



Dynamické chování deskových otopných těles

Dynamic Behaviour of Panel Radiators

Recenzent
prof. Ing. Karel Hemzal, CSc.

Provozní chování otopné soustavy závisí mj. na tepelné setrvačnosti otopných těles. Byla zkoumána přechodová charakteristika deskových otopných těles při různém způsobu napojení. Teoreticky stanovené přechodové charakteristiky jak při ohřívání tak při chladnutí vedou na prvky prvního řádu. Experimentálně zjištěné průběhy ukazují, že otopná tělesa se chovají odlišně při ohřevu a při chladnutí. Při ohřevu jsou prvky druhého a vyššího řádu. Při chladnutí se chovají podobně jako prvky prvního řádu. Časové konstanty doby náběhu a chladnutí na 63 a na 90 % konečných hodnot tepelného výkonu byly získány z časových změn povrchových teplot, vyhodnocených termograficky. Poměr doby průtahu a doby náběhu při ohřevu je asi 0,23. Poměr doby chladnutí na 90 % a na 63 % byl zjištěn asi 2,5. Metodika bude použita pro zkoumání vlastností článkových otopných těles.

Klíčová slova: vytápění, regulace, otopné těleso, dynamika otopných těles

Operational behaviour of a heating system depends among others on the heat inertia of radiators. A transient characteristic of panel radiators at different connection concept was examined. Theoretically derived transient characteristics of a warming or cooling process lead to first-order elements. Experimentally determined courses show that radiators behave different during a warming or cooling-down. They are second or higher-order elements during a warming. For the duration of a cooling-down, they act similarly as the first-order elements. Time constants of the rise and cooling time related to 63 and 90 % of the final heat outputs were obtained from the time changes of surface temperatures evaluated thermo graphically. The dead and rise time ratio during a warming is about 0,23. The ratio of the cooling-down time to 90 % and 63 % was determined approx. 2,5. The methodology will be used to explore sectional radiators characteristics.

Key words: heating, controls, radiator, dynamics of radiators

V dnešní době je řízení a regulace zásadním prvkem optimálního provozu otopných soustav. Otopné plochy jsou nedílnou součástí otopné soustavy, a tak způsob a možnost regulace jejich tepelného výkonu přímo ovlivňuje celou regulovatelnost regulačního celku [2]. Schopnost otopné plochy reagovat na regulační zásah je důležitým parametrem pro návrh jak vhodné otopné plochy, tak i celé otopné soustavy.

Dynamické chování otopných ploch (potažmo otopných těles) je velice důležitou provozní charakteristikou, která má nemalý vliv na kvalitu samotné regulace otopné soustavy. Zásadním aspektem je rychlost reakce otopné plochy na regulační zásah. Souvisí to s akumulační schopností, danou tepelnou kapacitou samotné otopné plochy. Důležité je jak množství teplosné látky (vodní obsah), tak i akumulační schopnost materiálu otopné plochy. Nejedná se o ustálené stavy, ale naopak o procesy, ve kterých se charakteristické veličiny (jako je např. střední povrchová teplota, tepelný výkon, ...) mění v čase. Typickým dějem, z něhož lze dynamické vlastnosti otopných ploch posuzovat je náběh či chladnutí.

TEPELNÁ SETRVAČNOST A SETRVAČNOST NÁBĚHU

Základními parametry pro hodnocení dynamického chování otopných ploch jsou tepelná setrvačnost τ a setrvačnost náběhu T_N (respektive chladnutí T_{CH}).

Tepelná setrvačnost τ [s] je tepelně-technickým parametrem, hodnotícím dynamické chování otopných ploch z hlediska materiálu. O tepelné setrvačnosti otopného tělesa vzhledem k vytápěnému prostoru rozhoduje především:

- ☐ tepelná kapacita hmoty tělesa a náplně
- ☐ hmotnostní průtok teplosné látky
- ☐ intenzita prostupu tepla z vnitřku tělesa do vytápěného prostoru
- ☐ teplotní poměry soustavy a prostoru.

Tepelná setrvačnost τ [s], stanovovaná výpočtem, je zatížena značnou chybou a v praxi nenašla, na rozdíl od setrvačnosti náběhu T_N (respektive chladnutí T_{CH}), využití.

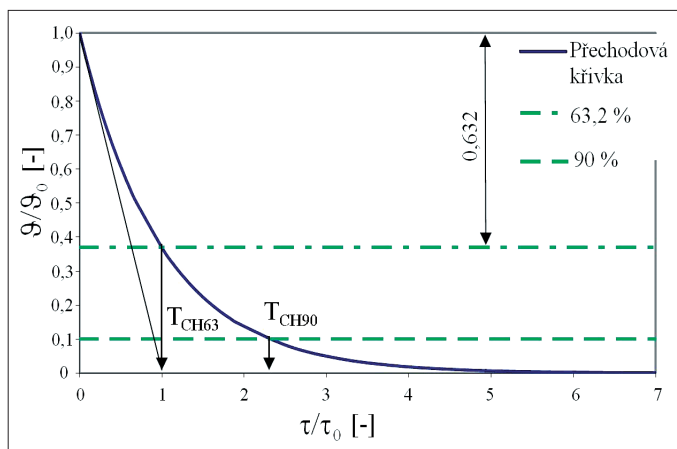
Setrvačnost náběhu

Spolu s tepelnou setrvačností patří setrvačnost náběhu mezi základní provozní charakteristiky otopných ploch. Setrvačnost náběhu T_N [min] vyjadřuje dobu potřebnou k dosažení jmenovitého tepelného výkonu otopné plochy ze stavu, odpovídajícího okrajovým podmínkám okolí, od okamžiku zahájení přívodu teplosné látky o jmenovité vstupní teplotě a jmenovitým průtokem [1]. Jako porovnávací kritérium pro možnost srovnání dynamického chování různých otopných ploch slouží hodnota T_{N63} , respektive T_{N90} . Hodnota T_{N63} (resp. T_{N90}) je dána dobou potřebnou k dosažení 63 % (resp. 90 %) jmenovitého tepelného výkonu otopné plochy.

Jak již bylo řečeno, dynamické chování otopných ploch je mimo jiné závislé na akumulační schopnosti samotné otopné plochy (akumulační schopnost jak vodního obsahu, tak i materiálu otopné plochy). Tuto skutečnost lze dobře pozorovat při porovnávání odlišných otopných ploch, kterými jsou například článková otopná tělesa a desková otopná tělesa (s konvektivními plechy). Deskové otopné těleso je, oproti článkovému tělesu, charakteristické svým malým vodním obsahem a vykazuje zcela odlišné dynamické chování. Dle [6] vycházejí setrvačnosti náběhu (chladnutí) deskových otopných těles přibližně poloviční než setrvačnosti náběhu (chladnutí) článkových otopných těles. A zároveň setrvačnost chladnutí je zhruba osmkrát větší než setrvačnost náběhu u obou druhů otopných těles (článková a desková otopná tělesa).

TEORETICKÁ PŘECHODOVÁ CHARAKTERISTIKA OHŘEVU A CHLADNUTÍ TĚLESA

Z hlediska sdílení tepla při dynamickém procesu lze říci, že se jedná o nestacionární děj – nestacionární sdílení tepla. To znamená, že je teplotní



Obr. 1 Teoretická křivka chladnutí tělesa

pole během procesu časově neustálené, tj. teplota je funkcí času $t = f(\tau)$. A právě změny teplot jsou spojeny s ohřevem nebo ochlazením tělesa.

Pokud budeme uvažovat, že těleso má malý vnitřní tepelný odpor, lze předpokládat, že teplota na povrchu tělesa se téměř neliší od teploty uprostřed ohřívajícího (ochlazovaného) tělesa. Tato podmínka je splněna pokud uvažujeme těleso s velkým součinitelem tepelné vodivosti. Za tohoto předpokladu lze uvažovat, že teplota je v celém tělese v každém čase stejná $\rightarrow t = f(\tau) \neq f(x, y, z)$. Dobrá shoda se skutečností je zajištěna u těles splňujících podmínku, týkající se Biotova kritéria $Bi < 0,1$.

$$Bi = \frac{\alpha \cdot H}{\lambda_{OT}} \quad (1)$$

kde

α je součinitel přestupu tepla na straně vzduchu [W/m²K]
 H výška otopného tělesa [m]
 λ_{OT} střední součinitel tepelné vodivosti otopného tělesa [W/mK].

Ve skutečnosti bude součinitel tepelné vodivosti λ nabývat vždy konečné hodnoty, a tak výsledná teplota tělesa bude reprezentována jakousi střední teplotou.

Rozhodující pro další postup je energetická bilance tělesa. Rozdíl tepelného toku vstupujícího do tělesa a tepelného toku odcházejícího z tělesa se projeví jako časová změna toku tepelné energie akumulované v tělese [5].

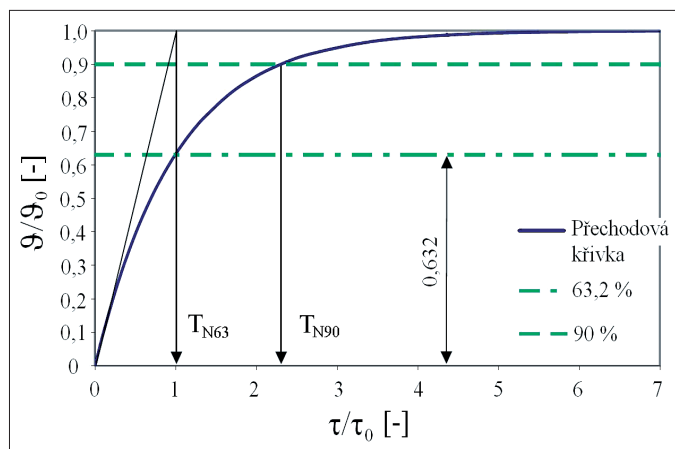
Při chladnutí ztrátový tok tepla z povrchu tělesa Q snižuje jeho teplotu. Tento tepelný tok lze vyjádřit z již zmíněné tepelné bilance (akumulace = přívod – odvod), přičemž v případě chladnutí uvažujeme nulový vstupující tepelný tok (přívod = 0)

$$Q = \alpha_i \cdot S_L \cdot (t - t_i) = -c_T \cdot \rho \cdot V \cdot \frac{dt}{d\tau} \quad (2)$$

kde

Q tepelný tok [W]
 α_i součinitel přestupu tepla na straně vzduchu [W/m².K]
 S_L teplosměnná plocha tělesa [m²]
 c_T měrná tepelná kapacita tělesa [J/kg.K]
 ρ hustota tělesa [kg/m³]
 V objem tělesa [m³]
 t střední teplota tělesa [°C]
 t_i teplota okolního vzduchu [°C]
 τ čas [s].

Zavedeme-li pro rozdíl teplot: $(t - t_i) = \vartheta$, $dt = d\vartheta$, pak z rovnice (2) plyne:



Obr. 2 Teoretická křivka ohřevu tělesa

$$\frac{d\vartheta}{d\tau} = -\frac{\alpha_i \cdot S}{C} d\tau = -\frac{d\tau}{\tau_0} \quad (3)$$

kde

$C = c_T \cdot \rho \cdot V$ je tepelná kapacita tělesa [J/K] a

$$\tau_0 = \frac{C}{\alpha_i \cdot S} \quad \text{je časová konstanta [s].}$$

$$\text{Integrací rovnice (3) dostaneme: } \ln \vartheta = -\frac{\tau}{\tau_0} + C_1 \quad (4)$$

přičemž integrační konstantu C_1 určíme na základě znalosti počátečních podmínek:

$$\tau = 0 \rightarrow t = t_0 \rightarrow \vartheta = \vartheta_0 \Rightarrow \ln \vartheta = \ln(t_0 - t_i) = \ln \vartheta_0.$$

$$\text{Výsledné řešení je } \frac{\vartheta}{\vartheta_0} = \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right) \quad (5)$$

Tímto postupem jsme získali rovnici popisující teoretický proces chladnutí tělesa s velkou tepelnou vodivostí (respektive s malou hodnotou Biotova čísla). Grafickým znázorněním této funkce získáme přechodovou charakteristiku (obr. 1). Přechodová charakteristika udává časový průběh výstupní veličiny vyvolané jednotkovou skokovou změnou vstupní veličiny.

Z obr. 1 je patrné, že se jedná o přechodovou charakteristiku statické soustavy 1. řádu, což odpovídá popisu soustavy diferenciální rovnici 1. řádu (3). Nalézáme zde jediný parametr, který určuje dynamické vlastnosti soustavy, a tím je časová konstanta τ_0 . Z grafického vyjádření je tak patrný význam časové konstanty τ_0 ($\tau_0 = T_{N63}$), která nám udává rychlost celého přechodového děje [3]. Za dobu τ_0 se změnila teplota od počátku o 63,2 % svého celkového přírůstku.

Podobným postupem a úvahou se dá získat rovnice popisující proces ohřevu (náběhu) tělesa. Výsledné řešení má podobu

$$\frac{\vartheta}{\vartheta_0} = 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right) \quad (6)$$

Jedná se o rovnici přechodové křivky mezi dvěma ustálenými stavy. Na obr. 2 je znázorněna grafická podoba přechodové charakteristiky ohřevu (náběhu). Podobně jako u přechodové charakteristiky chladnutí tělesa se u takto idealizované charakteristiky jedná (na rozdíl od skutečného – naměřeného průběhu) o soustavu 1. řádu, která je matematicky popsána diferenciální rovnici 1. řádu [4]. I zde je patrný význam časové konstanty τ_0 ($= T_{N63}$), která nám obecně udává rychlost náběhu.

EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Naším záměrem bylo zmapovat dynamické chování deskových otopných těles, tj. zabývat se dynamikou náběhu (chladnutí) různých typů deskových otopných těles a stanovit časové konstanty (setrvačnosti) náběhu a chladnutí pro různé typy deskových otopných těles a různé způsoby napojení. Zmíněné setrvačnosti náběhu (resp. chladnutí) byly určovány experimentálně. Při mapování změny teploty otopného tělesa v čase jsme používali termovizní kamerou ThermaCAM S65. Podstatou této metody měření je bezkontaktní snímání teploty tělesa termovizní kamerou, která využívá k určení teploty infračervené části elektromagnetického spektra (bezkontaktní snímání intenzity infračerveného záření). Výsledkem je termogram, tj. zobrazení teplotního pole otopného tělesa, ze kterého lze posléze stanovit střední povrchovou teplotu otopného tělesa t_{pm} (průměrná hodnota z teplot pro každý jeden pixel – program ThermaCAMTM Researcher). A právě změna střední povrchové teploty v čase, a následně tepelného výkonu, popisuje dynamické chování otopného tělesa.

$$Q = \alpha_i \cdot S_L \cdot (t_{pm} - t_i) = Q_N \cdot \left(\frac{(t_{pm} + \Delta t_{wp}) - t_i}{((t_{pm} + \Delta t_{wp}) - t_i)_N} \right)^n \quad (7),$$

kde

Q je tepelný výkon otopného tělesa [W]

α_i součinitel přestupu tepla na straně vzduchu [$W/m^2 \cdot K$]

S_L teplosměnná plocha tělesa [m^2]

t_{pm} střední povrchová teplota otopného tělesa [$^{\circ}C$]

t_i teplota okolního vzduchu [$^{\circ}C$]

Q_N jmenovitý tepelný výkon [W]

n teplotní exponent otopného tělesa [-]

$t_{wm} = t_{pm} + \Delta t_{wp}$ střední teplota vody [$^{\circ}C$]

Δt_{wp} korekční rozdíl mezi střední teplotou vody a střední povrchovou teplotou otopného tělesa (pohybuje se od 0,4 do 1,8 K a byl získán měřením) [K].

Předmětem měření byla desková otopná tělesa firmy Korado a. s. Ve všech případech se jedná o typ 10, a to

RADIK MM – konstrukční řady:

10–500 × 1000, 10–500 × 2000 a 10–300 × 2000,

RADIK KLASIK – konstrukční řady:

10–500 × 500, 10–500 × 1000, 10–500 × 2000 a 10–300 × 2000.

Aby měření postihovalo i různé hydraulické podmínky, byla zkoumaná otopná tělesa napojena na rozvod měřicí soustavy různými způsoby. U otopných těles RADIK MM bylo měřeno středové napojení (měřil se náběh i chladnutí), jednostranné napojení shora dolů (měřil se náběh) a oboustranné napojení shora dolů (měřil se náběh). U otopných těles RADIK KLASIK bylo měřeno jednostranné napojení shora dolů (měřil se náběh i chladnutí) a oboustranné napojení shora dolů (měřil se náběh i chladnutí).

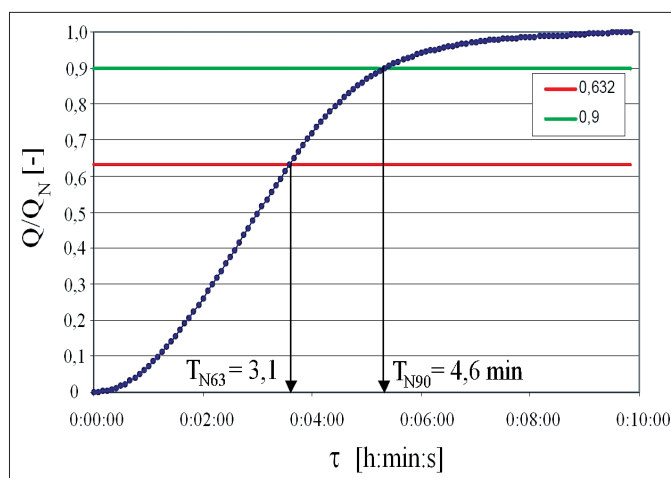
Druhá část zpracování dat probíhala v programu Microsoft Excel. Výstupními daty z programu ThermaCAMTM Researcher byly hodnoty střední povrchové teploty sledované oblasti (plocha otopného tělesa) snímání v čase. Pokud je známa střední teplota teplotnosné látky t_{wm} , teplota okolního vzduchu t_i , velikost teplosměnné plochy otopného tělesa na straně vzduchu S_L a součinitel prostupu tepla k , jsme schopni teplotní údaj převést na výkon otopného tělesa.

$$Q = k \cdot S_L \cdot (t_{wm} - t_i) \quad (8)$$

kde

Q je tepelný výkon otopného tělesa [W]

k součinitel prostupu tepla stěnou otopného tělesa [$W/m^2 \cdot K$]



Obr. 3 Naměřená přechodová charakteristika náběhu otopného tělesa MM 10–500 × 1000 středové napojení

S_L teplosměnná plocha tělesa [m^2]

t_{wm} střední teplota vody [$^{\circ}C$]

t_i teplota okolního vzduchu [$^{\circ}C$].

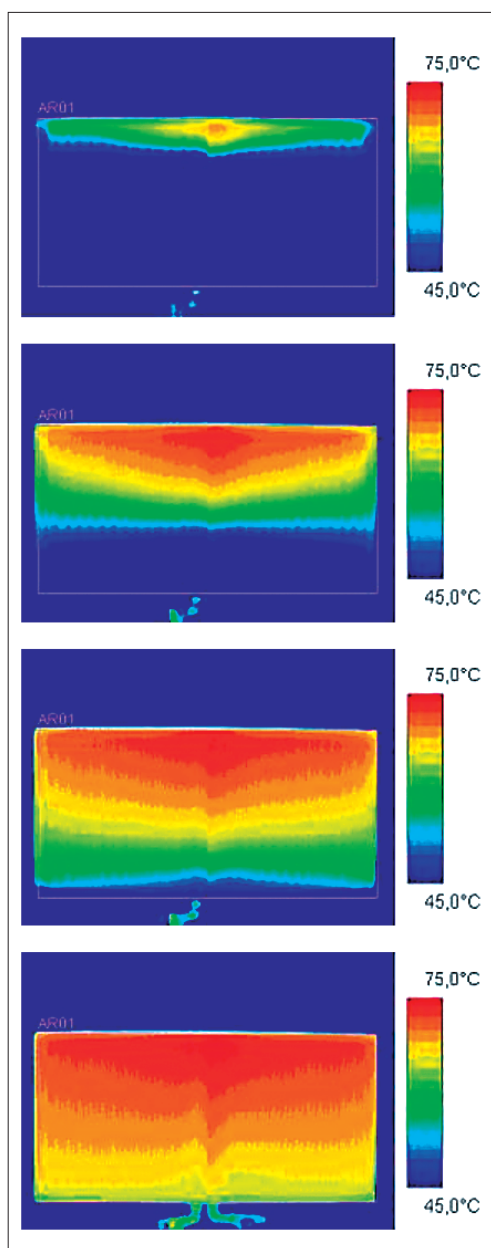
U náběhu jsme získali termogramy s příslušným časem snímání (obr. 4 a 5), které zobrazují rozložení teplotního pole otopného tělesa. Aby bylo možno porovnat náběh pro různá tělesa, jsou termogramy vyhodnoceny pro stejné časové okamžiky (např. 1,5, 3,5, 5 a 20 min). Časy jsou voleny tak, aby co nejlépe vystihovaly průběhy náběhů. Jelikož je náběh deskového otopného tělesa relativně rychlý dynamický proces, jsou voleny poměrně malé časové intervaly. Čas 20 min je volen záměrně tak, aby bezpečně postihoval již ustálený stav otopných těles. Z nasnímaných termogramů si lze vytvořit představu jak rozměry, typ tělesa či způsob jeho napojení ovlivňují dynamický proces, respektive jakým způsobem se vyvíjí teplotní pole těles v průběhu náběhu (chladnutí). Lze tak např. pozorovat odlišné způsoby zatékání teplotnosné látky do jednotlivých částí otopných tělesech vlivem odlišných hydraulických poměrů, způsobených různými variantami napojení otopných těles na měřicí soustavu.

ZÍSKANÉ VÝSLEDKY

U otopných těles typu MM, která byla středově a jednostranně napojena na měřicí soustavu, vycházejí hodnoty setrvačnosti náběhu (T_N) oproti typu Klasik menší. Nejnižší hodnota T_N je u tělesa MM 10–500 × 1000 (obr. 3), neboť toto těleso disponuje relativně malým vodním obsahem. Naopak největší setrvačnost náběhu je u tělesa MM 10–500 × 2000. U oboustranného napojení těles MM vychází nejnižší hodnota T_N opět u MM 10–500 × 1000, největší T_N je však u MM 10–300 × 2000 [7]. Z toho lze usoudit, že z regulačního hlediska není příliš vhodné oboustranné napojení otopných těles (v našem případě MM 10–300 × 2000), u kterých je výška tělesa $H \leq 300$ mm.

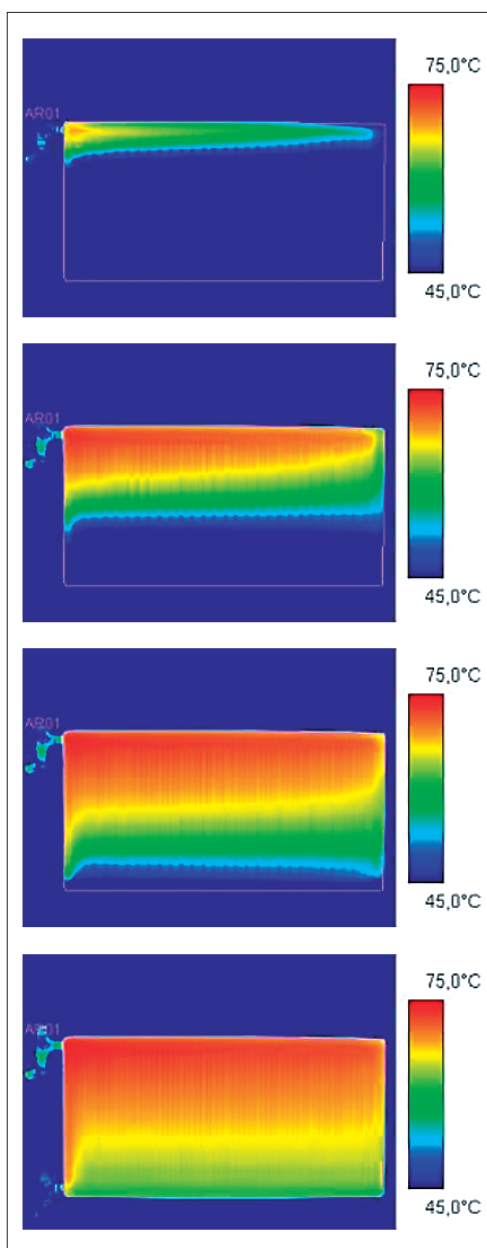
Z hlediska dynamického chování se optimálním napojením otopných těles typu MM jeví středové napojení. Těleso MM 10–300 × 2000 má v případě jednostranného napojení o 3,5 % větší hodnotu T_{N63} (u oboustranného napojení dokonce o 6 %) než v případě středového napojení. U tělesa MM 10–500 × 2000 jsou T_{N63} u všech způsobů napojení víceméně shodné. Rozdíl je u 90 % setrvačnosti náběhu (T_{N90}), kde je opět hodnota T_{N90} nejmenší u středového napojení. Otopné těleso typu MM 10–500 × 1000 vykazuje nejmenší setrvačnost náběhu (T_N) při jednostranném napojení ($T_{N63} = 3$ min, $T_{N90} = 4,45$ min). U oboustranného napojení vychází T_{N63} zhruba o 2 % větší (u středového napojení dokonce o 5 %) [7].

Při chladnutí otopných těles typu MM se hodnoty 63% setrvačnosti chladnutí (T_{CH63}) pohybují, pro různé velikosti otopných těles, v intervalu 17 až



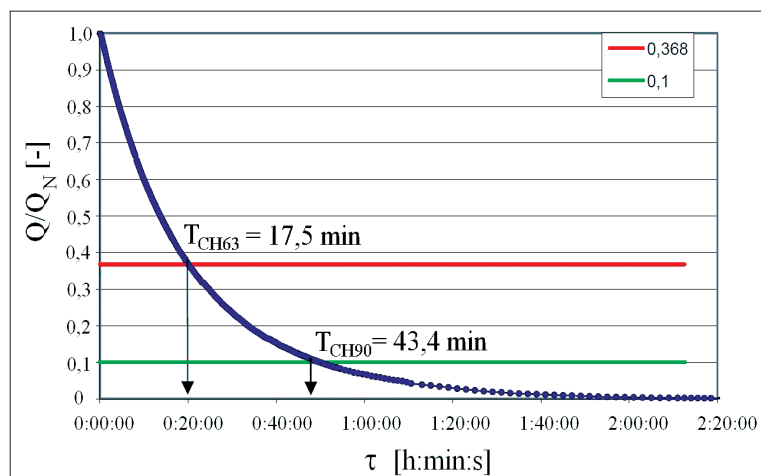
Obr. 4 Termogram náběhu otopného tělesa MM 10–500 × 1000 – středové napojení

a) $\tau = 1,5$ min, $t_m = 34,5$ °C, b) $\tau = 3,5$ min, $t_m = 55,3$ °C, c) $\tau = 5,0$ min, $t_m = 65,3$ °C, d) $\tau = 20$ min, $t_m = 70$ °C



Obr. 5 Termogram náběhu otopného tělesa Klasik 10–500 × 1000 – jednostranné napojení

a) $\tau = 1,5$ min, $t_m = 31,2$ °C, b) $\tau = 3,5$ min, $t_m = 52,7$ °C, c) $\tau = 5,0$ min, $t_m = 63,3$ °C, d) $\tau = 20$ min, $t_m = 68,3$ °C



Obr. 6 Naměřená přechodová charakteristika chlazení otopného tělesa MM 10–500 × 1000 středové napojení

18 min. 90% setrvačnosti chlazení (T_{CH90}) vychází těsně pod 44 min. Na základě výsledků lze vyvodit závěr, že pro všechny velikosti otopných těles typu MM jsou T_{CH63} (obr. 6) přibližně 5krát větší, než T_{N63} .

Otopné těleso typu Klasik 10-500 × 2000 vykazuje nejnižší hodnoty T_{N63} i T_{N90} pro oboustranné napojení. Pokud je toto těleso napojeno jednostranně vykazuje o 6 % větší T_{N63} (T_{N90} je dokonce o 8 % větší) než při napojení oboustranném. Naopak u otopného tělesa Klasik 10–500 × 1000 je z hlediska dynamického chování výhodnější jednostranné napojení ($T_{N63} = 3,54$ min, $T_{N90} = 5,21$ min). Při oboustranném napojení tohoto tělesa vychází T_{N63} o 7 % větší (T_{N90} o 9 % větší). Otopné těleso Klasik 10–300 × 2000 vykazuje pro oba způsoby napojení (jednostranné a oboustranné) téměř stejné hodnoty T_{N63} . Z hlediska T_{N90} se však jeví lépe jednostranné napojení (hodnota T_{N90} je při jednostranném napojení o 3 % nižší, než při oboustranném napojení) [7].

Vzhledem k výše popsaným faktům, je i z hlediska dynamického chování tělesa patrna dobrá shoda s doporučením napojování dlouhých a krátkých otopných těles. Doporučuje se dlouhá tělesa, která splňují podmínku $L/H > 3$ a zároveň $H > 300$ mm, napojovat oboustranně shora dolů [1]. Toto doporučení je vyvozeno na základě dosahovaných tepelných výkonů otopných těles při různých způsobech napojení za ustáleného stavu. Jak je ale patrné, lze ho aplikovat i v problematice dynamického chování.

Ze získaných průběhů lze usuzovat, že způsob napojení otopných těles má velice malý vliv na setrvačnost chlazení.

Teoreticky by způsob napojení vůbec neměl mít vliv na T_{CH} díky rovnoměrnému prohřátí tělesa. Otopné těleso však nemá za jmenovitého stavu všechny své části prohřáté na stejnou teplotu (díky různému napojení, tj. zatékání vody), a tak všechny jeho části nechladnou zcela stejně, tj. nemá ani zcela stejnou T_{CH} . Hodnoty T_{CH63} pro všechny velikosti otopných těles typu Klasik se pohybují kolem 19 min, a to pro oba způsoby napojení. Setrvačnosti chlazení (T_{CH90}) se pohybují v intervalu 44 až 48 min. Stejně jako u otopných těles typu MM, i zde jsou T_{CH63} zhruba 5krát větší než T_{N63} .

Podstatou mapování dynamického chování otopných těles je získat přechodovou charakteristiku tepelného výkonu otopného tělesa, čili přechod otopného tělesa z nulového na jmenovitý výkon (u chlazení je tomu naopak). Užitečným parametrem jsou setrvačnosti náběhu T_{N63} a T_{N90} , které pro desková otopná tělesa typu MM a Klasik souhrnně uvádí tab. 1 až 4.

Tab. 1 Hodnoty setrvačností náběhu T_N otopných těles MM [7]

Náběh otopných těles MM				
typ OT	způsob napojení	Setrvačnost náběhu T_N [min]		T_{N90} / T_{N63}
		T_{N63}	T_{N90}	
MM 10 - 500 x 1000	středové	3,1	4,6	1,48
	jednostranné shora dolů	3,0	4,5	1,50
	oboustranné shora dolů	3,0	4,6	1,53
MM 10 - 500 x 2000	středové	3,6	5,2	1,44
	jednostranné shora dolů	3,7	5,3	1,43
	oboustranné shora dolů	3,7	5,4	1,46
MM 10 - 300 x 2000	středové	3,5	5,4	1,54
	jednostranné shora dolů	3,6	5,5	1,53
	oboustranné shora dolů	3,7	5,7	1,54

Tab. 2 Hodnoty setrvačností náběhu T_N otopných těles Klasik [7]

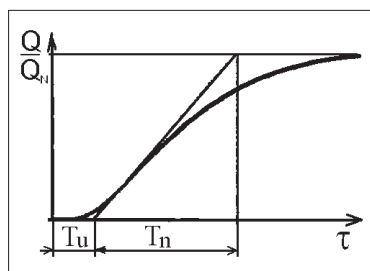
Náběh otopných těles KLASIK				
typ OT	způsob napojení	Setrvačnost náběhu T_N [min]		T_{N90} / T_{N63}
		T_{N63}	T_{N90}	
KL 10 - 500 x 500	jednostranné shora dolů	4,2	6,2	1,48
	oboustranné shora dolů	4,2	6,6	1,57
KL 10 - 500 x 1000	jednostranné shora dolů	3,5	5,2	1,49
	oboustranné shora dolů	3,8	5,7	1,50
KL 10 - 500 x 2000	jednostranné shora dolů	3,5	5,3	1,51
	oboustranné shora dolů	3,3	4,9	1,48
KL 10 - 300 x 2000	jednostranné shora dolů	3,6	5,4	1,50
	oboustranné shora dolů	3,5	5,6	1,60

ZÁVĚR

Experimentálně získané hodnoty T_{N63} se pohybují kolem 3 až 4 min, a to v závislosti na typu, velikosti a způsobu napojení deskových otopných těles. Hodnoty T_{N90} se pohybují kolem 5 až 6 min. Lze tedy usoudit, že deskové otopné těleso dosáhne 90 % svého jmenovitého výkonu za 1,5 až 2krát delší dobu, než dosáhne 63 % svého jmenovitého tepelného výkonu.

Chladnutí otopného tělesa je odlišný dynamický proces, což se projeví i na hodnotách T_{CH63} . Setrvačnosti chladnutí (T_{CH63}) se pohybují kolem 18 až 19 min, a to v závislosti na typu, velikosti a způsobu napojení otopných těles. Hodnoty T_{CH90} se pohybují kolem 42 až 48 min. To znamená, že otopné těleso sníží svůj výkon ze jmenovitého tepelného výkonu o 90 % za zhruba 2 až 2,5krát delší dobu než při snížení tepelného výkonu o 63 %. Jelikož je chladnutí samovolné, jedná se tak o časově velice dlouhý proces. Doba za kterou otopné těleso vychladne na teplotu okolí (těleso má nulový tepelný výkon), se pohybuje řádově v hodinách (v našem případě okolo 2,5 h) [7].

Jedním z výstupů experimentální práce je i grafické znázornění křivek náběhu a chladnutí deskových otopných těles. Jak již bylo uvedeno, jedná se o grafické znázornění přechodové funkce, která popisuje dynamické chování soustavy (v našem případě otopného tělesa) a nazývá se přechodovou charakteristikou. Z grafického znázornění je zřejmé, že u procesu chladnutí se jedná o přechodovou charakteristiku 1. řádu (statická soustava 1. řádu, resp. přechodová funkce je diferenciální rovnice 1. řádu). To se shoduje i s teoretickým předpokladem chladnutí otopného tělesa s malým vnitřním tepelným odporem. To znamená, že je zde jediný parametr určující dynamické chování soustavy a tím je časová konstanta τ_0 ($= T_{N63}$). U procesu náběhu je z grafického znázornění přechodové křivky (obr. 3 a 7) zřejmé, že se jedná o přechodovou charakteristiku 2. řádu (statická soustava 2. řádu). To znamená, že přechodová funkce má podobu diferenciální rovnice 2. řádu, která má dva určující parametry [3]. Těmito parametry jsou doba průtahu T_u a doba náběhu T_n .



Obr. 7 Přechodová charakteristika 2. řádu

Tab. 3 Hodnoty setrvačností chladnutí T_{CH} otopných těles MM [7]

Chladnutí otopných těles MM				
typ OT	způsob napojení	Setrvačnost chladnutí T_{CH} [min]		T_{CH90} / T_{CH63}
		T_{CH63}	T_{CH90}	
MM 10 - 500 x 1000	středové	17,5	43,4	2,48
MM 10 - 500 x 2000	středové	17,6	43,5	2,47
MM 10 - 300 x 2000	středové	17,0	41,4	2,44

Tab. 4 Hodnoty setrvačností chladnutí T_{CH} otopných těles Klasik [7]

Chladnutí otopných těles KLASIK				
typ OT	způsob napojení	Setrvačnost chladnutí T_{CH} [min]		T_{CH90} / T_{CH63}
		T_{CH63}	T_{CH90}	
KL 10 - 500 x 500	jednostranné shora dolů	18,7	46,6	2,49
	oboustranné shora dolů	18,4	45,4	2,47
KL 10 - 500 x 1000	jednostranné shora dolů	18,4	44,7	2,43
	oboustranné shora dolů	19,0	46,8	2,46
KL 10 - 500 x 2000	jednostranné shora dolů	19,3	47,9	2,48
	oboustranné shora dolů	18,0	43,6	2,42
KL 10 - 300 x 2000	jednostranné shora dolů	19,2	47,8	2,49
	oboustranné shora dolů	18,8	48,0	2,55

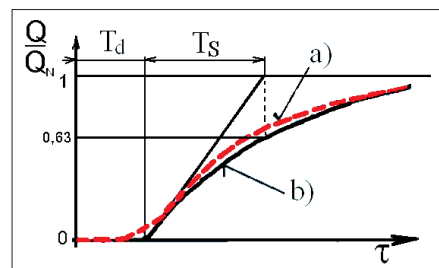
Doba průtahu je doba od okamžiku časové změny přechodové charakteristiky do průsečíku tečny vedené inflexním bodem (nejstřednější tečna) s osou času. Je možno říci, že daná soustava bude tím obtížněji regulovatelná, čím bude hodnota T_u / T_n větší.

Naskýtá se zde řešení, které by zjednodušilo pojetí přechodové charakteristiky náběhu. Řešení spočívá v náhradě charakteristiky 2. řádu charakteristikou 1. řádu s dopravním zpožděním T_d (obr. 8). Při náhradě by platil předpoklad: $T_u \approx T_d$, neboli $T_n = T_S = \tau_0 \approx T_{N63}$.

Tímto způsobem by bylo možno popsat křivku náběhu obdobně jako křivku chladnutí, tj. diferenciální rovnicí 1. řádu s jedním parametrem τ_0 , přičemž u náběhu by se ještě vyskytovalo dopravní zpoždění T_d .

Díky setrvačnosti náběhu lze porovnat různé druhy otopných těles (potažmo otopných ploch) z hlediska tepelné dynamiky. Jak již bylo uvedeno, desková otopná tělesa (typ 10) mají hodnotu T_{N63} kolem 3 až 4 min [7]. Zato u článkových litinových otopných těles je tomu jinak. Hodnoty setrvačnosti náběhu T_{N63} se pohybují u článkových litinových těles kolem 8 min a T_{CH63} kolem 70 min [6]. Lze tak říci, že setrvačnost náběhu článkových litinových otopných těles je zhruba dvakrát větší než u ocelových deskových těles. Článeková otopná tělesa budou součástí dalších experimentů v laboratořích Ústavu techniky prostředí.

Podle hodnot setrvačností náběhu (chladnutí), které hodnotí dynamické chování otopných těles, lze rozhodnout, kam je či není umístění otopných těles vhodné. Desková otopná tělesa s malou tepelnou setrvačností je vhodné použít u lehkých a středně těžkých staveb, kde se změna venkovních okrajových podmínek poměrně rychle projeví změnou vnitř-

Obr. 8 Náhrada přechodové charakteristiky 2. řádu charakteristikou 1. řádu s dopravním zpožděním T_d a dobou náběhu $T_n = T_S = T_{N63}$

a) skutečná křivka, b) nahrazená křivka

ních parametrů. V tomto případě je třeba, aby otopné těleso bylo schopno především rychle zareagovat na regulační zásah, a tím eliminovat následky venkovních vlivů, které se podílejí na narušení tepelné pohody ve vnitřním prostoru [2].

Další vhodné použití otopných těles s malou setrvačností náběhu a chladnutí je například u objektů s velkými prosklenými plochami, kde dochází k časově proměnným tepelným ziskům z oslunění. Naopak článková litinová otopná tělesa lze využít u těžkých či středně těžkých budov, kde proměnné venkovní podmínky nemají díky vlastnostem stěn bezprostřední odezvu na kvalitu tepelné pohody ve vnitřním prostoru [1].

Tento článek vychází z výzkumného záměru MŠM 6840770011 Technika životního prostředí

Použité zdroje:

- [1] Bašta, J. Otopné plochy. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. 328 s. ISBN 80-01-02365-6
- [2] Bašta, J. Hydraulika a řízení otopných soustav. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. 252 s. ISBN 80-01-02808-9
- [3] Čermák, J., Peterka, V., Závorka, J. Dynamika regulovaných soustav. Praha: Academia, nakladatelství Československé akademie věd, 1968. 584 s. ISBN 21-045-68
- [4] Kubík, S., Kotek, Z., Šalamon, M. Teorie regulace I. Lineární regulace. 1. vydání. Praha: SNTL, 1968. 268 s. ISBN 04-515-68
- [5] Hemzal, K. Přenosové jevy v technice prostředí. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2007. 100 s. ISBN 80-01-02924-7
- [6] Výzkumný ústav pozemních staveb: Tepelná setrvačnost otopných těles z hlediska regulace. [Výzkumná zpráva]. Praha, Výzkumný ústav pozemních staveb, 1987, Úkol C05-326-801
- [7] Šimek, J. Dynamické chování otopných těles. Praha 2008. ČVUT Fakulta strojní, 110 s. [Diplomová práce 35-TŽP 2008]. ■