

Využití tepelných čerpadel v budovách (6)

Pátá část našeho seriálu se věnovala odhadu parametrů metodou levenberg-marquard na různých časových úsecích. Celý proces byl odladěn na šesti sadách parametrů. V šestém pokračování se budeme zabývat návrhem a simulací řízení vytápěcího systému pro Bioregenu.

Návrh a simulace řízení vytápěcího systému pro Bioregenu

V této kapitole se budeme snažit optimalizovat řídicí veličiny tak abychom docílili stabilní průběh pokojové teploty s minimální hodnotou 20°C s co nejnižšími náklady na vytápění. Porovnáme průběhy kdy se budeme snažit minimalizovat pouze energetické náklady bez ohledu kolik stojí elektrická energie nebo stejný objem energie uvolněný při vytápění plynovým kotlem s průběhy ve kterých se budeme snažit minimalizovat finanční náklady na vytápění. Řídicí signály bude vypočítávat ACADO toolkit pomocí implementovaných algoritmů založených na metodách Newtona nebo levenberg-marquardta jež nám umožňují zadávat jak limitní podmínky (např. saturace, omezení stavu minimální hodnotou) tak i minimalizační podmínky pro nalezení nejnižší ceny řízení a nejmenší odchylky od požadované pokojové teploty.

Funkce COP pro tepelná čerpadla

Dříve než se dostaneme k samotné optimalizaci řízení, budeme potřebovat určit COP tepelných čerpadel aby simulace jeho výkonu tepelného čerpadla při dané venkovní teplotě byla věrohodná.

K dispozici jsou dvě totožná tepelná čerpadla typu MACH VHM 40,2 s chladivem R 507, tudíž COP obou čerpadel budou totožná, Z technické specifikace tepelného čerpadla máme k dispozici následující tab. 21.

MACH VHM 40,2	A7/ /W50	A0/ /W50	A-15/ /W50	A7/ /W35	A0/ /W35	A-20/ /W35
Tepelný výkon [kW]	48,8	33,8	24,2	49,2	36,6	21,8
Celkový příkon [kW]	15,10	13	11,6	12,85	12	8,99
Topný faktor (COP) [-]	3,2	2,6	2,1	3,8	3,1	2,4

Tab. 21 Parametry tepelného čerpadla Mach VHM 40,2

Pro upřesnění výraz v druhé buňce A7/W50 znamená, že pro venkovní teplotu 7°C a teplotu vratné vody 50 vytápí tepelné čerpadlo s topným faktorem 3,2. Dále, pro zjednodušení, budeme uvažovat, že maximální příkon tepelného čerpadla bude roven 12kW. Pomocí Matlabu se podařilo naměřené hodnoty proložit, jako závislost COP na venkovní teplotě a teplotě vratné vody. Proložená funkce vypadá následovně:

$$\begin{aligned} COP_{bez_saturace}(t) = & -9.3125 + 0.1145 \cdot T_{out}(t) + 0.0024 \cdot T_{out}(t)^2 + \\ & + 0.0009 \cdot T_{out}(t) \cdot T_{vratná}(t) + \\ & + 0.6264 \cdot T_{vratná}(t) - 0.0078 \cdot T_{vratná}(t)^2 \end{aligned} \quad (27)$$

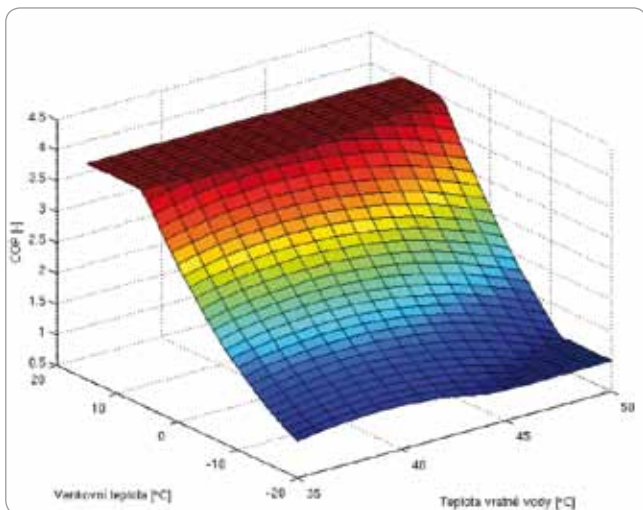
Z logické úvahy nejnižší smysluplný výkon dodaný tepelným čerpadlem je roven příkonu tepelného čerpadla a minimální COP=1, proto jsme funkci ošetřili následovně:

$$COP_{s_horni_saturaci}(t) = \frac{\text{abs}(COP_{s_saturace}(t) - 1) + COP_{s_saturace}(t) - 1}{2} + 1 \quad (28)$$

Součet hodnoty s absolutní nám zajistí nulový výsledek pro záporné vstupní hodnoty a dvojnásobný pro kladné, jež po vydělení dvěma odpovídají původní. Tím se podařilo saturovat záporné hodnoty do nuly a odečet jednotky od vstupní veličiny zajistí saturaci hodnot nižších než jedna, kterou je nutné opět přičíst k výsledku aby hodnoty byly odpovídající. Obdobně pro horní saturaci COP, která nebývá vyšší než 4:

$$COP_{s_saturaci}(t) = \frac{-\text{abs}(COP_{s_horni_saturaci}(t) - 4) + COP_{s_horni_saturaci}(t) - 4}{2} + 4 \quad (29)$$

Výslednou závislost COP lze vyobrazit ve 3D grafu (obr.20):



Obr. 20 Závislost COP na Teplotě vratné vody a Venkovní teplotě

Proložena závislost COP je nelineární a klesající z hlediska změny teploty vratné vody. Jinými slovy řečeno Při vysoké teplotě vratné vody je pro tepelné čerpadlo těžší více zvyšovat její teplotu.

Minimalizační kritéria a podmínky optimalizace

Pomocí ACADO toolkitu se budeme snažit minimalizovat dvě kritéria:

$$\min \left\{ (1 - K) \cdot \left(u_1(t) \cdot \frac{\text{cena_elektriny} + \text{cena_plynu} \cdot u_2(t)}{COP(t)} \right) \right\} \quad (30)$$

$$\min \left\{ K \cdot (x_2(t) - x_{2_ref})^2 \right\} \quad (31)$$

Kde

- u_1 je součet výkonů obou tepelných čerpadel v [kW]
- cena_elektriny – bezrozměrná veličina vycházející ze vztahu (32)
- cena_plynu – bezrozměrná veličina vycházející ze vztahu (33)
- x_{2_ref} – konstantní referenční hodnota pro teplotu pokoje [°C]
- x_2 – simulovaná teplota pokoje [°C]
- K – parametr vážící důležitost kritérií vůči sobě [-]

Další vztahy definují ceny energií, kterými budeme vážit řídicí veličiny:

$$\text{cena_elektriny} = \frac{\text{cena_energie_elektriny}}{\text{cena_energie_plynu} + \text{cena_energie_elektriny}} \quad (32)$$

$$\text{cena_plynu} = \frac{\text{cena_energie_plynu}}{\text{cena_energie_plynu} + \text{cena_energie_elektriny}} \quad (33)$$

kde $\text{cena_energie_elektriny}$ je cena elektrické energie v Kč/kWh, kterou jsme podle zdroje [11] určily 5Kč/kWh
 $\text{cena_energie_plynu}$ – cena plnu při spálení jedné kWh, kterou jsme určili 1,42 Kč/kWh pomocí následujícího vzorce (34)

$$\text{cena_energie_plynu} = \frac{\text{cena_plynu}}{\text{spalni_teplo}} \quad (34)$$

kde

cena_plynu je cena plynu za objemovou jednotku v Kč/m³, která činní 15Kč/m³ zdroj [11]

spalni_teplo – tepelný zisk při spálení m³ plynu v kWh/m³, která činní 10,599 kWh/m³ [12]

Zbývá nám ještě definovat doplňující podmínky pro saturace stavů a řídicích signálů ve formě nerovností:

$$20 \leq x_1(t) \leq 50 \quad (35)$$

$$19 \leq x_2(t) \leq 25 \quad (36)$$

$$0 \leq u_1(t)/COP(t) \leq P_{\text{max}} \quad (37)$$

$$0 \leq u_2(t) \leq P_{\text{kotle_max}} \quad (38)$$

kde

P_{max} je celkový maximálních příkon tepelných čerpadel, který podle tab. 21 odpovídá 30kW

$P_{\text{kotle_max}}$ – celkový maximální výkon plynových kotlů odpovídající hodnotě 300kW

Nyní nám zbývá určit váhu mezi kritérii, kterou jsem určil s hodnotou 0.9 ve prospěch minimalizace regulační odchylky od reference a prvnímu kritériu (30) zbývá doplněk k jednotce tj. 0,1. Tato volba hodnoty K je důsledkem potřeby menší odchylky od referenční hodnoty ke konci každého intervalu, na kterém se řízení navrhuje.

Návrh řízení

Následující sady, na kterých bylo řízení navrženo byly zvoleny tak, aby pokryly pokud možno co největší spektrum venkovních teplot. Jako první budeme analyzovat druhou sadu, která zahrnuje převážně záporné venkovní teploty v rozsahu od -18 do -3 °C. Pro třetí sadu odpovídají venkovní teploty kolem nulové hodnoty od -5 do +5 °C a pro čtvrtou sadu kladné venkovní teploty mezi 5 až 18 °C. Celkový interval jednotlivých sad bylo zapotřebí, pro jejich velký objem dat způsobující ACADU výpočetní problémy, rozdělit na menší intervaly a pro každý z nich vypočítat příslušný průběh řídicích veličin s tím, že koncové hodnoty stavů a vstupů systému byli brány jako počáteční podmínky do dalšího intervalu.

Řízení druhé sady

Řídicí signály v prvním grafu (obr. 21) byli vygenerováni ACADO toolkitem, kdy jsme se snažili minimalizovat kritéria (30) a (31). Průběhy výkonů tepelných čerpadel a plynových kotlů na hranicích jednotlivých intervalů značně kolísají, což je způsobeno tím, že ACADO ke konci každého neuvažuje regulaci následujícího intervalu a snižuje výkon na mezní úroveň což způsobí potřebu jeho rapidního zvýšení v následujícím intervalu. Mimo výkyvů řídicích veličin při přechodu z jednoho intervalu na druhý dochází ke značným změnám výkonů i v průběhu intervalů, proto bylo nutné do ACADA vnést následující kritérium:

$$\min \{ \delta u(t)_1^2 + \delta u(t)_2^2 \} \quad (39)$$

které nám minimalizuje velikost změny řídicích veličin. Bohužel zapsat jednoduše kritérium s derivacemi nelze. Bylo nutné derivaci zapsat v diskretní podobě jako rozdíl současné a minulé hodnoty, kterou jsme také neměli k dispozici, proto jsme si ji vytvořili zavedením dalších dvou stavů, pro každý řídicí vstup jeden:

$$x_3^*(t) = \tau \cdot (u_1 - x_3) \quad (40)$$

$$x_4^*(t) = \tau \cdot (u_2 - x_4) \quad (41)$$

Jedná se o systémy prvního řádu kde konstanta τ určuje rychlost náběhu výstupní veličiny na hodnotu vstupní veličiny, tudíž stavy x_3 a x_4 při každé změně potřebují určitý čas aby se dostali na hodnotu vstupů u_1 a u_2 , proto lze říci že stavy x_3 a x_4 reprezentují minulé hodnoty vstupů u_1 a u_2 a výsledné kritérium minimalizující změnu řídicích veličin lze psát následovně:

$$\min \{ (u_1(t) - x_3(t))^2 + (u_2(t) - x_4(t))^2 \} \quad (42)$$

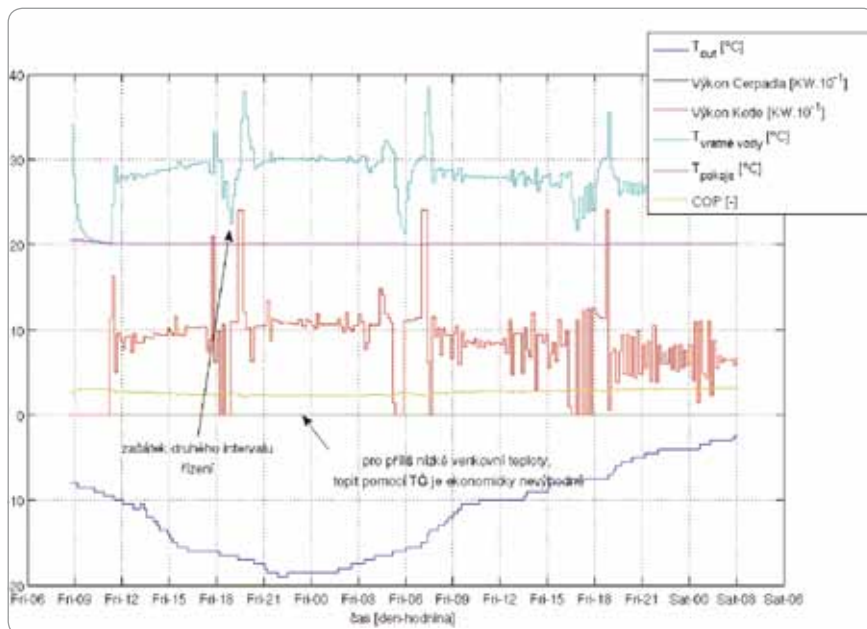
Nakonec zbývá upravit váhy jednotlivých kritérií, tak aby jejich součet byl roven jedné zavedením konstanty L s experimentálně zvolenou hodnotou 0.98:

$$\min \{ K \cdot (L - 1) (u_1(t) - x_3(t))^2 + (u_2(t) - x_4(t))^2 \} \quad (43)$$

$$\min \left\{ (1 - K) \cdot \left(\frac{u_1(t) \cdot \text{cena_energie_elektriny}}{\text{COP}(t)} + \text{cena_energie_plynu} \cdot u_2(t) \right) \right\} \quad (44)$$

$$\min \left\{ L \cdot K \cdot (x_2(t) - x_{2_ref})^2 \right\} \quad (45)$$

Jinými slovy řečeno konstanta L váží důležitost kritérií (43) až (45).



Obr. 21 Simulace řízení druhé sady bez omezení změny řídicích veličin

S dalším kritériem jsme získali hladké průběhy veličin, kde si lze všimnout i známých, nyní tlumených, výkyvů nejen řídicích veličin na hranicích sousedních intervalů, které jsem se snažil eliminovat nejen přidáním kritéria (44) ale i zahazením posledních navržených hodnot řídicích veličin ke konci každého intervalu, kdy řídicí veličina klesla ještě na přijatelnou hodnotu a následný výkyv nebyl tak veliký.

Literatura

- [11] MUDr. Zbyněk Mlčoch : osobní web [online]. Praha, 2003 - 2011 [cit. 2010-07-07]. Dostupný z WWW: < <http://www.zbynekmlcoch.cz/info/> >
- [12] Spotřeba energií objektu Bioregena. Interní materiál firmy ENERGOCENTRUM PLUS, s.r.o. [verze z 12.9.2010]

V dalším pokračování dokončíme ukázky řízení na třetí a čtvrté sadě parametrů a taky se budeme zabývat ekonomickou a energetickou úsporou navrženého řízení.

Ing. Alexander Ciller