

Ing. Jindřich BOHÁČ
 prof. Ing. Jiří BAŠTA, Ph.D.
 ČVUT v Praze, Fakulta strojní
 Ústav techniky prostředí

Dynamické chování otopných těles s ohledem na regulační zásah

Dynamic Behavior of Radiators as to Control Intervention

Recenzent
 Dr. Ing. Petr Fischer

V ideálním případě požadujeme, aby se tepelné ztráty rovnaly aktuálně dodávanému tepelnému výkonu. Tento proces je však v čase nestálý a prostřednictvím procesů regulace tepelného výkonu se snažíme co nejpřesněji reagovat na dané změny podmínek. Abychom dosáhli co nejefektivnější regulace, je třeba zabývat se dynamickým chováním otopných ploch obecně. Zde rozumíme dynamickým chováním reakcí na vyvolané regulační zásah. Příspěvek se zabývá dynamickým chováním otopného tělesa s místní kvantitativní regulací přes termostatický regulační ventil opatřený hlavicí s kapalinovou náplní (dále jen „TRV“).

Klíčová slova: dynamika otopných ploch, termostatické regulační ventily

We require that heat losses be equal to the currently supplied heat output, in an ideal event. However, this process is unsettled in time and we try to react precisely as best to the given changes of conditions through processes of the heat output control. It is necessary to deal with the dynamic behavior of heating surfaces, generally, to be able to achieve the most efficient control. The dynamic behavior is understood herein as the reaction towards the invoked control intervention. Authors are engaged in the dynamic behavior of radiators with local quantitative control through the thermal control valve fitted with the head with the liquid charge (hereinafter the “TRV” – Thermostatic Radiator Valve), in their contribution.

Key words: heating surfaces dynamics, thermostatic control valves

ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Typickým představitelem dynamického děje je náběh či chladnutí otopného tělesa. Pro jejich posouzení je třeba sledovat charakteristické veličiny, jakými jsou například 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, a jelikož si v technice prostředí mnohdy vystačíme právě se skokovou změnou vstupů, zabývali jsme se především nespojitým (dvoupolo-hovým) chováním TRV.

DYNAMICKÉ VLASTNOSTI OTOPNÝCH TĚLES

Setrvačnost náběhu a chladnutí

Setrvačnost náběhu resp. chladnutí je vedle jiných, základním provozním parametrem otopných ploch. Určíme hodnoty T_{n63} a T_{n90} , což jsou doby potřebné k dosažení 63,2 resp. 90% jmenovitého tepelného výkonu otopných ploch. T_{63} a T_{90} pak slouží jako porovnávací kritéria dynamického chování pro různé druhy otopných ploch a to jak pro náběh, tak pro chladnutí. Tyto hodnoty zjišťujeme spolehlivě zatím pouze měřením [4].

Chladnutí otopných těles

Jedná se o snižování střední povrchové teploty otopného tělesa v důsledku ztrátového tepelného toku z povrchu tělesa. V případě ochlazování uvažujeme, že tepelný tok směrem do tělesa je nulový (TRV uzavřen). Jednotlivé tepelné toky můžeme vyjádřit ze základní tepelné bilance *akumulace = přívod – odvod* [3]. Po úpravách uvedených v [3] získáme rovnici popisující teoretický průběh (přechodovou charakteristiku) chladnutí otopného tělesa. Grafické vyjádření tohoto vztahu je například v [1]. Jedná se o exponenciálně závislou křivku prvního řádu probíhající mezi dvěma ustálenými stavy. Nalezneme zde jediný parametr popisující dynamické chování, který zároveň udává rychlost celého přechodového jevu a je jím časová konstanta τ_0 . Tuto definujeme jako dobu potřebnou k dosažení 63,2% poklesu z celého přechodového děje (dosažení inflexního bodu). V souladu s výše uvedeným je $\tau_0 = T_{63}$ hlavním porovnávacím kritériem.

Náběh otopných těles

Analogickým způsobem jako u chladnutí vycházíme ze základní tepelné bilance a dojdeme k obdobnému řešení, opět popisujícímu křivku s parametrem τ_0 . V aplikacích techniky prostředí se však nejčastěji setkáváme s přechodovými charakteristikami druhého a vyšších řádů a právě náběhová křivka je jedním z takových případů. Křivky druhého řádu mohou obsahovat dobu průtahu či dopravní zpoždění. S těmito aspekty je nutno při hlubším řešení dynamiky kalkulovat. Pro naše vyhodnocení výsledků měření jsou tyto veličiny zanedbány [2].

MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ

V laboratořích Ústavu techniky prostředí FS ČVUT v Praze bylo postupně napojováno několik druhů a typů otopných těles k měřicí soustavě [1] několika způsoby připojení, z nichž alespoň jeden byl vždy jmenovitý. Proces náběhu a chladnutí byl pak sledován termovizní kamerou.

Měření náběhu vyžaduje především stav, kdy je otopné těleso na počátku měření teplotně vyrovnané se svým okolím tzn., že střední povrchová teplota tělesa se rovná teplotě 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.

Stanovení hodnot setrvačnosti náběhu a chladnutí

Záznamem termovizní kamery vlastně sledujeme závislost střední povrchové teploty tělesa na čase ($t_p = f(\tau)$), díky čemuž získáme grafické vyjádření dynamického procesu, tedy křivku náběhu resp. chladnutí. Sledovat t_p umožňuje fakt, že přestup tepla na straně vody je daleko intenzivnější než přestup tepla na straně vzduchu a zároveň součinitel tepelné vodivosti tenkého materiálu tělesa je vysoký. Za těchto předpokladů můžeme konstatovat, že střední teplota teplotonosné látky t_{wm} se přibližně rovná t_p . Postupem uvedeným v [1] převedeme závislost $t_p = f(\tau)$ na závislost poměrného tepelného výkonu otopného tělesa na čase $Q/Q_N = f(\tau)$. Podle tohoto vztahu již snadno nalezneme hodnoty T_{63} a T_{90} náběhu i chladnutí ($T_{63} \Leftrightarrow Q/Q_N = 0,632$; $T_{90} \Leftrightarrow Q/Q_N = 0,9$). Grafické výstupy pro jednotlivé druhy a typy otopných těles v kombinaci s různými způsoby připojení jsou

velice rozsáhlé [1], proto zde uvádíme pouze výslednou tabulku, zachycující zkorigované hodnoty setrvačnosti náběhu a chladnutí, tak abychom je mohli porovnávat.

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

Druh a typ otopného tělesa	Způsob připojení	Setrvačnost náběhu [min]		Setrvačnost chladnutí [min]	
		T_{n63}	T_{n90}	T_{ch63}	T_{ch90}
Desková					
KL 10–500×500	jednostr. shora dolů	4,3	6,4	18	43
	oboustr. shora dolů	4,3	6,8	18,5	43,9
KL 10–500×1000	jednostr. shora dolů	3,7	5,4	17,9	42
	oboustr. shora dolů	3,8	5,8	18,1	43,3
KL 10–500×2000	jednostr. shora dolů	3,6	5,4	18,7	44,9
	oboustr. shora dolů	3,5	5,2	18,1	42,1
Článeková					
Kalor 10 / 500 / 70	jednostr. shora dolů	7,9	11,7	43,5	102,7
	oboustr. shora dolů	8,3	12,3	40	93,7
Kalor 10 / 500 / 220	jednostr. shora dolů	7,8	12,3	45,3	109
	oboustr. shora dolů	8,1	12,3	43,9	106,4
Trubková					
KLC – 1200×600	oboustr. zdola dolů	8,6	18,1	28,5	60,3

Je zde 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. Např. článeková litinová otopná tělesa dosahují cca dvojnásobných hodnot než desková. Je to dáno především daleko vyšší tepelnou kapacitou článekových litinových těles (silnostěnný materiál a větší vodní objem). Trubkové těleso se bude svým dynamickým chováním blížit spíše tělesům článekovým. Všechny tyto aspekty samozřejmě výrazně ovlivňují dynamické chování daného otopného tělesa.

SIMULACE DYNAMICKÉHO CHOVÁNÍ OTOPNÉHO TĚLESA

Způsob regulace

Posuzujeme především místní dvupolohovou kvantitativní regulaci. Jedná se tedy o regulaci, kdy měníme pouze hmotnostní průtok teplotně látky, přičemž její teplota zůstává konstantní. Všechny výše uvedené parametry dokážeme zajistit prostřednictvím TRV, který je typickým zástupcem P – regulátoru, tedy spojitého proporcionálního regulátoru s nastaveným pásmem proporcionality. Toto platí, pokud je termostatický ventil osazen servo či termopohonem. V praxi však většinou bývá osazen jednoduchou kapalinovou či paroplynovou hlavici a v této kombinaci se skutečně regulační průběh blíží dvupolohovému chování (otevřeno/zavřeno) [2]. Samotná simulace průběhu dynamického chování pak spočívá ve skládání dříve získaných křivek náběhu a chladnutí okolo požadované hodnoty v rámci stanoveného pásma proporcionality.

Pásmo proporcionality

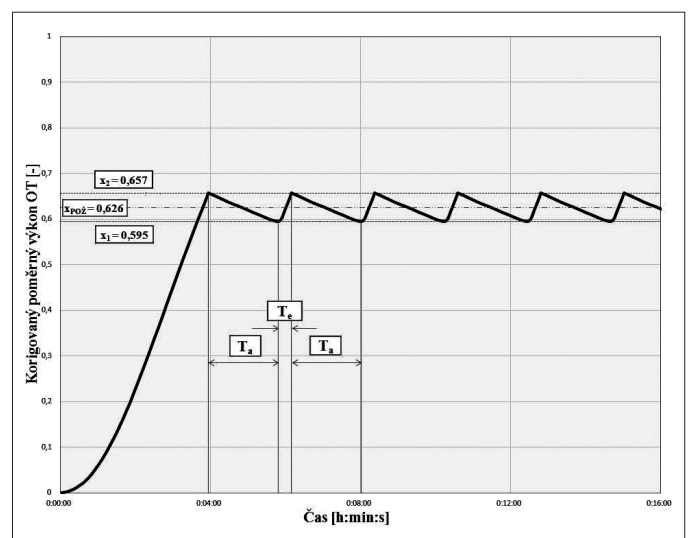
Pro simulaci jsme zvolili celkem tři pásma proporcionality, a to 1, 2 a 3 K okolo požadované teploty 20 °C (tzn. $20 \pm 0,5$ K; 20 ± 1 K; $20 \pm 1,5$ K). Správná volba pásma proporcionality TRV má na jeho provozní chování zásadní vliv. Pokud bude ventil poddimenzován, bude pracovat ve stále otevřené poloze a nebude plnit svoji regulační funkci. Ve výsledku pak nebude otopné těleso podávat tak vysoké výkony, jaké očekáváme. Naopak předdimenzovaný TRV pracuje v poloze téměř zavřeno a opět neplní svou regulační funkci. Ventil neustále zavírá a otevírá, což může vést k jeho nadměrnému opotřebení či hlukovým projevům. Pokud volíme pásmo užší např. $\pm 0,5$ K, můžeme dosáhnout přesnější regulace konečné hodnoty, obnáší to ovšem podobný problém jako předdimenzovaný TRV, tzn. nestabilitu a ztrátu regulační schopnosti. Při volbě širšího pásma proporcionality pak snižujeme nároky na dosažení žádaných úspor energie. Teplotní rozsahy byly převedeny na rozsahy výkonové (tak aby korelovaly se získanými průběhy křivek), resp. stanovili jsme horní x_2 a dolní x_1 spínací hodnoty.

Ke sledování dynamického chování bylo vybráno deskové otopné těleso KL 10–500 × 1000 s připojením oboustranně shora dolů. Simulovány byly celkem tři provozní stavy. Nejprve stav kdy je potřeba 100 % výkonu tělesa, dále stav kdy je zapotřebí 62,6 % a 10 % výkonu otopného tělesa tak, abychom měli představu o chování regulátoru v celém výkonovém spektru.

Vyhodnocení

Obdobně jako v předešlém odstavci, tak i zde je velké množství vyhodnocených průběhů [1]. Proto byl vybrán průběh dynamického chování (reakce na regulační zásah) pouze výše uvedeného tělesa pro 62,6% potřebu výkonu a pro pásmo proporcionality 20 ± 1 K (obr. 1).

Z obr. 1 je zřejmé, že na počátku je regulovaná veličina rovna 0 %. Jelikož je požadovaná hodnota $x_{pož} = 62,6$ %, vzniká zde regulační odchylka, na kterou reaguje regulátor tak, že zapíná svou akční veličinu (vlhovec se uvolňuje a pružina zvedá kuželku). Tímto zvýší průtok teplotně látky otopným tělesem, což způsobí nárůst střední povrchové teploty otopného tělesa, resp. jeho výkonu. Náběh probíhá u jednotlivých otopných těles podle získané křivky náběhu s časovou konstantou τ_0 resp. T_{63} , a to až do okamžiku, kdy je dosaženo horní spínací hodnoty x_2 . Pokud ve vytápěném prostoru dojde ke změně požadavku ve smyslu snížení požadované teploty nebo je dosaženo právě hodnoty x_2 , dvupolohový regulátor zavírá ventil a otopné těleso začíná chladnout podle získané křivky chladnutí. Toto probíhá do chvíle, kdy je dosaženo spodní spínací hodnoty x_1 . Následně je ventil opět otevřen a těleso nabíhá k hodnotě x_2 . Po prvotním náběhu, kdy je dosaženo spínací hodnoty x_2 , dochází k cyklování průběhu teplotně-



Obr. 1 Průběh dynamického chování deskového otopného tělesa KL10–500×1000 (20 ± 1 K)

ho výkonu v rámci rozmezí hodnot x_1 a x_2 . Doba, po kterou otopné těleso chladne, nazýváme dobou vypnutí T_a a dobu, po kterou se výkon pohybuje po náběhové křivce, nazýváme dobou zapnutí T_e [4]. Právě tyto dvě hodnoty, resp. jejich poměr byl využit jako porovnávací kritérium (viz tab. 2). V praxi dochází ještě k překmitu požadovaného rozsahu a ten se pak rozšiřuje do tzv. pásma kolísání. Zde je však překmitnutí zanedbáno.

Tab. 2 Hodnoty doby zapnutí a vypnutí regulátoru ve spojení s deskovým otopným tělesem KL10 – 500 x 1000 s oboustranným připojením shora dolů

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

ZÁVĚR

100% potřeba výkonu je stav specifický tím, že střední, tedy požadovaná hodnota x_{poz} je rovna horní spínací hodnotě x_2 . Máme tedy k dispozici pouze polovinu spínacího rozsahu. Oproti ostatním průběhům je tento stav specifický tím, že doba zapnutí je výrazně delší než doba vypnutí. Toto je dáno úseky křivek, ve kterých se s rozsahem pohybujeme. Náběhová křivka je v tomto rozmezí velice plochá, naopak křivka chladnutí je ve své nejstrmější části. Z tohoto důvodu je poměr doby vypnutí a doby zapnutí T_a/T_e menší než jedna. V praxi však výše zmíněné nebude zcela platit, neboť výkony otopných těles nejsou navrženy přesně na jmenovitou tepelnou ztrátu, ale díky dané výrobní řadě těles mohou mít vyšší výkon, než je jmenovitá tepelná ztráta. Většinou tak projektant předimenzuje otopná tělesa o 5 až 15 % vůči skutečné tepelné ztrátě místnosti. Značí to tedy, že budeme ve skutečnosti mít i za jmenovitých podmínek k dispozici celý spínací rozsah. Pro všechny sledované průběhy také platí, že v nejužším pásmu proporcionality (±0,5 K) je počet cyklů vyšší než v širších sledovaných pásmech. Tento závěr je tedy ve shodě s výše popsáním faktem, že užší spínací diference zapříčiní větší kmitání kuželky ventilu a způsobuje vyšší opotřebení či hlukové projevy.

Pro 62,6% potřebu výkonu již pozorujeme jak dolní, tak horní spínací hodnotu a tudíž jsou sledované rozsahy dvojnásobně širší než u 100% teoretické potřeby výkonu. Přesto, že je pásmo širší, není rozdíl mezi dobou zapnutí a vypnutí tak markantní jako u předchozího stavu. Zde je doba vypnutí delší než doba zapnutí, což je opět dáno průběhem jednotlivých křivek. Chladnutí má v tomto rozsahu výrazně plošší průběh než náběh. Tím je dáno, že počet cyklů za srovnatelné časové rozmezí je v tomto případě vyšší a jednotlivé cykly jsou tudíž kratší.

Při 10% potřebě výkonu se nacházíme na opačné straně výkonového spektra a to znamená, že křivka náběhu je ve své téměř nejstrmější části a křivka chladnutí je skoro plochá. Proto poměr dob vypnutí a zapnutí vychází nejvyšší právě zde. Rozdíl v počtu cyklů mezi ± 0,5 K a ± 1,5 K je téměř dvojnásobný a zde se tedy velmi názorně ukazuje praktický rozdíl v návrhu regulátoru pro zajištění jeho správné funkce a dlouhodobé spolehlivosti.

Z výše uvedeného je patrné, jak důležitá je znalost setrvačnosti náběhu a chladnutí u otopných těles resp. průběhů křivek. Chování regulátorů je jiné 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 nebo díky vnitřním zdrojům tepla apod. Tomuto rozboru se dále věnuje [1].

Kontakt na autory: jindrabohac@seznam.cz, jiri.basta@fs.cvut.cz

Použité zdroje:

- [1] Boháč J. Diplomová práce Dynamické chování otopných těles. Praha: ČVUT, 2012. 136 s.
- [2] Bašta J. Regulace vytápění. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. 99 s. ISBN 978-80-01-02582-6.
- [3] Šimek J. Diplomová práce Dynamické chování otopných těles. Praha: ČVUT, 2007. 110 s.
- [4] Bašta J. Hydraulika a řízení otopných soustav. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2003. 252 s. ISBN 80-01-02808-9. ■



VYTÁPĚNÍ

VĚTRÁNÍ

INSTALACE

Vážení přátelé,
Společnost pro techniku prostředí nabízí
2. přepracované vydání
Názvoslovného výkladového slovníku
z oboru Technika prostředí
v Č-N-A, A-Č-N, N-Č-A mutacích

Obsahuje terminologii oborů:
 Vytápění, Solární technika, Tepelné izolace, Chladicí technika, Tepelná čerpadla, Větrání, Klimatizace, Hluk a otřesy, Průmyslová vzduchotechnika, Pneumatická doprava, Čistota ovzduší, Odprašování, Hygiena, Automatická regulace, Ekonomika investic, Domovní vodovody, Plynovody, Kanalizace.

Slovník je možno zakoupit:

- ❑ v Univerzitním knihkupectví ČVUT, budova NTK, Technická 6, 160 80 Praha 6 nebo si nechat zaslat dobírkou:
e-mail: vera.mikulkova@ctn.cvut.cz – tel. 224 355 003;
- ❑ osobně v sekretariátu Společnosti pro techniku prostředí:
Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1 nebo
- ❑ v redakci VVI – Fakulta strojní, 8. p., Technická 4, 166 07 Praha 6.

Cena 110 Kč vč. DPH