

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Czech Technical University in Prague
Faculty of Electrical Engineering



Ing. Lukáš Ferkl, Ph.D.

Prediktivní regulace
budovy ČVUT v Praze – Dejvicích:
Případová studie

Predictive Control
of the CTU Building in Prague – Dejvice:
A Case Study

Praha, 2012

Summary

The objective of the presentation is to introduce the concept of model-based predictive control (MPC) for buildings and illustrate its behaviour on the case of heating control of the building of CTU in Prague – Dejvice. First, the design procedure will be shown, including the system identification, modelling and controller tuning phases. The implementation aspects will be briefly introduced and results from the operation of the system will be shown.

Souhrn

Cílem přednášky je uvést koncepci prediktivního řízení pro budovy (model-based predictive control, MPC) a ukázat jeho chování na případě řízení vytápění budovy ČVUT v Praze – Dejvicích. Nejprve bude naznačena etapa návrhu regulátoru, tj. fáze identifikace systému, modelování a ladění regulátoru. Stručně budou ukázány některé stránky implementace systému a budou představeny výsledky reálného provozu systému.

Klíčová slova

prediktivní regulace; modelování; regulace vytápění;
matematická optimalizace

Keywords

model-based predictive control; modelling; heating control;
mathematical optimization

Obsah

Summary	1
Souhrn	2
Klíčová slova	3
Contents	4
1 Úvod	5
2 Současné systémy řízení vytápění	5
3 Princip MPC	6
3.1 Regulace	6
3.2 Nalezení modelu	7
3.3 Standardní formulace MPC problému	8
4 Aplikace na budově ČVUT v Praze – Dejvicích	11
5 Výsledky	12
6 Závěr	14
Literatura	15
Ing. Lukáš Ferkl, Ph.D. – životopis	16

1 Úvod

Podle dostupných zdrojů [6] spotřebují budovy celosvětově 20-40 % veškeré energie, navíc v rozvinutých zemích tento podíl stoupá o 0,5-5 % ročně. Například v USA v roce 2010 spotřebovaly budovy 41 % primární energie (průmysl 31 % a doprava 28 %)[1]. Přestože se efektivita používaných systémů vytápění, ventilace a klimatizace v budovách v posledních letech výrazně zlepšila, stále je zde prostor pro úspory především v oblasti algoritmizace řízení – to ukazuje nejen tato práce, ale například i výsledky projektu OptiControl (ETH Zürich a Siemens [3]), které regulátoru MPC předpovídají úspory 15-40 %.

2 Současné systémy řízení vytápění

Podle C. P. Underwooda [9] jsou v současné době používány tři hlavní typy řízení vytápění: termostat (on-off řízení), ekvitermní regulace a PID regulace podle referenční místnosti. Řízení termostatem je velmi jednoduché a spolehlivé, nicméně nemá žádnou informaci o konkrétní budově a je vhodné pouze pro malé budovy. Ekvitermní regulace je přímovazebním regulátorem, který nastavuje teplotu topné vody podle venkovní teploty. PID jako klasická regulace nemá v budovách takovou popularitu jako v jiných průmyslových odvětvích, protože se zde obtížně dosahuje kompromisu mezi zabráněním rychlých oscilací (např. vlivem otevírání oken) a pružnou reakcí na změny venkovní teploty. Všechny uvedené regulátory jsou typu SISO (Single-Input, Single-Output) a obtížně se aplikují na MIMO (Multiple-Input, Multiple-Output) systémy.

Hledáme tedy takovou řídicí strategii, která bude mít zavedenou zpětnou vazbu, bude využívat co nejvíce dostupných informací o budově a o počasí a také bude obsahovat informace o dynamice budovy. Takovou strategii můžeme ideově popsat jako

$$\theta_{\text{medium}} = f(\theta_{\text{in}}, \theta_{\text{out}}, \theta_{\text{predicted}}, x, \text{system}) \quad (1)$$

kde θ_{medium} je teplota topného média (např. topné vody), θ_{in}

je teplota uvnitř budovy, θ_{out} je venkovní teplota, $\theta_{\text{predicted}}$ je předpověď venkovní teploty, x jsou „další“ informace o vnějším a vnitřním prostředí (např. sluneční svit a jeho teplota, radiace oblohy, obsazenost budovy apod.), systém značí znalost systému ve smyslu jeho dynamiky. Rovnici 1 vyhovuje například strategie řízení obecně zvaná MPC (Model-based Predictive Control).

3 Princip MPC

3.1 Regulace

Prediktivní regulace MPC je známá od sedmdesátých let, kdy vznikla jako odpověď na řízení rozsáhlých systémů především v chemickém průmyslu (těžební ropné plošiny, rafinérie apod.) [7, 5] MPC není jeden konkrétní regulátor, ale jedná se o celou třídu regulátorů, které využívají explicitní model procesu jako základ pro optimalizační funkci (minimalizace nákladů, minimalizace regulační odchylky) a omezení (např. na velikost akčního zásahu, změnu regulované veličiny apod.) Zásadním znakem prakticky využívaného MPC je princip tzv. „receding horizon control“ – spočítá se množina optimálních vstupů na horizontu predikce T_N a do systému se pustí první z nich. V následujícím kroce se vše opakuje pro aktuální výstupy regulovaného systému.

Konkrétně je prvním krokem nalezení dynamického modelu systému

$$y = P(u, x, t) \quad (2)$$

kde y je vektor výstupů modelu, u je vektor jeho vstupů, x jsou stavy modelu a t je čas. Úkolem regulátoru je najít optimální posloupnost vstupů u vyjádřenou ve vztahu k optimalizačnímu kritériu \mathcal{J} :

$$u_{\text{optimal}} = \arg \min_u \mathcal{J}(P(u, x, t), u, t) \quad (3)$$

přičemž optimalizace může být vhodně omezená.

3.2 Nalezení modelu

Dobrý model (2) je pro MPC naprosto klíčový. V praxi je sice nemožné přesný model nalézt a je nutné model doplnit pozorovatelem stavu, například Kalmanovým filtrem, ale chování MPC významně závisí především na deterministické části modelu řízeného procesu.

Metod identifikace modelu existuje celá řada, viz například [4, 10]. Konkrétně pro modelování budov je nutné použít identifikační metodu, která umožňuje nalézt vícerozměrný model (MIMO) procesu. V současnosti je známý a prakticky použitelný pouze přístup tzv. podprostorových identifikací (subspace identification).

Princip podprostorových identifikací je poměrně jednoduchý, avšak přesahuje téma této práce. Proto si zde nastíníme pouze základní verzi, identifikace deterministického, lineárního, v čase neměnného modelu. Z důvodu přehlednosti také použijeme hrubě zjednodušený zápis principu podprostorových identifikací. Pro podrobnější informace o podprostorových identifikacích doporučujeme např. [4]

Mějme časově diskrétní model procesu ve stavovém tvaru

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\y(k) &= Cx(k) + Du(k),\end{aligned}\tag{4}$$

se vstupy $u(k)$, výstupy $y(k)$, stavy $x(k)$ a maticemi stavového modelu A , B , C , D . Zatímco vstupy $u(k)$ (teplota vzduchu, teplota topné vody, ...) a výstupy $y(k)$ (vnitřní teplota, komfort, ...) dokážeme na budobě přímo měřit, stavy a matice jsou obecně neznámé, i když je velmi výhodné co nejvíce apriorních informací o systému do jeho modelu zakomponovat [8].

Rekurzivním zápisem stavových rovnic (4) můžeme s využitím zápisu Hankelovými maticemi a napsat datovou rovnici systému

$$Y = \Gamma X + \Phi U\tag{5}$$

kde Y je Hankelova matice výstupů, U je matice vstupů, X je matice stavů a Γ je rozšířená matice pozorovatelnosti. Abychom se

v rovnici (5) zbavili členu ΦU , vynásobíme ji zprava ortogonálním doplňkem matice U . Máme nyní rovnici

$$YU^\perp = \Gamma XU^\perp \quad (6)$$

příčemž na levé straně již máme pouze čísla (data z měření) a na pravé straně hledané parametry. Provedeme-li SVD rozklad levé strany, dostaneme

$$YU^\perp = [U_1 \ U_2] \begin{bmatrix} \Sigma_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{bmatrix} = U_1 \Sigma_1 V_1^T \quad (7)$$

a porovnáním dostáváme

$$\tilde{\Gamma} = U_1. \quad (8)$$

Hodnosti matice Σ_1 odpovídá řádu systému. Jelikož máme definovanou rozšířenou matici pozorovatelnosti

$$\Gamma = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \end{bmatrix}, \quad (9)$$

určíme nyní snadno matice A a C např. pomocí nejmenších čtverců. Matice B a D určíme dosazením do datové rovnice a využitím Kroneckerových součinů – jelikož je zápis této části velice zdlouhavý, z prostorových důvodů jej vynecháme a odkážeme např. na [10].

3.3 Standardní formulace MPC problému

MPC strategie má v principu dva základní kroky:

- Budoucí výstupy se predikují v otevřené smyčce s využitím modelu, do kterého se přivedou informace o minulých vstupech, výstupech a budoucích signálech, které se mají spočítat. Budoucí řídicí signály se spočítají optimalizací pokutové funkce, tzn. zvoleného kritéria, které má často tvar kvadratické funkce. Předmětem kritéria mohou být například:

- chyba mezi predikovaným signálem a referenční trajektorií $y_r(k)$
 - norma řídicího signálu
 - rychlost změny řídicího signálu
- Do systému se pustí první prvek optimální řídicí posloupnosti $u(k)$ a zbytek posloupnosti se zahodí. V příštím časovém okamžiku se změří nový výstup $y(k+1)$ a řídicí posloupnost se spočítá znovu, její první prvek $u(k+1)$ se opět pustí do systému a zbytek se zahodí. To se opakuje neustále dokola (tento princip se jmenuje „receding horizon“).

Mějme tedy lineární, časově invariantní, časově diskrétní, deterministický model systému

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\y(k) &= Cx(k) + Du(k).\end{aligned}\tag{10}$$

Cílem je nalézt optimální řídicí posloupnost na horizontu predikce délky N tak, abychom minimalizovali pokutovou funkci

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} q(k) (y(k) - z(k))^2 + r(k)u(k)^2,\tag{11}$$

s omezeními

$$\begin{aligned}u_{min} &\leq u(k) \leq u_{max} \\y_r(k) &\leq z(k) \\\Delta_{max} &\geq |u(k) - u(k-1)|,\end{aligned}\tag{12}$$

kde omezení u_{min} , u_{max} jsou minimální a maximální hodnota řídicího signálu, $y_r(k)$ je požadovaná hodnota výstupu (referenční signál), což je dolní hranice pro $z(k)$ a Δ_{max} je maximální rychlost změny řídicího signálu.

Pokutovou funkci J (v rovnici (11)) můžeme napsat v maticové formě jako

$$J = (y - z)^T Q (y - z) + u^T R u,\tag{13}$$

kde Q a R jsou váhové matice chyby výstupu a řídicího signálu. Trajektorie výstupu je daná následovně:

$$\begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{N-1} \end{bmatrix} x(0) + \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} D \\ CB & D \\ \vdots & \ddots \\ CA^{N-2}B & \dots & CB & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(0) \\ u(1) \\ \vdots \\ u(N-1) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

tj.

$$y = \Gamma x(0) + Hu, \quad (16)$$

kde Γ je rozšířená matice pozorovatelnosti a H je matice impulzních odezev. Necht' $\tilde{y} = \Gamma x(0)$, potom dosazením do (16) můžeme přepsat rovnici (13) takto:

$$J = (\tilde{y} + Hu - z)^T Q (\tilde{y} + Hu - z) + u^T Ru. \quad (17)$$

Minimalizace takovéto pokutové funkce je problémem nelineárního programování, který můžeme zapsat v jako kvadratický program

$$\begin{aligned} J = [u^T \quad z^T] & \begin{bmatrix} H^T Q H + R & -H^T Q \\ -QH & Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ z \end{bmatrix} + \\ & + 2 [\tilde{y}^T Q H \quad -\tilde{y}^T Q] \begin{bmatrix} u \\ z \end{bmatrix} + \tilde{y}^T Q \tilde{y} \end{aligned} \quad (18)$$

Dostáváme tak optimalizační problém $\min_{u,z} J$, který můžeme efektivně vyřešit běžnými algoritmy numerické algebry. Výsledný problém má $(m + p) \cdot T$ proměnných, takže je vidět, že jde o výpočetně náročnou operaci.

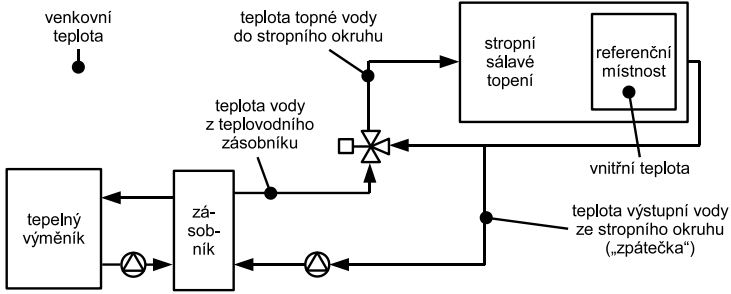


Obrázek 1: Budova ČVUT v Praze – Dejvicích, jejíž vytápění řídí od února 2010 MPC regulátor.

4 Aplikace na budově ČVUT v Praze – Dejvicích

Budova Fakulty strojní a Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze – Dejvicích byla postavena na konci 50. let 20. století. Systém vytápění je tzv. Crittall (podle R. G. Crittalla, který jej v roce 1927 s J. L. Musgravem vymyslel [2]) – topná voda je trubkami přivedena přímo do betonové hmoty budovy, takže primárně působí sálavým teplem. Systém má velmi dlouhou dynamiku, takže je sice velmi robustní, ale obtížně se řídí klasickými systémy (např. ekvitermní křivkou), protože dlouhé časové konstanty ke svému řízení vyžadují buď extrémní akční zásahy, nebo prediktivní strategii řízení.

Na obrázku 2 je schématicky zobrazen jeden topný okruh budovy. Budova je rozdělena na stavební bloky a jeden stavební blok je vytápěn vždy dvěma topnými okruhy – severní a jižní větví (přednáškové sály mají vlastní vytápění a vzduchotechniku). Teplo se přivádí parním potrubím z teplárny v Podbabě, v protiproudém výměníku se předává vodě, která se dále shromažďuje v zásobníku. Z toho jde ohřátá voda do topného okruhu,



Obrázek 2: Schéma topného okruhu

přičemž před vstupem do budovy se v třicestném ventilu smíchá se zpětnou vodu, aby bylo dosaženo požadované teploty topné vody.

Máme tedy vstupní veličiny systému, kterými jsou teplota topné vody T_{hw} a předpověď venkovní teploty, která je daná maximálním a minimálním odhadem T_{max} a T_{min} . Výstupem modelu jsou vnitřní teplota v budově T_{in} a teplota zpětné vody T_{rw} . Potom můžeme model budovy napsat jako

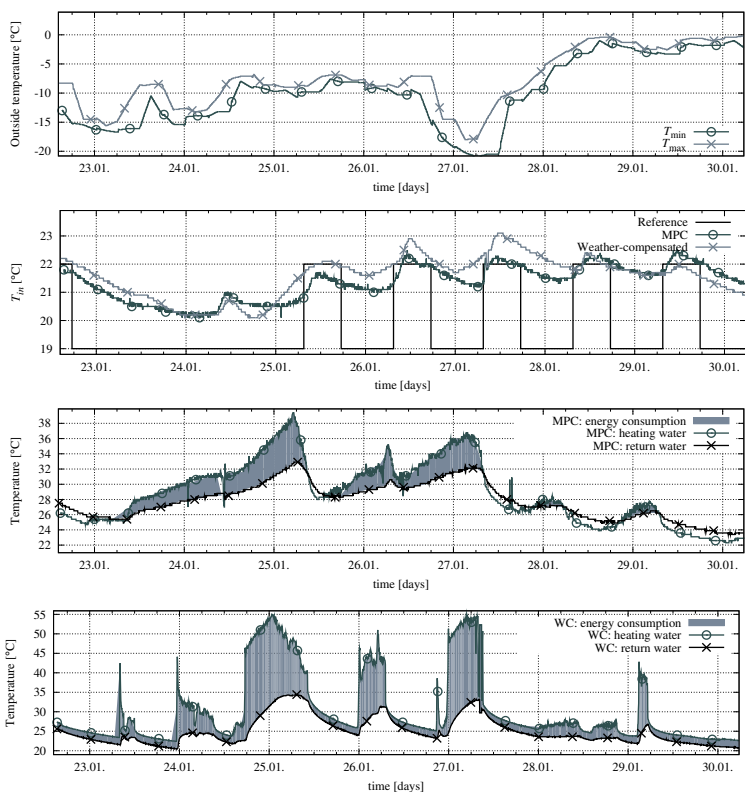
$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + B \begin{bmatrix} T_{min}(k) \\ T_{max}(k) \\ T_{hw}(k) \end{bmatrix} + K(y(k) - C\hat{x}(k))$$

$$\begin{bmatrix} \hat{T}_{in}(k) \\ \hat{T}_{rw}(k) \end{bmatrix} = C\hat{x}(k) + D \begin{bmatrix} T_{min}(k) \\ T_{max}(k) \\ T_{hw}(k) \end{bmatrix}, \quad (19)$$

kde K je Kalmanův filtr a matice A , B , C a D získáme podprostorovou identifikací. Jelikož jsme získali statistický (black-box) model, stavy $x(k)$ nemají fyzikální interpretaci.

5 Výsledky

V rámci implementace řízení vytápění pomocí MPC regulátoru byl podprostorovými identifikacemi identifikován statistický model budovy a byla zvolena pokutová funkce a omezení pro MPC



Obrázek 3: Různé řídicí algoritmy: porovnání ekvitermní regulace (weather-compensated control, WC) a prediktivního řízení (MPC) – teploty topné vody a teploty v místnostech.

regulátor. Takto nalezený regulátor byl implementován v jazyce Scilab a řízení bylo v únoru 2010 spuštěno. Od té doby je v budově FS a FEL ČVUT v Praze – Dejvicích v běžném provozu.

Na obrázku 3 je ukázán rozdíl pro ekvitermní regulaci a pro MPC. Využili jsme toho, že bloky B2 a B3 budovy jsou stavebně identické a mají i obdobné využití a obsazenost, takže jsme vždy na jednom bloku provozovali MPC a na druhém referenční strategii, abychom dosáhli porovnání. Z grafů jsou patrná následující

pozorování:

- MPC dokáže udržet vnitřní teplotu na referenční hodnotě lépe než ekvitermní regulace
- Protože má MPC informace o předpovědi počasí, nepotřebuje velké akční zásahy, aby dosáhlo referenční teploty
- MPC má pozvolnější náběhy a spotřebuje méně energie než ekvitermní regulace

Vyhodnocením naměřených hodnot, údajů z kalorimetrů a faktur za topení bylo zjištěno, že MPC oproti ekvitermní regulaci ušetří přibližně 25-30 % energie (přesné číslo závisí na metodice stanovení úspor).

6 Závěr

Přestože budovy spotřebovávají podstatnou část energie, kterou lidstvo vyrobí, nasazení moderní regulace založené na jejich modelech bylo dlouho nemožné díky složitosti těchto modelů. S použitím podprostorových identifikací a MPC regulace se však podařilo implementovat, provozovat a analyzovat regulátor, který je pro budovy velmi vhodný a má velký potenciál úspor. Na případu budovy FS a FEL ČVUT v Praze – Dejvicích byla funkčnost regulátoru ověřena a byly zjištěny úspory přibližně 25-30 % (v závislosti na metodice stanovení úspor).

Literatura

- [1] *Buildings Energy Data Book*. U.S. Department of Energy, U.S.A., 2011.
- [2] Richard Godfrey Crittall and Joseph Leslie Musgrave. Heating and cooling of buildings. GB Patent No. 210880, April 1927.
- [3] M. Gwerder, D. Gyalistras, F. Oldewurtel, B. Lehmann, K. Wirth, V. Stauch, J. Tödli, C.J. Tödli, and S. Zurich. Potential assessment of rule-based control for integrated room automation. In *10th REHVA World Congress Clima*, pages 9–12, 2010.
- [4] Lennart Ljung. *System Identification: Theory for user*. Prentice-Hall, 1999.
- [5] J. M. Maciejowski. *Predictive control with constraints*. Prentice Hall, 2002.
- [6] L. Perez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout. A review on buildings energy consumption information. *Energy and buildings*, 40(3):394–398, 2008.
- [7] J. Richalet, A. Rault, J. L. Testud, and J. Papon. Algorithmic control of industrial process. In *Proceedings: Symposium on Identification and System Parameter Estimation*, Tbilisi, 1976. IFAC.
- [8] Pavel Trnka and Vladimír Havlena. Subspace like identification incorporating prior information. *Automatica*, 45(4):1086–1091, 2009.
- [9] C. P. Underwood. *HVAC Control Systems: Modelling, Analysis and Design*. E & FN Spon, 1999.
- [10] Peter Van Overschee and Bart De Moor. *Subspace Identification for Linear Systems*. Kluwer Academic Publishers, 1999.

Ing. Lukáš Ferkl, Ph.D.

Lukáš Ferkl se narodil 26. března 1980 v Praze. V roce 2004 získal titul Ing. v oboru technická kybernetika na FEL ČVUT v Praze, v roce 2007 získal doktorát tamtéž (školitelem byl prof. Michael Šebek). Pracoval postupně jako průvodce a pozorovatel na Štefánikově hvězdárně v Praze (1997-2009), jako vědecko výzkumný pracovník UTIA AV ČR (2005-6) a FEL ČVUT (od r. 2009). V roce 2006 založil spin-off firmu Feramat Cybernetics, s.r.o. V roce 2005 strávil 6 měsíců na Twente Universiteit (NL).



Je autorem či spluautorem zhruba dvaceti konferenčních příspěvků včetně dvou zvaných přednášek na IEEE konferencích a spoluautorem čtyř článků v impaktovaných časopisech. Je školitelem pěti doktorandů.

V roce 2005 se Lukáš Ferkl oženil, má tři děti.

Nejvýznamnější publikace

- PRÍVARA, S. – ŠIROKÝ, J. – FERKL, L. – CIGLER, J. Model Predictive Control of a Building Heating System: The First Experience. *Energy and Buildings*. 2011, 43, 2-3, s. 564–572. ISSN 0378-7788.
- NÝVLT, O. – PRÍVARA, S. – FERKL, L. Probabilistic risk assessment of highway tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2011, 26, 1, s. 71–82. ISSN 0886-7798.
- FERKL, L. – ŠIROKÝ, J. Ceiling radiant cooling: Comparison of ARMAX and subspace identification modelling methods. *Building and Environment*. 2010, 45, 1, s. 205–212. ISSN 0360-1323.
- FERKL, L. – MEINSMA, G. Finding Optimal Control for Highway Tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2007, 22, 2, s. 222–229. ISSN 0886-7798.