

MINIMALIZACE NÁKLADŮ A AUTOMATICKÉ ŘÍZENÍ

THE COST MINIMIZATION AND AUTOMATIC CONTROL

František Dušek¹, Daniel Honc²

Anotace: Řízení vycházející z ekonomických kritérií se používá obvykle až ve vyšších úrovních řízení a probíhá za přímé účasti člověka tj. nejde o automatické řízení v reálném čase. V článku je ukázáno, že za určitých okolností lze čistě ekonomické kritérium (minimalizace nákladů na dosažení a udržení požadovaného stavu) zařadit jako součást cíle plně automatického řízení tj. použít ekonomické kritérium i na nižších úrovních řízení. Základním předpokladem je, aby řízený systém měl více ovládaných vstupů než řízených výstupů. Dalším požadavkem je umět stanovit náklady na realizaci jednotlivých ovládaných vstupů. Je ukázán princip řešení – formulace problému jako úlohy hledání vázaného extrému. Jsou uvedeny dva příklady návrhu řízení s rozšířením cíle řízení o další požadavek – minimalizace nákladů na řízení. Jeden příklad se zabývá doplněním požadavku na nákladovou minimalizaci do návrhu jednoduchého decentralizovaného řízení (fiktivního) systému s čtyřmi vstupy a třemi výstupy. Druhý případ ukazuje způsob přidání požadavku minimalizace nákladů do sofistikovaného prediktivního řízení ideálního termostatu.

Klíčová slova: automatické řízení, vícerozměrové systémy, náklady na řízení

Summary: The control based on economical cost function is used in general in higher control level and runs over direct human participation i.e. it isn't real time automatic control. In article it is shown that (under some circumstances) it is possible to incorporate the economical cost function (minimum of costs to reaching and maintenance of control goal) into full automatic control i.e. to use economical cost in low level control. The basic presumption is a controlled system with more inputs than out-puts. An additional demand is to know the cost for ever manipulated inputs. It is shown the solution principle – problem formulation as a task of constrained extreme finding. There are introduced two examples of control design that include control cost minimization. The first one deals with a design of simple decentralized control of a (fictional) system with four inputs and three outputs including cost minimization. The second one shows the way how to incorporate the cost minimization into an advanced predictive control of an ideal thermostat.

Key words: automatic control, multi inputs multi outputs systems, control costs

1 ÚVOD

Řízení složitějších systémů (výrobní celek) bývá rozčleněno do několika hierarchických úrovní. Na nejnižší (nulté) úrovni je instrumentace tj. čidla, akční členy, zobrazovače a zapisovače, lokální ovládání atd. Cílem je jednak získat informace o sledovaném systému a jednak zajistit realizaci požadavků na změnu stavu systému.

¹ doc. Ing. František Dušek, CSc., Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra řízení procesů., nám. Čs. legií, 53210 Pardubice, tel.: +420 466 037 125, fax +420 466 037 068, e-mail: frantisek.dusek@upce.cz

² Ing. Daniel Honc, PhD., Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra řízení procesů., nám. Čs. legií, 53210 Pardubice, tel.: +420 466 037 125, fax +420 466 037 068, e-mail: daniel.honc@upce.cz

První úrovní řízení je automatické řízení (tj. průběžné ovlivňování systému na základě aktuálních informací o stavu systému bez prostřední účasti člověka) s cílem dosažení a udržení kvality vyjádřené požadovanými hodnotami (nebo časovými průběhy hodnot) technologických veličin jako jsou otáčky, hladina, teplota, tlak, koncentrace apod. Jde o typické řízení v reálném čase s požadovanými dobami odezvy řádově milisekundy až desítky sekund.

Na druhé úrovni řízení se začínají uplatňovat ekonomická kritéria jako je minimalizace nákladů a maximalizace ceny (kvality). Ještě na této úrovni může jít o automatické řízení v reálném čase byť již více závislé na subjektivním zadání požadavků. Požadované doby odezvy jsou řádově sekundy až desítky minut. Obvykle jde o krátkodobé (sekundy až hodiny) plánování s objektivním (matematicky) formulovaným kritériem. Výstupem řízení druhé úrovně jsou časové průběhy technologických veličin, které jsou zajišťovány nižší úrovní řízení. Nejčastějším cílem je minimalizace nákladů. Té může být dosaženo mimo jiné i tím, že se rovnoměrně zatěžují zdroje. Např. máme-li linku s několika paralelně pracujícími dávkovými (fáze plnění / vypouštění bez spotřeby energie a fáze činnosti se spotřebou energie) zařízeními je výhodné zajistit, aby fáze spotřeby energie neprobíhala u všech najednou. Na první pohled se zdá, že to lze zajistit prostým jednorázovým naplánováním spuštění zařízení. Avšak ve skutečnosti vždy jednotlivé fáze v závislosti na konkrétních podmínkách trvají různě dlouho a tyto doby lze v první úrovni řízení v určitém rozsahu ovlivňovat. Řízení tedy spočívá v průběžném plánování startu jednotlivých zařízení a zadávání pokynů k prodloužení / zkrácení fází činnosti jednotlivých zařízení s cílem dosáhnout co nejrovnoměrnější zátěže na zdroje energií (surovin) a zároveň maximalizovat výkon celé linky. Příkladem automatického řízení s čistě ekonomickým cílem řízení je např. situace, kdy je normou dané rozmezí vlastností výrobku (která lze převést na technologické veličiny). Ideální je, když přímo v normě je uvedeno, že určité procento výrobků může tyto meze překračovat. Řízení pak spočívá v průběžném vyhodnocování aktuálního rozptylu sledované veličiny a posun její střední hodnoty (= žádaná hodnota veličiny v nižší úrovni) směrem k ekonomicky výhodnější hranici tak, aby pouze normou povolené procento tuto hranici statisticky překračovalo. Předpokladem je kvalitní řízení v nižší úrovni minimalizující za daných podmínek (poruchy atd.) rozptyl sledované veličiny.

Na další (třetí) úrovni již začíná plně ekonomické řízení s masivním zastoupením subjektivního rozhodování člověka i když s podporou analytických nástrojů. Většinou jde o dlouhodobější plánování od desítek hodin až po několik roků. Do této úrovně se zahrnuje jak řízení lidských zdrojů, plánování investic atd. tak i řízení související přímo s výrobou jako je operativní řízení. Do operativního řízení se zahrnuje např. plánování odstávek částí technologie (vyprázdnění kapacit před a naopak vytvoření zásob za odstavenou částí tak, aby zbytek technologie mohl pracovat) nebo skladové hospodářství (minimalizace skladových zásob, zajištění dodávek surovin v závislosti na plánu výroby atd.).

V článku se budeme zabývat tím, že za určitých okolností lze zahrnout čistě ekonomický požadavek – minimální náklady – do řízení v první úrovni. Hlavním cílem řízení zůstává dosažení požadované kvality vyjádřené jako požadované hodnoty výstupů. Základním

předpokladem pro rozšíření o nákladovou optimalizaci je, aby řízený systém měl větší počet vstupů než výstupů. Dalším předpokladem je znát cenu vstupů.

Postup bude demonstrován na dvou příkladech. První na složitější soustavě s čtyřmi vstupy, třemi výstupy a jednoduchým decentralizovaným řízením pomocí tří PID regulátorů a druhý na nejjednodušší „skoro reálné“ soustavě (ideální termostat) se dvěma vstupy s omezeními, jedním výstupem a sofistikovaným prediktivním regulátorem.

2 PRINCIP ŘEŠENÍ

Jak již bylo řečeno, základním předpokladem je, že řízená soustava má větší počet vstupů než výstupů. V tom případě je principiálně možné dosáhnout v ustáleném stavu stejné hodnoty výstupů (požadovaná kvalita) různými kombinacemi vstupů (různé náklady). Jestliže má každý vstup jinou cenu, je zřejmé, že mezi všemi kombinacemi vstupů musí existovat jedna, která má nejmenší náklady. Kdyby neexistoval požadavek na dosažení určitých hodnot výstupů, bylo by řešení triviální. Optimální hodnoty vstupů by byly nulové tj. bez ohledu na cenu jednotlivých vstupů by celkové náklady byly nulové. V případě požadavku dodržet požadované hodnoty výstupů soustavy a současně minimalizovat náklady, lze celý problém formulovat jako standardní matematickou úlohu hledání vázaného extrému. Pokud zvolíme kvadratické kritérium jako účelovou funkci a vstupy nejsou omezené, lze nalézt i analytické řešení.

2.1 Matematická formulace úlohy

Vztah popisující chování řízené soustavy (n_u vstupů a n_y výstupů) v ustáleném stavu je dán maticovou rovnicí (1)

$$\mathbf{y}_\infty = \mathbf{Z} \times \mathbf{u} \quad (1)$$

kde \mathbf{y}_∞ sloupcový vektor výstupů soustavy v ustáleném stavu o rozměru $n_y \times 1$

\mathbf{u} sloupcový vektor vstupů soustavy v ustáleném stavu o rozměru $n_u \times 1$

\mathbf{Z} matice zesílení o rozměru $n_u \times n_y$

Pokud jako kritérium přiblížení zvolíme sumu kvadrátů odchylek hledaného vektoru vstupů \mathbf{u} od technologicky optimálních hodnot vstupů \mathbf{u}_w , můžeme úlohu zapsat v maticové formě jako

$$\min_{\mathbf{u}} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_w)^T \mathbf{M}_u (\mathbf{u} - \mathbf{u}_w) \quad \mathbf{y} = \mathbf{Z} \times \mathbf{u} \quad (2)$$

kde \mathbf{M}_u je čtvercová váhová matice o rozměru $n_u \times n_u$ definující váhu jednotlivých vstupů (diagonální prvky) či kombinace vstupů (mimodiagonální prvky). Řešení je v tomto případě možné získat v analytické podobě (5).

Pokud chceme dosáhnout nákladové optimalizace je potřeba vyjádřit váhovou matici \mathbf{M} v rovnici (2) pomocí cen vstupů. Předpokládejme znalost jednotkové cenové matice \mathbf{C} přiřazující nějakou cenu každému prvku (a případně každé kombinaci prvků) vektoru vstupů \mathbf{u} tj. výsledný vektor cen vstupů je dán vztahem

$$\mathbf{u}_C = \mathbf{C} \times \mathbf{u} \quad (2a)$$

Potom lze jednoduše modifikovat původní váhovou matici \mathbf{M}_u tak, aby kritérium (2) vyjadřovalo nákladovou optimalizaci

$$(\mathbf{C}\mathbf{u} - \mathbf{C}\mathbf{u}_w)^T \mathbf{M}_u (\mathbf{C}\mathbf{u} - \mathbf{C}\mathbf{u}_w) = (\mathbf{u} - \mathbf{u}_w)^T \underbrace{\mathbf{C}^T \mathbf{M}_u \mathbf{C}}_{\mathbf{M}} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_w) \quad (2b)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{C}^T \mathbf{M}_u \mathbf{C}$$

2.2 Řešení

Přepíšme rovnici (2) jako minimalizaci s vázaným extrémem tj. zavedeme vektor Lagrangeových multiplikátorů λ a kritérium zapíšeme ve tvaru

$$J(\mathbf{u}, \lambda) = (\mathbf{u} - \mathbf{u}_0)^T \mathbf{M} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_0) + (\mathbf{Z}\mathbf{u} - \mathbf{y})^T \lambda \quad (3)$$

Rovnici (3) již můžeme řešit standardním způsobem tj. položit parciální derivace podle hledaných vektorů rovné nule a řešit vzniklou soustavu lineárních rovnic

$$\frac{\partial J}{\partial \mathbf{u}} = 2(\mathbf{u} - \mathbf{u}_w)^T \mathbf{M} + (\mathbf{Z}^T \lambda)^T = 0 \Rightarrow \mathbf{M}^T \mathbf{u} + \frac{1}{2} \mathbf{Z}^T \lambda = \mathbf{M}^T \mathbf{u}_w$$

$$\frac{\partial J}{\partial \lambda} = (\mathbf{Z} \times \mathbf{u} - \mathbf{y})^T = 0 \Rightarrow \mathbf{Z} \times \mathbf{u} = \mathbf{y} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}^T & \frac{1}{2} \mathbf{Z}^T \\ \mathbf{Z} & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{M}^T \mathbf{u}_w \\ \mathbf{y} \end{bmatrix} \Leftarrow \begin{bmatrix} \mathbf{M}^T & \frac{1}{2} \mathbf{Z}^T \\ \mathbf{Z} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}^T \mathbf{u}_w \\ \mathbf{y} \end{bmatrix}$$

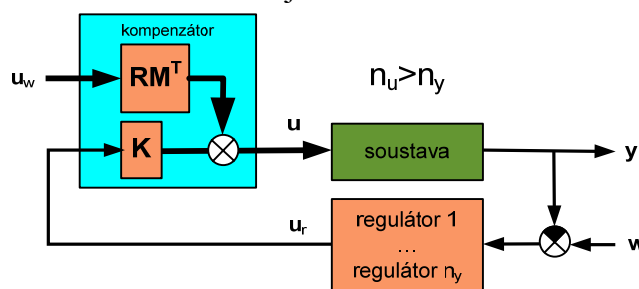
Vzhledem k tomu, že nás zajímá pouze vektor vstupů \mathbf{u} , použijme pouze část inverze matice (čtvercovou submatici \mathbf{R} o rozměru $n_u \times n_u$ a obdélníkovou submatici \mathbf{K} o rozměru $n_u \times n_y$). Pomocí těchto matic pak zapíšeme hledaný vektor vstupů (minimálně vzdálený od \mathbf{u}_w a zajišťující výstup \mathbf{y}_0) jako

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}^T & \frac{1}{2} \mathbf{Z}^T \\ \mathbf{Z} & 0 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \mathbf{M}^T \mathbf{u}_w \\ \mathbf{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{K} \\ \mathbf{X}_1 & \mathbf{X}_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{M}^T \mathbf{u}_w \\ \mathbf{y} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{R} \times \mathbf{M}^T \mathbf{u}_w + \mathbf{K} \times \mathbf{y}$$

2.3 Decentralizované řízení

Zahrnutí požadavku na nákladovou optimalizaci dokonce umožňuje (blíže viz [1] a [2]) realizovatelnost decentralizovaného řízení v případě že je větší počet vstupů než výstupů. Schéma zapojení decentralizovaného řízení je na obrázku 1.



Obr. 1 - Decentralizované řízení s kompenzátorem

Požadavek statické autonomnosti s jednotkovým zesílením tj. rovnost vektoru výstupů regulátoru \mathbf{u}_r a výstupu soustavy \mathbf{y} v ustáleném stavu můžeme zapsat jako

$$\mathbf{y} = \mathbf{u}_r \quad (6)$$

Výsledkem pak je rovnice (7) tj. rovnice statického kompenzátoru, který zajišťuje jak maximální možné přiblížení k optimální kombinaci vstupů \mathbf{u}_0 tak i transformaci výstupů regulátoru \mathbf{u}_r (rozměru $n_{ur} \times 1$) na vstupy soustavy \mathbf{u} (rozměru $n_u \times 1$), je potom dána vztahem

$$\mathbf{u} = \mathbf{R} \times \mathbf{M}^T \cdot \mathbf{u}_0 + \mathbf{K} \times \mathbf{u}_r \quad (7)$$

2.4 Prediktivní regulátor

V případě použití prediktivního regulátoru je situace složitější. Předpokládá se znalost dynamického chování řízené soustavy ve tvaru stavového diskrétního modelu (8)

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A} \times \mathbf{x}(k) + \mathbf{B} \times \mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C} \times \mathbf{x}(k) \end{aligned} \quad (8)$$

a z něj odvozených maticových rovnic (9) popisujících jednak stav $\mathbf{x}(k+N)$ na konci horizontu řízení a jednak vektor budoucích výstupů soustavy \mathbf{y}_N v závislosti na stavu $\mathbf{x}(k)$ a vstupu $\mathbf{u}(k)$ v čase k a vektoru známých vstupů $\mathbf{u}_{0,N}$ (vše na budoucím na horizontu řízení délky N kroků).

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+N) &= \mathbf{S}_{xx} \mathbf{x}(k) + \mathbf{S}_{xu} \mathbf{u}_N \\ \mathbf{y}_N &= \mathbf{S}_{yx} \mathbf{x}(k) + \mathbf{S}_{yu} \mathbf{u}_N \quad \mathbf{u}_N = \mathbf{u}_{0,N} + \Delta \mathbf{u}_N \end{aligned} \quad (9)$$

kde N horizont řízení a sledování (počet kroků řízení)
 $\mathbf{x}(k+N)$ stav soustavy na konci horizontu řízení
 \mathbf{y}_N vektor predikovaných (očekávaných) výstupů soustavy
 $\mathbf{u}_{0,N}$ vektor předpokládaných (známých) vstupů soustavy
 $\Delta \mathbf{u}_N$ vektor změn předpokládaných vstupů (řízení)
 $\mathbf{S}_{xx}, \mathbf{S}_{xu}, \mathbf{S}_{yx}, \mathbf{S}_{yu}$ konstantní matice závislé na \mathbf{A}, \mathbf{B} a \mathbf{C}

Požadavky na řízení lze formulovat jako kvadratické maticové kritérium (10) doplněné o omezení

$$\begin{aligned} J(N) &= \Delta \mathbf{x}(N)^T \mathbf{Q}_N \Delta \mathbf{x}(N) + \mathbf{e}_N^T \mathbf{Q} \mathbf{e}_N + \Delta \mathbf{u}_N^T \mathbf{R} \Delta \mathbf{u}_N \\ \Delta \mathbf{x}(N) &= \mathbf{x}_w(k+N) - \mathbf{x}(k+N) \quad \mathbf{e}_N = \mathbf{w}_N - \mathbf{y}_N \\ \mathbf{u}_{\min,N} &\geq \mathbf{u}_{0,N} + \Delta \mathbf{u}_N \leq \mathbf{u}_{\max,N} \end{aligned} \quad (10)$$

kde $\mathbf{x}_w(k+N)$ ustálený stav soustavy odpovídající žádané $\mathbf{w}(k+N)$
 \mathbf{w}_N vektor budoucích hodnot žádané

Návrh řízení představuje vyhledání vektoru $\Delta \mathbf{u}_N$, který minimalizuje kritérium (10). Nákladová optimalizace (optimalizace v ustáleném stavu) se v kritériu (10) projeví zahrnutím koncového stavu jako odchylky od žádaného stavu = ustáleného stavu odpovídajícího žádané na konci horizontu řízení. Výpočet tohoto ustáleného stavu $\mathbf{x}_w(k+N)$ je možný přes pomocný výpočet ustálených vstupů \mathbf{u}_w zajišťujících jednak dosažení požadované hodnoty ustálených výstupů \mathbf{w}_N a jednak maximální přiblížení k optimální kombinaci \mathbf{u}_0 – minimální náklady. Jde o modifikaci rovnice (3) – doplnění o omezení vypočtených vstupů a výpočet matice zesílení \mathbf{Z} na základě dynamického stavového popisu (8).

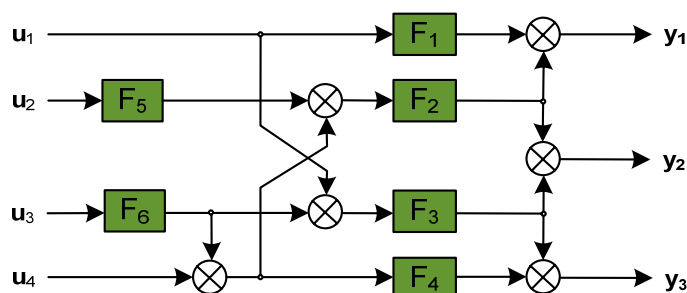
$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{u}_w} \left[(\mathbf{u}_0 - \mathbf{u}_w)^T \mathbf{M} (\mathbf{u}_0 - \mathbf{u}_w) \right] \quad \underbrace{\mathbf{C}(\mathbf{I} - \mathbf{A})^N \mathbf{B}}_{\mathbf{Z}} \times \mathbf{u}_w &= \mathbf{w}(k+N) \\ (\mathbf{u}_0 - \mathbf{u}_w)^T \mathbf{M} (\mathbf{u}_0 - \mathbf{u}_w) + [\mathbf{Z} \times \mathbf{u}_w - \mathbf{w}(k+N)]^T \lambda \quad \mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u}_w \leq \mathbf{u}_{\max} & \\ \mathbf{x}_w(k+N) &= (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} \times \mathbf{u}_w \end{aligned} \quad (11)$$

- kde $w(k+N)$ žádaná na konci horizontu řízení
 u_0 vektor optimálních hodnot vstupů (nejmenší náklady)
 M matice cenových nákladů vstupů
 u_{\min}, u_{\max} omezení na akčních veličinách
 u_w vektor optimálních ustálených hodnot vstupů (minimum kritéria)
 $x_w(k+N)$ hledaný ustálený stav

Při minimalizaci kritéria (10) tedy probíhá výpočet Δu_N jak z pohledu optimalizace dynamického průběhu tak i optimalizace ustáleného stavu na konci horizontu řízení (11). V obou případech jde o úlohu hledání vázaného extrému za existence omezení. Vzhledem k tvaru kritéria a lineárnosti omezení lze obě řešení převést na úlohu kvadratického programování.

2.5 Příklad řízení soustavy 4x3

Tento příklad ukazuje vliv nákladové optimalizace při decentralizovaném řízení fiktivní soustavy o čtyřech vstupech a třech výstupech popsané blokovým schématem na obr. 2 s přenosy v Tabulce 1. Tabulka 2 ukazuje jak se změní ustálené kombinace vstupů při změně ceny jednotlivých vstupů a konstantním požadavku na hodnoty výstupu. Sloupec **Velikost A** ukazuje velikosti jednotlivých vstupů při stejné váze a ceně všech vstupů. Sloupec **Velikost B** ukazuje velikosti při ceně – zahrnuto jako diagonála matice **C** rovnice (2b) – uvedené ve sloupci **Jednotková cena**. V obou případech jsou výstupy soustavy stejné ale celková cena vstupů klesne na cca 30%.



Obr. 2 - Blokové schéma soustavy 4x3

Tab. 1 - Dílčí přenosy soustavy

$F_1 = \frac{0,3}{(s+1)^3}$	$F_2 = \frac{0,3}{3s+1}$	$F_3 = \frac{0,1}{s+1}$	$F_4 = \frac{0,7}{(s+1)^3}$	$F_5 = \frac{0,3}{5s+1}$	$F_6 = \frac{0,15}{3s+1}$
-----------------------------	--------------------------	-------------------------	-----------------------------	--------------------------	---------------------------

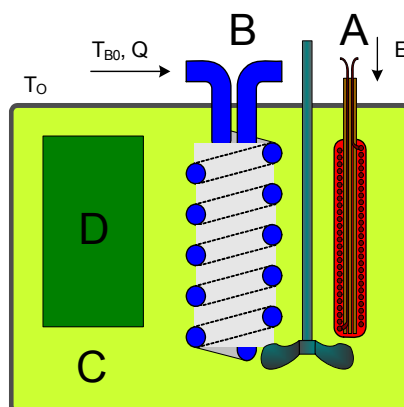
Tab. 2 - Vstupy soustavy pro různé váhy vstupů

Výstup soustavy	Hodnoty	Vstup soustavy	Velikost A	Velikost B	Jednotková cena
y1	3,00	u1	5.1272	5.0001	1,00
y2	2,00	u2	14.0435	14.2855	0,50
y3	1,00	u3	1.6955	0.0012	15,00
		u4	0.4055	0.7141	1,00
		Cena vstupů	37.9873	12.8746	

2.6 Příklad prediktivního řízení ideálního termostatu

Tento příklad – řízení ideálního termostatu (viz schéma na obr. 3) – ukazuje jak při měnícím se požadavku na kvalitu výstupu (teplota objektu D ponořeného v kapalině C) se zároveň automaticky minimalizuje spotřeba energie tj. jak topení tak chlazení se blíží k ekonomicky výhodné hranici omezení – topení má co nejmenší příkon a vstupní teplota chladicí vody je co nejvyšší (minimalizují se náklady na její ochlazování).

Vstupními veličinami ideálního termostatu na obr. 3 jsou teplota okolí T_o , teplota vstupní vody T_{B0} , průtok chladicí vody Q a příkon topení E ; stavové veličiny jsou teplota vody T_C , střední teplota topné spirály T_A , střední teplota chladicí vody T_B a teplota vloženého tělesa T_D . Regulovanou veličinou je teplota vloženého tělesa a akčními veličinami jsou příkon topení (0 až 1000 W) a vstupní teplota chladicí vody (5 až 20 °C).



Obr. 3 - Schéma termostatu

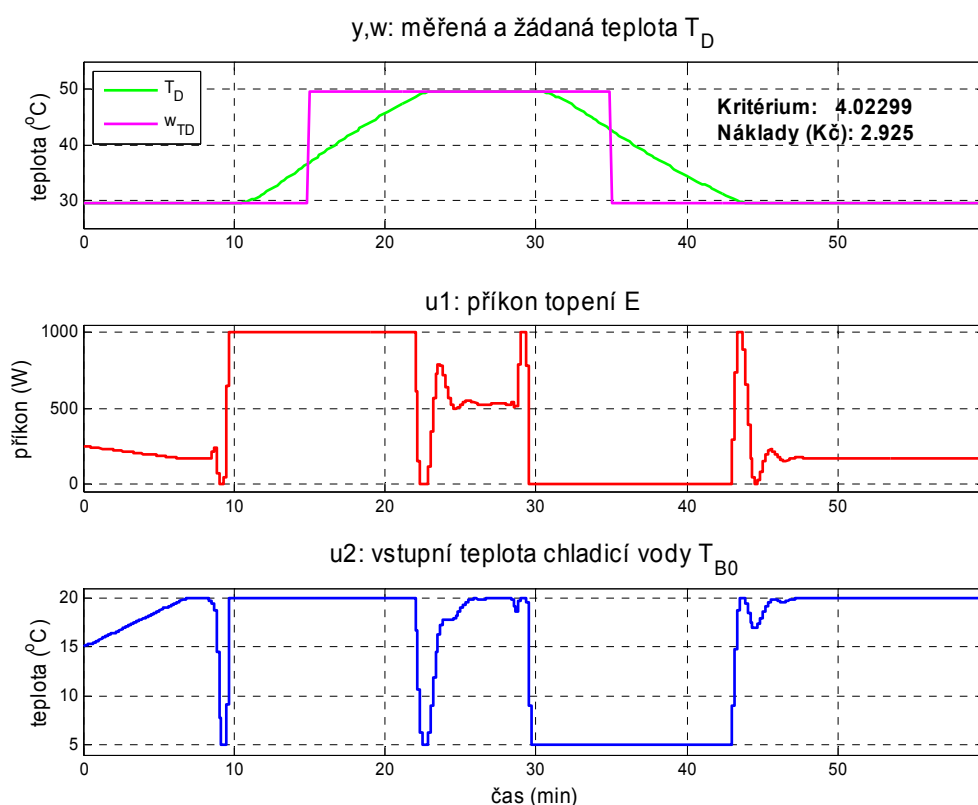
Vzhledem ke složitosti řešení (rovnice, parametry i návrh řízení viz článek [3]) je uveden pouze výsledek regulace tj. časové průběhy požadované a výsledné regulované teploty a akčních veličin – teplota chladicí vody a příkon topení. Kromě časových průběhů je uvedena i hodnota kritéria kvality (střední kvadratická odchylka žádané a skutečné teploty) a odhad nákladů na topení a chlazení.

Na obr. 4 je ukázána simulace řízení na známý průběh žádané teploty tělesa D. Regulace začíná z ustáleného stavu (prvních cca 8 min), kdy regulovaná teplota je sice shodná s žádanou teplotou, ale chlazení a topení není nákladově optimální. V této fázi dochází k postupnému automatickému přechodu na optimální kombinaci chlazení a topení při udržení žádané teploty. V dalších fázích dochází ke změně žádané teploty a regulátor zajišťuje v rámci možností její sledování včetně průběžné nákladové optimalizace, která se projeví tak, že po odeznění přechodových dějů přejdou vstupy rovnou do nákladově optimální kombinace (co nejvyšší teplota chladicí vody a co nejnižší příkon topení). Náklady na topení a chlazení jsou za daných podmínek při nezahrnutí nákladové optimalizace 4,18 Kč a při zahrnutí jsou 2,93 Kč tj. dojde k cca 30% úsporám na energii. Kritérium kvality je v obou případech prakticky stejné.

3 ZÁVĚR

V textu je ukázáno, jak lze kromě standardního požadavku na automatické řízení (dosažení a udržení požadované kvality) zahrnout i ekonomické kritérium – minimalizaci

nákladů na dosažení požadované kvality. Toto rozšíření je možné pouze za předpokladu, že řízený systém má více vstupů než výstupů. Je ukázána základní matematická formulace problému tj. převod na řešení standardní úlohy hledání vázaného extrému. Dále je na příkladě fiktivní soustavy se čtyřmi vstupy a třemi výstupy ukázáno zahrnutí nákladové optimalizace do návrhu decentralizovaného řízení a dosažené výsledky oproti řešení bez uvažování znalosti cen vstupů. Druhý uvedený příklad ukazuje principiální způsob zahrnutí nákladové optimalizace do návrhu sofistikovaného prediktivního regulátoru ideálního termostatu. Vliv nákladové optimalizace je ukázán na časovém průběhu teploty chladicí vody, příkonu topení a teploty tělesa vloženého do termostatu při simulovaném řízení.



Obr. 4 - Regulace ideálního termostatu

Príspevek vznikl za podpory Institucionálního výzkumu MSM 0021627505 „Teorie dopravních systémů“ Univerzity Pardubice.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] DUŠEK, F.; HONC, D. *Static compensator for non-square MIMO systems*. In.: 8th International Scientific-Technical Conference Process Control 2008, Kouty nad Desnou 9-12, June 2008, Czech Republic, University of Pardubice, 2008, p. 13, ISBN 978-80-7395-077-4 (plný text 7 stran na doprovodném CD).
- [2] DUŠEK, F.; HONC, D. *Transformace soustav s různým počtem vstupů a výstupů pro decentralizované řízení*. *Automatizace* (51)7-8, 2008, Automatizace s.r.o. Praha, s. 458-462, ISSN 0005-125X.

[3] DUŠEK, F.; HONC, D. *Návrh a simulace řízení nesymetrického systému*. Automatizace (50)10, 2007, Automatizace s.r.o. Praha, s.636-642, ISSN 0005-125X.

Recenzent: prof. Ing. Ivan Taufer, DrSc.
Univerzita Pardubice, FEI, Katedra řízení procesů