hodin rozplánoval dodávku energie takovým způsobem, že nejprve roztopil část C2, poté přesunul veškerý dodávaný výkon do částí A2 Sever a A2 Jih, mezitím ale došlo k plánovanému poklesu teploty v části C2, na což reagoval regulátor dodávkou maximálního výkonu opět do části C2. V 8.00 hod. tak bylo v budově přesně požadovaných 22 °C. V této situaci je dlužno zmínit, že uvedených 36 hodin představuje právě horizont predikce prediktivního regulátoru (při periodě 30 minut je $N = 72$).

Plánovací horizont hraje při regulaci čtvrt hodinových odběrových maxim klíčovou roli. V tomto případě jsme na historických datech provedli analýzu, kolik energie je maximálně nutné pro přechod z útlumového do komfortního režimu. Pak je nutné nastavit horizont tak, aby se rovnal minimálně podílu potřebné energie a rezervované kapacity. Tímto způsobem lze i u stávajícího provozu snížit rezervované kapacity a dosáhnout úspor na paušálních výdajích za energie.

Průběh teploty otopných vod na jednotlivých okruzích je tak nečekaný, že by jej bylo těžko dosaženo ekvitermní regulací, i třeba s využitím podmínkového řízení. Výsledkem je dosaženo jen díky tomu, že model velmi dobře popisuje toky energií v budově a numerická optimalizace ze všech možných řešení vybere to, které dokáže splnit tvrdá omezení na rezervované výkonové kapacity, zajistit tepelný komfort a toho dosáhnout s minimální potřebnou energií.

ZÁVĚR

V tomto článku jsme ukázali, jak lze jednoduchým způsobem rozšířit formulaci prediktivního řízení o zajištění dodržování čtvrt hodinové rezervované kapacity pro odebraný výkon. U otopných systémů je situace specifická tím, že se setkáváme s pomalou tepelnou setrvačností systé-

mů a kroky k dodržení rezervované kapacity je nutné dopředu plánovat tak, aby nedošlo k omezení komfortu.

Na provozních datech bylo ukázáno, jak instalovaný systém po vánočním útlumu správně zafungoval a dodržel jak tepelný stav prostředí v budově, tak rezervované kapacity.

Podobně přímočaře lze do prediktivního regulátoru přidávat informaci o časově proměnných cenách energií. Autoři v současné době testují využití cen z vnitrodenního trhu s elektrickou energií na budově s podobnou tepelnou setrvačností, jako má zmiňovaná budova ČVUT v Praze.

Prediktivní regulace představuje nástroj, kterým lze energetiku budov a systémů s pomalou dynamikou, příp. akumulací, posunout ještě dále a dosáhnout úspor nejen v množství dodávané ENERGIE, ale i v paušálních částkách za rezervované kapacity, případně za průměrnou cenu za odebrané množství energie.

V současné době je v mnoha případech obtížné získat přístup k průběhovému měření výkonu, a tedy pracovat s touto hodnotou v systémech měření a regulace. V případě otevřenějšího přístupu k aktuálním datům by pak bylo možné na straně zákazníka jít dále a nevyužívat jen plánovací algoritmy prediktivní regulace k dodržení nasmlouvaného limitu, ale také optimalizovat roční hodnotu smluvního maximálního výkonu.

Kontakt na autora: cigler@feramat.cz

Použité zdroje:

- [1] CIGLER, J., ŠIROKÝ, J. Zkušenosti s nasazováním prediktivní regulace pro energeticky hospodárné provozování budov. *Vytápění, větrání, instalace*. 2014, č. 3, pp. 102–106.
- [2] PRÍVARA, S., CIGLER, J., VÁŇA, Z., OLDEWURTEL, F., SAGERSCHNIG C., ŽÁČEKOVÁ, E. Building modeling as a crucial part for building predictive control. *Energy and Buildings*. 2013.
- [3] ŠIROKÝ, J., OLDEWURTEL, F., CIGLER J., PRÍVARA, S. Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system. *Applied Energy*. 2011, č. 9.

Udržitelné bydlení s decentrálním větráním

V hornobavorském Eichstättu vzniká bytová výstavba se čtyřpodlažními domy a 243 byty, u nichž bylo užito decentrální větrání. Každý byt má decentrální větrání přístrojem LTM Thermo-Lüfter 1230 od LTM GmbH, Ulm. Průtok každého přístroje se liší podle bytové plochy až k 30 m³/h (k 60 m³/h v příčném větrání) a byl vypočítán podle požadavků DIN 1946 Teil 6. Vstupní výkon podle směrnice ekodesignu č. 1254/2014 je 5 W při 25 m³/h. Průtoky venkovního vzduchu jsou 36 až 130 m³/h se spotřebou 5 až 32 W a s energetickou účinností třídy A. Taktovací doba pro změnu směru otáčení ventilátoru je 50 s. Větrání je realizováno vstupním otvorem 26×25 cm na fasádě s vnějším krytem, prostup zdí ve výši horní hrany okna min. tloušťky 24 cm může mít délku 28 až 46 cm a obsahuje teleskopický kanál, zvukovou izolaci, vzduchový filtr, akumulaci hmoty (regenerační – přepínací výměník tepla), ventilátor s motorem a vnitřní kryt.

Pramen: *Technik hoch zwei*, 1/2016, s. 4–7

(AB)

Nejlepší portály

o stavebnictví



Největší stavební portál
pro odborníky v ČR

ESTAV.cz

Portál pro širokou
stavební veřejnost