

Ing. Jindřich Boháč
Školitel: prof. Ing. Jiří Bašta, Ph.D.
Obor studia: Technika prostředí

Jindrich.Bohac@fs.cvut.cz

MOTIVACE A CÍLE PRÁCE

Tato práce se zabývá nestacionárními reakcemi otopných těles na regulační zásah, kterými jsou mj. náběh tepelného výkonu a také jejich chladnutí. Dosud však bylo možné dynamiku otopných těles vyhodnotit a popsat pouze časově, a především finančně, náročným měřením termovizní technikou. Rovněž neexistuje jednotná spolehlivá metodika vyhodnocování dynamiky různých druhů otopných těles. Obecným cílem bylo 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 měření v akreditovaných laboratořích. Veškeré experimenty a simulace v MATLABu byly prováděny s deskovým otopným tělesem typu 10 – 500 x 1000. Práce si neklade za cíl rozbor různých způsobů regulace, ale pouze uvádí jednotlivé možnosti a účelem je například výrobcům regulačních prvků poskytnout efektivní nástroj pro optimalizaci a nastavování stávajících způsobů regulace pro nejrozšířenější způsob vytápění, tj. pomocí deskových otopných těles. Jednotlivé cíle byly 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)

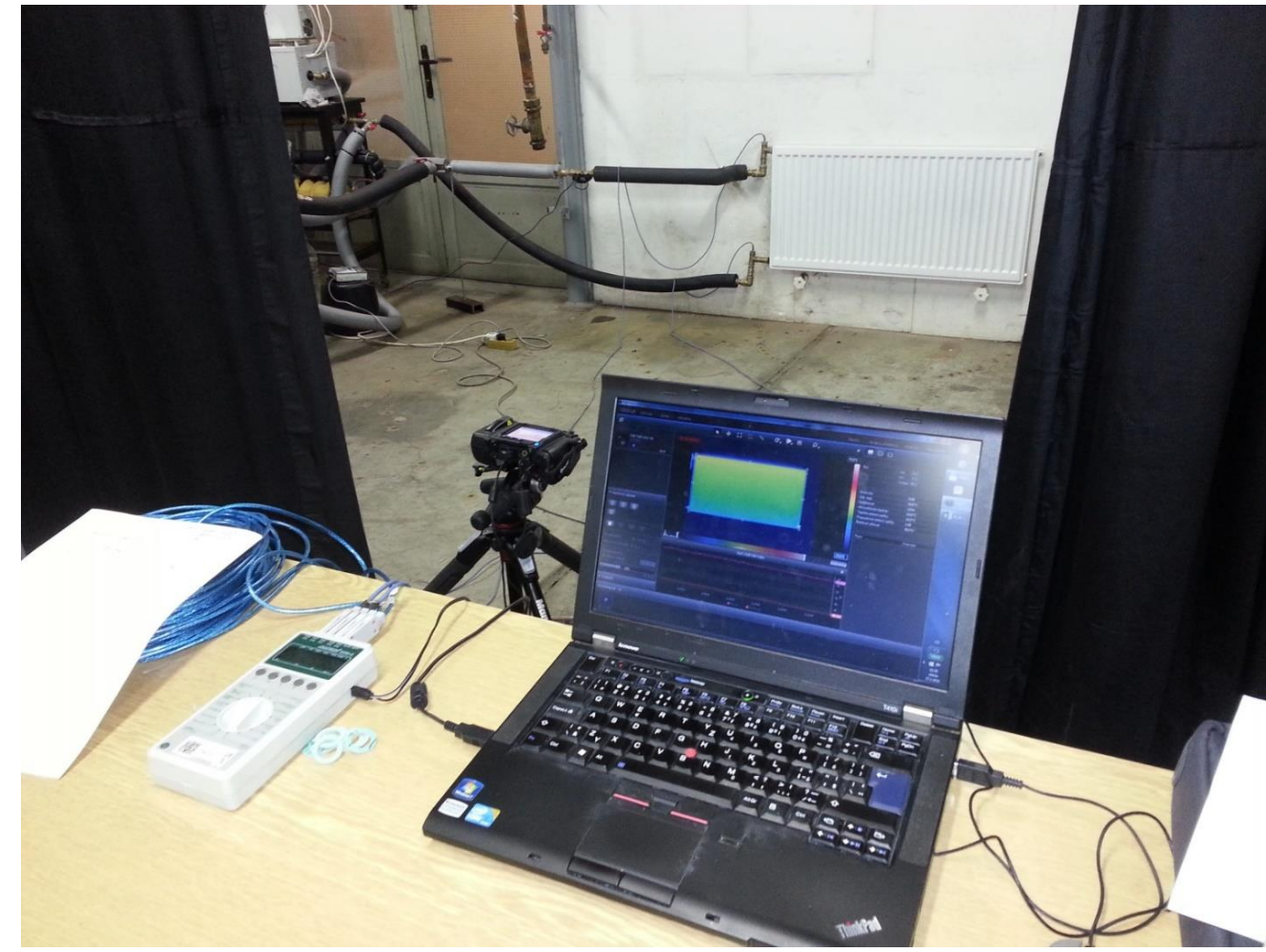
METODY ŘEŠENÍ

Záznam dynamického chování byl nejprve zjišťován konvenčním způsobem, kdy bylo otopné těleso sledováno termovizní kamerou, jednak pro získání validačních dat pro pozdější ověření přesnosti modelu, ale také pro získání vstupních údajů pro tvorbu samotných modelů. Kamerou byla snímána střední povrchová teplota celé průměrné plochy otopného tělesa. Dále byla tato teplota převedena na závislost bezrozměrného tepelného výkonu otopného tělesa na čase pomocí následující rovnice:

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

Vyhodnocení a vyčíslení vlastních dynamických parametrů probíhalo metodou inflexní tečny, přičemž takto lze snadno aproximovat nekmitavé systémů vyšších řádů s tím, že jsou převedeny na systém 1. řádu s dopravním zpožděním. V práci byla dále využita aproximace podle Strejce, kdy se využívá proporcionální soustavy 2. řádu se dvěma časovými konstantami. Tohoto přístupu bylo v oblasti dynamiky otopných těles využito poprvé. Obecný tvar přenosu soustavy je dán následující rovnicí:

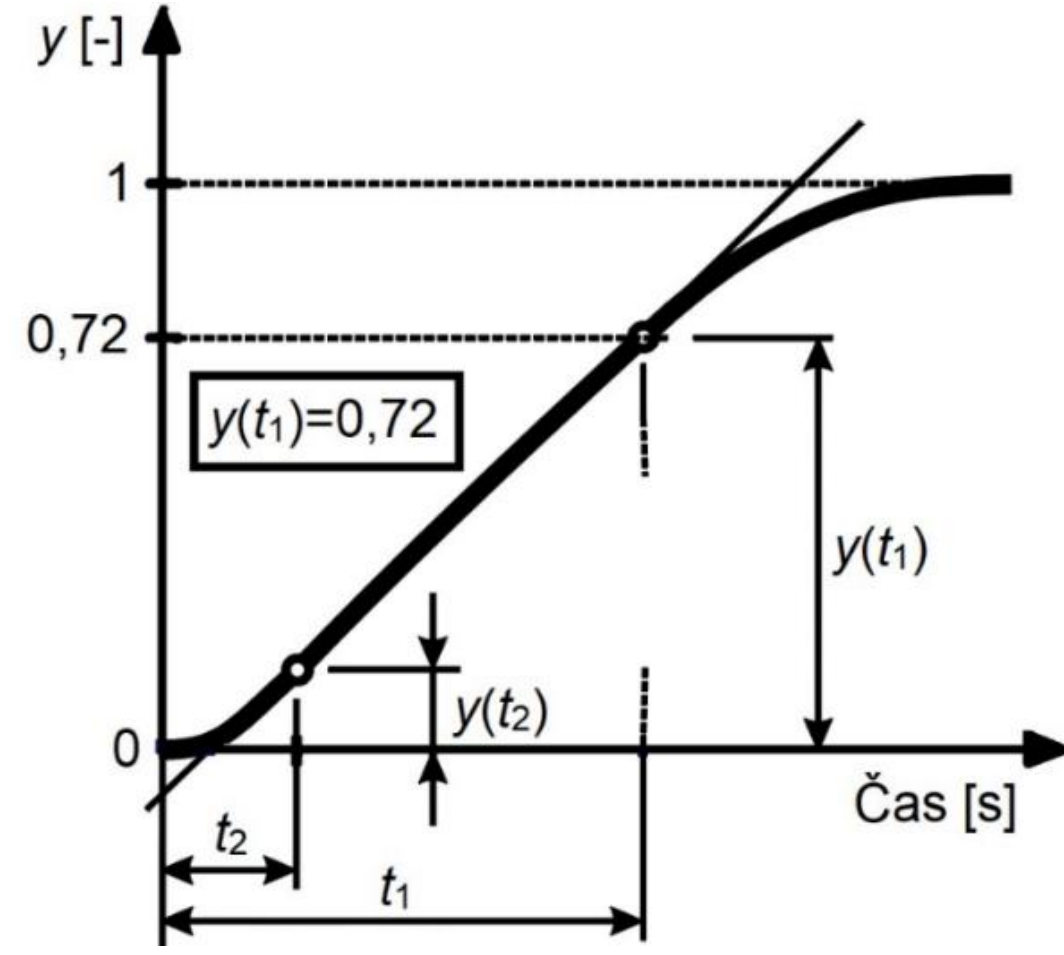
$$G(s) = \frac{K}{(\tau_{0,1}s + 1) \cdot (\tau_{0,2}s + 1)}$$



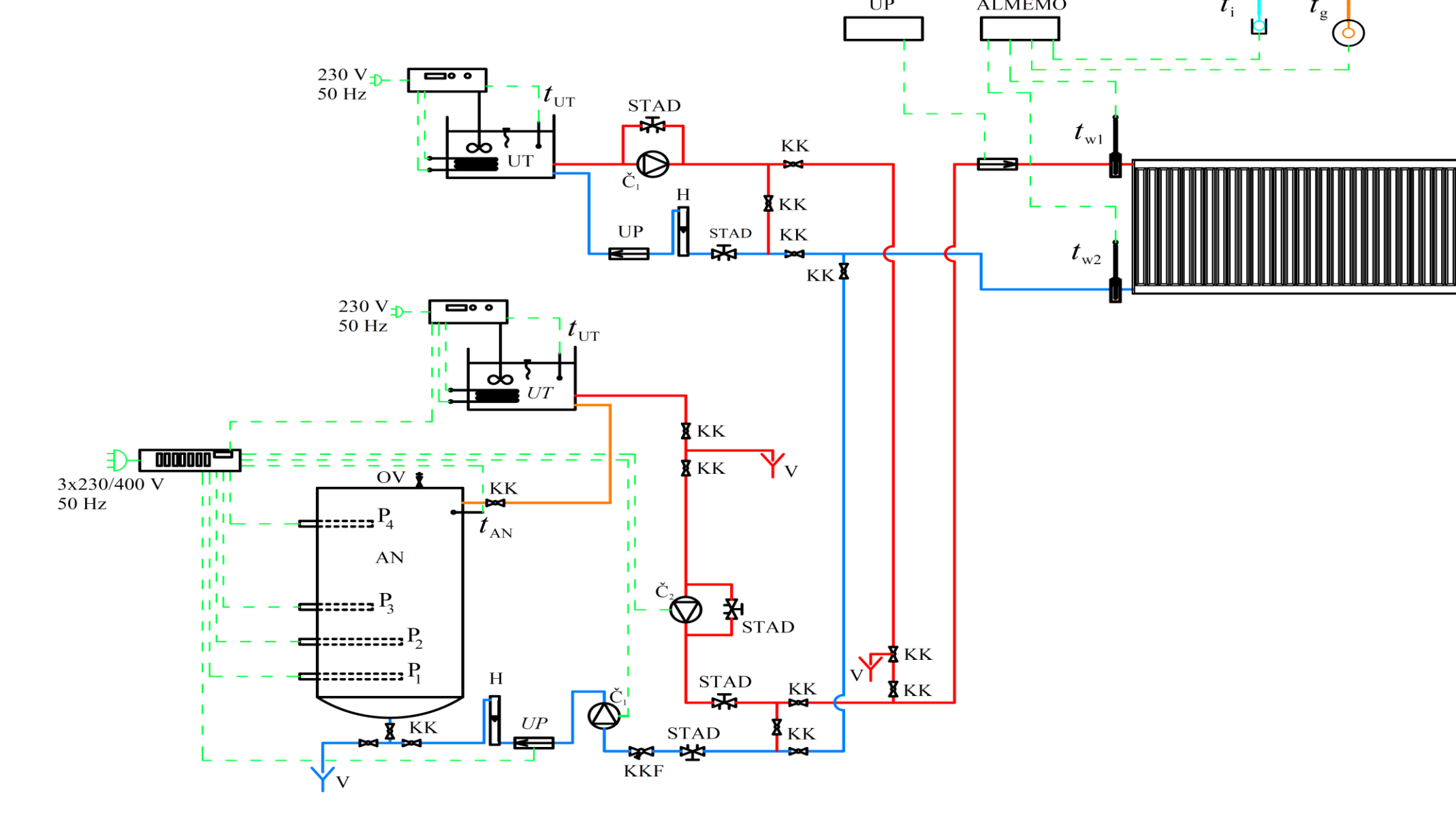
Obr. 1 Experiment

Na základě získaných dat byl v MATLABu vytvořen **komplexní model dynamiky s aproximací podle Strejce** s dvoukanalovým postupem pro výpočet aproximace. Toto řešení vede k pružnější aproximaci a není tak nutné pracovat jen s jednou pevně danou přenosovou funkcí. Připojením modelu chladnutí byl vytvořen komplexní model. Propojení dějů náběhu a chladnutí bylo provedeno prvkem „Relay“, kdy reálné si tento blok lze přestavit jako P-regulátor, čili například jako termostatickou hlavici s kapalinovou náplní, kterou se těleso zcela běžně osazuje. Model tak disponuje možností nastavit pásmo proporcionality skutečně použitého P-regulátoru a umožňuje provádět simulace dynamiky otopného tělesa osazeného tímto regulátorem. Výsledky tohoto modelu však nebyly zcela uspokojivé (hodnocení viz blok s výsledky práce) a proto byl sestaven finální model na základě jiného přístupu.

Dále uvedený model je tím finálním, který řeší hlavní cíl disertační práce – je to nástroj pro zjišťování dynamiky deskových otopných těles. V prostředí MATLABu byl implementován **diskrétní ARX black-box model 1. řádu**. K jeho sestavení bylo nutné sestavit další měřicí trať (obr. 3), na které je možné dosáhnout libovolné skokové změny teploty vody vstupující do otopného tělesa. Záznam termovizní kamerou na otevřeném měřicím místě podle DIN 4704-2, spolu se stanovením statických vlastností pro různé průtoky a teplotní parametry, byl zásadní pro vytvoření matematického black-box modelu.



Obr. 2 Základní princip aproximace podle Strejce



Obr. 3 Schéma zapojení měřicí trati se dvěma nezávislými zdroji tepla [1]

otopného tělesa t_p , která vynikají způsobem reprezentuje dynamiku otopných těles a ze které lze uvedeným postupem stanovit výkon. 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 snadného zápisu do MATLABu. Zároveň výsledky tohoto modelu s uspokojivou přesností simulují změřený průběh dynamiky otopného tělesa, viz textový blok s výsledky. Zápis tohoto modelu viz níže.

ZÁPIS MATLAB

```
clear all;
data = importdata('data_0pr.xlsx');
order = 1;
periods(1) = [7 154];
periods(2) = [155 327];
periods(3) = [328 444];
periods(4) = [445 664];
periods(5) = [665 862];

u = data(:, 2);
T = data(:, 1);

for k = 1:length(periods)
    index = 1;
    clear regressor;
    clear output;

    u_init = u(periods(k)(1));
    T_init = T(periods(k)(1));
    for i=periods(k)(1):periods(k)(end)
        du = u(i)-u_init;
        dT = T(i)-T_init;
        dT_1 = T(i+1)-T_init;
        switch order
            case 1
                output(index) = dT_1;
                regressor(index,:) = [dT du];
            case 2
                dT_2 = T(i+2)-T_init;
                output(index) = dT_2;
                regressor(index,:) = [dT_1 dT du];
            end
        index = index + 1;
    end
    params(k,:) = regressor\output;
end

%Ověření pomocí simulace
figure(1);
clf;
clear dT;
clear time;

for k = 1:length(periods)
    index = 1;
    clear dT_sim;
    u_init = u(periods(k)(1));
    T_init = T(periods(k)(1));
    time = periods(k)(1):periods(k)(end);
    dT = T(periods(k)(1):periods(k)(end))-T_init;
end
```

ZÁVĚR PRÁCE A JEJÍ PŘÍNOS

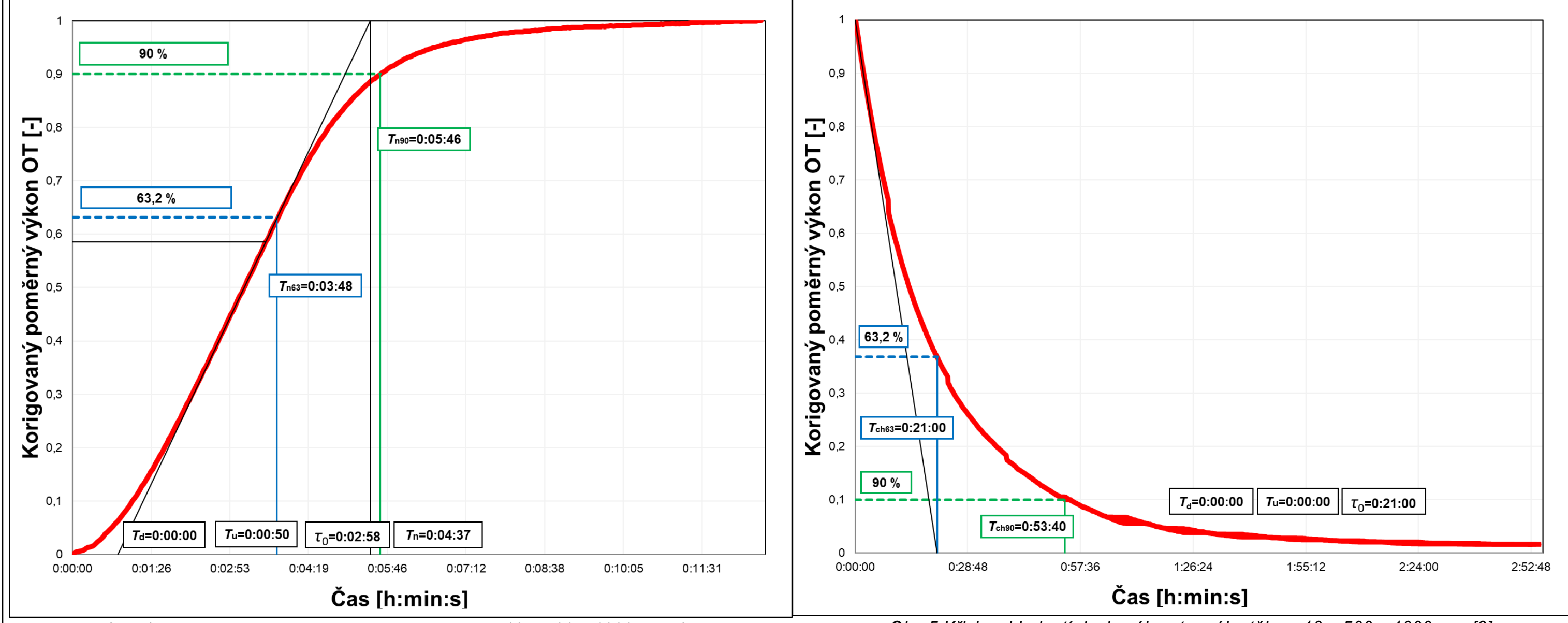
Disertační práce popisuje nový způsob stanovení a zobrazení nestacionárního chování otopných těles s využitím matematického modelování. Je to velmi praktický výstup, protože **uvedený ARX black-box model je nástroj poskytující možnost zjišťovat a hodnotit dynamiku velice rychle, a to bez nutnosti provádění finančně náročných experimentů. Takto dostupná data jsou základem pro návrh a optimalizaci funkce regulátorů tepelného výkonu, ale také podkladem pro jejich optimální součinnost s konkrétním typem či druhem otopného tělesa. Je to důležité především pro výrobce regulátorů, kdy se čím dál tím více rozšiřuje použití elektronických programovatelných hlavice (PI regulátory), či pohonů na regulačních ventilech a s nimi komunikujících P nebo PI prostorových regulátorů, standardně na otopných tělesech (nebo na podlahové otopné soustavě) osazovaných. Výrobci tak mohou přímo ve svých podkladech uvádět doporučení pro koncové uživatele, pro jakou aplikaci je jejich výrobek vhodný.** Model je k dispozici na Ústavu techniky prostředí FS ČVUT a na základě vyhodnocení mnoha experimentů lze konstatovat, že jej lze pro získání základního přehledu použít nejen pro sledované otopné těleso, ale i pro typové a rozměrově podobná otopná tělesa, resp. dynamika takových těles je analogická. Jedná se především o tzv. krátká desková otopná tělesa s poměrem $L_{OT}/H_{OT} < 3$. Po doplnění databáze naměřených údajů lze tento model využít téměř neomezeně. Disertační práce dále podrobně popisuje metodiku stanovení dynamiky termovizní. Pro praxi je rovněž velmi důležitá znalost zapojování různých druhů a typů otopných ploch v závislosti na tepelné setrvačnosti. Byly vyčísleny hodnoty pro nastavování regulátorů tepelného výkonu otopných těles. Teoretickým přínosem je vůbec první využití aproximace podle Strejce pro nahrazení reálné přechodové charakteristiky. Byla stanovena metodika pro popis vývoje aktivní teplosměnné plochy otopného tělesa na straně vzduchu, která je v rovnicích pro popis dynamiky téměř vždy neznámou.

LITERATURA

[1] BOHÁČ, J., BAŠTA, J., VAVŘIČKA, R., ŠULC, J. Modelování provozního chování otopných těles. Vytápění, větrání instalace, 2016, roč. 27, č. 2, s. 80 – 83. ISSN 1210-1389.
[2] BOHÁČ, J., BAŠTA, J. Dynamika teplotních polí deskových otopných těles. Vytápění, větrání instalace, 2016, roč. 25, č. 1, s. 2 – 5. ISSN 1210-1389.
[3] BOHÁČ, J., BAŠTA, J. Dynamisches Verhalten von Heizkörpern unter Berücksichtigung des Regelungsaspekts. Heizung Lüftung/Klima Haustechnik, 2014, roč. 65, č. 3, s. 18 – 22. ISSN 1436-5103.
[4] BOHÁČ, J., BAŠTA, J. Přístupy pro modelování dynamiky deskového otopného tělesa. Konference Vytápění Třeboň 2019. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2019. Přijato k publikaci.
[5] BOHÁČ, J. Thermography Data of Panel Radiator Dynamic Behaviour for Simulation Model. Praha: Central Europe towards Sustainable Building - Innovations for Sustainable Future, 2016, Građa Publishing, s. 1014 – 1021.

VÝSLEDKY A DISKuze

Niže jsou uvedeny **charakteristické křivky náběhu a chladnutí** pro deskové otopné těleso typu 10 – 500 x 1000 získané experimentem.

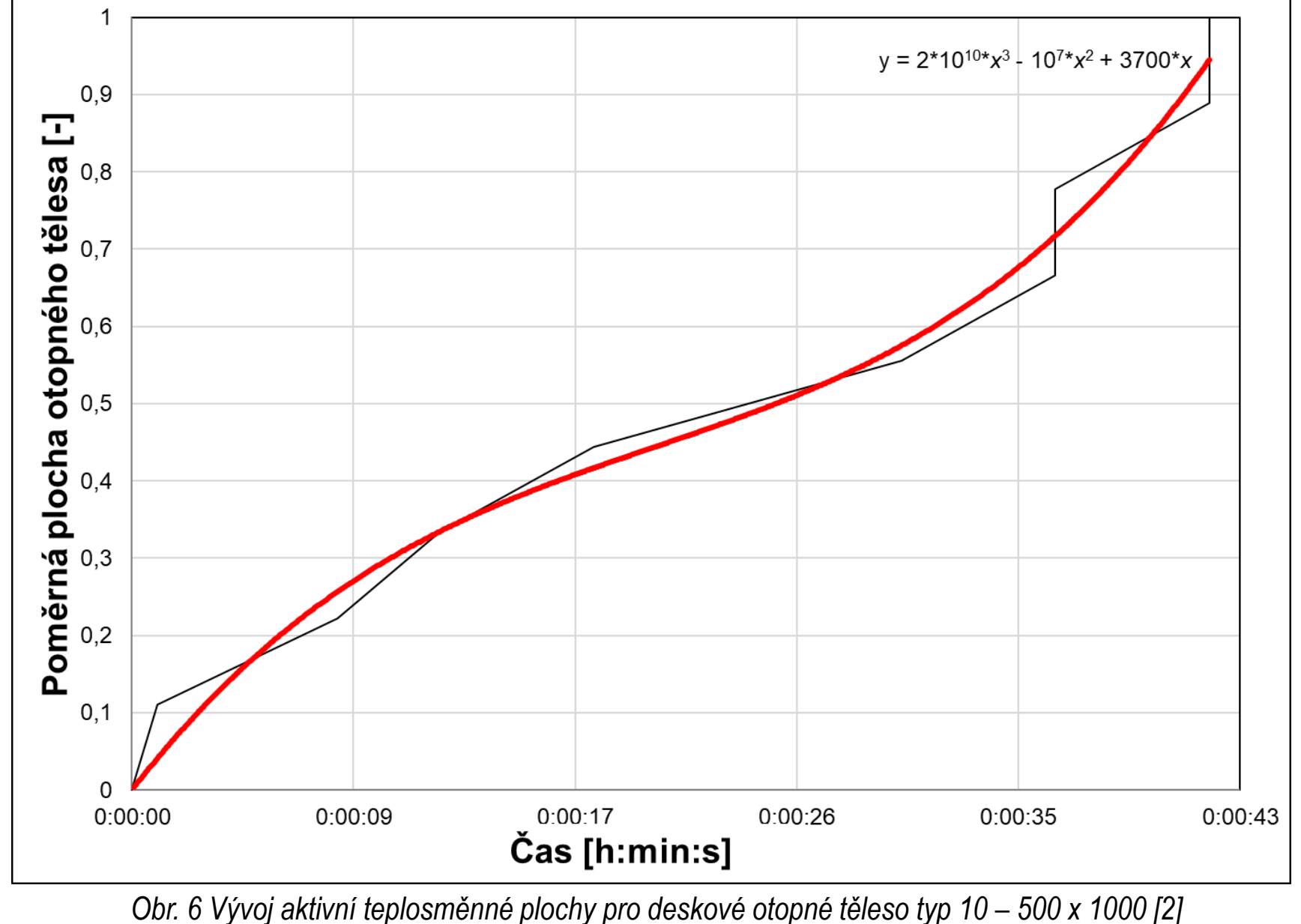


Obr. 4 Křivka náběhu deskového otopného tělesa 10 – 500 x 1000 mm [2]

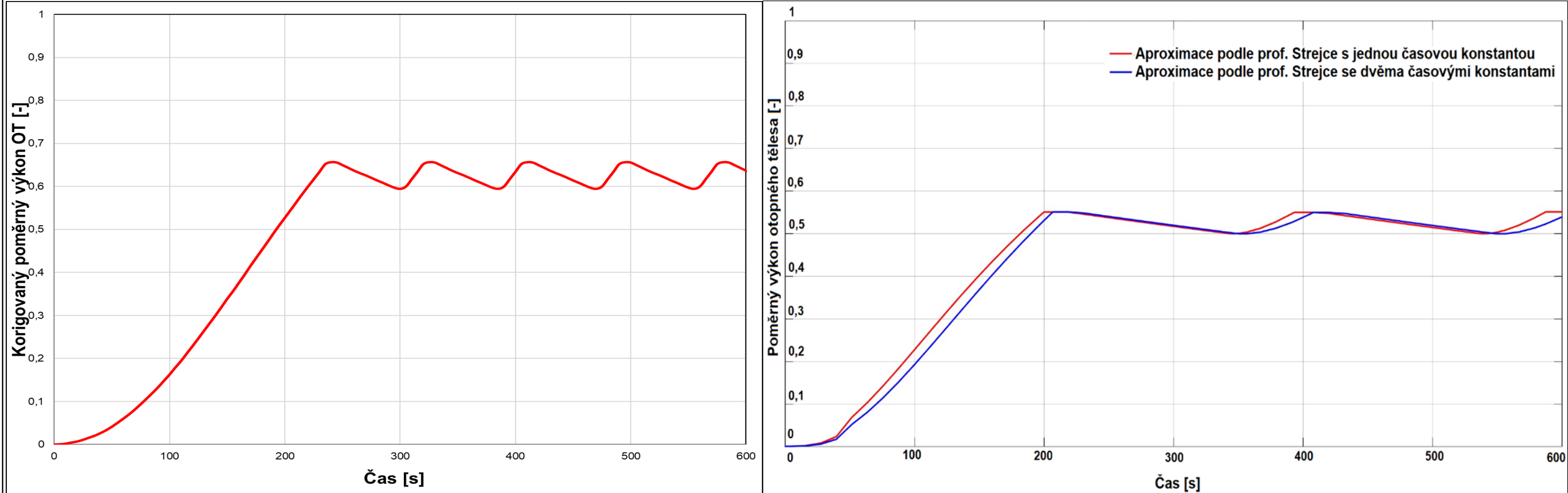
Obr. 5 Křivka chladnutí deskového otopného tělesa 10 – 500 x 1000 mm [3]

Doba dopravního zpoždění je uvažována jako nulová a tepelný výkon otopného tělesa je vždy korigován na 20 °C. Dále **jsou uvedeny dynamické parametry vyčíslené z přechodové charakteristiky 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 platí, že $T_{ch63} = \tau_0 = 1260$ s a $T_{ch90} = 3220$ 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. Pro popis dynamických systémů však není nutné pracovat s křivkou takto vysokého řádu a při posouzení zákonitostí dynamického chování je naprosto dostatečné pracovat s křivkou prvního nebo nejvýše druhého řádu, viz metody aproximace. Komplexní model dynamického chování s aproximací podle Strejce využívá mimo uvedených charakteristik ještě simulaci trendu vývoje aktivní teplosměnné plochy (obr. 6).

Lze konstatovat, že otopné těleso sdílí teplo celou svou otopnou plochou po přibližně 40 s od prvotního vstupu teplé vody. V modelu lze nastavit jakoukoliv žádanou hodnotu tepelného výkonu otopného tělesa i pásmo proporcionality. Je **uveden průběh dynamického chování deskového otopného tělesa pro 62,6 % potřeby tepelného výkonu osazeného regulačním ventilem s termostatickou hlavici, která disponuje pásmem proporcionality 2 K** (tj. 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 (obr. 7). Model (obr. 8) je schopen generovat charakteristiku střední povrchové teploty, skutečného i poměrného tepelného výkonu. Výsledky modelu však neodpovídají experimentu na obr. 7. Tepelný výkon uvedený modelem vykazuje hodnoty nižší přibližně o 10 %.



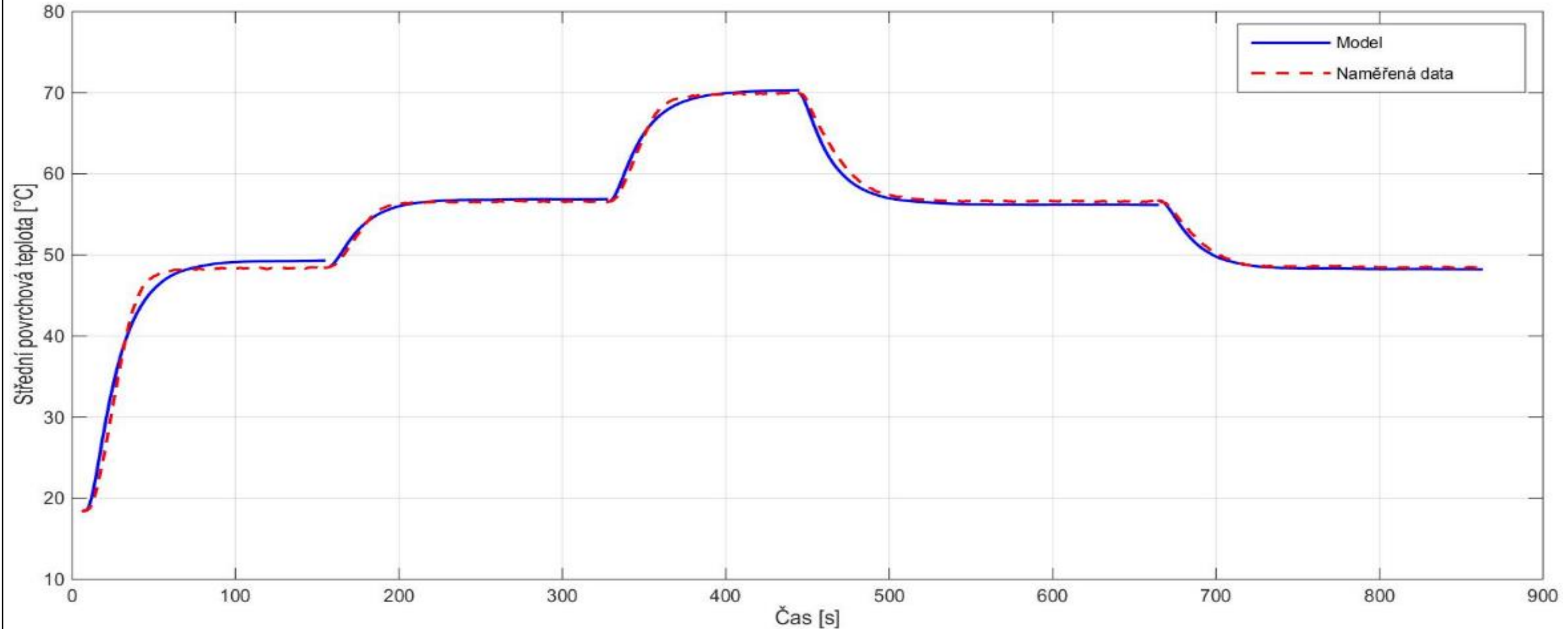
Obr. 6 Vývoj aktivní teplosměnné plochy pro deskové otopné těleso typ 10 – 500 x 1000 [2]



Obr. 7 Dynamické chování deskového otopného tělesa typ 10 – 500 x 1000 pro hodnotu výkonu 62,6 % (20 ± 1 K); hodnoty stanovené měřením [4]

Obr. 8 MATLAB Simulink model dynamického chování deskového otopného tělesa typ 10 – 500 x 1000 pro žádanou hodnotu výkonu 62,6 % (20 ± 1 K) [4]

Je to způsobeno podmínkou, kdy je teplota okolí považována za konstantní. Zároveň model vykazuje vyšší hodnoty tepelné setrvačnosti než otopné těleso, což je patrné je to zejména ve fázi cyklování tepelného výkonu na základě povelů P-regulátoru. Významným zdrojem chyby tohoto modelu je odhad součinitelů přestupu tepla na straně vody i vzduchu a 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 stanovení časových konstant Strejcovou metodou, Daný parametr je v praxi neznámý a nelze jej zjistit jinak než experimentem. **Na základě dosavadních poznatků bylo rozhodnuto o simulačním přístupu s využitím black-box modelu, který je tím konečným výstupem disertační práce.** Na základě uvedeného zápisu v MATLABU a změřených hodnot byl vytvořen model, jehož vyjádření je zřejmé z obr. 9, kde je uvedeno porovnání matematické simulace průběhu střední povrchové teploty a reálného změřeného průběhu.



Obr. 9 Porovnání výsledků ARX black-box modelu a experimentálních dat pro dynamické chování deskového otopného tělesa typ 10 – 500 x 1000 [5]

Model je založen na polynomu prvního řádu. Maximální odchylky vznikají vždy ve fázi náběhu a to v periodě, kde je největší rozdíl mezi dvěma ustálenými stavy. Nejvýznamnější rozdíly jsou těsně před prvním ustálením, kde maximální rozdíl teplot mezi skutečností a modelem je 2,02 K (v Case 45 s) tzn., že údaj modelu je o přibližně 4,5 % nižší. Údaje generované modelem se z hlediska střední povrchové teploty udržují v udržují v maximálním intervalu ±4,5 % od experimentálně zjištěných hodnot. V případě zavedení polynomu druhého řádu lze konstatovat, že generované údaje se z hlediska střední povrchové teploty nachází v maximálním intervalu ±2,8 % od experimentálně zjištěných hodnot. Nicméně ARX black-box model vývoje než prvního řádu pro své analytické řešení vyžaduje mnohem složitější matematické vyjádření. **Maximální interval ±4,5 % (absolutně ±2 K) od naměřené hodnoty je pro účely nalezení vhodných konstant regulátorů tepelného výkonu zcela dostačující,** a proto nejsou matematické modely disponující aproximací polynomem vyššího řádu potřeba. Sestavením tohoto modelu byl naplněn i poslední cíl disertační práce.

DALŠÍ SMĚŘOVÁNÍ PRÁCE

Zobecnění modelu pro další druhy a typy otopných těles by mohlo efektivně využít snadno dostupného teplotního exponentu otopných těles n , který mají výrobci povinnost uvádět. K dalšímu vývoji je rovněž ponecháno jiné než jmenovité připojení otopných těles na otopnou soustavu. Dále je možné řešit implementaci black-box modelu do prostředí TRNSYS pomocí propojení s MATLABem funkcí „TYPE 155“.