

Dynamické chování topných těles a regulační zásah

Jiří Bašta, Jindřich Boháč

Příspěvek se zabývá dynamickým chováním otopného tělesa s místní kvantitativní regulací prostřednictvím termostatického regulačního ventilu opatřeného hlavici s kapalinou náplní (TRV).

Klíčová slova: otopné těleso, dynamické chování, regulační zásah, setrvačnost náběhu, setrvačnost chladnutí

The paper deals with the dynamic behavior of the radiator with local quantitative control through a thermostatic valve fitted with liquid filling (TRV).

1. Úvod

V ideálním případě je při vytápění požadováno, aby se tepelné ztráty rovnaly aktuálně dodávanému tepelnému výkonu. Tento proces je však v čase nestálý a prostřednictvím procesu regulace tepelného výkonu se snažíme co nejpřesněji reagovat na změny podmínek. Pro dosažení co nejefektivnější regulace je potřebné zabývat se dynamickým chováním otopných ploch v obecných souvislostech. Dynamickým chováním se zde rozumí reakce na vyvolaný regulační zásah. Typickým představitelem dynamického děje je náběh či chladnutí otopného tělesa. Pro jejich posuzování je třeba sledovat charakteristické veličiny v čase. Jsou jimi např. tepelný výkon nebo střední povrchová teplota otopného tělesa. Vyhodnocení takových dějů je nejčastěji vyjádřeno v grafické podobě. Z pohledu regulace jsou získané křivky přechodovými charakteristikami, tedy odezvami výstupní veličiny na skokovou změnu veličiny vstupní. V technice prostředří mnohdy postačí právě skoková změna vstupů. Proto bylo hodnoceno chování soustav především s nespojitým (dvoupolohovým) chováním termostatického regulačního ventilu (TRV).

2. Dynamické vlastnosti otopných těles

2.1 Setrvačnost náběhu a chladnutí

Setrvačnost náběhu a chladnutí je (vedle jiných vlastností) základní provozní charakteristika otopných ploch. Určují se hodnoty T_{n63} a T_{n90} (pro náběh) a T_{ch63} a T_{ch90} (pro chlazení), což jsou doby potřebné k dosažení 63,2 % a 90 % jmenovitého tepelného výkonu otopné plochy. Hodnoty T_{63} a T_{90} slouží jako porovnávací kritéria dynamického chování pro různé druhy otopných ploch, a to jak pro náběh, tak pro chladnutí. Tyto hodnoty se zatím spolehlivě zjišťují pouze měřeními [4], [5], [6].

2.2 Chladnutí otopných těles

Při chladnutí se snižuje střední povrchová teplota otopného tělesa v důsledku ztrátového tepelného toku z povrchu tělesa. V případě ochlazování uvažujeme, že tepelný tok směrem do tělesa je nulový (TRV je uzavřen). Jednotlivé tepelné toky lze vyjádřit ze základní tepelné bilance akumulace = přívod – odvod [3], [6]. Po úpravách uvedených v [5] získáme rovnici popisující teoretický průběh (přechodovou charakteristiku) chladnutí otopného tělesa. Grafické vyjádření tohoto vzta-

hu uvádí např. [1]. Jde o exponenciální křivku prvního řádu, vedoucí mezi hodnotami dvou ustálených stavů. Z ní lze určit jediný parametr popisující dynamické chování, který zároveň udává rychlost celého přechodového jevu. Je jím časová konstanta τ_0 . Tu definujeme jako dobu potřebnou k dosažení přírůstku 63,2 % z celého přechodového děje. V souladu s výše uvedeným je $\tau_0 = T_{63}$ hlavním porovnávacím kritériem.

2.3 Náběh otopných těles

Podobně jako u chladnutí, vychází se i při náběhu ze základní tepelné bilance. Lze tak dojít k obdobnému řešení, které opět popisuje exponenciální křivku s časovou konstantou τ_0 . V tomto případě to však není soustava prvního řádu. V technice prostředří se lze často setkat s přechodovými charakteristikami druhého a vyšších řádů a právě náběhová křivka je jedním z takových případů. Na křivce přechodové charakteristiky soustavy druhého řádu lze rozlišit dobu průtahu jako obdobu dopravního zpoždění. S těmito aspekty je nutné při exaktním řešení dynamiky počítat. Pro zjednodušené vyhodnocení výsledků měření však mohou být tyto veličiny zanedbány [2].

3. Měření a vyhodnocení

3.1 Způsob měření

V laboratořích ústavu techniky prostředí bylo postupně napojováno několik druhů a typů otopných těles k měřicí soustavě [1], a to několika způsoby připojení, z nichž alespoň jeden byl vždy jmenovitý. Proces náběhu a chladnutí byl sledován termovizní kamerou. Měření náběhu vychází z počátečního stavu, kdy je otopné těleso měření teplotně vyrovnané se svým okolím, tj. střední povrchová teplota tělesa je shodná s teplotou okolního vzduchu. Naopak pro měření chladnutí je nezbytné vycházet ze stavu, kdy má otopné těleso jmenovité teplotní parametry. Protože doba chladnutí je podstatně delší, odpovídají tomu i delší intervaly snímání povrchových teplot termovizní kamerou.

3.1 Stanovení hodnot setrvačnosti náběhu a chladnutí

Záznamem termovizní kamery je sledována závislost střední povrchové teploty otopného tělesa t_p (určená váženým průměrem hodnot pixelů obrazu) na čase t ($t_p = f(t)$). Tak je získáno grafické vyjádření dynamického procesu, tedy křivku náběhu či chladnutí. Vyhodnocení tepelného procesu ze sledování t_p

Tab. 1. Korigované hodnoty setrvačnosti náběhu a chladnutí vyhodnocovaných otopných těles

Druh a typ otopných těles	Způsob připojení	Setrvačnost náběhu (min)		Setrvačnost chladnutí (min)	
		T_{n63}	T_{n90}	T_{ch63}	T_{ch90}
desková					
KL 10-500x500	jednostranné shora dolů	4,3	6,4	18,0	43,0
	oboustranné shora dolů	4,3	6,8	18,5	43,9
KL 10-500x1000	jednostranné shora dolů	3,7	5,4	17,9	42,0
	oboustranné shora dolů	3,8	5,8	18,1	43,3
KL 10-500x2000	jednostranné shora dolů	3,6	5,4	18,7	44,9
	oboustranné shora dolů	3,5	5,2	18,1	42,1
článková					
Kalor 10/500/70	jednostranné shora dolů	7,9	11,7	43,5	102,7
	oboustranné shora dolů	8,3	12,3	40,0	93,7
Kalor 10/500/220	jednostranné shora dolů	7,8	12,3	45,3	109,0
	oboustranné shora dolů	8,1	12,3	43,9	106,4
trubková					
KLC 1200x600	oboustranné zdola dolů	8,6	18,1	28,5	60,3

umožňuje skutečnost, že přestup tepla na straně vody je podstatně intenzivnější než přestup tepla na straně vzduchu a zároveň součinitel tepelné vodivosti tenké materiálu tělesa je velký. Za těchto předpokladů lze konstatovat, že střední teplota teplotnosné látky t_{wm} se přibližně rovná t_p (rozdíl bývá od 0,5 K do 1,5 K, podle druhu otopného tělesa). Postupem popsáním v [1] je převedena závislost $t_p = f(t)$ na závislost poměrného tepelného výkonu otopného tělesa na čase $Q/Q_N = f(t)$, kde Q je skutečný tepelný výkon a Q_N jmenovitý tepelný výkon otopného tělesa. Podle tohoto vztahu lze již snadno nalézt hodnoty T_{63} a T_{90} pro proces náběhu a chladnutí ($T_{63} \Rightarrow Q/Q_N = 0,632$; $T_{90} \Rightarrow Q/Q_N = 0,9$). Soubory grafických výstupů pro různé druhy a typy otopných těles v kombinaci s různými způsoby připojení jsou rozsáhlé [1]. Proto je zde uvedena pouze výsledná tabulka, zachycující korigované hodnoty setrvačnosti náběhu a chladnutí tak, aby je bylo možné porovnávat.

Je zde vidět zřetelný rozdíl hodnot T_{63} mezi jednotlivými tělesy. V rámci jednoho druhu těles jsou hodnoty srovnatelné, ale v porovnání s jinými druhy se hodnoty výrazně liší. Například článková litinová otopná tělesa dosahují zhruba dvojnásobných hodnot než desková. Je to dáno především podstatně větší tepelnou kapacitou článkových litinových těles (silnostěnný materiál a větší objem vody) oproti tenkostěnným deskovým tělesům. Trubkové těleso se svým dynamickým chováním blíží spíše tělesům článkovým. Všechny tyto aspekty výrazně ovlivňují dynamické chování daného otopného tělesa.

4. Simulace dynamického chování otopného tělesa

4.1 Způsob regulace

Posuzovány byly především tepelné děje s místní dvoupolohovou kvantitativní regulací, při které se mění pouze hmotnostní průtok teplotnosné látky, přičemž její teplota zůstává konstantní. Všechny dříve uvedené parametry lze zajistit termoregulačním ventilem, který je typickým zástupcem regulátoru typu P, tedy spojitého proporcionálního regulátoru s nastaveným pásmem proporcionality. To ovšem platí pouze tehdy, je-li termostatický ventil osazen servopohonem, termickým pohonem nebo správně navržen s termohlavicí. V praxi však bývá termostatický regulační ventil většinou osazen jednoduchou kapalinovou či paroplynovou hlavicí, přitom se neposuzuje autorita ventilu ani se nesnižuje pásmo proporcionality. V této situaci se skutečný regulační průběh blíží dvoupolohovému chování (otevřeno/zavřeno) [2]. Samotná simulace průběhu dynamického chování potom spočívá ve skládání dříve získaných křivek náběhu a chladnutí okolo požadované hodnoty v rámci stanoveného pásma proporcionality.

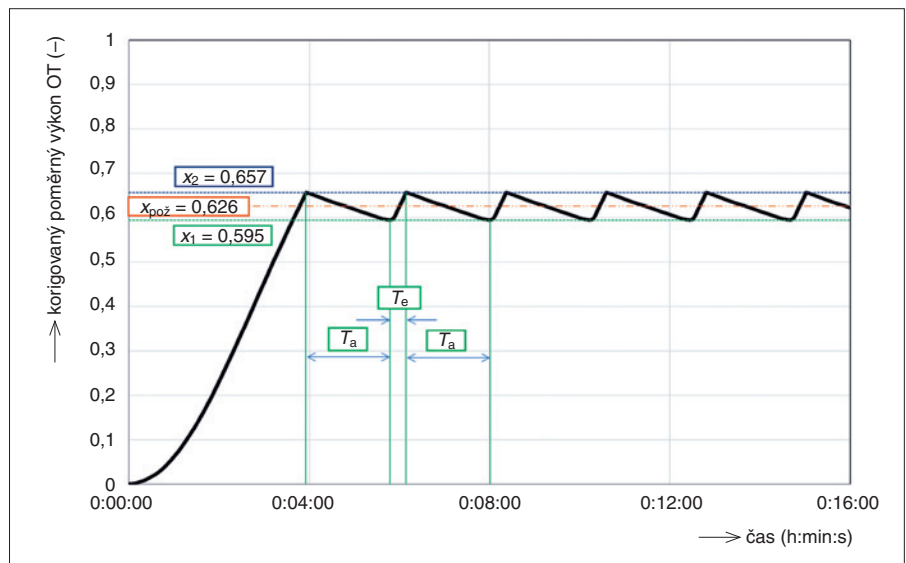
4.2 Pásmo proporcionality

Pro simulaci byla zvolena celkem tři pásma proporcionality, a to 1 K, 2 K a 3 K okolo požadované teploty 20 °C (tzn. $20 \pm 0,5$ °C; 20 ± 1 °C; $20 \pm 1,5$ °C). Správná volba pásma proporcionality TRV má na jeho provozní chování zásadní vliv. Bude-li ventil poddimenzován, bude pracovat ve stále otevřené poloze a nebude plnit svoji regulační funkci. V důsledku toho nebude otopné těleso podávat tak velké výkony, jaké očekáváme. Naopak předimenzovaný TRV pracuje v poloze téměř zavřeno a opět neplní svou regulační funkci – chová se dvoustavově. Ventil neustále zavírá a otevírá, což může vést k jeho nadměrnému opotřebení či hlučnos-

no deskové otopné těleso KL 10-500x1000 s připojením oboustranně shora dolů. Simulovány byly tři provozní situace, kdy bylo zapotřebí 100 %, 62,6 % a pak 10 % výkonu otopného tělesa. Tak bylo možné získat představu o chování regulátoru v celém rozsahu výkonů.

4.3 Vyhodnocení

Obdobně jako v předešlé kapitole, i zde lze vyhodnotit velké množství průběhů [1]. Proto byl vybrán průběh dynamického chování (reakce na regulační zásah) pouze uvedeného tělesa (KL 10-500x1000 s připojením oboustranně shora dolů) pro potřebu výkonu 62,6 % a pro pásmo proporcionality 20 ± 1 °C, zobra-



Obr. 1. Průběh dynamického chování deskového otopného tělesa KL10-500x1000 (20 ± 1 °C)

Tab. 2. Hodnoty doby zapnutí a vypnutí regulátoru ve spojení s deskovým otopným tělesem KL 10-500x1000 s oboustranným připojením shora dolů

Potřeba výkonu	Pásmo proporcionality	Doba zapnutí	Doba vypnutí	Poměr T_a/T_e (-)
		T_e (min)	T_a (min)	
100 %	$\pm 0,5$ K	4,42	0,42	0,10
	± 1 K	5,33	0,67	0,13
	$\pm 1,5$ K	5,92	0,92	0,16
62,6 %	$\pm 0,5$ K	0,30	1,00	5,00
	± 1 K	0,35	1,87	5,34
	$\pm 1,5$ K	0,53	2,88	5,43
10 %	$\pm 0,5$ K	0,23	6,08	26,43
	± 1 K	0,42	11,68	27,81
	$\pm 1,5$ K	0,65	18,38	28,28

ti. Volíme-li pásmo užší, např. $\pm 0,5$ K, můžeme dosáhnout přesnější regulace konečné hodnoty. Přináší to ovšem podobný problém jako u předimenzovaného TRV, tedy nestabilitu a ztrátu regulační schopnosti. Při volbě širšího pásma proporcionality jsou omezeny možnosti úspor energie. Optimální pásmo proporcionality se tak pohybuje okolo 2 K. Teplotní rozsahy byly převedeny na rozsahy výkonové tak, aby korelovaly se získanými průběhy křivek. Byla stanovena horní spínací hodnota x_2 a dolní spínací hodnota x_1 . Ke sledování dynamického chování bylo vybrá-

zený na obr. 1. Na počátku je regulovaná veličina rovna 0 %. Jelikož je požadovaná hodnota $x_{poz} = 62,6$ %, vzniká zde regulační odchylka, na kterou reaguje regulátor tak, že zapíná svou akční veličinu (přes pružinu zdvihá kuželku ventilu). Zvýší se průtok teplotnosné látky otopným tělesem, což způsobí nárůst střední povrchové teploty otopného tělesa, a tím i jeho výkonu. Náběh u jednotlivých otopných těles je charakterizován křivkou náběhu s časovou konstantou t_0 , resp. T_{63} , a to až do okamžiku, kdy je dosaženo horní spínací hodnoty x_2 . Je-li ve vytápěném prostoru v průběhu nábě-

hu vydán požadavek na snížení požadované teploty nebo je dosaženo právě hodnoty x_2 , dvoupolohový regulátor zavírá ventil a otopné těleso začíná chladnout podle získané křivky chladnutí. Chladnutí probíhá do chvíle, kdy je dosaženo spodní spínací hodnoty x_1 . Následně je ventil opět otevřen a teplota tělesa nabíhá k hodnotě x_2 . Po prvotním náběhu, kdy je dosaženo spínací hodnoty x_2 , dochází k cyklování průběhu tepelného výkonu v rozmezí hodnot x_1 a x_2 . Doba, po kterou otopné těleso chladne, se nazývá doba vypnutí T_a , a doba, po kterou se výkon pohybuje po náběhové křivce, se nazývá doba zapnutí T_e [4]. Právě tyto dvě hodnoty, resp. jejich poměr, byly využity jako porovnávací kritéria (viz tab. 2). Ve skutečnosti jsou otopná tělesa soustavami druhého nebo vyšších řádů, a tak v praxi dochází ještě k překmitu požadovaného rozsahu – ten se potom rozšiřuje do tzv. pásma kolísání. Zde je však situace zjednodušena a překmitnutí je zanedbáno.

5. Závěr

Potřeba 100% výkonu je stav specifický tím, že střední, tedy požadovaná hodnota x_{poz} je rovna horní spínací hodnotě x_2 . V tomto případě je k dispozici pouze polovina spínacího rozsahu. Oproti ostatním průběhům je tento stav specifický tím, že doba zapnutí je výrazně delší než doba vypnutí. To vyplývá z úseků křivek získaných měření. Náběhová křivka je v tomto rozmezí velice plochá, naopak křivka chladnutí je ve své nejstrmější fázi. Poměr doby vypnutí a doby zapnutí T_a/T_e je menší než jedna. V praxi však tento předpoklad nebude splněn, neboť výkony otopných těles nejsou navrženy přesně na jmenovitou tepelnou ztrátu vytápěné místnos-

ti, ale v závislosti na zvolené výrobní řadě těles mohou mít výkon vyšší, než je jmenovitá tepelná ztráta. Většinou tak projektant předimenzuje otopná tělesa o 5 až 15 % vzhledem ke skutečné tepelné ztrátě místnosti. Z toho vyplývá, že ve skutečnosti bude i za jmenovitých podmínek k dispozici celý spínací rozsah. Pro všechny sledované průběhy také platí, že v nejužším pásmu proporcionality ($\pm 0,5$ K) je počet cyklů větší než v širších sledovaných pásmech. Tento závěr je tedy ve shodě s popsanou skutečností, že užší spínací diference je příčinou většího kmitání kuželky ventilu a způsobuje větší opotřebení či hluk.

U potřeby 62,6% výkonu již lze v tab. 2 pozorovat dolní i horní spínací hodnotu a sledované rozsahy jsou dvojnásobně širší než u potřeby 100% výkonu. Přes to, že je teplotní pásmo širší, není rozdíl mezi dobou zapnutí a vypnutí tak markantní jako u předchozího stavu. Zde je doba vypnutí delší než doba zapnutí, což opět vyplývá z průběhu jednotlivých křivek. Chladnutí má v tomto rozsahu výrazně plošší průběh než náběh. Počet cyklů za srovnatelné časové rozmezí je v tomto případě větší a jednotlivé cykly jsou kratší.

Potřeba 10% výkonu se projevuje opačnou situací ve výkonovém spektru – křivka náběhu je ve své téměř nejstrmější části a křivka chladnutí je velmi plochá. Proto poměr dob vypnutí a zapnutí vychází nejvyšší právě zde. Rozdíl v počtu cyklů mezi $\pm 0,5$ K a $\pm 1,5$ K je téměř dvojnásobný. Zde se velmi názorně ukazuje rozdíl v návrhu regulátoru pro zajištění jeho správné funkce a dlouhodobé spolehlivosti.

Z uvedených skutečností je patrné, jak důležitá je znalost setrvačnosti náběhu a chladnutí u otopných těles a znalost průběhů křivek. Chování regulátoru je odlišné v různých

částech výkonového spektra. Do rychlosti odezvy se promítá i akumulace otopných těles, resp. jejich tepelná setrvačnost. Samotná reakce otopných těles na regulační zásah je proto prodloužena o dobu úměrnou tepelné setrvačnosti. Všechny uvedené průběhy byly určeny pouze pro jednu požadovanou hodnotu. Reálně se však potřeba tepla neustále mění, např. vlivem oslunění, změnou požadavků na teplotní komfort, v důsledku tepelných ztrát (např. otevření okna) a zisků (např. vnitřních zdrojů tepla) apod. Tomuto rozboru se bude věnovat další výzkum.

Literatura:

- [1] BOHÁČ, J.: *Dynamické chování otopných těles*. Diplomová práce. ČVUT Praha, 2012, 136 s.
- [2] BAŠTA, J.: *Regulace vytápění*. Nakladatelství ČVUT, Praha, 2007, 99 s., ISBN 978-80-01-02582-6.
- [3] ŠIMEK, J.: *Dynamické chování otopných těles*. ČVUT Praha, 2007, 110 s.
- [4] BAŠTA, J.: *Hydraulika a řízení otopných soustav*. Nakladatelství ČVUT Praha, 2003, 252 s., ISBN 80-01-02808-9.
- [5] JANČÍK, L. – BAŠTA, J.: *Dynamic behaviour of heating panels*. In: 4th PhD Symposium Building Performance Simulation 2008. Praha, květen 2008.
- [6] JANČÍK, L. – BAŠTA, J.: *Dynamic Behavior of Panel Radiators – Experimental Investigation and Modeling*. In: 10th REHVA World Congress Clima 2010 Sustainable Energy Use. Antalya, Turkey, 2010.

prof. Ing. Jiří Bašta, Ph.D.,
Ing. Jindřich Boháč, ústav techniky prostředí,
Fakulta strojní ČVUT v Praze
(jiri.Basta@fs.cvut.cz)
Lektoroval: Ing. Ladislav Šmejkal, CSc.



Prague Fire & Security Days 2013

■ FIRE & SECURITY
■ IT PROTECTION
■ SAFE TRAFFIC
■ RESCUE PRAGUE

17. -21. 9. 2013 | PVA EXPO PRAHA

5. ročník mezinárodního veletrhu
nejnovějších trendů protipožární
a zabezpečovací techniky,
systémů a služeb

www.fsdays.cz

Téma: „DIGITÁLNÍ BEZPEČNOST“

Souběžně s 24. mezinárodním
stavebním veletrhem

FOR ARCH

Organizátor



Zaštitla



Ministerstvo dopravy



Mediální partner





