

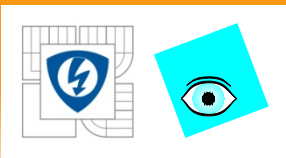
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Prediktivní řízení budov

Jiří Cigler

20. dubna 2012

Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



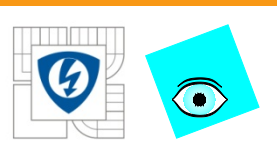
Motivace

Proč se tímto tématem zabírat?

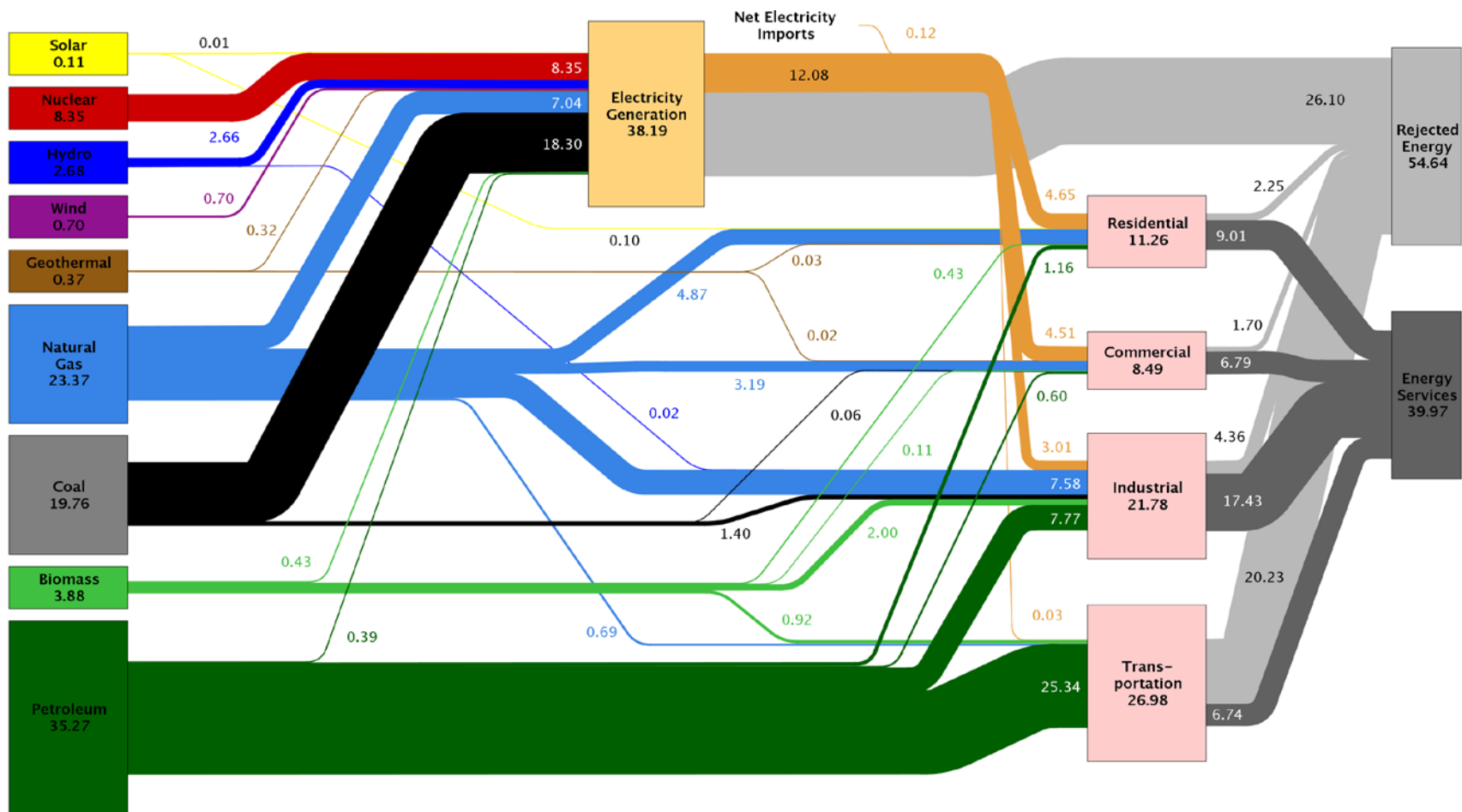
20.4.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Energetické toky v USA, r. 2009

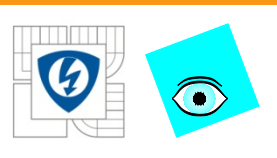


Source: LLNL 2010. Data is based on DOE/EIA-0384(2009), August 2010. If this information or a reproduction of it is used, credit must be given to the Lawrence Livermore National Laboratory

20.4.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

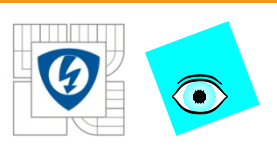




Cíle EU do roku 2020

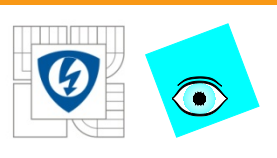
- Do roku 2020
 - Snížení CO₂ emisí o 20% v porovnání s rokem 1990
 - 20% energie z obnovitelných zdrojů
 - 20% úspory ve spotřebě energie, na základě jejího lepšího využívání





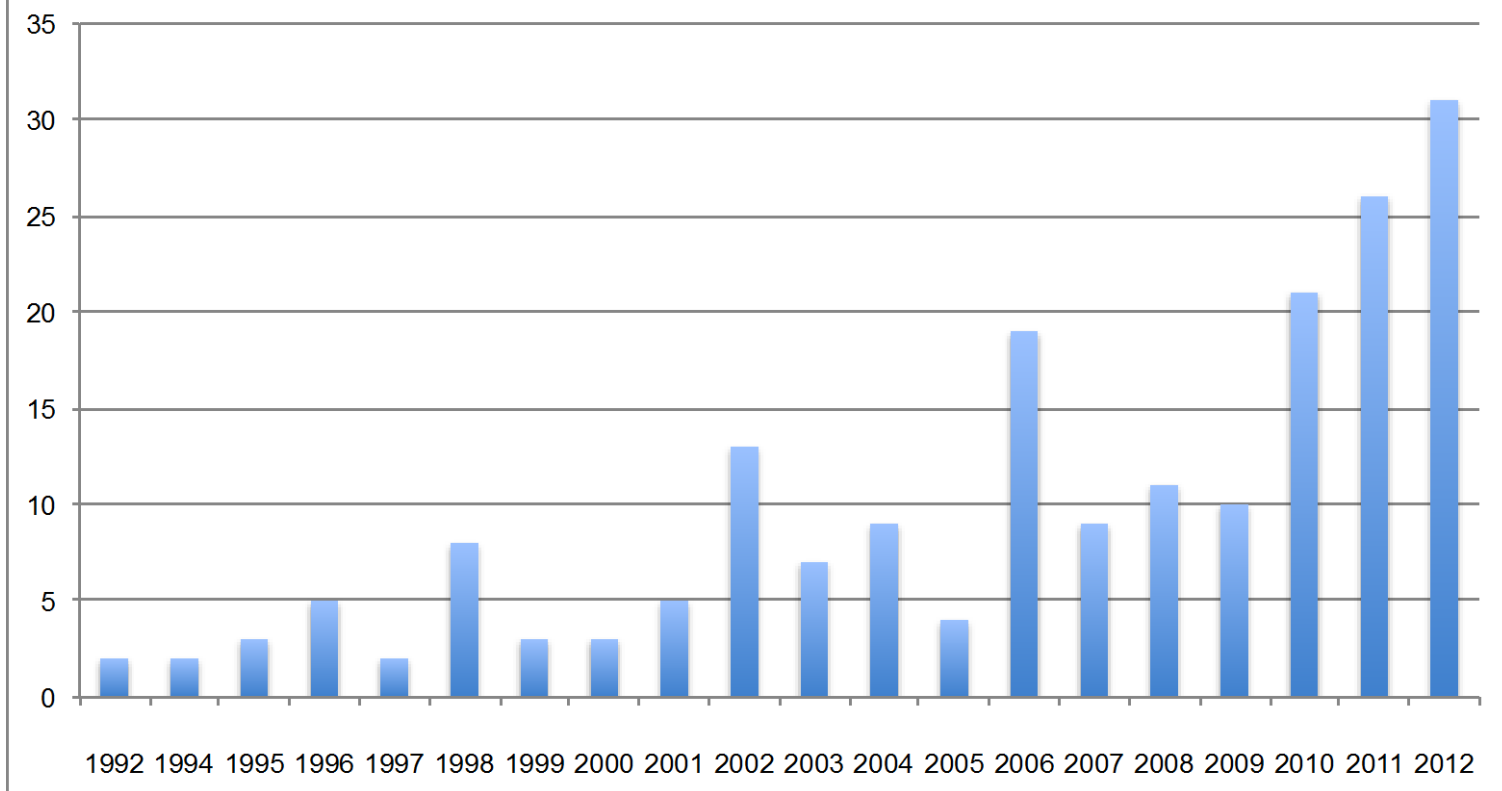
a proč prediktivní řízení na budovy?

- Prediktivní regulátor (dále již jen MPC)
 - je v podstatě matematický předpis našich požadavků na optimální řízení:
 - „Minimalizuj spotřebovanou energii v následujících 24h“
 - „Sleduj, aby maximální odběr nebyl vyšší než limit stanovený tarifem“
 - „Pokud bude velká zima, přitop“
 - „Dodržuj požadovaný rozsah vnitřních teplot“



Výzkumná aktivita na tomto poli

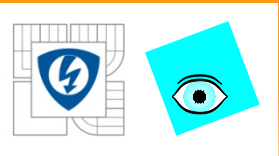
Počet publikací v Energy and Buildings o MPC



20.4.2012

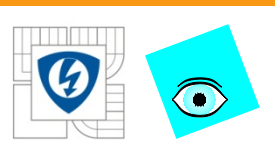
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



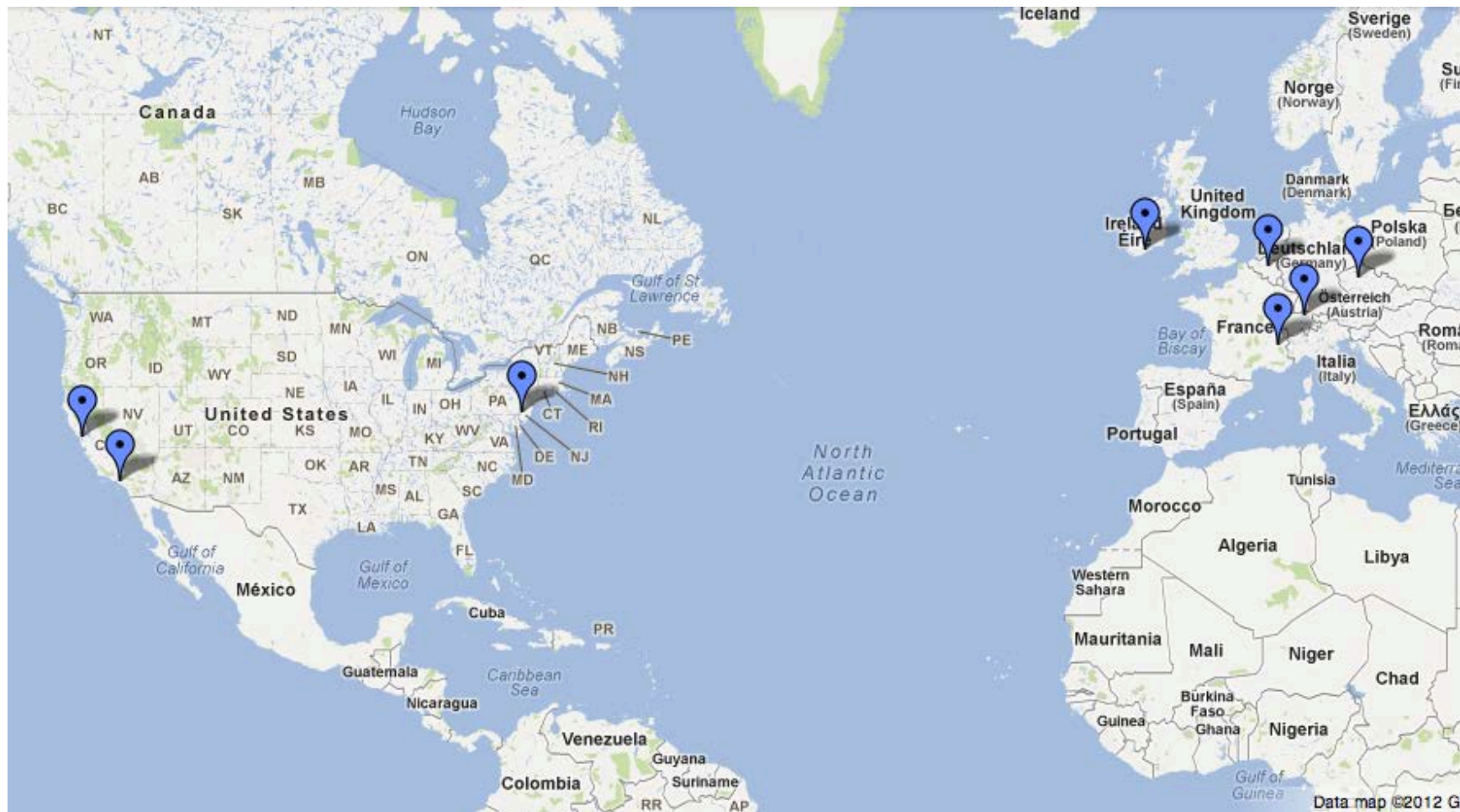


Obsah přednášky

- State-of-the-art
- Formulace MPC problému pro budovy
- Druhy matematických modelů a jejich použití v optimalizaci
- Ukázkový příklad (MPC řízení budovy ČVUT v Praze)
- Shrnutí



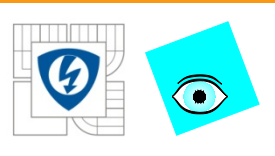
MPC pro budovy: vědecké teamy



20.4.2012

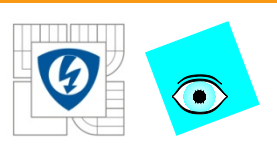
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





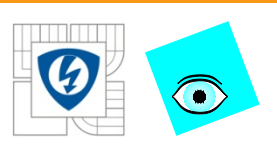
- Výzkumný projekt Opticontrol
 - první fáze se zaměřením na ověření potenciálu MPC na různých typech budov
 - Studie vlivu obsazenosti na energetickou spotřebu
 - Minimalizace odběrových špiček
 - SMPC, LearningBased MPC ...
 - V současnosti snaha o reálné nasazení





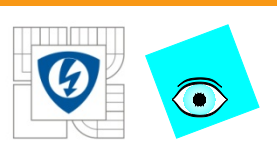
- V první fázi: ověření technologie na univerzitním kampusu
 - MPC pro chladicí systém s velkou kapacitou
 - Porovnávání strategie operátor, MPC a operátor vyškolený MPC
 - Úspory v řádu 10-30% v závislosti na strategii
- Po úspěšném prototypu sledují: nižší úroveň řízení, (stochastické) distribuované MPC.



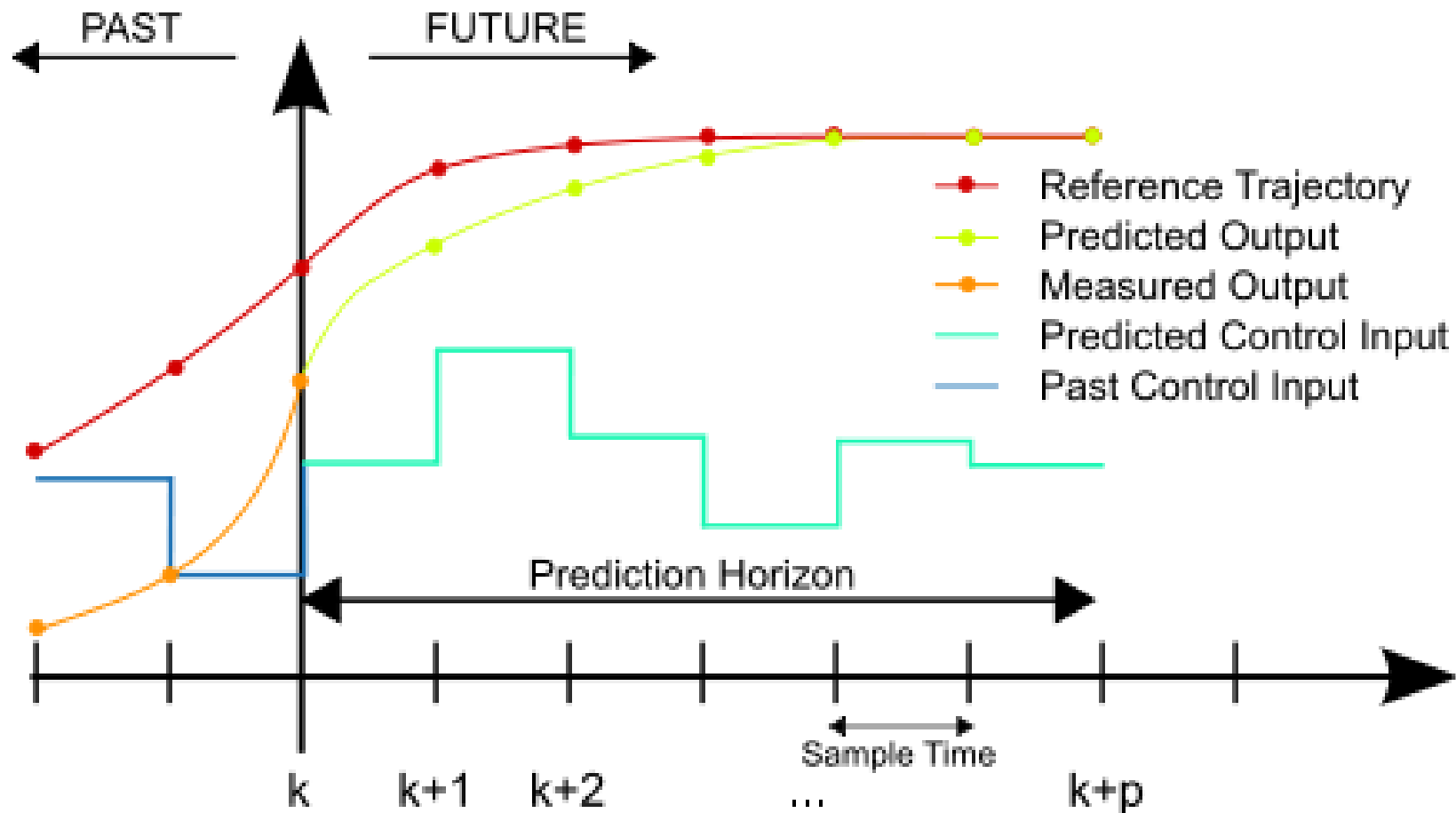


Stručně o ostatních teamech

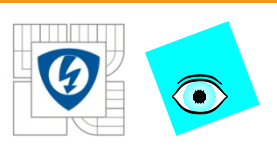
- KU Leuven
 - integrace a optimální využívání obnovitelných zdrojů v řízení budov. Úzké zaměření na tepelná čerpadla.
- University of South California, Supelec (FR) a další
 - integrace „intelligentního“ řízení budov do smart grid
 - různé modelovací přístupy
 - vždy v pozadí nějaký velký průmyslový hráč



MPC strategie

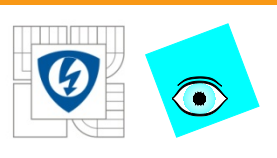


source:http://en.wikipedia.org/wiki/File:MPC_scheme_basic.svg



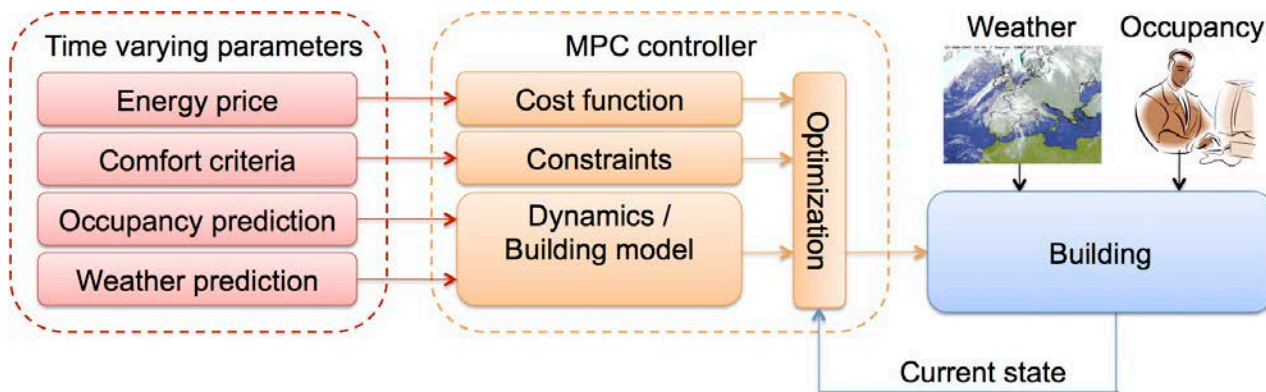
MPC formulace problému

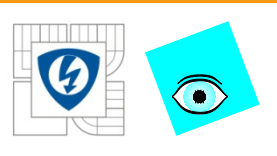
- Kriteriaální funkce by měla vyjadřovat
 - stabilitu/sledování reference
 - performance
- Stav systému, budoucí poruchové veličiny jako parametry optimalizace
- Dynamika budovy, vliv aktuátorů, rozmístění senzorů, tj. matematický model soustavy (v následujícím se omezíme na lineární model se vstupy ve formě tepelných toků)
- Omezení max/min hodnoty, rychlost změny atp.



MPC řešení problému

- Vždy se úloha formuluje formou matematického programování
- Obvykle se převádí na LP nebo QP
- Optimalizační úloha se řeší v každém diskrétním kroku řízení – výpočetní náročnost – není problém u budov





Naivní formulace

$$\min_u \sum_{k=0}^{N_u-1} |u_k|_1$$

subject to:

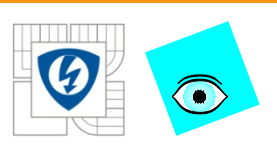
$$F_k x_k + G_k u_k \leq h$$

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + Vv_k \quad k = 1 \dots N_y$$

$$y_k = Cx_k + Du_k + Wv_k \quad k = 1 \dots N_y$$

$$x_0 = x_{init}$$

$$\underline{r}_k \leq y_k \leq \bar{r}_k \quad k = 1 \dots N_y$$



Typická formulace

$$\min_u \sum_{k=0}^{N_u-1} |R_k u_k|_1 + \sum_{k=0}^{N_y-1} |Q_k(y_k - z_k)|_2^2$$

subject to:

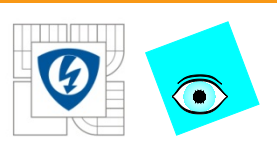
$$F_k x_k + G_k u_k \leq h$$

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + Vv_k \quad k = 1 \dots N_y$$

$$y_k = Cx_k + Du_k + Wv_k \quad k = 1 \dots N_y$$

$$x_0 = x_{init}$$

$$\underline{r}_k \leq z_k \leq \bar{r}_k \quad k = 1 \dots N_y$$



Robustní formulace

$$\min_u \sum_{k=0}^{N_u-1} \left(|R_k u_k|_1 + \delta |u_k - u_{k-1} - p_k|_2^2 \right) + \sum_{k=0}^{N_y-1} |Q_k(y_k - z_k)|_2^2$$

subject to:

$$F_k x_k + G_k u_k \leq h_k$$

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + Vv_k \quad k = 1 \dots N_y$$

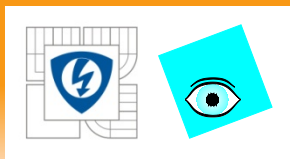
$$y_k = Cx_k + Du_k + Wv_k \quad k = 1 \dots N_y$$

$$u_{-1} = u_{last}$$

$$x_0 = x_{init}$$

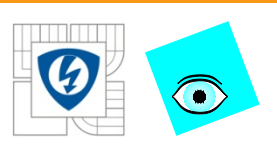
$$\underline{r}_k \leq z_k \leq \bar{r}_k \quad k = 1 \dots N_y$$

$$\underline{\Delta u} \leq p_k \leq \overline{\Delta u} \quad k = 1 \dots N_u$$



Alternativní reprezentace tepelného komfortu: PMV index (1)

- Normy definují splnění tepelného komfortu dvojnásobem
 - referenční pásmo operačních teplot (závisí na typu budovy, jejím využití, ročním období atp.)
 - referenčním pásmem pro PMV (Predicted Mean Vote index): toto pásmo je invariantní vůči ročnímu období, typu budovy atp, protože PMV přímo vyjadřuje vnímání tepla/zimy v konkrétním prostředí
 - PMV je složitá funkce teploty vzduchu, stěn, vlhkosti, oblečení, aktivity atp.



Alternativní reprezentace tepelného komfortu: PMV index (2)

Symbol	Quantity	Typical values	Units
M	Metabolic rate	46–232	W/m ²
W	Effective mechanical power	≥ 0	W/m ²
I_{cl}	Clothing insulation	0–0.31	m ² K/W
f_{cl}	Clothing surface area factor	0–1	-
t_a	Air temperature	10–30	°C
$\bar{t}_r$	Mean radiant temperature	10–40	°C
v_{ar}	Relative air velocity	0–1	m/s
p_a	Water vapor partial pressure	0–2700	Pa
h_c	Convective heat transfer coefficient	0–12.1	W/m ² K
t_{cl}	Clothing surface temperature	10–30	°C

$$PMV = (0.303 \cdot \exp(-0.036 \cdot M) + 0.028) \cdot L,$$

$$L = (M - W)$$

$$- 3.05 \cdot 10^{-3} \cdot (5733 - 6.99 \cdot (M - W) - p_a) - 0.42 \cdot ((M - W) - 58.15)$$

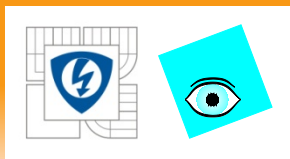
$$- 1.7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - t_a)$$

$$- 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot ((t_{cl} + 273.16)^4 - (\bar{t}_r + 273.16)^4) - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a),$$

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot (3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot ((t_{cl} + 273.16)^4 - (\bar{t}_r + 273.16)^4) + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a))$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0.25} & \text{if } 2.38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0.25} \geq 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{if } 2.38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0.25} < 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases},$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290 \cdot I_{cl} & \text{if } I_{cl} \leq 0.078 \\ 1.05 + 0.645 \cdot I_{cl} & \text{if } I_{cl} > 0.078 \end{cases}.$$



Alternativní reprezentace tepelného komfortu: PMV index (3)

$$\min_u \sum_{k=0}^{N_u-1} \left(|R_k u_k|_1 + \delta |u_k - u_{k-1} - p_k|_2^2 \right) + \sum_{k=0}^{N_y-1} |Q_k (PMV_k - z_k)|_2^2$$

subject to: PMV formula $k = 1 \dots N_y$

$$F_k x_k + G_k u_k \leq h_k$$

$$x_{k+1} = A x_k + B u_k + V v_k \quad k = 1 \dots N_y$$

$$y_k = C x_k + D u_k + W v_k \quad k = 1 \dots N_y$$

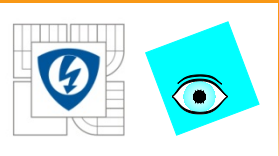
$$u_{-1} = u_{last}$$

$$x_0 = x_{init}$$

$$\underline{PMV}_k \leq z_k \leq \overline{PMV}_k \quad k = 1 \dots N_y$$

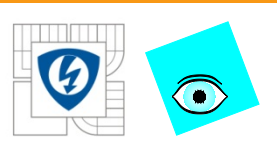
$$\underline{\Delta u} \leq p_k \leq \overline{\Delta u} \quad k = 1 \dots N_u$$

- Konvexní aproximace odvozena (linearizace)
- Řešení vykazuje ještě úspornější chování



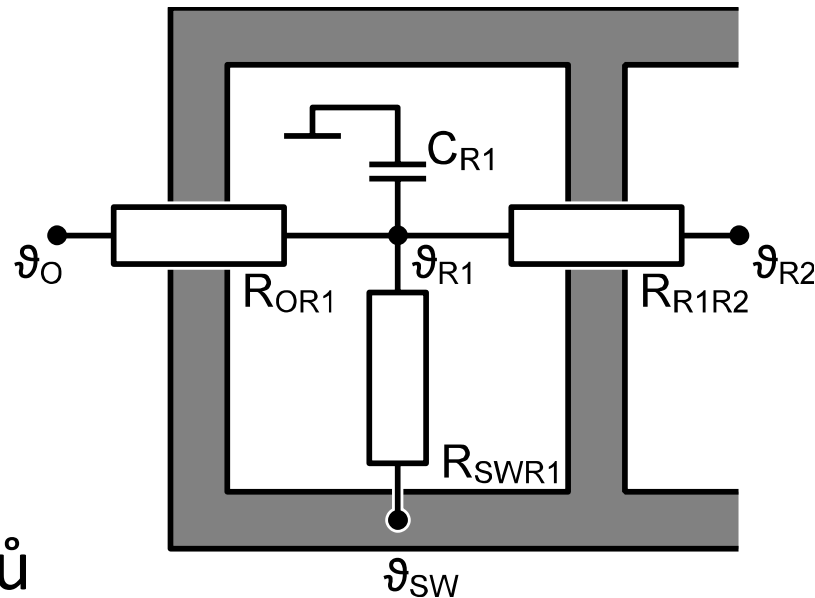
Matematické modely budov

- Ve stavebnictví se používají detailní modely založené na konstrukčních plánech
 - implicitní, nevhodné pro optimalizaci
 - ale možnost využít je k získání pestrých identifikačních dat
- Přístupy k získání explicitního modelu budovy
 - gray box
 - black box
 - white box

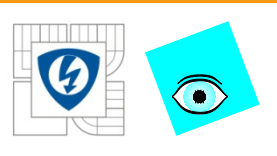


Gray-box metody

- Vytvořena hrubá struktura budovy
- Složena z odporových a akumulačních prvků
- Parametry se buď identifikují metodami odhadu koeficientů diferenciálních rovnic
- Nebo se struktura diskretizuje a problém řeší nejmenšími čtverci s omezením

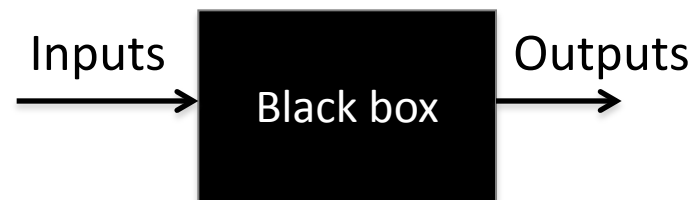


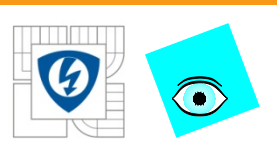
$$\begin{aligned} -\dot{\vartheta}_{R1} = & \frac{1}{C_{R1} R_{SWR1}} (\vartheta_{R1} - \vartheta_{SW}) \\ & + \frac{1}{C_{R1} R_{OR1}} (\vartheta_{R1} - \vartheta_O) \\ & + \frac{1}{C_{R1} R_{R1R2}} (\vartheta_{R1} - \vartheta_{R2}) \end{aligned}$$



Black-box metody

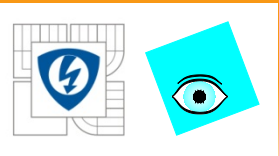
- Subspace identifikace
- ARX, ARMAX a další
- Předpokladem dobré funkčnosti těchto identifikačních metod jsou dostatečně vybuzená IO data, v praxi lze dosáhnout experimenty na budovách (vhodné Vánoce, Velikonoce atp.)
- Energetická cena experimentu je ale vysoká
- V porovnání s Gray-box metodami potřebují i větší počet vzorků dat
- Jejich numerická náročnost je ale obvykle nižší





Porovnání modelovacích technik

	Building simulation software modeling	RC modeling – tab- ular data driven	RC modeling – sta- tistical estimation	Statistical Identifi- cation
Planing data from archi- tects and engineers need	yes	yes	no	no
Operation data need	no	no	yes	yes
HVAC engineering back- ground needed	yes	yes	no	no
Result is achieved in de- fined time	yes	yes	no	no
Use of prior information about building	yes	yes	yes	no
Continuous model update	no	no	yes	no
MPC applicable	no	yes	yes	yes

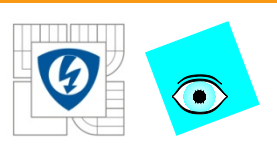


Poznámka na okraj

- ARX, ARMAX metody patří do třídy PEM (Prediction Error Methods) – minimalizace jednokrokové predikce
- Pro účely MPC je ale vhodné minimalizovat chybu predikce na celém horizontu predikce
- tj. alternativní kritérium identifikace ve tvaru:

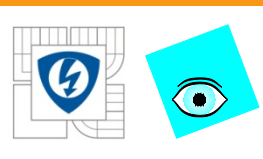
$$J_{MPC} = \frac{1}{(N - P) P} \sum_{k=1}^{N-P} \sum_{i=1}^P (y_{r,k+i} - y_{k+i})^2,$$

- P je počet dat, N je horizont predikce
- Nelineární, ale vede na dobré výsledky u budov

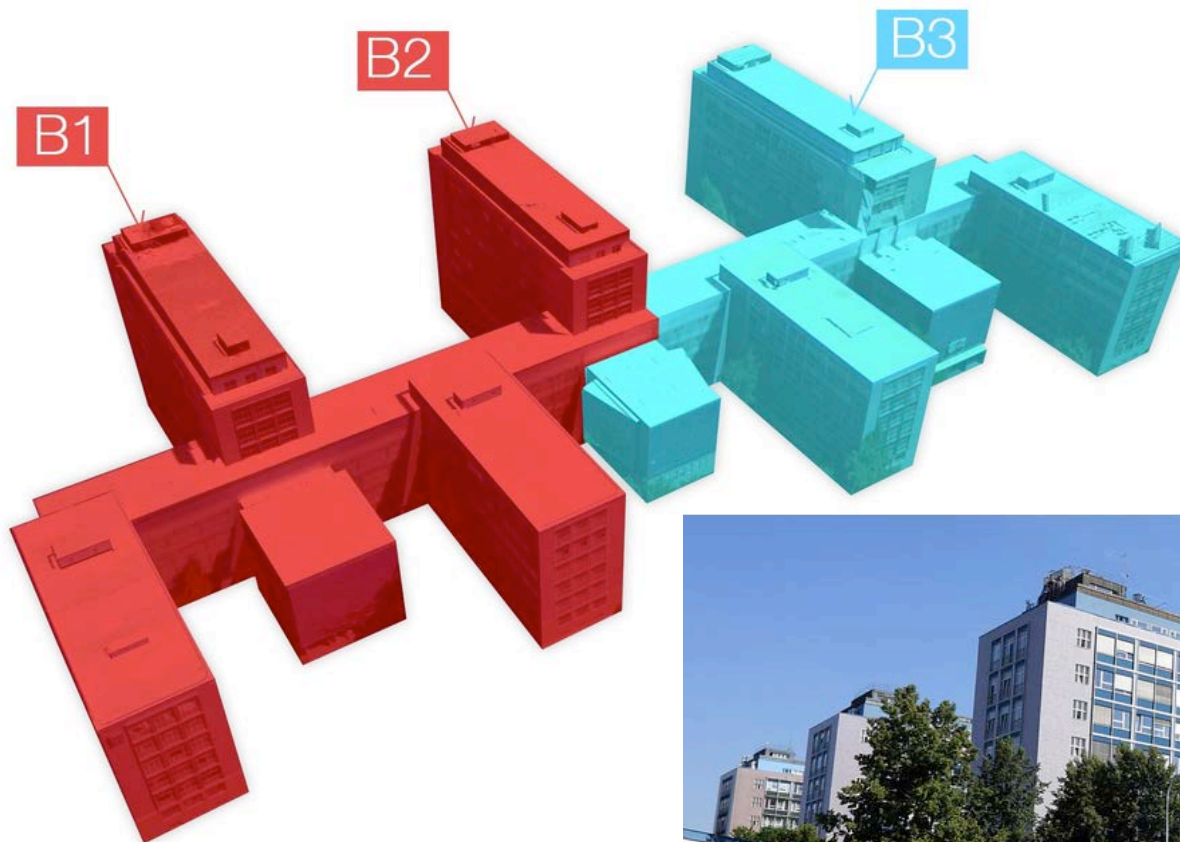


Implementace

- Necht' máme model pro řízení a navrženou MPC strategii
- Poté už zbývá jen implementace
 - Nutné získat počasové data (NOAA, wunderground.com, ČHMÚ atp.)
 - Rozvrhy obsazenosti, referencí, omezení, ceny energií
- Implementace na reálné budově:
 - vlastní řešení, nebo
 - BCVTB (<http://simulationresearch.lbl.gov/bcvtb>)



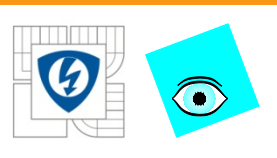
Případová studie: budova ČVUT (1)



20.4.2012

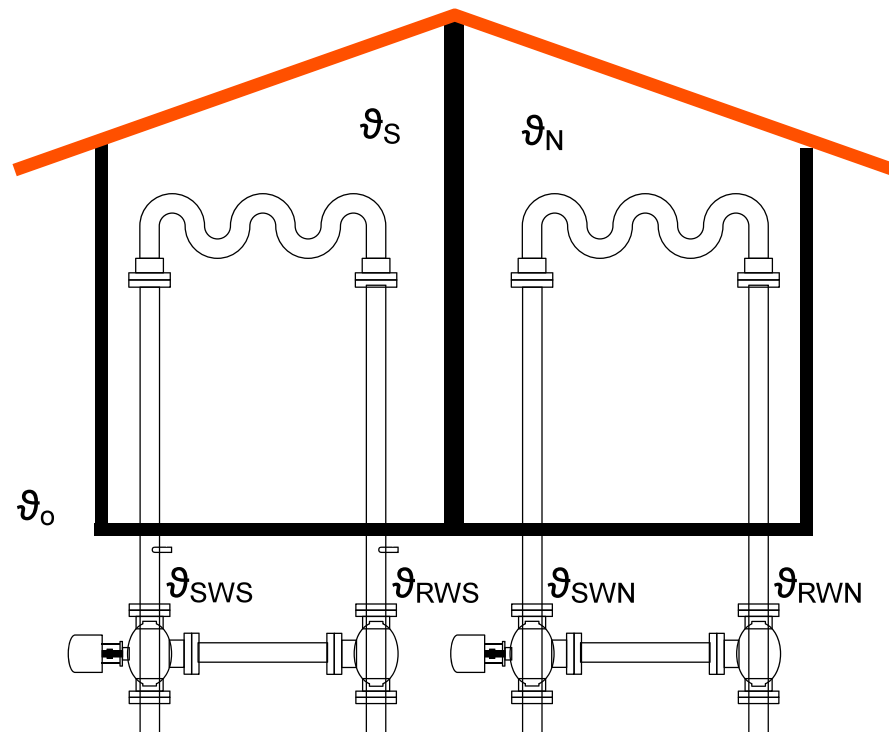
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

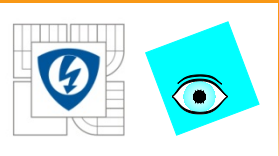




Případová studie: budova ČVUT (2)

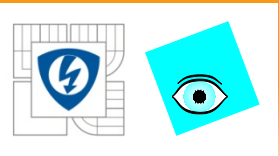
- Critall typ vytápění
- Jeden blok: dva topné okruhy
- Optimalizujeme teplotu topné vody do každého okruhu
- PID na nižší úrovni zajistí dodržení set-pointu
- Všechny zmíněné metody ověřované





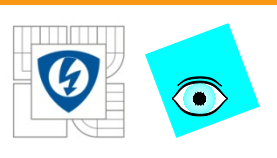
Případová studie: budova ČVUT (3)

- Cíle řízení:
 - minimalizace energie – vypočítávána jako rozdíl topné a vratné vody (konstantní průtok)
 - cena energie je konstantní
 - dodržení tepelného komfortu
 - protože se jen topí, existuje jen dolní limit 22 °C na teplotu v referenčních místnostech (každý blok má jednu nebo několik takových místností) v průběhu pracovních hodin
 - Mimo pracovní dobu se budova temperuje na min 19 °C



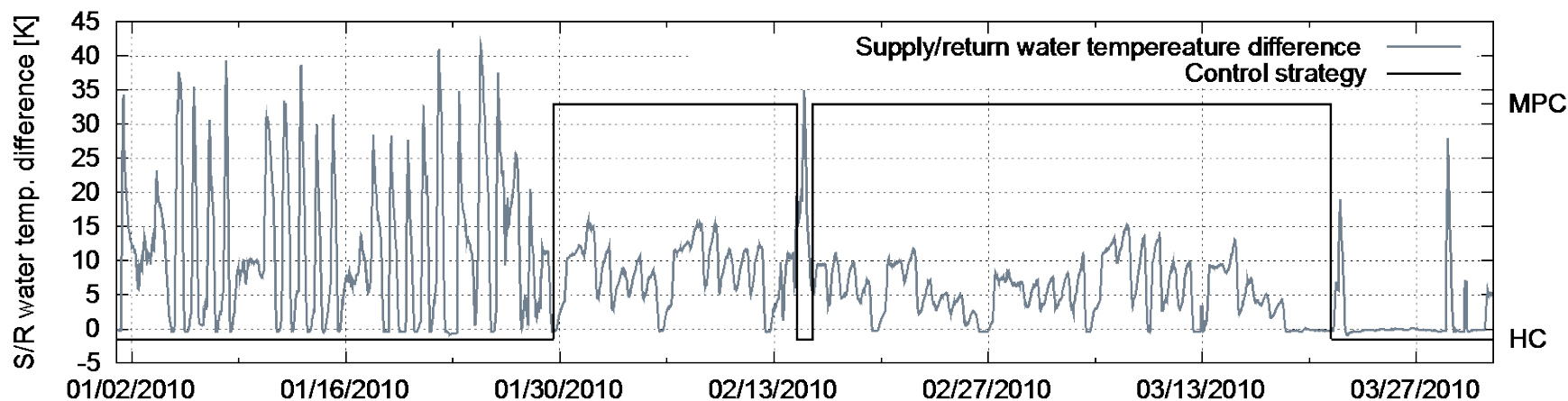
Případová studie: budova ČVUT (4)

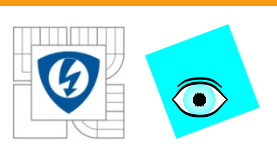
- Omezení:
 - Požadované teploty jsou omezení na slack variables
 - topná voda je v rozpětí 15 a 55 °C (v létě chlazení)
 - rychlost změny teploty topné vody je max 1°C za minutu
- Ostatní nastavení
 - Horizont predikce: „obvykle“ 2 dny
 - Perioda vzorkování: 18 až 30 minut
 - Zdroj počasí: NOAA (budova leží ve vrcholu gridu)



Případová studie: budova ČVUT (5)

- Výsledky:
 - MPC vykazuje mnohem hladší charakteristiky vstupního signálu – minimalizace odběrových špiček automaticky
 - MPC vhodně a včas předtápí budovu





Případová studie: budova ČVUT (6)

- Výsledky statisticky:

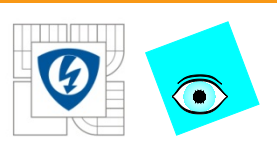
- Heating degree day

$$HDD = \sum_{k=T_{begin}}^{T_{end}} y_{r,k} - \vartheta_{o,k},$$

- Spotřebovaná energie je úměrná

$$E_{CM} = \sum_{k=T_{begin}}^{T_{end}} (\vartheta_{sws,k} - \vartheta_{rws,k}) + (\vartheta_{swn,k} - \vartheta_{rwn,k}).$$

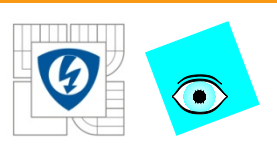
block - control	E_{CM}/HDD	mean ϑ_o [°C]	mean ϑ_s, ϑ_n [°C]	days compared	relative MPC savings
B_1 - HC	0.906	3.8	21.6	84	28.74 %
B_1 - MPC	0.645	3.2	21.8	49	
B_2 - HC	0.813	4.0	21.7	85	26.83 %
B_2 - MPC	0.595	3.0	21.7	49	
B_3 - HC	1.532	3.8	20.9	84	17.67 %
B_3 - MPC	1.262	3.2	21.9	49	



Případová studie: budova ČVUT (7)

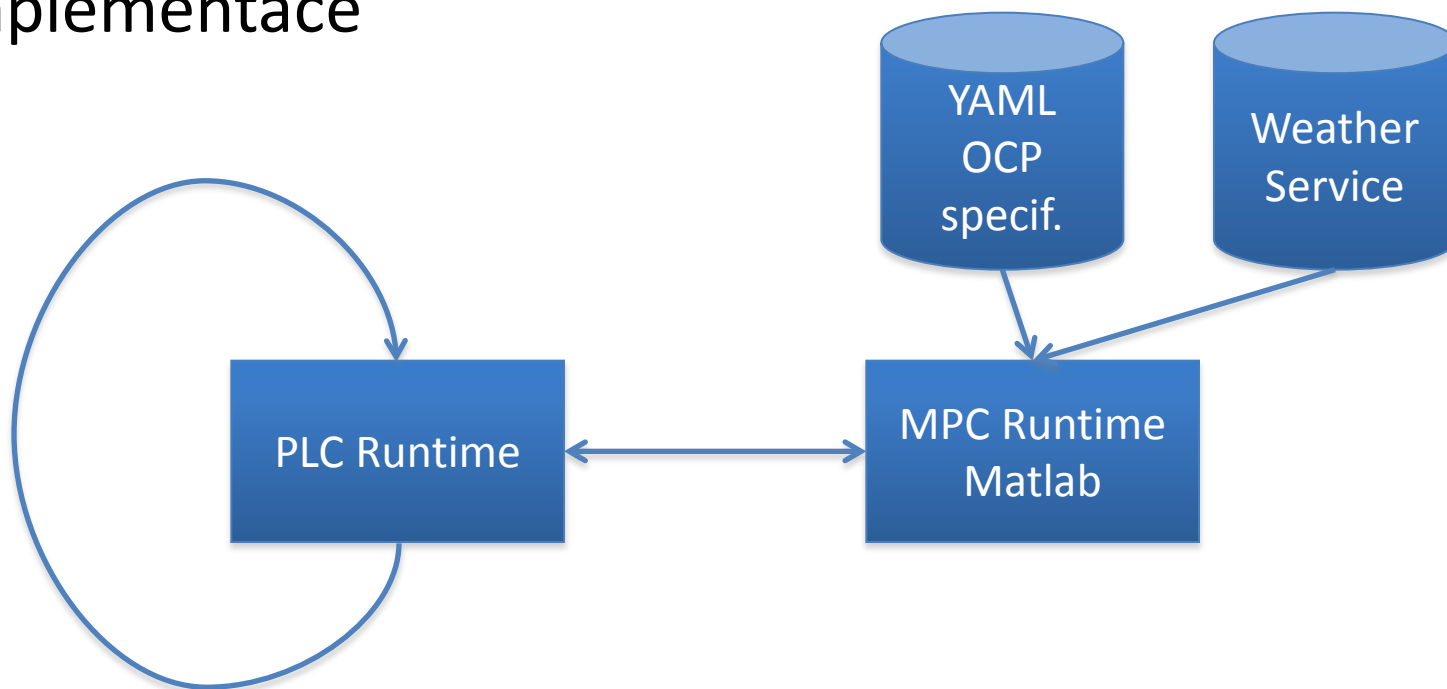
- Výsledky statisticky:
 - Křížové porovnání (jednotlivé bloky mají podobné termodynamické vlastnosti)
 - Týden MPC na prvním a HC na druhém a druhý týden obráceně

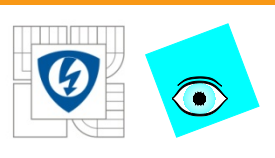
	mean ϑ_o [°C]	B_1		B_2		MPC savings
		control	mean ϑ_s, ϑ_n [°C]	control	mean ϑ_s, ϑ_n [°C]	
1 st week	-3.4	HC	21.4	MPC	21.1	15.54 %
2 nd week	-1.3	MPC	21.4	HC	20.9	16.94 %



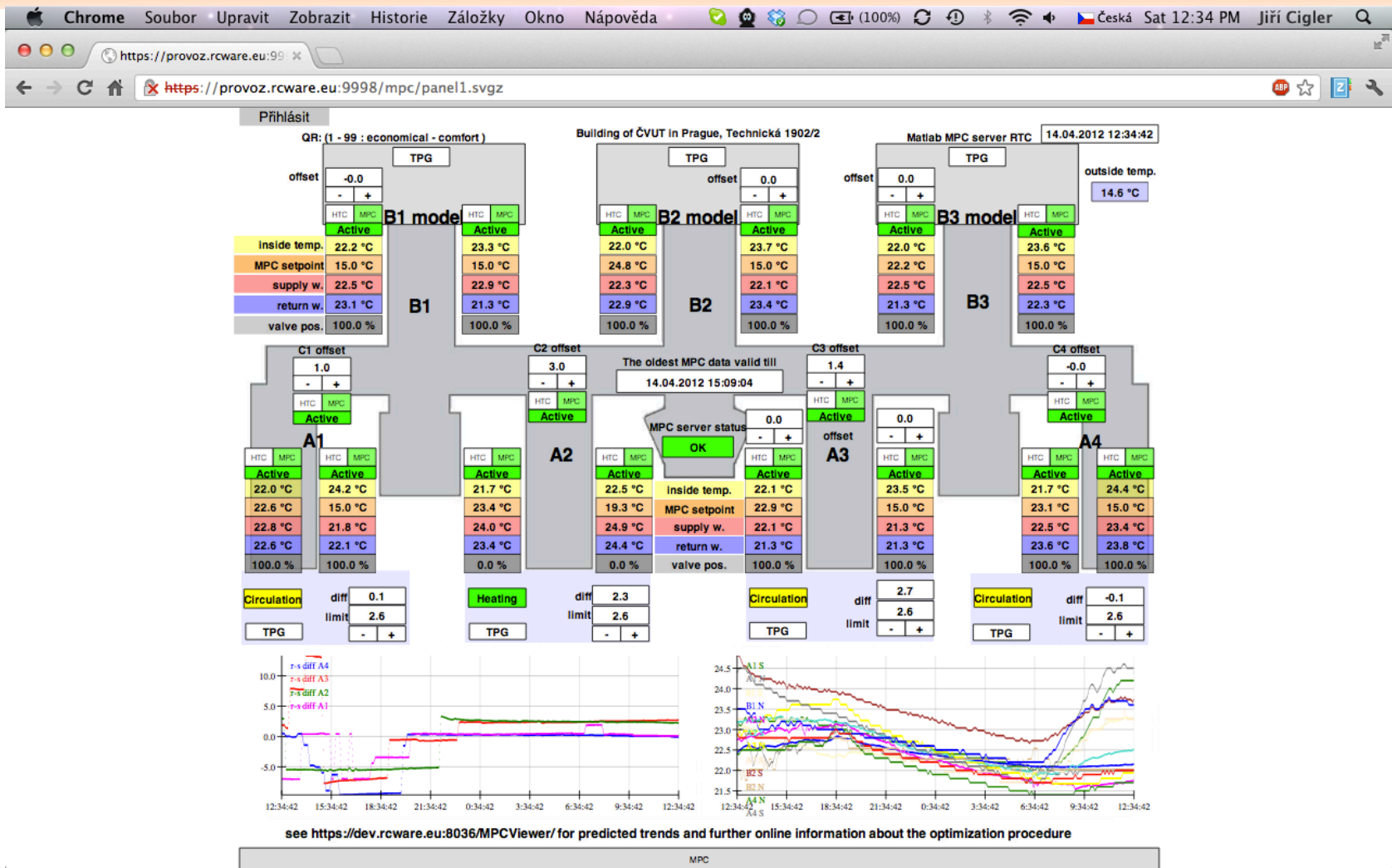
Případová studie: budova ČVUT (8)

- Implementace



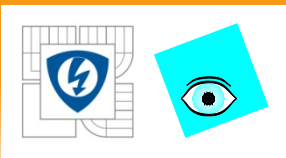


WebPanel



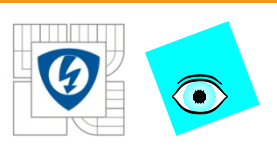
20.4.2012

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



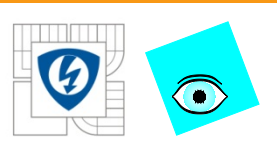
Další pokusy s budovou ČVUT: Hybridní MPC

- Každý blok je tvořen severní a jižní větví
- V situacích, kdy jsou sluneční zisky na jižní straně velmi výrazné a tato větev je přetopená, lze přepnout mód topného systému
- topná voda poté cirkuluje skrz obě větve bez jakékoliv dodávky energie.
- Energie se přesouvá z přetopeného jihu na (nedotopený) sever.
- Okamžik přepnutí módu lze formulovat jako optimalizační úlohu
- Každý mód má svůj LTI model



Shrnutí

- Budovy skýtají velký potenciál energetických úspor
- MPC strategie přirozenou formou řeší problém optimálního řízení budov a
- Problémem zůstává otázka získání matematického modelu (úroveň detailu, přesnost atp)
- Krok od simulace k nasazení je velmi dlouhý a náročný



Reference

- 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):564-572.
- Široký J, Oldewurtel F, Cigler J, Prívara S. Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system. *Applied Energy*. 2011;88(9):1-9.
- Cigler J, Prívara S. Subspace Identification and Model Predictive Control for Buildings. In: *Proceedings of 11th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision.*; 2010.
- Prívara S, Váňa Z, Gyalistras D, et al. Modeling and Identification of a Large Multi-Zone Office Building. In: *2011 IEEE Multi-Conference on Systems and Control.*; 2011