

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**TEZE
DISERTAČNÍ
PRÁCE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

DYNAMICKÉ CHOVÁNÍ OTOPNÝCH PLOCH VE
VAZBĚ K ŘÍZENÍ JEJICH TEPELNÉHO
VÝKONU

Jindřich Boháč

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Technika prostředí

Školitel: prof. Ing. Jiří Bašta, Ph.D.

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce
"Ph.D."

Dynamic Behaviour of Heating Appliances in Relation to Control of Their Heat Output

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na Ústavu techniky prostředí Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Ing. Jindřich Boháč
Ústav techniky prostředí
Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, Praha 6, 160 00

Školitel: prof. Ing. Jiří Bašta, Ph.D.
Ústav techniky prostředí
Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, Praha 6, 160 00

Oponenti: doc. Ing. Michal Kabrhel, Ph.D. (FSv ČVUT v Praze)
prof. Ing. Jiří Hirš, CSc. (FAST VUT v Brně)
doc. Ing. Pavel Neuberger, Ph.D. (TF ČZU v Praze)

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod.
v zasedací místnosti Ústavu techniky prostředí č. B1-819 (8. patro)
Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6
před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru
Technika prostředí.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

prof. Ing. Jiří Bašta, Ph.D.
předseda oborové rady oboru Technika prostředí
Fakulta strojní ČVUT v Praze

ANOTACE

Práce se zabývá nalezením nového přístupu pro stanovování nestacionárního chování otopných těles ve fázi náběhu tepelného výkonu a chladnutí. Finální navržený přístup je založen na matematické simulaci dynamiky deskového otopného tělesa v softwaru MATLAB. Byl vytvořen diskrétní stochastický black-box autoregresní (ARX) model sloužící k predikci typického chování dané skupiny deskových otopných těles. Výsledky, resp. data generovaná modelem, lze využít pro optimalizaci a zefektivnění místní regulace tepelného výkonu otopných těles. Sestavený model rovněž velmi usnadňuje zjišťování dynamiky oproti dosud běžně využívanému způsobu zjišťování termovizní technikou, který je časově i finančně velmi nákladný.

Úvodní část práce je zaměřena na teoretický rozbor jednotlivých dynamických parametrů a rešerši metod pro nalézání nestacionárního chování otopných těles či celých soustav. V rámci rešerše byl získán přehled o experimentálních a simulačních přístupech a rovněž byly popsány i statické analýzy. Byl zdůvodněn výběr sledovaného deskového otopného tělesa. V další části práce byly popsány různé metodiky, které byly na základě rešerše zvoleny a prakticky využity pro řešení disertační práce. Byl popsán základní experiment a metodika pro získání validačních dat pro finální model. Práce rovněž uvádí předpoklady a omezení platnosti získaného modelu. Dále byla vytvořena simulace provozu deskového otopného tělesa osazeného regulačním ventilem s termostatickou hlavicí. Pro hodnocení dynamiky otopných ploch byl poprvé využit nový parametr vycházející z metody aproximace dynamiky podle Strejce. Vlastní finální model zde byl i teoreticky odvozen a je uveden praktický zápis v prostředí MATLAB. V části následující pak byly prezentovány dosažené výsledky, které byly porovnány a zhodnoceny vzhledem k experimentálně získaným údajům.

V závěrečné části práce pak byly porovnány výsledky s vytčenými cíli. Finální model lze s uspokojivou přesností využít pro stanovení dynamiky skupiny tzv. krátkých a středně dlouhých deskových otopných těles s nejvýše jednou deskou, jejichž poměr délky k výšce tělesa je roven nejvýše 3. Byly uvedeny přínosy pro praxi i teorii a bylo nabídnuto další možné směřování výzkumu v oblasti dynamiky tepelného výkonu otopných těles.

SUMMARY

The dissertation work deals with finding a new approach for the determination of dynamic behaviour of radiators in the stages of heat-up and cool-down. The final suggested approach is based on the mathematical simulation of the dynamics of panel radiator in MATLAB. The model is designed as discrete stochastic black-box autoregressive (ARX). It is used for prediction of typical behaviour of stated group of panel radiators. The results generated by the model can be used to optimize of local control of heat output of radiators. Model also greatly facilitates the determination of dynamics as opposed to the commonly used method by thermal camera, which is very expensive and time consuming.

Introduction is focused on theoretical analysis of the individual dynamic parameters and research of methods for finding of unsteady behaviour of radiators or entire heating systems. In the framework of literature research was obtained an overview of the experimental and simulation approaches and statistical analysis also have been described. In next part of the work were described different methodologies that have been chosen and practically used for solution of the dissertation. Fundamental experiment by which was obtained data for the validation of the final model was described. The work also indicates the validity of the assumptions and conditions for the obtained model. Furthermore, the simulation of operation radiator's valve equipped with a thermostatic head was created. For the evaluation of the dynamics of heating appliances was the first time used the new parameter based on Strejc's approximation. Final model was derived in this part of dissertation. Results achieved were presented in the following part of work and they were compared in relation to the experimentally obtained data.

In the last part of the work were results compared with stated dissertation targets. The final model can be with satisfactory precision used for determining the dynamics of the group so called short and medium long (the ratio of the length to the height of the radiator is maximum 3) panel radiators with one panel. There were given benefits for practice as well as for theory. Another possible direction for research in the field of dynamics of thermal performance of radiators was offered.

OBSAH

1.	ÚVOD.....	1
2.	SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY.....	1
2.1	Tepelný výkon ve vytápěném prostoru a jeho regulace.....	1
2.2	Určování dynamiky systémů termovizním měřením.....	2
2.3	Určování dynamiky systémů modelováním.....	3
3.	FORMULACE CÍLŮ PRÁCE.....	4
4.	METODY ŘEŠENÍ.....	5
4.1	Volba otopného tělesa.....	5
4.2	Experiment a jeho předpoklady.....	6
4.3	Metodika vyhodnocení experimentu.....	6
4.4	Aproximace soustavou 1. řádu s dopravním zpožděním.....	7
4.5	Aproximace metodou podle Strejce.....	9
4.6	Numerický simulační přístup – MATLAB.....	10
4.6.1	Komplexní model dynamického chování s aproximací podle Strejce..	10
4.6.2	Diskrétní stochastický ARX black-box model 1. řádu.....	12
5.	VÝSLEDKY A JEJICH OVĚŘENÍ.....	14
5.1	Základní experiment a vyhodnocení náběhu a chladnutí.....	14
5.2	Komplexní model dynamického chování s aproximací podle Strejce..	17
5.3	Diskrétní stochastický ARX black-box model.....	20
6.	ZÁVĚR.....	23
6.1	Porovnání výsledků s uvedenými cíli.....	23
6.2	Přínos pro praxi.....	26
6.3	Teoretický přínos.....	27
6.4	Návrhy pro další směřování.....	27
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY V TEZI.....	28
	PUBLIKACE AUTORA VZTAHUJÍCÍ SE K DISERTAČNÍ PRÁCI.....	30
	JINÉ PUBLIKACE AUTORA NEVZTAHUJÍCÍ SE K DISERATČNÍ PRÁCI....	31

1. ÚVOD

Regulace tepelných zdrojů je v době snižování energetické náročnosti budov velkým tématem. Otopné plochy si lze představit jako izolované lokální tepelné zdroje, u nichž se regulace bezpochyby uplatňuje. Obecně je cílem dosáhnout s adekvátní reakcí regulátoru takového stavu, kdy je výkon otopného tělesa v rovnováze s požadavky vytápěného prostoru, tj. dosažení nového ustáleného stavu. Tím je přeneseně vytvářena i tzv. tepelná pohoda, která je zásadní složkou pohody prostředí. Ustálené stavy tepelného výkonu otopných ploch jsou však v literatuře velmi dobře popsány a práce se proto věnuje výhradně dějům nestacionárním, tedy reakcím na regulační zásah.

Nejvýznamnějšími takovými ději jsou náběh tepelného výkonu a také chladnutí otopných těles. Disertační práce je zaměřena pouze na desková otopná tělesa. Je to dáno tím, že na současném českém trhu je k dispozici nepřeborné množství druhů a typů otopných ploch, lišících se konstrukcí, materiály, principem funkce apod.

Dosud bylo možné dynamiku otopných ploch vyhodnotit a popsat pouze nákladným měřením termovizní technikou, přičemž základním cílem disertační práce je nalezení metodiky stanovení dynamiky jiným způsobem. V práci je tak proveden rozbor experimentálně zjištěných hodnot a na základě jejich matematického popisu je navržen způsob určování dynamiky otopných těles v simulačním prostředí MATLAB. Ideální je takový model, který generuje data na základě snadno dostupných údajů. Nejprve je třeba experimentálně ověřit hodnoty dynamických parametrů otopných těles a jejich kolísání v různých oblastech výkonového spektra a také celkovou reakci na regulační zásah. Každé otopné těleso vykazuje individuální přechodovou charakteristiku, ze které lze známými postupy dynamiku vyhodnotit a právě generování této charakteristiky modelem je zásadním novým poznatkem. Uvedený model je praktický nástroj velice rychle poskytující podklad pro zjištění a hodnocení dynamiky a to bez nutnosti provádění finančně náročných experimentů. Takto dostupná data jsou základem pro návrh a optimalizaci funkce regulátorů tepelného výkonu, a jelikož je dnes vytápění otopnými tělesy zdaleka nejrozšířenější, je nutno se zabývat regulací provozu právě takového způsobu vytápění.

2. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

2.1 Tepelný výkon ve vytápěném prostoru a jeho regulace

Pro člověka je fyziologicky příznivější převážně sálavý způsob sdílení tepla do prostoru, kdy lze tepelné pohody dosáhnout i při nižších teplotách vzduchu, a přestože jsou otopná tělesa zástupci převážně konvektivního způsobu vytápění, je možné mezi jejich typy nalézt i takové, které mají výraznou sálavou složku tepelného výkonu. Poměr zastoupení jednotlivých složek je závislý především na uspořádání teplosměnné plochy na straně vzduchu jako celku. Není tedy pravdou, že je závislý pouze na průměrné

ploše otopného tělesa směrem do prostoru. Zde se také nachází významné omezení použitelnosti termovizní techniky, jako nástroje pro spolehlivé zjišťování tepelného výkonu otopných těles. Část tepla sdílená sáláním je závislá na poměru průmětné čelní plochy a konvekčních ploch, kdy např. deskové otopné těleso typu 33 s relativně malou průmětnou plochou a velkou rozšířenou přestupní plochou sdílí z celkového tepelného toku do místnosti pouze 14 % sáláním. Těleso typu 10 o stejné průmětné ploše a za stejných teplotních podmínek však sdílí do místnosti 38 % tepelného toku sáláním. Procentuální podíl tepla sdílený sáláním je také u typů s více deskami téměř nezávislý na rozdílu střední teploty teplotnosné látky a referenční teploty okolí [1].

Regulace tepelného výkonu otopných těles se realizuje jako místní tzn., že se provádí výhradně v místě dodávky teplotnosné látky do tělesa a to změnou jejího množství, čili kvantitativně (teplota vody samozřejmě kolísá v závislosti na regulaci zdroje tepla, což ovšem není předmětem této práce). Nejběžnějším způsobem zajištění místní regulace tepelného výkonu otopného tělesa je osazení dvoucestného regulačního ventilu termostatickou hlavici. Termostatická hlavice je přímočinný proporcionální regulátor s kapalinovou nebo paroplynovou náplní, který místně a kvantitativně reguluje tepelný výkon otopného tělesa podle teploty vzduchu ve svém okolí. Další možností je využití P či PI spojitých elektrických regulátorů, kdy na regulačním ventilu je osazen termopohon či servopohon. P-regulátor je však v běžné praxi tím nejjednodušším a nepoužívanějším typem spojitého regulátoru (přestože v praxi vykazuje místy nespojitě chování). Práce si neklade za cíl rozbor různých způsobů místní regulace, ale pouze uvádí jednotlivé možnosti a naopak cílem práce je poskytnout efektivní nástroj pro optimalizaci nebo jednodušší nastavování již stávajících způsobů regulace. Více lze nalézt např. v [2], [3], [4].

2.2 Určování dynamiky systémů termovizním měřením

V současnosti nepoužívanější způsob sledování dynamiky systémů je s využitím termovizní techniky. Jedná se o zařízení, které zachycuje infračervenou část elektromagnetického záření. Skutečnost, že záření přímo závisí na povrchové teplotě objektu, umožňuje kamerou tuto teplotu vypočítat a zobrazit. Avšak radiace měřená kamerou nezávisí pouze na teplotě objektu, ale výrazně také na emisivitě jeho povrchu. Dalšími veličinami jsou úhel snímání, vzdálenost mezi objektivem kamery a měřeným objektem, střední radiční teplota, relativní vlhkost a teplota vzduchu, resp. propustnost atmosféry mezi objektivem a objektem. Na všech těchto veličinách pak závisí přesnost měřené povrchové teploty.

Zajímavou prací [5] se prezentoval Litwa, který sledoval vliv úhlu snímání na přesnost tří různých kamer. Za kritickou hodnotu je považován pokles přesnosti o 2 %. Například pro termovizní kameru od výrobce FLIR ThermaCam E25 autor udává kritický pozorovací úhel 53 až 57° (v závislosti na vzdálenosti od měřené plochy). O problematice bezdotykového měření

teplot, výhodách a také vyhodnocení výsledků se významnou měrou hovoří v [6] a [7].

Stanovit dynamiku termovizní kamerou umožňuje metodika, kdy je snímáno teplotní pole v určitých nastavených časových sekvencích a tím vzniká soubor termogramů, který určuje časovou osu měření. Tím se zároveň získá průběh závislosti povrchové teploty otopného tělesa na čase v každém jednotlivém bodě (pixelu), který je snímač kamery schopen rozlišit. Předpoklady a omezení použití termovizní techniky a rovněž podmínky za jakých je možný převod na závislost poměrného tepelného výkonu na čase popisují následující kapitoly. Obecně však lze konstatovat, že termovizní měření vyžaduje velmi nákladné technické vybavení (kamera, software, výkonný PC, příp. měřicí komora atp.) a jeho neustálou kalibraci a také vhodnou metodiku měření. Účelem této práce je proto omezení nutnosti provádění experimentů ve prospěch simulací. Termovizní snímání však vždy bude mít svou nezastupitelnou úlohu ve smyslu validace a ověření dosažených výsledků. Měření tepelného výkonu otopných těles se v současnosti provádí výhradně v autorizovaných zkušebnách podle ČSN EN 442-2 např. tzv. váhovou metodou. Tato měření jsou však založena výhradně na ustáleném a nikoliv na nestacionárním stavu tepelného výkonu otopného tělesa.

2.3 Určování dynamiky systémů modelování

Žádný matematický model nemůže dokonale postihnout realitu a je tak pouze odvozenou, více či méně zdařilou aproximací skutečnosti. Má-li být tedy model dostatečně přesný a vystihovat všechny důležité okolnosti, a zároveň nemá být příliš komplikovaný, je nutné znát účel využití daného modelu. Výhodou publikace [8] je obsáhlý popis základních zákonitostí sdílení tepla tepelných výměníků a jejich využití pro automatizaci a regulaci. Matematickou identifikaci systémů a simulačními modely se uceleně zabývali i Zitek [9] a Noskiewič [10].

Autoři Bašta a Vavříčka využili kombinaci termovize a softwarové simulace ve své práci [11]. Porovnali teplotní pole dvou typů deskových otopných těles pro různé způsoby napojení. Intenzivně se modelování dynamického chování otopných těles věnovali Jančík a Bašta [12]. Příspěvek se zabývá procesem chladnutí otopného tělesa se středovým napojením MM typ 10 – 500 x 1000, a to především sestavením modelu chování v programu MATLAB Simulink v závislosti na různých způsobech určení celkového součinitele přestupu tepla coby jednoho z nejdůležitějších parametrů pro sdílení tepla na teplosměnné ploše na straně vzduchu. Jednotlivé dynamické modely s odlišně určenými součiniteli přestupu tepla následně autoři porovnávají s termovizními měřeními a vyhodnocují maximální možnost zjednodušení celkového součinitele přestupu tepla pro dosažení relevantních výsledků. Autoři zanedbávají odpory proti přestupu tepla na straně vody a vedení tepla materiálem otopného tělesa, za předpokladů, které jsou v jejich i v této práci popsány. Stejní autoři se rovněž pokusili o sestavení modelu

dynamického chování otopného tělesa ve fázi náběhu [13]. V této práci nejprve rozebírají historii měření povrchových teplot s využitím teplotních čidel v určených bodech na otopné ploše a vyzdvihují význam termovizní techniky, díky které se prohloubila úroveň poznání v tomto oboru. Upozorňují, že zatímco pro fázi chladnutí byla metoda měření např. ve třech bodech dostatečně přesná, pro náběh to neplatí. Je to především z toho důvodu, že křivka náběhu je na rozdíl od chladnutí vyššího řádu. Například měření v devíti bodech vykazuje odchylku až 30 % vůči termoviznímu záznamu teplotního pole.

Velmi podobným přístupem se o nalezení funkčního modelu pokusili autoři Brembilla a kol. [14]. Příspěvek pojednává o sestavení modelu náběhu deskového otopného tělesa na základě jeho dělení do 5 částí, které jsou postupně protékány otopnou vodou. Grafické výsledky byly dále porovnány s daty získanými ze softwaru IDA. O pravděpodobně nejkompexnější popis dynamické simulace chování systémů s otopnými tělesy osazenými regulačními ventily s termostatickými hlavici se pokusili autoři z pekingské univerzity Xu, Fu a Di [15]. Jejich práce spočívala v sestavení a popisu oddělených modelů obytné místnosti, ventilu, otopné soustavy a otopného tělesa a jejich vzájemného propojení. Sestavili tak globální model popisující nejen tepelné chování, ale rovněž hydraulické poměry otopných těles v celé obytné budově. Tato práce však detailně neřeší model otopného tělesa, ale spíše funkci soustavy jako celku fungujícího v určitém typu stavby. Velice podobnou tematikou, jakou obsahuje předchozí příspěvek, se zabývá i Tahersima a kol. v [16], kde autoři popisují sestavení modelu dynamického chování samotného otopného tělesa osazeného regulačním ventilem s termostatickou hlavici. Model byl sestaven v programu MATLAB. Autoři také popisují chování regulačního ventilu pro přechodné období. V reálném provozu regulační ventil osazený běžnou (kapalinovou nebo paroplynovou) termostatickou hlavici s ohledem na velmi omezené pásmo proporcionality a pohyb mechanických částí nabývá pouze setrvalých hodnot otevřeno/zavřeno přesto, že se jedná o spojitý regulátor. Tyto závěry jsou ve shodě se závěry disertační práce.

Autoři Madsen a Holst [17] využili statistickou simulační metodu „grey-box“, když ji aplikovali na budovu s jednou měřenou místností. Tento přístup je jednou z možných cest pro řešení dynamiky systémů a v této práci byl využit, viz následující kapitoly. Modelování s využitím statistiky se věnovali i Braun a Chaturvedi [18] či Wang a Xu [19]. Tyto modely také obvykle ne zcela přesně reflektují fyzikální chování dané soustavy.

3. FORMULACE CÍLŮ PRÁCE

Tato práce se zabývá dynamikou otopných těles. Těmito ději jsou náběh tepelného výkonu otopných těles a také chladnutí. Z rešerše vyplynulo, že je třeba se věnovat především oblasti náběhu tepelného výkonu v čase, kdy se z mnoha hodnot, v případě chladnutí považovaných za konstanty, stávají proměnné. Komplikace oproti vyhodnocení fáze chladnutí vychází z fyzikální

podstaty náběhu, kdy je celý systém charakterizován křivkou vyššího řádu a dochází k problémům s identifikací inflexního bodu křivky, se sestrojením její tečny či správným určením dopravního zpoždění. V současnosti neexistuje jednotná spolehlivá metodika vyhodnocování dynamického chování různých druhů otopných těles. Obecným cílem je proto nalezení takového způsobu stanovení rozhodujících parametrů popisujících dynamické chování otopných těles a vlastní vyhodnocení dynamického děje, na jehož základě by bylo možné aplikovat získané poznatky na více typů otopných těles, a to ideálně bez použití finančně náročného měření v akreditovaných laboratořích. Veškeré experimenty a simulace jsou prováděny s deskovým otopným tělesem typu 10 – 500 x 1000. Práce si neklade za cíl rozbor různých způsobů místní regulace, ale pouze uvádí jednotlivé možnosti a účelem je poskytnout efektivní nástroj pro optimalizaci a nastavování stávajících způsobů regulace.

Jednotlivé cíle jsou stanoveny následovně:

- Zjistit reálnou a věrohodnou přechodovou charakteristiku náběhu a chladnutí deskových otopných těles
- Určit a vyčíslit dynamické parametry z přechodové charakteristiky otopných těles, vhodné pro nastavování regulace a simulaci tepelného výkonu otopných těles
- Provést simulaci chování deskového otopného tělesa osazeného P-regulátorem
- Omezit nutnost provádění experimentů pro vyhodnocování dynamických parametrů otopných těles
- Vytvořit a ověřit matematický model dynamického chování deskového otopného tělesa (MATLAB)

4. METODY ŘEŠENÍ

4.1 Volba otopného tělesa

Disertační práce, experimenty a matematické modely se věnují deskovému otopnému tělesu „klasik“ typu 10, tedy s jednou deskou a bez konvekčních plechů, o rozměrech 500 x 1000 mm (výška x délka). Délka 1 m představuje tzv. geometrický modul otopného tělesa. Těleso bylo vždy z hlediska průtoku otopné vody připojeno jmenovitým způsobem, tj. jednostranně shora dolů. Zásadním důvodem volby právě tohoto otopného tělesa je možnost validace dosažených výsledků experimentem. Zvolené deskové otopné těleso není totiž příliš zatíženo omezeními, která vyplývají s použitím termovizní techniky. Další motivací pro zkoumání uvedeného tělesa je fakt, že se snižujícími se tepelnými ztrátami moderních domů se snižuje i požadavek na velikost jednotlivých otopných ploch. Je to tedy typický představitel dnes používaných technologií a možností pro běžné vytápění rezidenčních objektů.

4.2 Experiment a jeho předpoklady

Termovizní měření je metoda optická, kdy je v určitých časových intervalech snímána povrchová teplota a lze měřit pouze taková zařízení, jejichž tepelné záření z povrchu dopadá na snímač kamery. Toto naplňují především desková otopná tělesa s minimálním počtem desek, kdy se předpokládá shodné teplotní pole na obou jejich stranách. Naopak pro otopné těleso typu 33, tj. tři desky a trojice konvekčních plechů mezi nimi, není tato metoda příliš vhodná, neboť kamerou je snímána pouze čelní deska a lze se jen domnívat, jak se vyvíjí proudění, resp. teplotní pole u zadních desek. Ani pro další druhy otopných těles (článeková a trubková) není tato metoda měření dynamiky vhodná. Problém způsobují především jejich geometrické parametry, které zásadně mění hydraulické poměry. Zcela nevhodná je tato metoda pro konvektory.

Sledovat povrchovou teplotu otopného tělesa termovizní kamerou umožňuje fakt, kdy přestup tepla na straně vody je daleko intenzivnější než přestup tepla na straně vzduchu. Zároveň platí, že součinitel tepelné vodivosti materiálu otopného tělesa je vysoký a tloušťka stěny otopného tělesa je malá (1,25 až 1,3 mm). Fyzikálně lze tento fakt kvantifikovat Biotovým číslem (prakticky za podmínky $Bi < 0,1$). Pokud má otopné těleso malý vnitřní odpor, lze konstatovat, že teplota vody uvnitř tělesa se přibližně rovná teplotě povrchové. Teplota je pak pouze funkcí času a nikoliv souřadnic, ve kterých je měřena. U deskových otopných těles je pro teplotní rozmezí 40 až 80 °C, tedy pro běžný provozní rozsah, rozdíl mezi střední teplotou vody t_{wm} a střední povrchovou teplotou tělesa t_p (na straně vzduchu) od 0,3 do 0,5 K [20]. Za těchto předpokladů lze při využití termovizní techniky přestup tepla na straně vody a vedení tepla materiálem tělesa zanedbat a platí, že $t_{wm} = t_p$.

Byť je kamerou teplota povrchu měřena v každém pixelu snímače, lze ji definovat tzv. vyhodnocovanou oblastí v softwaru Flir ThermaCam Researcher pro každé měření. Ta respektuje obrys aktivní teplosměnné plochy otopného tělesa. Pak lze výhodně pracovat pouze se střední povrchovou teplotou celé průmětné plochy otopného tělesa.

Další podmínkou bylo nastavení jmenovitého průtoku teplotonosné látky tělesem (dle hodnot udávaných výrobcem při měření ve zkušební komoře podle ČSN EN 442-2:2015). Všechna měření byla provedena rovněž se jmenovitým připojením k otopné soustavě, resp. ke zkušebnímu okruhu (tj. jednostranně shora dolů). Veškeré záznamy dynamického chování byly oproti akreditované zkušební laboratoři snímány na tzv. otevřeném měřicím místě a naměřený tepelný výkon je nutné řádně korigovat na teplotu vzduchu 20°C. Teploty vstupní a výstupní otopné vody byly rovněž zvoleny a nastavovány v souladu s uvedenou normou.

4.3 Metodika vyhodnocení experimentu

Dynamiku lze posuzovat podle časové konstanty, setrvačnosti náběhu atp. Pro tyto veličiny platí, že se nejnázne vyjádří ze závislosti bezrozměrného

tepelného výkonu otopného tělesa na čase. Níže uvedený postup pro převedení z přímo změřené závislosti střední povrchové teploty na čase, prezentovaný v [21], vychází z teorie výpočtu tepelného výkonu otopných těles prostupem tepla jejich stěnou z teplotnosné látky do okolního prostředí, viz rovnice (1).

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{OT} &= \dot{m}_w \cdot c_w \cdot (t_{w1} - t_{w2}) = \alpha_w \cdot S_w \cdot (t_{wm} - t_{sw}) = \frac{\lambda_{OT}}{\delta_{OT}} \cdot S_m \cdot (t_{sw} - t_{sL}) = \\ &= \alpha_k \cdot S_L \cdot (t_{sL} - t_{ok}) + 5,67 \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot S_L \cdot \left[\left(\frac{t_{sL} + 273,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_r + 273,15}{100} \right)^4 \right] \cdot \varphi_{1,2} \end{aligned} \quad (1)$$

Tento tepelný výkon vztažený v každém okamžiku měření k výkonu jmenovitému definuje rovnice (2). Jmenovitý tepelný výkon je získán podle ČSN EN 442-2:2015 v laboratorních podmínkách ve zkušební komoře, za dodržení jmenovitých podmínek (označeno indexem N): $t_{w1,N} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$, tj. teplota vstupní otopné vody; $t_{w2,N} = 65 \text{ }^\circ\text{C}$ teplota výstupní otopné vody; $t_{ok,N} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ teplota vzduchu v místnosti. Tento výkon je výrobce povinen deklarovat ve svých projekčních podkladech a je tedy snadno dostupný.

$$\varphi = \frac{\dot{Q}_{OT}}{\dot{Q}_{OT,N}} = \frac{U \cdot S_L \cdot (t_{wm} - t_{ok})}{U_N \cdot S_{L,N} \cdot (t_{wm} - t_{ok})_N} \quad (2)$$

Teplosměnná plocha otopného tělesa je stále stejná $S_L = S_{L,N}$, tudíž tento poměr lze ze zlomku vykrátit. Změnu součinitele prostupu tepla lze převést na mocninou funkci přes teplotní exponent otopného tělesa n , který se stanovuje experimentálně a rovněž jej musí udávat výrobce otopného tělesa. Po dosažení předpokladu $t_{wm} = t_p$ nabývá rovnice (2) výsledného tvaru (3), kterým lze přeneseně vyjádřit dynamické procesy otopných těles.

$$\varphi = \frac{\dot{Q}_{OT}}{\dot{Q}_{OT,N}} \cong \left[\frac{(t_p - t_{ok})}{(t_p - t_{ok})_N} \right]^n \quad (3)$$

Tímto postupem lze převést, při znalosti teploty okolního vzduchu t_{ok} , charakteristiku náběhu (i chladnutí) z tvaru $t_p = f(\tau)$, kdy se jedná o závislost střední povrchové teploty otopného tělesa na čase, na tvar $\varphi = f(\tau)$, kde se již jedná o hledanou závislost poměrného výkonu otopného tělesa na čase. Z takto získané závislosti lze snadno stanovit například setrvačnost náběhu, časovou konstantu aj. Příklad viz níže.

$$T_{n63} \Leftrightarrow \frac{\dot{Q}_{OT}}{\dot{Q}_{OT,N}} = 0,632 \quad \text{tj. setrvačnost náběhu ot. tělesa pro } 63,2 \%$$

$$T_{n90} \Leftrightarrow \frac{\dot{Q}_{OT}}{\dot{Q}_{OT,N}} = 0,9 \quad \text{tj. setrvačnost náběhu ot. tělesa pro } 90 \% \text{ atd.}$$

4.4 Aproximace soustavou 1. řádu s dopravním zpožděním

Nejjednodušší, ale zároveň dostatečnou aproximací dynamického chování otopných těles je tzv. metoda tečny v inflexním bodě přechodové

charakteristiky. Tak lze s dobrými výsledky aproximovat stabilní nekmitavé dynamické systémy nejméně druhého řádu bez kmitavých složek. Je to nejčastější případ regulovaných soustav, u nichž jsou všechny póly přenosu reálné a záporné a činitelem přenosu je konstanta. Metodu lze rozšířit i na dynamické systémy s dopravním zpožděním. Aproximace tedy vychází z předpokladu, že náběh je ustalující proces, jehož průběh je charakterizován nekmitavou křivkou vyššího řádu, která se na rozdíl od chladnutí projevuje inflexí, tj. přítomností doby průtahu.

Základní energetická bilance je popsána rovnicí (4) a obsahuje hlavní problémy, které při identifikaci dynamiky náběhu případně chladnutí vznikají.

$$(m_w \cdot c_w + m_{OT} \cdot c_{OT}) \cdot \frac{dt_p}{dt} = \dot{m}_w \cdot c_w \cdot (t_{w1} - t_{w2}) - \alpha_c \cdot S_L \cdot (t_p - t_{ok}) \quad (4)$$

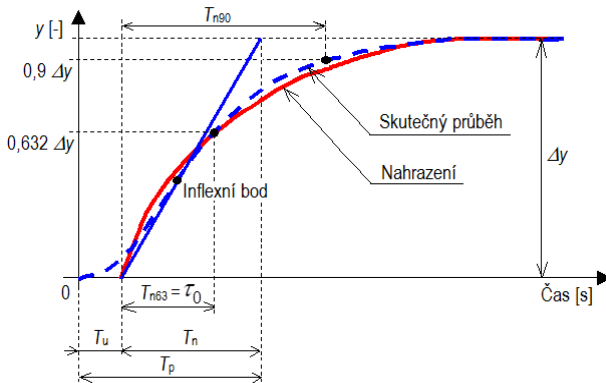
Pro náběh je oproti fázi chladnutí komplikací fyzikální podstata tohoto děje, kdy náběh je vždy charakterizován křivkou vyššího řádu, u které lze vyhodnotit průtah, avšak vznikají zde nepřesnosti vlivem individuální identifikace inflexního bodu křivky. Na tom je závislé sestrojení inflexní tečny a správné určení dopravního zpoždění. Dále při náběhu dochází k vytlačování původního vodního obsahu tělesa vstupní otopnou vodou o výrazně vyšší teplotě, což způsobí, že v rovnici (4) se stanou některé členy, které jsou v případě chladnutí konstantní, proměnnými. Jedná se především o velikost teplosměnné plochy, která sdílí teplo do okolí jen určitou svou částí, tj. tzv. aktivní teplosměnná plocha. Tato problematika byla řešena dělením teplosměnné plochy na 9 částí, kde byly sledovány dynamické pochody postupně v těchto plochách, viz [28]. V prvotní fázi rovněž není známo, jakou teplotu bude mít otopná voda odcházející z tělesa. Součinitel přestupu tepla rovněž není konstantní. Naopak teplota vzduchu v okolí tělesa se v modelech uvažuje konstantní, tzn. že sdílený tepelný výkon odpovídá okamžité tepelné ztrátě prostoru, kde je těleso instalováno. Princip vyhodnocení dynamických parametrů z přechodových charakteristik a jejich význam uvádí *Obr. 1*. Tento přístup byl prezentován v [22]. Jedná se o nahrazení skutečné přechodové křivky křivkou prvního řádu se stanovením určitého dopravního zpoždění, které odpovídá době průtahu (skutečné čisté dopravní zpoždění T_d je však u všech průběhů rovno nule tzn., že průběhy jsou na počátku oříznuty přesně na začátek dynamické změny).

V této práci je pro přechodovou funkci prvního řádu využita rovnice (5) a přenosová funkce pro soustavu prvního řádu je dána rovnicí (6).

$$y(t) = K \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}} \right) \quad (5)$$

$$G(s) = \frac{K}{\tau_0 s + 1} \quad (6)$$

Časovou konstantu τ_0 lze zjednodušeně položit rovnu setrvačnosti náběhu T_{n63} , která uplyne mezi skončením doby průtahu a časem, v němž přechodová charakteristika dosáhla 63,2 % své nové ustálené hodnoty.



Obr. 1 Základní princip grafického vyjádření parametrů přechodové odezvy nekmitavého systému [22]

4.5 Aproximace metodou podle Strejce

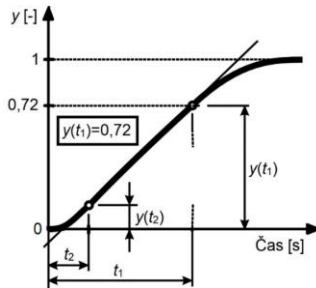
Metodu podle Strejce [23], [24] lze použít opět pouze tehdy, pokud je odezva systému nekmitavá. Na rozdíl od výše uvedené metody se však aproximuje proporcionální soustavou 2. řádu se dvěma rozdílnými časovými konstantami ($\tau_u < 0,104$) nebo soustavou n -tého řádu se stejnými časovými konstantami ($\tau_u > 0,104$). Volba soustavy závisí na hodnotě parametru τ_u . V oblasti dynamiky většiny otopných těles je tento poměr typicky nižší než 0,104, a proto byl v práci popsán a využit postup podle tohoto případu. Obecný výsledný tvar přenosu je dán rovnicí (7), kde $\tau_{0,1}$ a $\tau_{0,2}$ jsou jednotlivé odlišné časové konstanty.

$$G_{(s)} = \frac{K}{(\tau_{0,1}s + 1) \cdot (\tau_{0,2}s + 1)} \quad (7)$$

Průběh aproximace je založen na parametru, daném rovnicí (8),

$$y(t_1) = 0,72 \cdot y_{(\infty)} \quad (8)$$

kdy se pro hodnotu 0,72 y odečte z příslušné přechodové charakteristiky časový okamžik t_1 a vypočte se součet časových konstant $\tau_{0,1}$ a $\tau_{0,2}$ a následně i jednotlivé časové konstanty podle [23].



Obr. 2 Základní princip stanovení časových konstant metodou podle Strejce

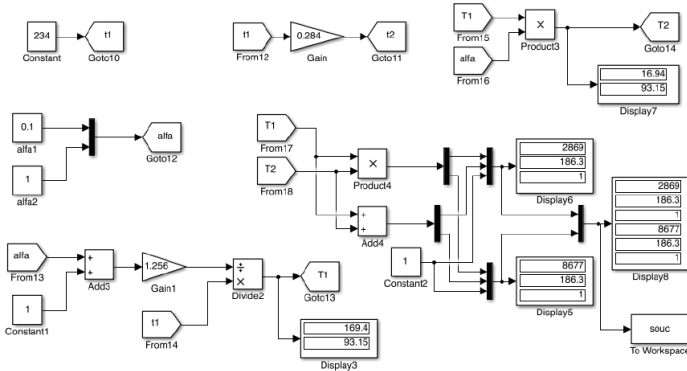
4.6 Numerický simulační přístup – MATLAB

Na základě řešerše vzešel požadavek na využití numerického simulačního nástroje. Zde jsou prezentovány dva modely, kdy jeden je vytvořen v prostředí MATLAB s nadstavbou Simulink (viz 4.6.1) a druhý pomocí samotného prostředí MATLAB (viz 4.6.2). Hlavním cílem této práce je sestavení matematického modelu pro zjišťování dynamiky otopného tělesa, který by dokázal zastoupit termovizní měření, které je doposud hlavním, a v akreditovaných laboratořích drahým, způsobem stanovování dynamiky.

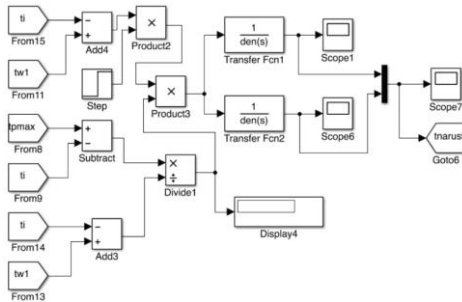
4.6.1 Komplexní model dynamického chování s aproximací podle Strejce

První z modelů prezentovaných v této tezi je založen na identifikaci parametrů přechodových charakteristik podle Strejce, viz výše. Jako vstupní (zjednodušeně) skoková změna je uvažována změna teploty přívodní otopné vody do otopného tělesa, kdy je nejprve otopné těleso teplotně vyrovnáno s okolím a následně je do něj přiváděna voda o jmenovité teplotě (75 °C). Výstupem modelu je pak žádaná závislost střední povrchové teploty tělesa na čase, kterou lze postupem podle 4.3 převést na závislost tepelného výkonu otopného tělesa na čase. Celý proces aproximace je zahrnut do modelu a stanovené hodnoty zesílení a časových konstant jsou následně vkládány do přenosové funkce.

Schéma programu aproximace funkce, viz *Obr. 3* a schéma vlastního programu simulace průběhu střední povrchové teploty viz *Obr. 4*. Byl zaveden dvoukanálový postup pro výpočet aproximace (který metodika podle Strejce umožňuje), kdy jednou je uvažováno standardně se dvěma časovými konstantami, jak bylo v příslušné kapitole uvedeno (v modelu na *Obr. 3* označeno jako „alfa“). Druhý kanál výpočtu pak uvažuje s tím, že $\tau_u = 1$. Tento zjednodušující předpoklad umožňuje výpočet přenosových funkcí pouze s jednou časovou konstantou. Takové řešení vede k pružnější aproximaci a není tak nutné pracovat jen s jednou pevně danou přenosovou funkcí, nýbrž je možné pracovat s tzv. flexibilním přenosem [23].



Obr. 3 Schéma programu aproximace funkce 2. řádu [25]



Obr. 4 Schéma programu simulace s přenosovými funkcemi [25]

K modelu s flexibilním přenosem pro náběh otopných těles byl připojen model chladnutí a byl tak sestaven komplexní model celého dynamického procesu. Chladnutí je z hlediska matematického popisu výrazně jednodušší proces než náběh. Podmínky vyjadřuje například rovnice (4), ovšem bez členu vyjadřujícího přívod energie do otopného tělesa. Podstatným zjednodušením je rovněž počáteční rozložení aktivní teplosměnné plochy, která zaujímá celé těleso. Vzhledem k tomu, že doba průtahu je zde téměř neznatelná, lze výslednou přechodovou charakteristiku chladnutí označit za křivku prvního řádu. Nevýhodou a zároveň významným zdrojem chyby tohoto modelu je pouze odhad součinitelů přestupu tepla na straně vody i v zduchu. Další nevýhodou je nutnost vložení hodnoty střední povrchové teploty pro okamžik, kdy je dosaženo 72% změny mezi dvěma ustálenými stavy. Toto specifikum je dáno metodikou stanovování časových konstant Strejcovou metodou, což výrazně znesnadňuje použití uvedených modelů. Daný parametr je v praxi neznámý a nelze jej zjistit jinak než experimentem pro každé otopné těleso.

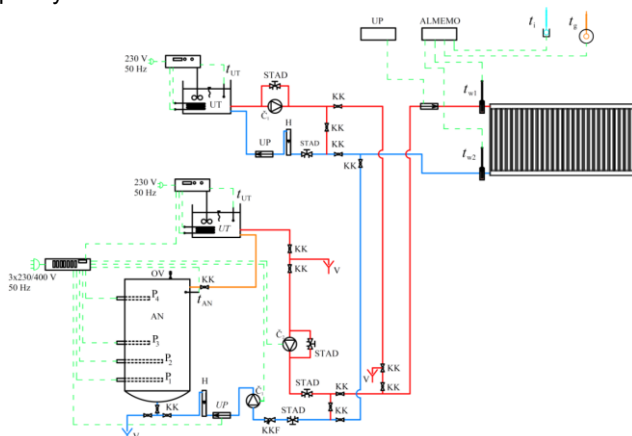
Pro správnou funkci modelu, bylo nutné propojení dějů náběhu a chladnutí prvkem, „Relay“ který oba děje mezi sebou přepíná. Reálně si

tento blok lze přestavit jako P-regulátor, čili například jako termostatickou hlavici s kapalinovou náplní, kterou se tělesa zcela běžně osazují. Model tak disponuje možností nastavit pásmo proporcionality skutečně použitého P-regulátoru a umožňuje provádět simulace dynamiky otopného tělesa osazeného tímto regulátorem. Pro přehlednost byly jednotlivé výpočtové bloky na obrázcích výše a jiné, zde neilustrované pomocné výpočtové mechanismy zastavěny do několika podsystémů, jež tvoří kompaktní model. Výstupem je pak průběh střední povrchové teploty otopného tělesa, resp. jeho výkonu.

Výsledky tohoto modelu uvedené v kapitole 5.2 však nebyly zcela uspokojivé a proto byl sestaven finální model na základě jiného přístupu, uvedený v následující kapitole.

4.6.2 Diskrétní stochastický ARX black-box model 1. řádu

Model představený v této kapitole je na základě předchozích zkušeností tím výsledným, který disertační práce nabízí. Zvoleným přístupem je tzv. black-box modelování, kdy se jedná o identifikaci parametrů dynamiky otopného tělesa pouze na základě reálně změřených údajů bez jakékoliv apriorní informace o fyzikálních závislostech. Výsledkem takového přístupu je diskrétní, příp. spojitý dynamický model, který je možno popsat diferenční, resp. diferenciální rovnicí. K sestavení modelu nestačila data ze sledování pouhé změny mezi původním a novým ustáleným stavem, viz 4.2. Bylo nutné sestavit měřicí trať (viz *Obr. 5*), na které je možné dosáhnout libovolné skokové změny teploty vody vstupující do otopného tělesa. Tím bylo zajištěno, že dynamické změny probíhající v otopných tělesech (náběh i chladnutí) je možné sledovat naprosto libovolně, ve kterékoliv části výkonového spektra daného tělesa. Tento unikátní záznam, spolu se stanovením statických vlastností pro různé průtoky a teplotní parametry je zásadní pro vytvoření matematického black-box modelu.



Obr. 5 Schéma zapojení měřicí trati se dvěma nezávislými zdroji tepla pro zajištění skokové změny vstupní teploty vody do otopného tělesa [26]

Obr. 5 prezentuje základní schéma zapojení se dvěma zdroji tepla, které je nezbytné pro zajištění (kvazi)skokové změny teploty vstupní otopné vody. Nejprve byl na obou okruzích zdrojů zapojených v obtoku nastaven průtok odpovídající jmenovitým podmínkám a veškeré změny teplot pak byly prováděny za tohoto konstantního průtoku. Reakce tělesa na změnu průtoku pak byla zjišťována v jiné konfiguraci měřicí trati, pouze s jedním zdrojem tepla, kdy změny průtoku probíhaly naopak při konstantní teplotě vstupní otopné vody. Dále pak byly zaznamenávány teploty na vstupu a výstupu z otopného tělesa, mj. i za účelem vyhodnocení ustálení daného stavu [26]. V praxi není sice běžné, že teplota vody vstupující do tělesa je měněna skokově, ale v laboratorních podmínkách je to způsob, jak zajistit změnu podmínek, kterou lze následně matematicky popsat a vyhodnotit.

Záznamy dynamického chování byly opět snímány termovizní kamerou (model Flir ThermaCam T460) podle popsanych zásad na otevřeném měřicím místě podle DIN 4704-2. Experiment však nebyl prováděn primárně za účelem zjištění absolutních hodnot tepelných výkonů, jak tomu většinou bývá, ale především za účelem zhodnocení rychlosti reakce zvoleného otopného tělesa na změnu parametrů a porovnání tohoto chování v různých fázích teplotního spektra.

Při sestavování modelu bylo pracováno s myšlenkou, že spojitá soustava, resp. její dynamické účinky jsou aproximovány diskrétním modelem s obecným přenosem $G(z)$ a s určitou zvolenou časovou periodou vzorkování. Stochastický proces $y_F(k)$ vznikající průchodem vstupního signálu diskrétním filtrem lze popsat stochastickou diferenční rovnicí:

$$y_F(k) + d_1 \cdot y_F(k-1) + \dots + d_n \cdot y_F(k-n) = c_0 \cdot v(k) + c_1 \cdot v(k-1) + \dots + c_m \cdot v(k-m) \quad (9)$$

Rovnici (9) je možné upravit do žádaného tvaru pro analýzu stochastických dynamických systémů, viz (10). Pro tuto disertační práci byl vybrán matematický model, označovaný jako AR – **AutoRegressive**, kterým lze popsat obecně náhodný autoregresní proces n -tého řádu.

$$y_F(k) + d_1 \cdot y_F(k-1) + \dots + d_n \cdot y_F(k-n) = c_0 \cdot v(k) \quad (10)$$

Diskrétní výstupní hodnoty $y_F(k)$ závisí vždy na okamžité hodnotě vstupu $v(k)$ a na minulých hodnotách výstupu $y_F(k-1)$ až $y_F(k-n)$, které jsou váženy příslušnými koeficienty – odtud vyplývá název modelu – autoregresní. Důležitým poznatkem pro popis dynamického systému je fakt, že odezva takového identifikovaného systému $y(k)$ obsahuje jak složku deterministickou, tak složku stochastickou a pro obě tyto složky je nutné dále nalézt jejich matematické vyjádření. Celý postup viz [27].

Pro získání finálního modelu označovaného jako ARX – **AutoRegressive with eXogenous variable**, který byl implementován do prostředí MATLAB se zvolí přenos $G_F(z-1) = 1$. Následně pak diferenční rovnice obecného ARX modelu s rozepsanými polynomy nabývá tvaru:

$$y(k) = -a_1 \cdot y(k-1) - \dots - a_n \cdot y(k-n) + b_0 \cdot u(k-1) + \dots + b_m \cdot u(k-m) + v(k) \quad (11)$$

Vlastní reálný model využil právě obecné rovnice (11) diskrétního dynamického systému a pro ARX model otopného tělesa byla zapsána v následujícím tvaru diferenční rovnice s polynomem prvního řádu [26]. Jako vstupní veličina byla zvolena (a na měřící trati viz *Obr. 5* byla měřena) teplota vstupní otopné vody t_{w1} a výstupem z modelu je již zmiňovaná střední povrchová teplota otopného tělesa, která vynikajícím způsobem reprezentuje dynamiku otopných těles a ze které lze uvedeným postupem stanovit výkon.

$$t_p(\tau+1) = a \cdot t_p(\tau) + b \cdot t_{w1}(\tau) \quad (12)$$

Byla zvolena vzorkovací perioda 10 s. Polynom vyššího řádu sice poskytuje vyšší přesnost výsledků, nicméně polynom prvního řádu byl využit z důvodu nejjednoduššího možného vyjádření jeho tzv. Z-transformace a následného zápisu do MATLABu. Zároveň výsledky tohoto modelu s uspokojivou přesností simulují změřený průběh dynamiky otopného tělesa, viz následující kapitola s výsledky. Metoda identifikace ARX modelem obecně tedy spočívá v metodě nejmenších čtverců. V zásadě se jedná o minimalizaci součtu kvadratických odchylek odhadovaného vektoru parametrů (reálně množiny hodnot střední povrchové teploty $t_p(\tau)$) od reálně změřených hodnot [26]. Ovšem ani při znalosti všech parametrů (hodnoty vstupů $u(k)$ a měřené minulé hodnoty výstupů $y(k-i)$) není pro takové modely možné stanovit výstupy $y(k)$. Tyto výstupy pak musí být odhadem speciálních matematických modelů tzv. prediktorů, které obsahují množinu měřených vstupů a výstupů. Kompletní zápis a výsledné tvary odvozených rovnic, stejně jako obecný zápis matice naměřených dat, výsledný hledaný vektor parametrů \hat{p} a případně další struktury vektorů a vlastnosti odhadů jsou uvedeny v disertační práci případně v [27]. Celá struktura zápisu modelu v prostředí MATLAB je vzhledem ke své délce ponechána rovněž pouze v textu disertační práce.

5. VÝSLEDKY A JEJICH OVĚŘENÍ

5.1 Základní experiment a vyhodnocení náběhu a chladnutí

Níže jsou uvedeny charakteristické křivky náběhu (resp. chladnutí) pro předmětné deskové otopné těleso typu 10 – 500 x 1000 s připojením jednostranným shora dolů, které slouží k tvorbě i následné validaci modelů. Podle popsaného postupu byly pomocí termovizní kamery v případě náběhu určeny dynamické veličiny, tj. setrvačnost náběhu (resp. chladnutí) T_{n63} a T_{n90} , doba dopravního zpoždění T_d , doba průtahu T_u , doba náběhu T_n a časová konstanta τ_0 . Pro chladnutí je z principu třeba vyhodnotit jen některé z těchto veličin. Doba dopravního zpoždění je v těchto výsledcích uvažována jako nulová, čili samotný přechodový děj začíná v čase $\tau=0$. Na svislé ose je pak uveden bezrozměrný korigovaný poměrný výkon otopného tělesa, pro možnost porovnání. Korekce poměrného výkonu je provedena v tom smyslu, že se přechodová charakteristika vždy nachází v intervalu hodnot 0 až 1 s tím, že počáteční 0 odpovídá teplotě vzduchu v okolí otopného tělesa 20 °C

a hodnota 1 je dána vstupní jmenovitou teplotou otopné vody 75 °C. Tepelný výkon otopného tělesa je vždy přepočítán ze skutečné teploty vzduchu na otevřeném měřicím místě na 20 °C.

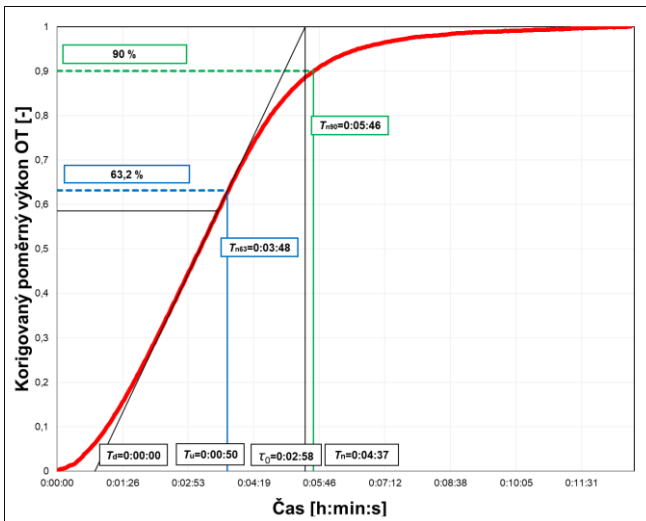
Dále jsou uvedeny dynamické parametry vyčíslené z výše uvedených přechodových charakteristik náběhu – setrvačnost náběhu $T_{n63} = 228$ s a $T_{n90} = 346$ s, doba dopravního zpoždění $T_d = 0$ s; doba průtahu $T_u = 50$ s; doba náběhu $T_n = 277$ s a časová konstanta $\tau_0 = 178$ s. Pro chladnutí pak za uvedeného předpokladu platí, že $T_{ch63} = \tau_0 = 1260$ s a $T_{n90} = 3220$ s, doba dopravního zpoždění $T_d = T_u = 0$ s.

Zároveň bylo z vyhodnocené přechodové křivky určeno, že náběh deskových otopných těles je křivkou až 5. řádu. Rovnice polynomu pro popis křivky náběhu na Obr. 6 je následující:

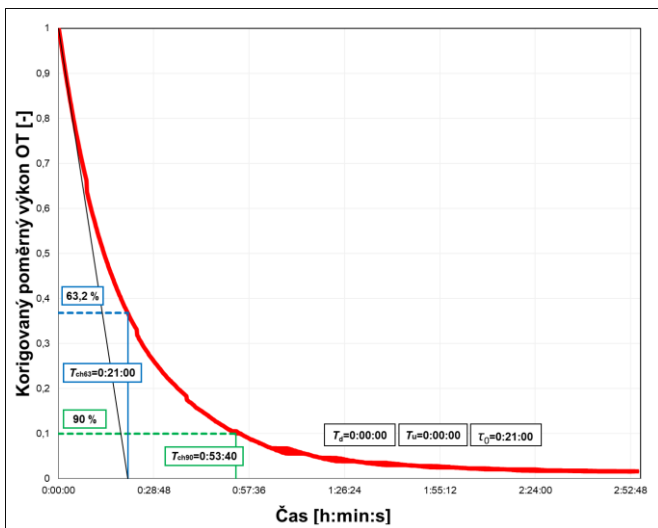
$$y = -3 \cdot 10^{11} x^5 + 8 \cdot 10^9 x^4 - 7 \cdot 10^7 x^3 + 2,36 \cdot 10^5 x^2 - 23,336 x \quad (13)$$

Pro popis dynamických systémů však není nutné pracovat s křivkou takto vysokého řádu. Pro posouzení zákonitostí dynamického chování je naprosto dostatečné pracovat s křivkou prvního nebo nejvýše druhého řádu, viz kapitoly 4.4 a 4.5.

S využitím termografické techniky byly pro porovnání zaznamenány i jiné druhy a typy otopných těles – mimo deskových ještě článková a trubkové těleso a to se dvěma způsoby jmenovitého připojení. Pro grafické znázornění byl vybrán pouze průběh přechodové charakteristiky náběhu a chladnutí řešeného deskového otopného tělesa Korado typ 10 – 500 x 1000. Výsledky pro jiná otopná tělesa a jejich grafické znázornění lze případně nalézt v [30].



Obr. 6 Křivka náběhu deskového otopného tělesa 10 – 500 x 1000 mm zapojení jednostranně shora dolů [28]



Obr. 7 Křivka chladnutí deskového otopného tělesa 10 – 500 x 1000 mm zapojení jednostranně shora dolů [29]

Tab. 1 Korigované hodnoty setrvačností náběhu a chladnutí ot. těles [31]

Otopné těleso	Připojení (shora dolů)	Setrvačnost náběhu [min]		Setrvačnost chladnutí [min]	
		T_{n63}	T_{n90}	T_{ch63}	T_{ch90}
Desková					
KL 10 – 500 x 500	jednostranné	4,3	6,4	18	46
	oboustranné	4,3	6,8	18,5	47,2
KL 10 – 500 x 1000	jednostranné	3,8	5,8	21	53,7
	oboustranné	3,9	6,0	21,5	55
KL 10 – 500 x 2000	jednostranné	3,7	5,7	22,4	57,2
	oboustranné	3,6	5,4	21,5	53,9
Článeková					
Kalor 10 / 500 / 70	jednostranné	7,9	11,7	43,5	102,7
	oboustranné	8,3	12,3	40	93,7
Kalor 10 / 500 / 220	jednostranné	7,8	12,3	45,3	109
	oboustranné	8,1	12,3	43,9	106,4
Trubkové					
KLC 1200x600	oboustranné	8,6	18,1	28,5	60,3

V Tab. 1 je uvedeno porovnání setrvačností náběhu i chladnutí všech sledovaných těles. Pro desková otopná tělesa paradoxně podle zjištění platí,

že jejich setrvačnost náběhu je tím nižší, čím je těleso delší. Voda po vstupu do otopného tělesa je totiž rychle rozváděna horní rozvodnou komorou po celé délce tělesa. Nejnižší hodnotu setrvačnosti náběhu vykazuje tedy otopné těleso typu 10 – 500 x 2000 a to při oboustranném napojení. Pro kratší desková otopná tělesa je naopak výhodnější připojení jednostranné. Lze tedy konstatovat, že běžné doporučení, které platí pro připojení jednotlivých otopných těles k soustavě za účelem dosažení maximálního tepelného výkonu [1], je shodné s tím, jak připojovat tělesa pro co nejefektivnější provoz z hlediska dynamiky. Z hlediska chladnutí se pak jednoznačně projevuje tepelná kapacita otopného tělesa jako celku (materiál + náplň). Obecně je proces chladnutí u deskových těles přibližně pětinasobně delší (pro hodnotu T_{63}) než náběh. Rozbor dynamiky dalších typů a druhů těles z *Tab. 1* je ponechám pouze v plném textu disertační práce.

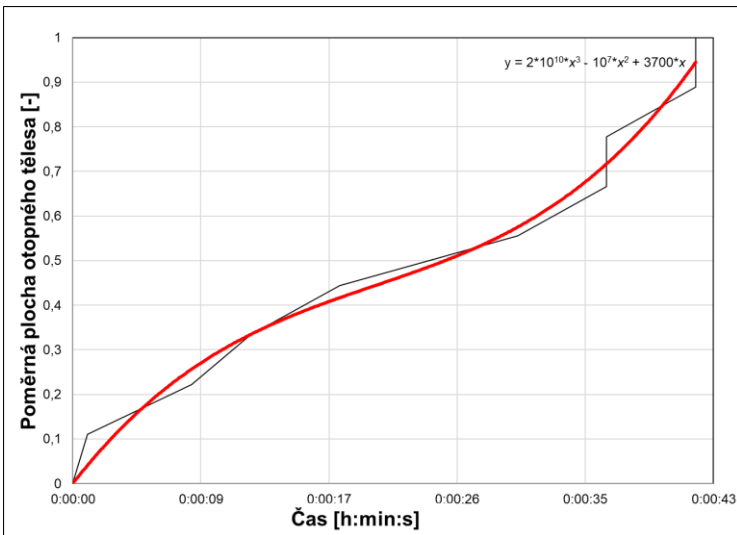
5.2 Komplexní model dynamického chování s aproximací podle Strejce

Model popsáný v kapitole 4.6.1 implementuje rovněž výsledky zkoumání trendu vývoje aktivní teplosměnné plochy otopného tělesa. Na základě kritické literární rešerše byl zvolen postup, kdy byla čelní průmětná deska otopného tělesa rozdělena na 9 shodných částí, kterými postupně protéká otopná voda (nastaven průtok odpovídající jmenovitému tepelnému výkonu při teplotách vody vstup/výstup = 75/65 °C a sektory jsou značeny čísly s tím, že 1 je sektor u vstupu do horní rozvodné komory až číslo 3 ve směru délky tělesa (analogicky v prostřední a spodní úrovni tělesa). Každá z devíti částí je pak z hlediska dynamiky řešena zvlášť [28], [32]. Jednotlivé sektory, a také celá čelní plocha, byly vyhodnoceny pomocí metodiky uvedené v 4.3 a všechny údaje jsou uvedeny v *Tab. 2*. Podle zaznamenané doby dopravního zpoždění v jednotlivých sektorech lze určit vývoj aktivní plochy tak, že jakmile dojde ke zvýšení střední povrchové teploty daného sektoru o 0,1 K (teplotní citlivost použité termografické kamery Flir ThermaCam T460 je méně než $\pm 0,03$ K), je celý sektor označen jako teplo sdílející aktivní plocha. Grafický vývoj je zřejmý z *Obr. 8*. Proložení vhodnou křivkou (zde polynom 3. řádu, viz rovnice uvnitř grafu) lze konstatovat, že za uvedeného předpokladu těleso sdílí teplo celou svou otopnou plochou po přibližně 40 s od prvotního vstupu teplé vody. U všech sledovaných parametrů je zcela jednoznačné, že jsou závislé především na výšce otopného tělesa a ve směru jeho délky se nemění s takovou intenzitou. Totéž platí i pro dobu dopravního zpoždění, kdy ve směru délky otopného tělesa se mění jen úměrně k hodnotám ze sektorů zahrnujících rozvodnou komoru (sektory 1 až 3). Bylo potvrzeno, že dělení plochy tělesa na 9 sektorů je dostatečné. Bylo zkoumáno i dělení na 18 sektorů, avšak praktický význam pro výsledné hodnoty byl zanedbatelný.

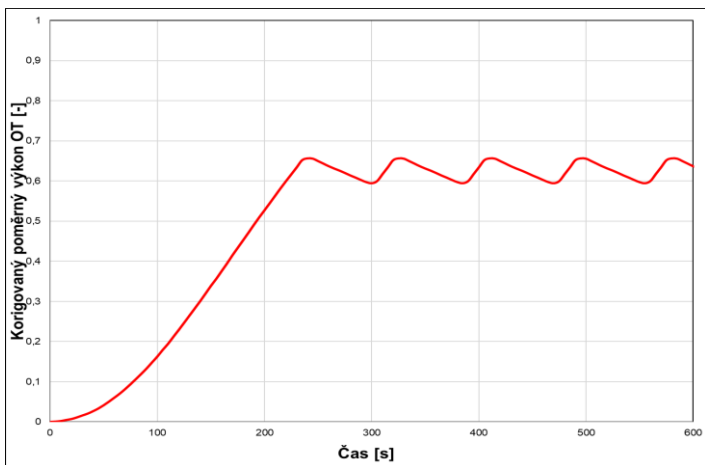
Tab. 2 Dynamické veličiny čelní plochy a sektorů deskového otopného tělesa 10 – 500 x 1000 s jednostranným připojením shora dolů [32], [28], [33]

	Čelní plocha	[h:min:s] Sektor č.								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
T_d	0:00:00	0:00:00	0:00:12	0:00:18	0:00:08	0:00:30	0:00:36	0:00:36	0:00:42	0:00:42
T_u	0:00:50	0:00:19	0:00:20	0:00:19	0:01:45	0:01:22	0:01:05	0:02:37	0:02:29	0:02:15
T_n	0:04:37	0:02:03	0:01:52	0:01:55	0:02:13	0:02:20	0:02:39	0:02:54	0:02:57	0:03:10
T_{n63}	0:03:48	0:01:38	0:01:32	0:01:36	0:03:12	0:02:52	0:02:50	0:04:32	0:04:24	0:04:20
T_{n90}	0:05:46	0:02:44	0:02:42	0:03:10	0:04:30	0:04:10	0:04:22	0:06:18	0:06:08	0:06:12
τ_0	0:02:58	0:01:19	0:01:12	0:01:17	0:01:27	0:01:30	0:01:45	0:01:55	0:01:55	0:02:05

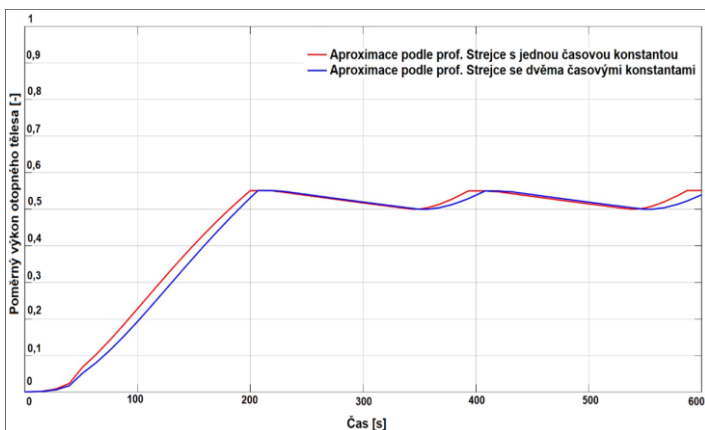
Přesto, že je možné nastavit v modelu jakoukoliv žádanou hodnotu tepelného výkonu otopného tělesa i pásmo proporcionality, je zde uveden průběh dynamického chování deskového otopného tělesa pro 62,6 % potřeby tepelného výkonu (hodnota, která statisticky pokrývá potřebu tepla pro více než 93 % délky otopného období), osazeného regulačním ventilem s termostatickou hlavici, která disponuje pásmem proporcionality 2 K (při volbě teploty vzduchu 20 °C to je 20±1 K). Výsledný průběh z modelu lze porovnat se změřenými daty uspořádanými do předpokládaného průběhu provozního chování P-regulátoru osazeného na deskovém otopném tělese, viz Obr. 9. Model, viz Obr. 10, je schopen generovat charakteristiku střední povrchové teploty, skutečného i poměrného tepelného výkonu.



Obr. 8 Vývoj aktivní teplosměnné plochy pro deskové otopné těleso typ 10 – 500 x 1000 [32], [28], [33].



Obr. 9 Dynamické chování deskového ot. tělesa typ 10 – 500 x 1000 pro žádanou hodnotu výkonu 62,6 % (20 ± 1 K); hodnoty stanovené měřením [34]



Obr. 10 MATLAB Simulink model dynamického chování deskového otopného tělesa typ 10 – 500 x 1000 pro žádanou hodnotu výkonu 62,6 % (20 ± 1 K) [34]

Na Obr. 10 jsou dva simulované dynamické průběhy. Toto je důsledek přístupu popsaného výše, kdy byl pro flexibilitu modelu zaveden dvoukanálový výpočet. Červená křivka je výpočet s jednou časovou konstantou a modrá výpočet s dvojicí časových konstant.

Při porovnání průběhů křivek je zřejmé, že tento, na počátku práce s MATLABem, uvažovaný model na Obr. 10 neodpovídá průběhu na Obr. 9, který je sestavený ze změřených údajů. Grafy se liší v údaji dosažení žádané hodnoty 62,6 % potřeby tepelného výkonu. Poměrný výkon

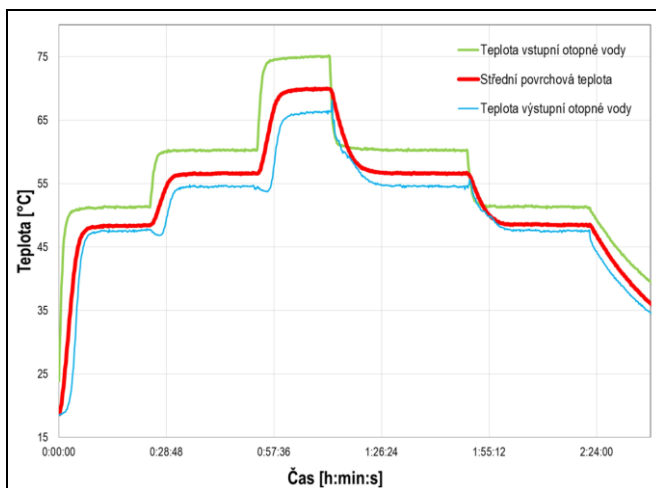
generovaný modelem vykazuje hodnoty nižší přibližně o 5 až 10 %. Částečně je to způsobeno zjednodušující okrajovou podmínkou, kdy je teplota okolí považována za konstantní. Z toho důvodu není možné považovat teplotu vzduchu za regulovanou veličinu a byla tak zvolena střední povrchová teplota tělesa. Pásmo proporcionality se tudíž vztahuje právě ke střední povrchové teplotě a nikoliv k teplotě okolního vzduchu, jako u naměřených dat. Zároveň je zřejmé, že model vykazuje vyšší hodnoty tepelné setrvačnosti než skutečné otopné těleso. Patrné je to zejména ve fázi cyklování tepelného výkonu na základě povelů P-regulátoru. Nedostatkem tohoto modelu je také neschopnost simulovat výkony vyšší než 98 %. Je to dáno zápisem jednotlivých bloků, kdy při požadavku na vyšší výkon končí výpočet chybou. Do budoucna je nutné tuto vadu odstranit. Zároveň fakt, že pro sestavení modelu je využita aproximace podle Strejce znamená, že je nutné vždy zadat jako vstupní hodnotu časový okamžik, kdy nastane právě 72% změna v přechodové funkci mezi původním a novým ustáleným stavem. S touto veličinou však výrobci těles dnes nijak nepracují a pro praktické využívání modelu by to znamenalo vždy provedení experimentu. Toto je v přímém rozporu s cíli této práce, a jelikož se tato podmínka nedá v modelu obejít, není tento model zcela vhodný pro simulaci dynamiky v součinnosti s P-regulátorem a nebyl dále rozpracován. Při hodnocení funkce tohoto modelu bylo uvažováno, jak vyřešit jednotlivé omezující a okrajové podmínky, které se postupně vyskytovaly. Na základě dosavadních poznatků bylo rozhodnuto o simulačním přístupu s využitím tzv. black-box modelu.

5.3 Diskrétní stochastický ARX black-box model

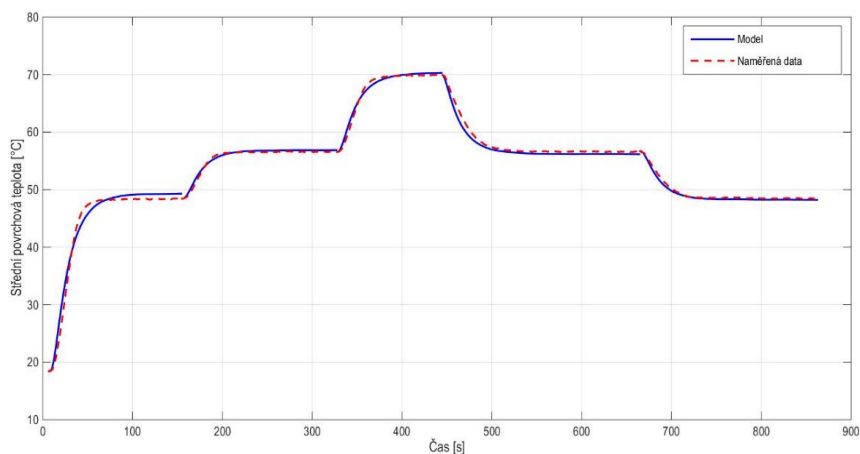
Jedná se o finální model disertační práce. Na uvedené trati, viz kapitola 4.6.2, byla nejprve při konstantním průtoku postupně měněna teplota vstupní otopné vody z teploty okolí na 50, dále na 60 a nakonec na jmenovitých 75 °C. V rámci experimentu bylo sledováno i chladnutí, které však nebylo primárním účelem zkoumání a záznam chladnutí byl ukončen dříve, než došlo k plnému ustálení na teplotu okolí. Záznam chování deskového otopného tělesa je uveden na *Obr. 11*. Je zde patrný nejen průběh střední povrchové teploty celého otopného tělesa, ale i teploty vody na vstupu a výstupu z tělesa. Je zřejmé, že změny vstupní teploty se skutečně podařilo realizovat téměř skokově. Na rozdíl od teploty výstupní, kde došlo vlivem ruční manipulace s regulačními prvky měřící trati ke krátkodobému poklesu. Tento pokles však nemá zásadní vliv na střední povrchovou teplotu tělesa. Za jednotlivými teplotními skoky si lze reálně představit postupnou kvalitativní regulaci tepelného výkonu otopného tělesa při jeho provozu.

Jednotlivá měření přinesla potřebné poznatky pro vytvoření finálního black-box modelu, resp. sestavení výsledné rovnice (12). Tato udává výpočet střední povrchové teploty otopného tělesa na základě předcházející vypočítané hodnoty střední povrchové teploty a aktuální teploty vstupní otopné vody. Dále bylo nutné zmapovat stavy tělesa i pro různé průtoky teplotonosné látky. Na dané měřící trati tak byly zaznamenány tzv. statické

převodní charakteristiky, které hodnotí vliv parametrů hmotnostního průtoku, resp. teploty vstupní otopné vody na ustálenou hodnotu střední povrchové teploty otopného tělesa. Tyto závislosti a celý rozbor vlivu parametrů byly ponechány pouze v textu disertační práce.



Obr. 11 Dynamické chování deskového otopného tělesa typ 10 – 500 x 1000 s jednostranným připojením shora dolů [26]



Obr. 12 Porovnání výsledků ARX black-box modelu a experimentálních dat pro provozní dynamické chování deskového otopného tělesa typ 10 – 500 x 1000 [26], [32]

Na Obr. 12 je uvedeno porovnání matematické simulace průběhu střední povrchové teploty a reálného změřeného průběhu uvedeného i na Obr. 11.

Pro nalezení simulovaného průběhu střední povrchové teploty je v tomto případě využit model prvního řádu. V modelu je zavedeno 5 period s různými teplotami vstupní otopné vody (jejich počet lze ovšem libovolně upravit). Maximální odchylky vznikají vždy ve fázi náběhu a to v periodě, kde je největší rozdíl mezi ustálenými stavy, resp. s největší skokovou změnou teploty vstupní otopné vody. V tomto případě je tak maximální odchylka v prvotním náběhu z teploty okolí na úroveň danou teplotou vstupní otopné vody 50 °C.

Maximální rozdíl teploty je 3,07 K v okolí inflexního bodu v čase 21 s, nicméně v této části křivky není takovýto rozdíl významný, protože zároveň časový rozdíl mezi oběma křivkami je minimální (do 3 s). Nejvýznamnější rozdíly z hlediska dynamiky jsou těsně před prvním ustálením, kde maximální rozdíl teplot mezi skutečností a modelem je 2,02 K (v čase 45 s) tzn., že údaj modelu je o přibližně 4,5 % nižší. Zároveň rozdíl časových údajů je v této části největší a to až 6 s (pro hodnotu přibližně 45 °C). Důležitý je i rozdíl teplot v oblasti ustálení, zde maximálně 0,97 K (v čase 119 s). Model tak vykazuje přibližně o 2 % vyšší hodnotu střední povrchové teploty. Lze tedy konstatovat, že údaje generované modelem se z hlediska střední povrchové teploty udržují v maximálním intervalu $\pm 4,5$ % od experimentálně zjištěných hodnot.

Pro zpřesnění matematického modelu je možné využít i aproximaci druhého (či vyššího řádu). Maximální rozdíl teploty v celém spektru je v případě polynomu druhého řádu 1,89 K (opět v okolí prvního inflexního bodu náběhových křivek) a rovněž s naprosto zanedbatelným časovým rozdílem (0,4 s). Maximální rozdíl teplot, mezi skutečností a modelem, významný pro dynamiku je téměř ve shodné poloze jako pro model prvního řádu, tj. těsně před prvním ustálením. Hodnota 1,3 K (v čase 45 s) odpovídá nepřesnosti modelu přibližně 2,8 % (model zde opět vykazuje nižší hodnotu). Rozdíl v čase je v této části křivky rovněž největší, ovšem oproti předchozímu případu jen poloviční, tj. 5 s (pro hodnotu přibližně 46 °C). Rozdíl teplot v oblasti ustálení je maximálně 0,42 K (v čase 119 s). Model tak vykazuje o 0,9 % vyšší hodnotu střední povrchové teploty. V případě modelu druhého řádu lze tedy konstatovat, že údaje jím generované se z hlediska střední povrchové teploty nachází v maximálním intervalu $\pm 2,8$ % od experimentálně zjištěných hodnot.

Z výše uvedeného je zřejmé, že oba modely se v podstatě shodují v oblasti, kde se vyskytuje nejvyšší hodnota odchylky, přičemž velmi obecně lze konstatovat, že model druhého řádu je přibližně dvojnásobně přesnější. Nicméně ARX black-box model vyššího než prvního řádu pro své analytické řešení vyžaduje mnohem složitější matematické vyjádření. A protože maximální interval $\pm 4,5$ % (absolutně ± 2 K) od naměřené hodnoty, kterého dosahuje model prvního řádu, je pro účely nalezení vhodných konstant regulátorů tepelného výkonu zcela dostačující, nejsou matematické modely disponující aproximací polynomem vyššího než prvního řádu potřeba [26].

Byl proveden výpočet nejistoty měření termovizní kamerou, kdy je kamera Flir ThermaCam T460 schopna pracovat s teplotní citlivostí do

$\pm 0,03$ °C. Zároveň pracuje v rozsahu od -20 do $+120$ °C s přesností ± 1 °C nebo ± 1 % z měřené hodnoty. Nejvyšší povrchová teplota, které bylo při experimentech dosaženo je 75 °C. Výsledná hodnota celkové kombinované standardní nejistoty pro měření termovizní kamerou je stanovena na $0,45$ °C. Pro hodnotu naměřenou na povrchu tělesa termovizní kamerou tak platí zápis $75 \pm 0,45$ °C, což odpovídá relativní odchylce od naměřené hodnoty $\pm 0,6$ %.

6. ZÁVĚR

Jelikož jsou ustálené stavy tepelného výkonu otopných těles v literatuře velmi rozsáhle popsány, tak se tato práce věnuje výhradně dějům dynamickým, tj. takovým, které vznikají jako reakce na regulační zásah, či obecně na poruchovou veličinu. Nejvýznamnějšími ději jsou náběh a chladnutí otopných těles. Byly popsány a byl proveden rozbor jednotlivých dynamických veličin v různé oblasti výkonového spektra daného deskového otopného tělesa. Doposud však bylo možné dynamické chování některých otopných ploch spolehlivě vyhodnotit a popsat pouze s využitím měření termovizní technikou. Tato disertační práce však popisuje zcela nový způsob stanovení a především zobrazení nestacionárního chování otopných těles s využitím matematického modelování. Je to velmi praktický výstup, protože uvedený ARX black-box model je nástroj poskytující možnost zjišťovat a hodnotit dynamiku velice rychle, a to bez nutnosti provádění finančně náročných experimentů. Takto dostupná data mohou být dále základem pro návrh a optimalizaci funkce regulátorů tepelného výkonu, ale také podkladem pro jejich optimální součinnost s konkrétním druhem otopného tělesa. Je to důležité především v dnešní době, kdy se čím dál tím více rozšiřuje použití elektronických programovatelných hlavic (PI regulátory), či pohonů na regulačních ventilech a s nimi komunikujících P nebo PI prostorových regulátorů.

6.1 Porovnání výsledků s uvedenými cíli

a) Zjištění reálné a věrohodné přechodové charakteristiky náběhu a chladnutí deskových otopných těles

Pro splnění tohoto zásadního cíle byla využita termovizní technika. Experimentem byla získána data pro pozdější validaci všech modelů. Díky popsané metodice experimentu (včetně předpokladů a omezení) byl tento cíl jednoznačně splněn tím, že byly nalezeny a zaznamenány reálné přechodové charakteristiky jak pro náběh, tak pro chladnutí deskových otopných těles. Graficky jsou však znázorněny charakteristické křivky náběhu a chladnutí pouze pro deskové otopné těleso typu $10 - 500 \times 1000$ (viz *Obr. 6* a *Obr. 7*). Toto těleso bylo zvoleno jako reprezentativní. Nad rámec splnění tohoto cíle byly zaznamenány i přechodové charakteristiky jiných druhů či typů otopných těles (mimo ocelových deskových, dále i článkových litinových a ocelového trubkového), přičemž zásadní parametry byly sestaveny do *Tab. 1*.

Bylo určeno, že přechodová charakteristika popisující náběh deskových

otopných těles může být křivkou až 5. řádu, viz rovnice polynomu pro popis křivky náběhu na Obr. 6. Pro popis dynamických systémů však není nutné pracovat s křivkou s takto vysokým řádem. Pro posouzení zákonitosti dynamického chování je naprosto dostatečné pracovat s křivkou druhého řádu, například viz aproximace podle Strejce uvedená v kapitole 4.5, či dokonce s křivkou 1. řádu s dopravním zpožděním. Křivku chladnutí pak lze, nejen pro účely této disertační práce, považovat zcela jednoznačně za křivku prvního řádu.

b) Určení a vyčíslení dynamických parametrů z přechodové charakteristiky otopných těles, vhodných pro nastavování regulace a simulaci tepelného výkonu otopných těles

Tohoto cíle bylo dosaženo určením parametrů vzešlých z aproximace skutečné přechodové křivky charakteristikou prvního řádu. Byly určeny všechny dynamické parametry pro popis dynamiky: doba dopravního zpoždění T_d , doba průtahu T_u , doba náběhu T_n , doba přechodu T_p , časová konstanta τ , setrvačnost náběhu T_{n63} a setrvačnost náběhu T_{n90} . Uvedený cíl byl splněn tím, že jednotlivé parametry byly v kapitole 5.1 přesně vyčísleny. Porovnání hodnot setrvačnosti náběhu a chladnutí všech analyzovaných otopných těles je uvedeno v Tab. 1. Byly tak nalezeny a vyčísleny hodnoty pro nastavování spojitých regulátorů tepelného výkonu různých druhů a typů otopných těles. Vlastní disertační práce pak popisuje i metodiku pro nastavování regulátorů.

c) Simulace chování deskového otopného tělesa osazeného P-regulátorem

Cíle bylo dosaženo v kapitole 5.2 komplexním modelem s aproximací podle Strejce. Referenční data pro porovnání simulovaných výsledků byla získána složením získaných křivek náběhu a chladnutí okolo žádané hodnoty regulované veličiny v rámci stanoveného pásma proporcionality, viz Obr. 9. Je zde využito teorie dvoupolohové regulace soustavy prvního řádu bez dopravního zpoždění. Sledovány byly provozní stavy, kdy je potřeba 100% výkon tělesa, dále 62,6 % a poslední sledovanou hodnotou byl 10% výkon otopného tělesa. Byla zvolena celkem tři pásma proporcionality v okolí žádané teploty vzduchu 20 °C, tj. 20±0,5 K; 20±1 K; 20±1,5 K. Tyto teplotní intervaly byly převedeny na intervaly výkonové (tak, aby korelovaly s vyhodnocenými průběhy křivek), resp. byly stanoveny dolní a horní spínací hodnoty pro odpovídající žádané hodnoty tepelného výkonu otopného tělesa [31]. S využitím procesoru MS Excel byly podle zvoleného pásma proporcionality nalezeny rozhodné části křivek náběhu a chladnutí, kde byly vyčísleny doby vypnutí (T_a) a zapnutí (T_e). Právě tyto hodnoty, resp. jejich poměr, byl využit jako porovnávací kritérium požadavků na tepelný výkon otopného tělesa a chování regulátoru v různých fázích výkonového spektra, viz Tab. 3. Příkladem splnění cíle je simulace dynamiky deskového otopného tělesa pro 62,6 % výkonu a pro pásmo proporcionality 20±1 K na Obr. 10.

Tab. 3 Hodnoty doby zapnutí a vypnutí regulátoru ve spojení s deskovým ot. tělesem typ 10 – 500 x 1000 s jednostranným připojením shora dolů [31]

Potřeba výkonu	Pásmo proporcionality	Doba zapnutí	Doba vypnutí	Poměr
		T_e [min]	T_a [min]	T_a/T_e [-]
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

d), e) Omezení nutnosti provádění experimentů pro vyhodnocování dynamických parametrů otopných těles a Vytvoření a ověření matematického modelu dynamického chování deskového otopného tělesa (MATLAB)

Poslední dva cíle jsou zde uvedeny společně, neboť spolu pevně souvisí. Lze shrnout, že tím nejpodstatnějším cílem bylo vytvoření a ověření matematického modelu, který umožní generovat dynamiku deskového otopného tělesa ideálně bez využití experimentu. Obou těchto cílů bylo jednoznačně dosaženo díky originálnímu a zcela novému využití autoregresní (ARX) aproximace v prostředí MATLAB pro otopná tělesa. Byl vytvořen stochastický black-box model, jehož kompletní odvození a celá struktura zápisu jsou uvedeny v disertační práci.

Grafický výstup modelu, včetně jeho ověření, potvrzující dosažení stanovených cílů, je uveden v kapitole 5.3 na Obr. 12.

Z provedené rešerše a rozboru získaných dat bylo v této práci potvrzeno, že na tepelnou dynamiku těles nemá teplota výstupní vody ani návrhový teplotní spád soustavy tak zásadní vliv, jako teplota vstupní otopné vody. Rychlost změny tepelného stavu však stále závisí především na vlastní tepelné kapacitě otopného tělesa, ale rovněž i na průtoku otopné vody. V rámci záznamu údajů potřebných pro sestavení modelu chování tělesa tak bylo nutné dále zmapovat i stavy tělesa pro různé průtoky teplotonosné látky. Byly tak zaznamenány tzv. statické převodní charakteristiky, které hodnotí vliv parametrů hmotnostního průtoku, teploty vstupní otopné vody a teplotního spádu na ustálenou hodnotu střední povrchové teploty otopného tělesa. Pro vlastní matematický ARX model byla sestavena originální diferenční rovnice s polynomem prvního řádu. Vstupní veličinou byla zvolena teplota přírodní otopné vody t_{w1} a výstupem z modelu je již zmiňovaná střední povrchová teplota otopného tělesa. Rovnice udává výpočet střední povrchové teploty

otopného tělesa na základě její předcházející vypočtené hodnoty a aktuální teploty vstupní otopné vody. Vzorkovací frekvence výpočtu byla zvolena 10 s.

Na základě vyhodnocení mnoha experimentů (viz např. [30]) je možné konstatovat, že tento model lze pro získání základního přehledu použít nejen pro sledované otopné těleso, ale i pro typově a rozměrově podobná otopná tělesa, resp. lze konstatovat, že dynamika takových těles je analogická. Takovými jsou především tzv. krátká desková otopná tělesa s poměrem $LOT/HOT < 3$. Byl tedy naplněn cíl v tom smyslu, že již není nutné provádět experimenty za účelem získání přehledu o dynamice příslušných typů deskových otopných těles. Pro jiná, než uvedená otopná tělesa je pro použití uvedeného modelu dále třeba na měřicí trati získat příslušné vstupní údaje. Dále je možné využít teplotní exponent otopných těles n , viz další směřování práce.

6.2 Přínos pro praxi

Bylo prokázáno, že pro stanovování dynamiky náběhu otopných těles není měření teploty jen v několika bodech plochy otopného tělesa dostatečně reprezentativní, např. třech bodech, ale je třeba využít metody jiné. Disertační práce podrobně popisuje metodiku stanovování dynamiky termovizní technikou s následným převedením na závislost tepelného výkonu otopného tělesa na čase. Pro chladnutí otopných těles může být naopak měření teploty v několika bodech plochy otopného tělesa dostatečně přesné a dokonce výhodnější než termovizní měření, které vyžaduje nákladnější techniku.

Byla explicitně popsána omezení a předpoklady pro použití termovizního měření. Byla uvedena *Tab. 1*, která potvrzuje praktické poznatky ohledně připojování otopných těles k otopné soustavě. Tyto poznatky byly dále analyzovány a poskytují praktický návod, jakým způsobem je nejvhodnější otopná tělesa zapojovat. Pro praxi je rovněž velmi důležitá možnost zapojování různých druhů a typů otopných ploch do jednoho regulačního celku, a to v závislosti na tepelné setrvačnosti. V práci bylo rovněž prokázáno, že setrvačnost chladnutí deskových otopných těles je průměrně pětinasobná v poměru k náběhu těchto těles. Totéž platí i pro litinová článková otopná tělesa. Článková otopná tělesa však disponují oproti náběhu deskových těles přibližně dvojnásobnou dobou v případě náběhu a 2,5 násobně delší dobou oproti chladnutí. Trubkové otopné těleso se pak chová velmi podobně jako litinová článková otopná tělesa.

Byly popsány reálné dopady nevhodného návrhu regulačních ventilů, vycházející ze simulace dynamického chování otopného tělesa osazeného tímto ventilem a termostatickou hlavicí. Byly jednoznačně určeny a vyčísleny konkrétní parametry pro popis dynamiky sledovaného deskového otopného tělesa. Tím byly zároveň nalezeny a vyčísleny hodnoty pro nastavování regulátorů tepelného výkonu otopných těles.

Podstatným přínosem pro praktické využití je sestavený matematický model, který je k dispozici na Ústavu techniky prostředí FS ČVUT. V současnosti lze modelem generovat dynamiku určitých typů deskových

otopných těles, avšak po doplnění databáze naměřených údajů lze tento model využít téměř neomezeně. Poskytuje uživateli přehled o chování otopného tělesa mezi ustálenými stavy a ze získané charakteristiky pak lze velmi snadno vyhodnotit výše uvedené dynamické parametry pro nastavování regulátorů. Nezanedbatelným praktickým přínosem je i uvedené schéma zapojení měřicího okruhu, na němž lze v případě potřeby zajistit libovolný stav při provozu jakéhokoliv otopného tělesa či obecně výměníku tepla.

6.3 Teoretický přínos

Byl určen řád přechodové charakteristiky pro náběh deskových otopných těles. Bylo prokázáno, že pro popis dynamických systémů není nutné pracovat s křivkou s takto vysokým řádem a je dostačující vycházet z křivky nejvýše druhého řádu.

Podstatným teoretickým přínosem je vůbec první využití aproximace podle Strejce pro nahrazení reálné přechodové charakteristiky. Tato metoda matematické identifikace tak mění dosud zavedený standard pro otopná tělesa, kdy se jejich dynamika hodnotila výhradně s využitím časové konstanty τ_0 . Metoda podle Strejce posouvá tuto hodnotu na 72 % a v závislosti na konkrétním ději, resp. na tom, jak rychle dochází k ustálení po regulačním zásahu, se využívá ještě druhá konstanta. V oblasti dynamiky otopných těles byla tato metoda použita poprvé a na jejím základě byl sestaven komplexní model generující chování otopného tělesa ve spojení s regulátorem tepelného výkonu.

Byla stanovena metodika pro popis vývoje aktivní teplosměnné plochy otopného tělesa na straně vzduchu, která je v rovnicích pro popis dynamiky téměř vždy neznámou. Za další teoretický přínos lze považovat matematickou analýzu sledovaného dynamického děje a dále konkrétní implementaci poznatků do podoby black-box modelu v prostředí MATLAB. Konkrétně byla vůbec poprvé pro otopné těleso využita metoda identifikace ARX (autoregresním) modelem, kdy zásadním přínosem je kompletní odvození modelu a rovněž analýza, jejímž výsledkem je, že do odvozeného modelu střední povrchové teploty otopného tělesa je nejhodnější za vstupní veličinu považovat teplotu vstupní otopné vody.

Přínosem této práce do budoucna je i implementace získaného modelu MATLAB do simulačního prostředí TRNSYS. Toho lze dosáhnout přímým propojením obou softwarů, kdy v TRNSYSu je MATLAB přímo podporován funkcí „Type 155“.

6.4 Návrhy pro další směřování

V práci je popsán přístup, hodnocení dynamiky a model pro deskové otopné těleso typu 10 o rozměrech 500 x 1000 mm (tzv. geometrický modul). Bylo uvedeno, že finální black-box model lze využít i pro získání základního přehledu o dynamice typově, resp. rozměrově podobných otopných těles. Pro přepočítání výkonu otopných těles se využívá jejich teplotní exponent n . Tento je

určen experimentálně v kalorimetrické komoře. Jedná se fakticky o směrnici přímkou pro logaritmickou závislost tepelného výkonu tělesa na teplotním rozdílu mezi střední teplotou vody a teplotou vzduchu v okolí otopného tělesa. Teplotní exponent tak závisí nejen na druhu či typu tělesa, kdy je podstatná především výška daného typu otopného tělesa, ale i na průtoku a teplotách vody. Pro uživatele je však výhodou, že podle ČSN EN 442-2:2015 musí výrobci teplotní exponent uvádět pro každé otopné těleso. Je tak velmi snadno dosažitelným parametrem, který komplexně hodnotí rozdíly v chování různých druhů a typů otopných těles, neboť vyjadřuje změnu součinitele prostupu tepla u otopného tělesa pro různé provozní podmínky. Zobecnění modelu pro další druhy a typy otopných těles, či dokonce otopných ploch, by mohlo efektivně využít právě tohoto snadno dostupného parametru. Teplotní exponent však nedokáže zcela jednoznačně popsat tepelnou setrvačnost a je tak třeba dále pracovat se souborem geometrických charakteristik otopných těles, provést citlivostní analýzu parametrů jiných druhů otopných těles než deskových a pro získání nevhodnější veličiny pro popis dynamiky lze případně vycházet i z fyzikální rozměrové analýzy. K dalšímu vývoji je rovněž ponecháno jiné než jmenovité připojení otopných těles na otopnou soustavu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY V TEZI

- [1] BAŠTA, J. Otopné plochy – Otopná tělesa. Praha: ČVUT, 2016. 206 s., ISBN 978-80-01-05943-2.
- [2] ZIEGLER, J.G., NICHOLS, N.B. Optimum settings for automatic controllers. *Trans. ASME*, 1942. 64. s. 759-769.
- [3] RECKNAGEL, H., SPRENGER, E., ALBERS, K.J. Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. Band 1. Deutscher Industrie-Verlag GmbH: München, 2017. s. 1347. ISBN 978-3-8356-7284-0.
- [4] BAŠTA, J. Regulace v technice prostředí staveb. Praha: ČVUT, 2014. 194 s., ISBN 978-80-01-05455-0.
- [5] LITWA, M. Influence of Angle of View on Temperature Measurements Using Thermovision Camera. In: *IEEE Sensors Journal*, vol. 10, No. 10, 2010. s. 1552-1554.
- [6] VAVŘIČKA, R. Zkušenosti s měřením povrchových teplot bezkontaktními teploměry. *Topenářství, instalace*. 2012, roč. 46, č. 6, s. 24-27. ISSN 1211-0906.
- [7] BAŠTA, J., VAVŘIČKA, R., ŠOUREK, B. Vizualizace teplotních polí deskových otopných těles. *Konference Vytápění Třeboň 2005*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2005. s. 72-78. ISBN 80-02-01724-2.
- [8] ČERMÁK, J., PETERKA, V., ZÁZVORKA, J. Dynamika regulovaných soustav v tepelné energetice a chemii. Praha: Nakladatelství Academia, 1968. 583 s.
- [9] ZÍTEK, P. Matematické a simulační modely. Praha: Nakladatelství ČVUT, 1996. 128 s. ISBN 80-01-01524-6.
- [10] NOSKIEVIČ, P. Modelování a identifikace systémů. Ostrava: Nakladatelství Montanex, 1999. 276 s. ISBN 80-7225-030-2.

- [11] BAŠTA, J., VAVŘIČKA, R. Počítačová simulace deskových otopných těles. In: TZB info [online]. 22. 11. 2004 [cit. 2013-10-05]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2254-pocitacova-simulace-deskovych-otopnych-teles>.
- [12] JANČÍK, L., BAŠTA, J. Posouzení dynamického chování otopných těles termografickou metodou. Brno. 5. *Konference simulace budov a techniky prostředí SBTP'08*, 2008. s. 45-49. ISBN 978-80-254-3373-7.
- [13] JANČÍK, L., BAŠTA, J. Setrvačnost náběhu a chladnutí otopných těles. *Vytápění, větrání, instalace*. 2009, roč. 18, č. 3, s. 154-157. ISSN 1210-1389.
- [14] BREMBILLA, C., SOLEIMANI-MOHSENI M., OLOFSSON T. Transient model of a panel radiator [online]. Hyderabad, India: 14th International Conference of IBPSA, 2015, 2962 s. [cit. 2017-11-26]. ISBN 978-93-5230-118-8. Dostupné z: <http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2015/p2784.pdf>.
- [15] XU, B., FU, L., DI, H. Dynamic simulation of space heating systems with radiators controlled by TRVs in buildings. *Energy and Buildings*, 2008, vol. 40, s. 1755-1764. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.03.004.
- [16] TAHERSIMA, F., STOUSTRUP, J., RASMUSSEN, H., NIELSEN, P.G. Thermal Analysis of an HVAC System with TRV Controlled Hydronic Radiator. 6th annual IEEE *Conference on Automation Science and Engineering*, Toronto, 2010. s. 756-761. ISBN 978-1-4244-5449-5.
- [17] MADSEN, H., HOLST, J. Estimation of continuous-time models for the heat dynamics of a building. *Energy and Buildings*, 1995, vol. 22, s. 67-79.
- [18] BRAUN, J., CHATURVEDI, N. An inverse gray-box model for transient building load prediction. *HVAC and Research*, 2002, vol. 8 (1), s. 73-99.
- [19] WANG, S.W., XU, X.H. Parameter estimation of internal thermal mass of building dynamic models using genetic algorithm. *Energy Conversion and Management*, 2006, vol. 47, s. 1927-1941.
- [20] BEROUNSKÝ, V. ČSVTS. Otopná tělesa v teorii i praxi: Sešit projektanta 05 -16. Praha: SNTL, 1987, 104 s. ISBN 06-058-87.
- [21] BOHÁČ, J., BAŠTA, J. Dynamické chování otopných těles s ohledem na regulační zásah. *Konference Vytápění Třeboň 2013*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2013, s. 120 – 124. ISBN 978-80-02-02431-6.
- [22] BOHÁČ, J., VAVŘIČKA, R. Studie vlastností otopných těles. Online: <http://vytapani.tzb-info.cz/otopne-plochy/15603-studie-vlastnosti-otopnych-teles>. TZB info. 2017, 19(15), ISSN 1801-4399
- [23] STREJC, V. O možnostech vyššího využití teorie regulace v praxi. Práce, Praha, 1958.
- [24] KUBÍK, S., KOTEK, Z., STREJC, V., ŠTECHA, J. Teorie automatického řízení I. SNTL/Alfa, Praha/Bratislava, 1982.
- [25] BOHÁČ, J., BAŠTA, J. Experimentální podklady po dynamický model chování deskového otopného tělesa. Praha: 8. *Konference IBPSA-CZ Simulace budov a techniky prostředí*, 2014. s. 101-106. ISBN 978-80-260-7209-6.

- [26] BOHÁČ, J., BAŠTA, J., VAVŘIČKA, R., ŠULC, J. Modelování provozního chování otopných těles. *Vytápění, větrání instalace*, 2018, roč. 27, č. 2, s. 80 – 83. ISSN 1210-1389. 2-s2.0-85044328795.
- [27] MODRLÁK O. Modelování a diskrétní identifikace: Studijní materiály. Liberec. TU v Liberci, 2004.
- [28] BOHÁČ, J., BAŠTA, J. Dynamika teplotních polí deskových otopných těles. *Vytápění, větrání instalace*, 2016, roč. 25, č. 1, s. 2 – 5. ISSN 1210-1389. 2-s2.0-84957661819.
- [29] BOHÁČ, J., BAŠTA, J. Dynamisches Verhalten von Heizkörpern unter Berücksichtigung des Regelungseingriffs. *Heizung Lüftung/Klima Haustechnik*, 2014, roč. 65, č. 3, s. 18 – 22. ISSN 1436-5103.
- [30] BOHÁČ, J. Diplomová práce: Dynamické chování otopných těles. ČVUT: Praha, 2012. s. 87.
- [31] BOHÁČ, J., BAŠTA, J. Dynamické chování otopných těles s ohledem na regulační zásah. *Vytápění, větrání instalace*, 2013, roč. 22, č. 3, s. 102 – 104. ISSN 1210-1389.
- [32] BOHÁČ, J. Thermography Data of Panel Radiator Dynamic Behaviour for Simulation Model. Praha: *Central Europe towards Sustainable Building - Innovations for Sustainable Future*, 2016, Grada Publishing. s. 1014 – 1021. 2-s2.0-84986903197.
- [33] BOHÁČ, J., BAŠTA, J. Dynamika teplotních polí deskových otopných těles. *Konference Vytápění Třeboň 2015*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2015. s. 72 – 77. ISBN 978-80-02-02589-4.
- [34] BOHÁČ, J., BAŠTA, J. Přístupy pro modelování dynamiky deskového otopného tělesa. *Konference Vytápění Třeboň 2019*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2019. Přijato k publikaci.

PUBLIKACE AUTORA VZTAHUJÍCÍ SE K DISERTAČNÍ PRÁCI

- [A-1] BOHÁČ, J. Semestrální práce: Volná konvekce a sálání. ČVUT: Praha, 2012. 87 s.
- [A-2] BOHÁČ, J., BAŠTA, J. Dynamické chování otopných těles s ohledem na regulační zásah. *Konference Vytápění Třeboň 2013*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2013, s. 120 – 124. ISBN 978-80-02-02431-6.
- [A-3] BOHÁČ, J., VAVŘIČKA, R. Studie vlastností otopných těles. Online: <http://vytapani.tzb-info.cz/otopne-plochy/15603-studie-vlastnosti-otopnych-teles>. TZB info. 2017, 19(15), ISSN 1801-4399.
- [A-4] BOHÁČ, J. Thermography Data of Panel Radiator Dynamic Behaviour for Simulation Model. Praha: *Central Europe towards Sustainable Building - Innovations for Sustainable Future*, 2016, Grada Publishing. s. 1014 – 1021. 2-s2.0-84986903197.
- [A-5] BOHÁČ, J., BAŠTA, J. Dynamika teplotních polí deskových otopných těles. *Vytápění, větrání instalace*, 2016, roč. 25, č. 1, s. 2 – 5. ISSN 1210-1389. 2-s2.0-84957661819.
- [A-6] BOHÁČ, J., BAŠTA, J. Experimentální podklady po dynamický model chování deskového otopného tělesa. Praha: 8. *Konference*

- IBPSA-CZ Simulace budov a techniky prostředí*, 2014. s. 101-106. ISBN 978-80-260-7209-6.
- [A-7] BOHÁČ, J., BAŠTA, J., VAVŘIČKA, R., ŠULC, J. Modelování provozního chování otopných těles. *Vytápění, větrání instalace*, 2018, roč. 27, č. 2, s. 80 – 83. ISSN 1210-1389. 2-s2.0-85044328795.
- [A-8] BOHÁČ, J. Diplomová práce: Dynamické chování otopných těles. ČVUT: Praha, 2012. s. 87.
- [A-9] BOHÁČ, J., BAŠTA, J. Dynamisches Verhalten von Heizkörpern unter Berücksichtigung des Regelungseingriffs. *Heizung Lüftung/Klima Haustechnik*, 2014, roč. 65, č. 3, s. 18 – 22. ISSN 1436-5103.
- [A-10] BOHÁČ, J., BAŠTA, J. Dynamické chování otopných těles s ohledem na regulační zásah. *Vytápění, větrání instalace*, 2013, roč. 22, č. 3, s. 102 – 104. ISSN 1210-1389.
- [A-11] BOHÁČ, J., BAŠTA, J. Dynamika teplotních polí deskových otopných těles. *Konference Vytápění Třeboň 2015*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2015. s. 72 – 77. ISBN 978-80-02-02589-4.
- [A-12] BOHÁČ, J., BAŠTA, J. Přístupy pro modelování dynamiky deskového otopného tělesa. *Konference Vytápění Třeboň 2019*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2019. Přijato k publikaci.

JINÉ PUBLIKACE AUTORA NEVZTAHUJÍCÍ SE K DISERTAČNÍ PRÁCI

- [B-1] BOHÁČ, J., BAŠTA, J. Dynamické chování otopných těles s ohledem na regulační zásah. Online: <https://vytapani.tzb-info.cz/otopne-plochy/10368-dynamicke-chovani-otopnych-teles-s-ohledem-na-regulacni-zasah>. TZB info. 2013, 15(39), ISSN 1801-4399.
- [B-2] BOHÁČ, J., BAŠTA, J. Dynamické chování otopných těles a regulační zásah. *Automa*, 2013, roč. 19, č. 7, s. 44 – 46. ISSN 1210-9592.
- [B-3] BOHÁČ, J. Dynamic behaviour of the panel radiator. In. *Studentská tvůrčí činnost Conference 2015*. Praha: FS ČVUT, 2015, s. 72 – 77. ISBN 978-80-01-05727-8.
- [B-4] ZMRHAL, V., VAVŘIČKA, R., BOHÁČ, J. Vývoj indukční jednotky. Výzkumná zpráva, 2016, ČVUT v Praze. 830-8301566B001.
- [B-5] VAVŘIČKA, R., BOHÁČ, J. Survey of operating characteristics of convectors. Výzkumná zpráva, 2016, MINIB a.s., Praha 6 – Veveřslavín. 830-8301627B001.
- [B-6] BOHÁČ, J., BAŠTA, J., ŠULC, J. Modelování provozního chování otopných těles. *Konference Vytápění Třeboň 2017*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2017, s. 175 – 181. ISBN 978-80-02-02717-6.

