ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

REGULAČNÍ CHOVÁNÍ OTOPNÝCH TĚLES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. PAVEL NEKRASOV 6 – IB – 2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní

Ústav techniky prostředí Akademický rok: **2014/2015**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno studenta: **Bc. Pavel NEKRASOV**

Studijní program: **Inteligentní budovy**

Obor: **bez oboru**

Název česky: **Regulační chování otopných těles**

Název anglicky: **Control-Related Performance of Heating Radiators**

Zásady pro vypracování:

Vypracujte studii zabývající se dynamickým chováním otopných těles se zaměřením na deskové otopné těleso. Zabývejte se rovněž problematikou nespojitého chování a změnou pásma proporcionality u P-regulátorů, tj. termostatických hlavic. Aplikujte matematický model na chování otopného tělesa v prostředí Matlab.

Rozsah grafických prací: potřebná grafická dokumentace

Rozsah průvodní zprávy: podle potřeby k vyčerpání tématu

Seznam odborné literatury:

1) Bašta, J.: Hydraulika a řízení otopných soustav. Praha: Ediční středisko ČVUT, 2003. – 252 s., 209 obr., ISBN 80-01-02808-9.
2) Bašta, J.: Regulace v technice prostředí staveb. Česká technika – nakladatelství ČVUT. Praha 2014, 194s., ISBN 978-80-01-05455-0
3) Bašta, J., Boháč, J.: Dynamisches Verhalten von Heizkörpern unter Berücksichtigung des Regelungseingriffs. In: Heizung Lüftung/Klima Haustechnik, 3/2014. s. 18-22. ISSN 1436-5103.
4) Jančík, L.; Bašta, J. Dynamic Behavior of Panel Radiators – Experimental Investigation and Modeling. In *10th REHVA world congress Clima 2010 Sustainable Energy Use. Antalya, Turkey*, 2010.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Jiří Bašta, Ph.D.**

Konzultant: -

Datum zadání diplomové práce: **10.4. 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **19.6. 2015**

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu a tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Zadání diplomové práce převzal dne: .....

student

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE Fakulta strojní

Doc. Ing. Vladimír Zmrhal, Ph.D.
Vedoucí ústavu

Prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
Děkan fakulty

V Praze dne 10.4. 2015

SOUHRN

V této diplomové práci jsem se zabýval simulací regulačního chování otopných těles. Na začátku práce je uvedena teorie o otopných tělesech, aproximaci funkce soustavou druhého řádu a popsány v práci použité bloky simulačního prostředí Simulink. V další části práce je uveden postup vypracování úlohy od teoretických výpočtu a zkoumání možností modelování do samotného sestavování modelu v Simulink. Na konci práce jsou porovnány grafické výstupy ze simulačního modelu s grafickými výstupy z experimentu provedeného v laboratořích Ústavu techniky prostředí FS ČVUT.

SUMMARY

In this diploma thesis, I was working on simulations of the behavior of radiators. Theories about the radiators, function approximation with the second order dynamic system are featured at the beginning. Then follows the description of the blocks used in Simulink simulation environment. The next part of the thesis is about developing a given task from theoretical calculation and attempts to explore the opportunities of modeling to assembling the model in Simulink. At the end of the work I compared graphical outputs of the simulation model with graphical outputs of the experiment performed in the laboratories of the Department of Environmental Engineering at CTU.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Prof. Ing. Jiřímu Baštovi, Ph.D. za cenné připomínky, podporu a odborné rady, kterými přispěl k vypracování této diplomové práce.

Děkuji

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Regulační chování otopných těles“ vypracoval samostatně pod vedením Prof. Ing. Jiřího Bašty, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze 16.06.2015 Pavel Nekrasov

OBSAH

1. Úvod 2
2. Teoreticko-metodická část 3
   2.1. Základy teorie soustav 3
      2.1.1. Soustava nultého řádu 3
      2.1.2. Soustava prvního řádu 4
      2.1.3. Soustava druhého řádu 4
      2.1.4. Obraz funkce a Laplaceova transformace 5
      2.1.5. Přenos dynamické soustavy 6
      2.1.6. Aproximace funkce 6
   2.2. MATLAB Simulink 8
      2.2.1. Zdroje signálů 8
      2.2.2. Pozorovací bloky 9
      2.2.3. Podsystém a směrování signálů 10
      2.2.4. Úprava signálů 11
      2.2.5. Rozhodovací bloky 12
      2.2.6. Ostatní použité bloky 13
   2.3. Otopné těleso a dynamické procesy 14
      2.3.1. Druhy otopných těles 14
      2.3.2. Chladnutí otopných těles 16
      2.3.3. Náběh otopných těles 17
      2.3.4. Regulace výkonu otopného tělesa 18
      2.3.5. Dopravní zpoždění 18
3. Praktická část 19
   3.1. Náběh otopné plochy 19
      3.1.1. Rozbor všech podkladů 19
      3.1.2. Metoda „přestupu teploty mezi sektory“ 22
      3.1.3. Metoda postupného zapínaní sektorů 22
      3.1.4. Metoda zapínaní sektorů svislým směrem 24
      3.1.5. Lagrangeův a Eulerův pohled na tekutinu 26
      3.1.6. Simulace na základě rovnice pro výpočet výkonu otopného tělesa 26
      3.1.7. Aproximace průběhu teploty 30
      3.1.8. Realizace flexibilního přenosu aproximované funkce 32
      3.1.9. Jednosouborový model s flexibilním přenosem 36
   3.2. Chladnutí otopného tělesa 38
   3.3. Regulace otopného tělesa 38
   3.4. Spojení náběhu, chladnutí, regulace otopného tělesa 39
   3.5. Finální model 41
   3.6. Porovnání grafických výstupů z experimentu a ze simulačního modelu 43
4. Závěr 50
5. Seznam použité literatury 52
6. Seznam přiloh 53

1. ÚVOD

V současné době je zjišťování dynamického chování otopných těles založeno na experimentálních datech. Experimenty jsou drahé a mohou trvat až několik dnů. Cílem této diplomové práce je prostudovat děje probíhající v otopném tělese a navrhnout simulační program, který by měl respektovat reálné chování otopného tělesa.

Pro vývoj programu bylo zvoleno simulační prostředí Simulink, které je součástí systému MATLAB. Hlavními vstupními daty pro práci jsou data ze zkoušky otopného tělesa Korado Klasik 500x1000. Výstupní grafy ze simulačního programu musejí odpovídat experimentálním datům. Navíc cílem práce je odsimulovat otopné těleso s připojeným P-regulátorem. V práci popíšu všechny postupy, které jsem zkusil uplatnit pro řešení této úlohy.

2. TEORETICKO-METODICKÁ ČÁST

2.1. Základy teorie soustav

„Statické regulované soustavy, jejichž chování se popisuje prostřednictvím chování lineárního systému, mají jako určující znak pro utřídění řád systému. Pojem řádu se pak přenáší nepřesně i do pojmenování soustavy, takže máme regulované soustavy nultého, prvního, druhého a vyšších řádů“ [1].

2.1.1. Soustava nultého řádu

Soustava nultého řádu je nedynamická. Rovnice odpovídající soustavě nultého řádu je:

$$a_1.y = b_1.x \tag{1}$$

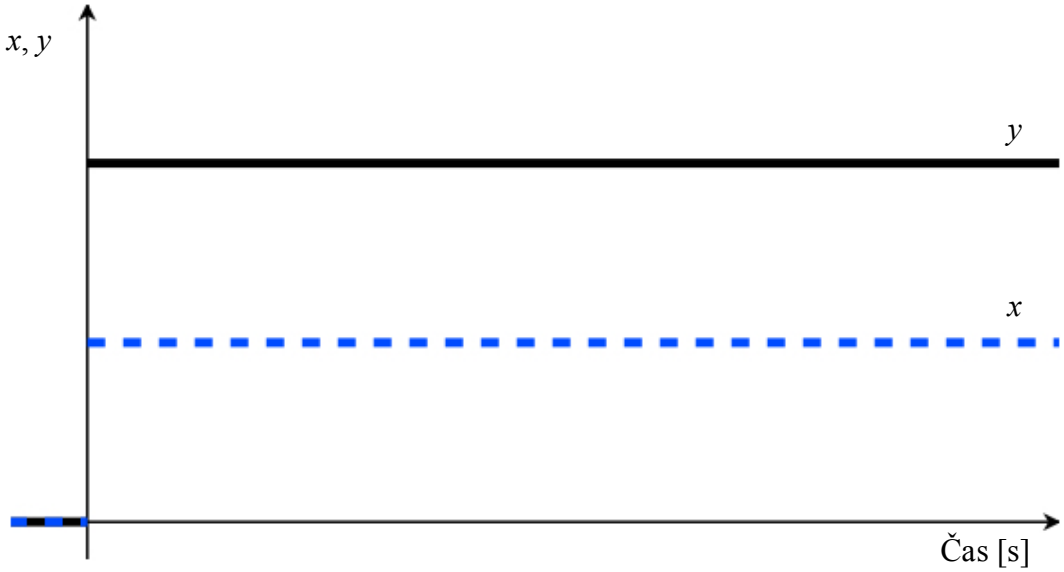
kde

a_1, b_1 – konstantní koeficienty

x – vstupní funkce

y – výstupní funkce

Přechodová charakteristika dynamické soustavy nultého řádu je zobrazena na obr. 2-1.



Obr. 2-1 Přechodová charakteristika soustavy nultého řádu

Je vidět, že dochází jenom ke skokové změně. Výstup ze systému nultého řádu je v každém okamžiku násobkem vstupu do systému. Tento typ soustavy se v reálném světě nevyskytuje a pro tuto práci není důležitý.

2.1.2. Soustava prvního řádu

„Soustavy prvního řádu (statické, proporcionální) jsou objekty, jejichž chování popisuje s dostatečnou věrohodností statický systém prvního řádu“ [1]. Tomuto systému odpovídá diferenciální rovnice prvního řádu a vypadá následujícím způsobem:

$$a_1.\dot{y} + a_2.y = b_1.x \tag{2}$$

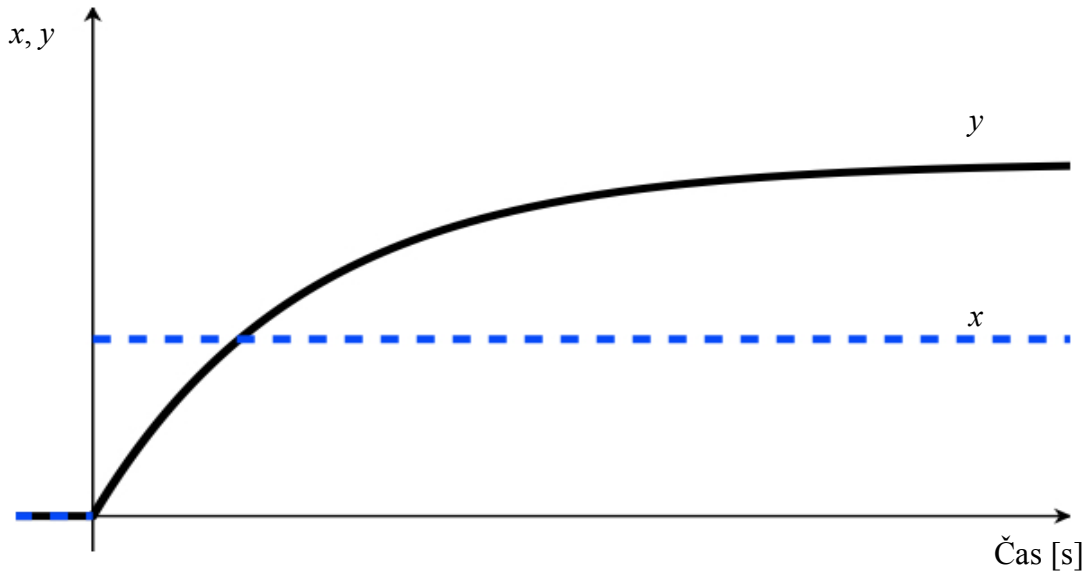
kde

a_1, a_2, b_1 – konstantní koeficienty

x – vstupní funkce

y – výstupní funkce

Na přechodové charakteristice (viz obr. 2-2) už je vidět dynamickou změnu výstupní veličiny na základě skokové změny vstupní veličiny. Tento typ dynamické soustavy bude použit v této práci.



Obr. 2-2 Přechodová charakteristika systému prvního řádu

2.1.3. Soustava druhého řádu

„Soustavy druhého a vyšších řádů jsou v technice prostředí nejčastěji se vyskytujícími objekty, u nichž je třeba regulací udržovat určitou veličinu na požadované hodnotě. Na vstupní skokovou změnu reagují nekmitavě, často s prodlevou související se setrvačností při náběhu. Platí, že čím vyšší řád soustava vykazuje, tím obtížněji se reguluje, resp. je třeba počítat s delší dobou regulace. Klesá také věrohodnost

matematicky odvozovaných modelů“ [1]. Soustava druhého řádu je popsána diferenciální rovnicí druhého řádu:

$$a_1.\ddot{y} + a_2.\dot{y} + a_3.y = b_1.x \tag{3}$$

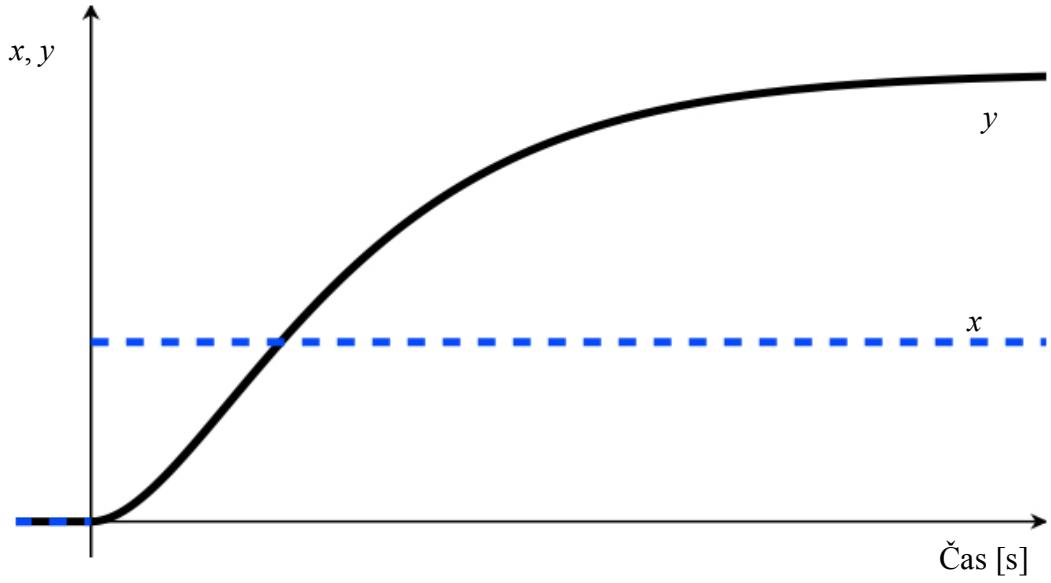
kde

a_1, a_2, a_3, b_1 – konstantní koeficienty

x – vstupní funkce

y – výstupní funkce

Na přechodové charakteristice (viz obr. 2-3) se už vyskytuje průtah na začátku děje. Model soustavy druhého řádu také bude použit v této práci.



Obr. 2-3 Přechodová charakteristika systému druhého řádu

2.1.4. Obraz funkce a Laplaceova transformace

Laplaceova transformace je integrální transformace, pomocí které se dají zjednodušit vztahy mezi funkcemi v diferenciální rovnici. Je použitelná na funkce spojité v čase. Transformace probíhá podle vztahu:

$$L\{f(t)\}(s) = \int_0^{\infty} f(t).e^{-s.t}.dt \tag{4}$$

Obrazem funkce je funkce komplexní proměnné s. Často je značen velkým písmenem.

2.1.5. Přenos dynamické soustavy

Přenosem dynamické soustavy je poměr obrazu výstupní funkce ku obrazu funkce vstupní. Rovnice (5) a (6) jsou obecnými přenosy dynamických soustav prvního a druhého řádu.

$$G(s) = \frac{b_1}{s + a_1} \tag{5}$$

$$G(s) = \frac{b_1}{s^2 + a_1.s + a_2} \tag{6}$$

kde

a_1, a_2, b_1 – konstantní koeficienty

s – komplexní proměnná Laplaceové transformace

2.1.6. Aproximace funkce

„Zcela přesné určení dynamických vlastností reálných systémů je prakticky nemožné. Vyhodnocení přechodové charakteristiky se obvykle spojuje s aproximací skutečných vlastností dynamického systému vlastnostmi náhradního systému s předem zvolenou strukturou“ [2]. V této práci pro aproximace funkce byla použita metoda prof. Strejce s aplikací na druhý řád.

Využitý postup aproximace v této práci byl vyvinut na základě [2] a [3] a dále bude uveden.

Tvar náhradního přenosu je pro přenos s dvěma různými časovými konstantami

$$G(s) = \frac{K_0}{(T_1.s + 1).(T_2.s + 1)} \tag{7}$$

nebo pro přenos s dvěma stejnými časovými konstantami

$$G(s) = \frac{K_0}{(T.s + 1)^2} \tag{8}$$

kde

T_1, T_2, T – časové konstanty

s – komplexní proměnná Laplaceové transformace

K_0 – zesilovací konstanta

$$K_0 = \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{9}$$

kde

Δy – změna výstupní veličiny

Δx – změna vstupní veličiny

Důležitou hodnotou je poměr časových konstant

$$\alpha = \frac{T_2}{T_1} \tag{10}$$

a součet těchto časových konstant.

„Bylo zjištěno, že čas t_1, pro který platí

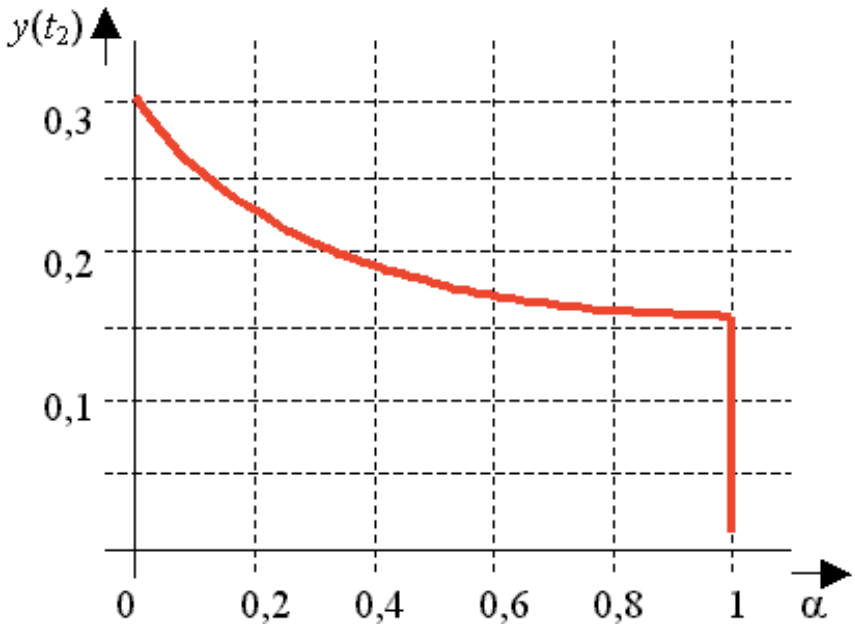
$$y(t_1) = 0{,}720.\, y(\infty) \tag{11}$$

je nezávislý na poměru α, ale je závislý jen na součtu T_1+T_2 a platí pro něj:

$$t_1 = 1{,}256.\,(T_1 + T_2) \tag{12}$$

Čas t_2, pro který platí:

$$t_2 = 0{,}357.\,(T_1 + T_2)\text{“ [3]} \tag{13}$$



Obr. 2-4 Závislost pořadnice $y(t_2)$ na poměru α [3]

Z rovnic (12) a (13) dostaneme:

$$t_2 = 0{,}284.\, t_1 \tag{14}$$

Vztah mezi pořadnicí $y(t_2)$ a poměrem α je dán grafem, který je na obr. 2-4.

Se známým poměrem α je možné dopočítat časové konstanty a tím zjistit rovnice náhradního přenosu.

2.2. MATLAB Simulink

Na tomto místě práce bych popsal simulační prostředí Simulink a základní věci použité v této práci.

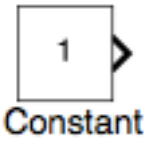
Simulink je nadstavbou MATLABu. Využívá se pro grafické modelování a simulace dynamických soustav a pro numerické řešení nelineárních diferenciálních rovnic s využitím algoritmů MATLABu.

Postup modelování je založen na postupném vkládání bloků do pracovního prostředí s následujícím propojením mezi sebou. Samozřejmostí je nutnost změny nastavení některých bloků. V Simulinku se pracuje se signály, což znamená, že musí být určitý zdroj signálu. Pak je tento signál upraven v různých blocích a potom je výsledný signál pozorován pomocí speciálních bloků.

Všechny bloky se nacházejí v knihovně bloků. Jsou zařazeny do různých kategorií. Například zdroje signálu jsou v záložce *Sources*, různé matematické operace jsou v záložce *Math Operators*, pozorovací nástroje jsou v záložce *Sinks* atd.

2.2.1. Zdroje signálů

Nejčastěji používaným zdrojem signálu v této práci je blok *Constant* (nebo česky konstanta, viz obr. 2-5).

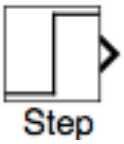


Obr. 2-5 Zdroj konstantního signálu

Podle názvu je jasné, že generuje konstantní signál předem nastavené velikosti (v uvedeném případě velikost je 1). Používá se pro simulaci různých konstantních

veličin vstupujících do soustavy, například hmotnost otopného tělesa, teplotní exponent a jiné.

Dalším použitým zdrojem signálu je blok *Step* (česky krok, ale lépe tomu odpovídá skok, viz obr. 2-6).



Obr. 2-6 Zdroj skokové změny hodnoty

Tento blok simuluje skokovou změnu velikosti signálu v určitém čase. Je potřeba nastavit počáteční hodnotu, čas ve kterém změna musí být provedena a cílovou hodnotu.

Posledním z použitých zdrojů signálu je blok *Clock* (česky hodiny, viz obr. 2-7).

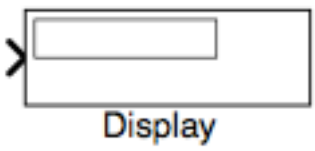
Obr. 2-7 Zdroj signálu typu hodiny

Tento blok generuje signál v závislosti na čase. Na začátku simulace je výstupem z bloku 0. Pak se každou sekundu velikost výstupního signálu zvětšuje o 1. Takový typ zdroje signálu pomáhá realizovat funkce závislé na čase.

2.2.2. Pozorovací bloky

Pozorovací bloky slouží ke kontrole signálů, buď graficky nebo číselně. Při modelování byly použity dva typy pozorovacích bloků.

Blok *Display* (viz obr. 2-8) ukazuje číselně aktuální veličinu signálu. Pokud v jednom signálu je více kanálů vypíše hodnoty všech kanálů.



Obr. 2-8 Pozorovací blok typu Display

Tento blok může být použit jak pro předvádění výsledků modelu, tak pro odladění programu, pokud bude připojen v místech, kde je třeba zkontrolovat velikost signálu.

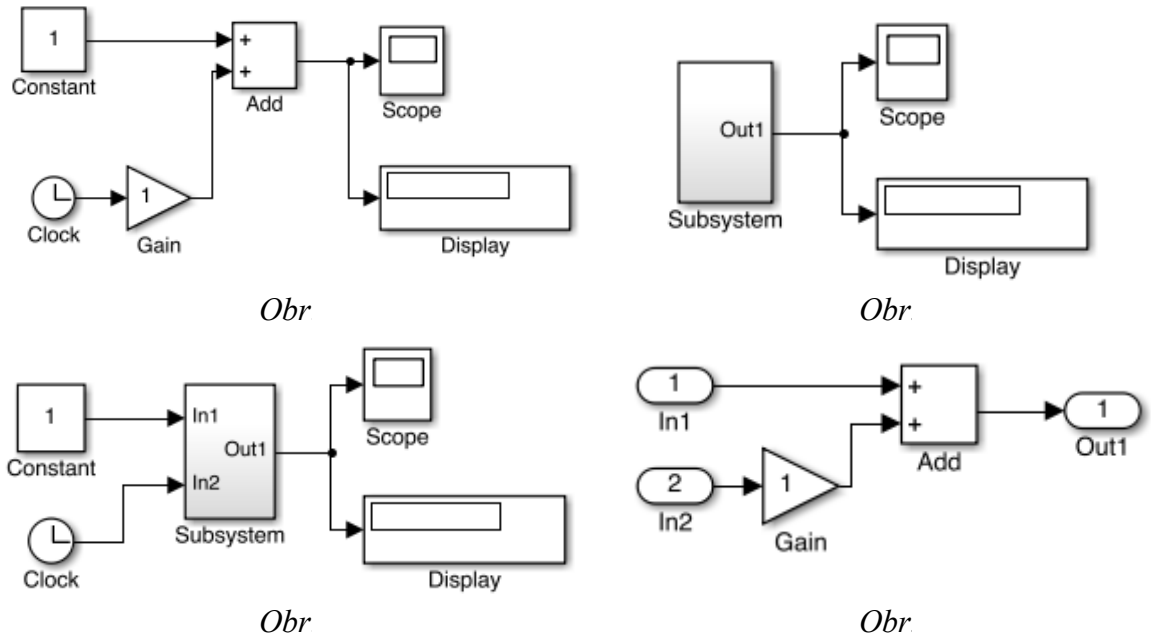
Blok *Float* (viz obr. 2-9) graficky znázorňuje průběh veličiny signálu, na který je připojen. Stejně jako předchozí blok, ukáže průběh veličin signálů několika kanálů.

Obr. 2-9 Pozorovací blok typu Float

Použití tohoto bloku je identické s použitím přechozího typu bloku.

2.2.3. Podsystém a směrování signálů

V závislosti na složitosti mohou být modely v Simulinku nepřehlednými. Pro zjednodušení vzhledu modelu je vhodné zabalit určité části modelu do podsystému (anglicky *Subsystem*).



Obr *Obr*

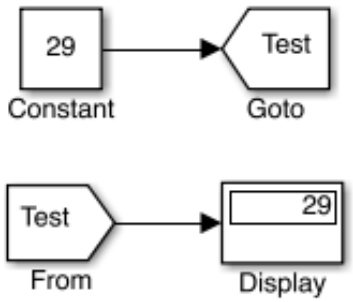
Obr *Obr*

Obr. 2-10 Příklad použití funkce podsystému
a) Výchozí systém, ke kterému bude aplikována funkce podsystému, b) Použití podsystému s zabalením zdrojových bloků do podsystému, c) Použití podsystému bez zabalení zdrojových bloků do podsystému, d) Podsystém modelu z bodu c)

Po provedení této akce v hlavním modelu zůstane jenom jeden blok podsystému. Bude mít počet vstupů a výstupů závislý na propojení zabalených bloků do podsystému.

Na obr. 2-10 je uveden princip použití podsystémů. Je vidět, že hlavní model je propojen s podsystémem pomocí vstupních bloků *In* a výstupních bloků *Out*.

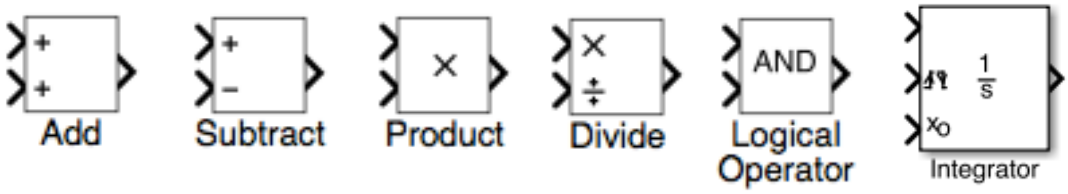
Pokud je třeba použít stejný signál v různých částech modelu není vhodné vytvářet hodně uzlů a propojovat bloky přímo mezi sebou. Lepší varianta je vyžít směrování signálů pomocí bloků *From* a *Goto*. Signál ukončený blokem *Goto* pak bude vycházet z každého bloku *From*, který je svázán s blokem *Goto* stejným *tagem* (je to identické s pojmenováním proměnné a jejím použitím v programování, viz obr. 2-11).



Obr. 2-11 Směrování signálu

2.2.4. Úprava signálů

Do této kategorie bloků bych zařadil bloky operací (matematických, logických) použité v práci. Jsou to bloky *Add*, *Subtract*, *Product*, *Divide*, *Math Function*, *Integrator* a *Logic Operator*. *Add* a *Subtract* jsou bloky sčítání a odečítání a jsou v podstatě stejným blokem s různými znaménky na vstupech.



Obr Obr Obr Obr Obr Obr

Obr. 2-12 Bloky úpravy signálů

a) Sčítání, b) Rozdíl, c) Součin, d) Dělení, e) Logický operátor, f) Integrátor s externími počátečními podmínkami a vynulováním jak nabíhající, tak sestupnou hranami nulovacího signálu

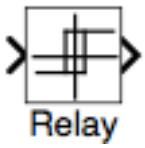
Stejná situace je s bloky *Product* a *Divide*. Pomocí bloku *Math Function* se realizují různé matematické funkce, například mocnina, odmocnina, absolutní hodnota, logaritmus atd.

Integrator integruje vstupní signál. Je možnost nastavení počátečních podmínek interně (v nastaveních bloku) nebo externě (počáteční podmínky jsou dalším vstupním signálem). Je možnost připojení i třetího vstupního signálu, který slouží pro vynulování integrátoru. *Logic Operator* muže být nastaven jako logické funkce AND, OR, NOT a jiné. Přehled použitých bloků úprav signálu je na obr. 2-12.

Integrátor je nezbytným blokem při modelování dynamické soustavy, která odpovídá diferenciální rovnice určitého řádu. V tomto případě se signál pomocí integrace postupně upravuje z derivovaného na nejvyšší řád diferenciální rovnice na nederivovanou veličinu signálu.

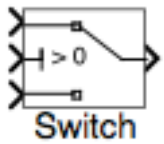
2.2.5. Rozhodovací bloky

K rozhodovacím blokům použitým v této práci patří bloky *Relay* a *Switch*. Relé na výstupu dává jednu ze dvou přednastavených hodnot (pro zapnuté relé a pro vypnuté relé) na základě veličiny vstupního signálu. Tento blok pracuje s hysterezí, což se dá výhodně využít v různých algoritmech. Vzhled bloku *Relay* je na obr. 2-13.



Obr. 2-13 Blok Relay

Switch (česky přepínač, viz obr. 2-14) také rozhoduje na základě vstupního signálu, ale výstupem nejsou přednastavené hodnoty, ale jeden ze dvou dalších vstupů. To znamená, že na základě určité řídicí veličiny je možné odebírat z tohoto bloku jeden nebo druhý vstupující signál do bloku přepínače.



Obr. 2-14 Přepínač

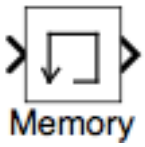
V knihovně Simulinku je přepínač zařazen do kategorie směrování signálu, ale v této práci tento blok má vliv více rozhodovací, než jenom směrovací.

2.2.6. Ostatní použité bloky

Další bloky, které se najdou v modelu jsou *Transport Delay*, *Memory*, *Saturation* a *Counter*. Blok *Transport Delay* (česky dopravní zpoždění, viz obr. 2-15) vnáší do signálu dopravní zpoždění určené v nastaveních tohoto bloku. Jinými slovy, pokud přednastavená hodnota dopravního zpoždění je pět sekund, výstup z bloku v každém okamžiku simulace se bude rovnat vstupu do bloku před pěti sekundami.

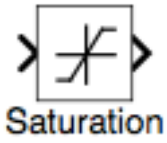
Obr. 2-15 Blok dopravního zpoždění

Výstup bloku *Memory* (česky paměť, viz obr. 2-16) se rovná vstupu do bloku v předchozím kroku simulace.



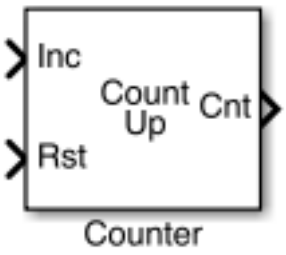
Obr. 2-16 Blok paměti

Blok *Saturation* (česky nasycení, viz obr. 2-17) zajišťuje, že velikost signálu bude mezi určitými hranicemi. Pokud signál přesáhne nastavenou hodnotu, bude se na výstupu držet tato maximální povolená hodnota. Stejně reaguje na podkročení dolní hranice.



Obr. 2-17 Blok saturace

Counter je čítač (viz obr. 2-18). V nastaveních je možnost vybrat jestli je třeba odečítat nebo přičítat velikost výstupu. Také je třeba vybrat mezi počítáním nabíhajících, sestupných nebo obou hran signálu.



Obr. 2-18 Přičítající čítač se vstupem pro vynulování

2.3. Otopné těleso a dynamické procesy

V této části práce popíši další téma, které je základem pro vytvoření simulačního modelu. Podle různých zdrojů probíhá v otopném tělese za provozu zároveň kolem šedesáti různých procesů. Samozřejmě každý z těchto procesů má určitý vliv na komplexní děj přenášení tepla z otopné vody do interiéru. Aby bylo možné sestavit nejpřesnější matematický model otopného tělesa, je potřeba prozkoumat, jaké jsou to procesy a popsat každý z nich. V této práci bude sestaven zjednodušený model, na základě určujících procesů (resp. určujících skupin procesů, zjednodušených do jednoho), odpovídající reálnému chování otopného tělesa. Pod pojmem reálné chování otopného tělesa rozumím výsledky experimentu provedeného v laboratořích Ústavu techniky prostředí FS ČVUT.

2.3.1. Druhy otopných těles

„Otopná tělesa se dělí podle druhu na:

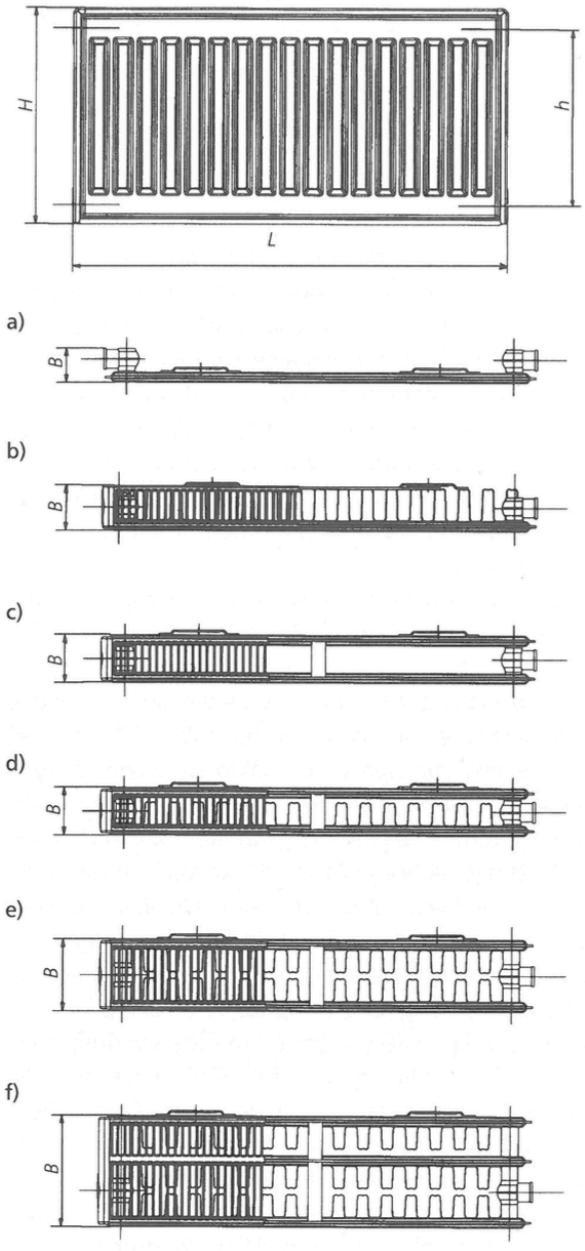
- článková otopná tělesa a jejich typy,
- desková otopná tělesa a jejich typy,
- trubková otopná tělesa a jejich typy,
- konvektory a jejich typy.“ [8]

Jelikož v této práci se zabývám simulací deskového tělesa, bude dále popsáno deskové otopné těleso.

„Desková otopná tělesa dnes patří mezi nejčastěji používaná tělesa (obr. 2-19). Za desková otopná tělesa pokládáme souvislé hladké desky, případně desky s povrchem zvětšeným zvlněním nebo konvekčním plechem v různém montážním uspořádání. Za

deskové těleso však nelze pokládat těleso vyskládané z jednotlivých článků, přestože výsledný výrobek vizuálně působí jako deska.

Základními částmi deskového otopného tělesa jsou horní rozvodná a dolní sběrná komora situované ve směru délky tělesa, obvykle se stejným neproměnným průřezem. Obě komory spojují prolisy tvořící kanálky. Celé těleso tak tvoří dvě prolisované desky z ocelového plechu, které jsou po obvodě svařeny odporově švově a mezi jednotlivými kanálky jsou svařeny bodově. Plech používaný na výlisky má tloušťku 1,25 až 1,3 mm.



Obr. 2-19 Deskové otopné těleso
a) typ 10, b) typ 11, c) typ 20, d) typ 21, e) typ 22, f) typ 33 [8]

Pokud je čelní deska rovná, zcela hladká, používá se plech o tloušťce 2 mm. Dochází tak ke zmenšení průtočného průřezu kanálku na polovinu, případně se na deskové těleso standardního tvaru lepicím tmelem a svařováním upevňuje hladká deska s plechem tlustým 1,25 mm. Na potrubní rozvod se tělesa připojují buď osovým, nebo bočním výstupem se závitem. V případě tzv. kompaktního provedení mají tělesa zabudovanou propojovací garnituru s ventilovou vložkou, anebo přímo ventil se spodním připojením vlevo, vpravo či uprostřed.

Desková tělesa dělíme na:

- jednoduchá,
- zdvojená,
- ztrojená.

Všechny tyto typy mohou mít rozšířenou přestupní plochu. Tělesa jsou z výroby z boku zakryta bočnicí a shora výstupní mřížkou, což zlepšuje jejich vzhled. Přestupní plocha je rozložena převážně do délky. Desková tělesa mají malý vodní obsah, což umožňuje rychlou reakci na regulační zásah, a rovněž mají i nižší hmotnost než tělesa článková. Kanálky jsou tvořeny vlysy ve tvaru kosodélníků či kruhových úsečí“ [8].

2.3.2. Chladnutí otopných těles

„Jedná se o snižování střední povrchové teploty otopného tělesa v důsledku ztrátového tepelného toku z povrchu tělesa. V případě ochlazování uvažujeme, že tepelný tok směrem do tělesa je nulový (TRV uzavřen). Jednotlivé tepelné toky můžeme vyjádřit ze základní tepelné bilance *akumulace = přívod – odvod*“ [4]. Výše uvedená rovnice pro ustálený stav podle [5] má tvar:

$$(m_T.c_T + m_w.c_w).\frac{dt_m}{d\tau} = \\ = \dot{m}_w.c_w.(t_{win} - t_{wout}) - \alpha_c.S_T.(t_m - t_i) \quad (15)$$

kde

α – součinitel přestupu tepla [W.m^{-2}.K^{-1}]

c – měrná tepelná kapacita [J.kg^{-1}.K^{-1}]

m – hmotnost [kg]

$\dot{m}$ – hmotnostní tok [kg.s^{-1}]

S – plocha [m^2]

indexy:

c – celkový

i – vzduchu

in – vstupní

m – střední

out – výstupní

t – teplota [ºC]
τ – čas [s]
T – těleso
w – voda

Upravená rovnice (15) pro chladnutí má tvar:

$$(m_T.c_T + m_w.c_w).\frac{dt_m}{d\tau} = -\alpha_c.S_T.(t_m - t_i) \quad (16)$$

kde
α – součinitel přestupu tepla [W.m^{-2}.K^{-1}]
c – měrná tepelná kapacita [J.kg^{-1}.K^{-1}]
m – hmotnost [kg]
S – plocha [m^2]
t – teplota [ºC]
τ – čas [s]

indexy:
c – celkový
i – vzduchu
m – střední
T – těleso
w – voda

Tato rovnice je diferenciální rovnice prvního řádu, což odpovídá reálným průběhům chladnutí otopné plochy.

2.3.3. Náběh otopných těles

Při analýze náběhu otopné plochy vycházím stejně jako u chladnutí z rovnice (15). Na rozdíl od prvního případu při náběhu tepelný tok směrem do tělesa nulový není, nejsou nulové i ostatní složky. To znamená, že rovnice se žádným způsobem neupraví. Je to diferenciální rovnice prvního řádu. Podle experimentálně zjištěných průběhů je náběh otopného tělesa procesem vyššího než prvního řádu, jelikož má na začátku děje určitý průtah. Tento rozdíl mezi teorií a experimentem spočívá v tom, že rovnice tepelné bilance je aplikovatelná jenom v ustáleném stavu. Pro odvození diferenciální rovnice, řešení které by odpovídalo reálnému náběhu otopné plochy, je potřeba podrobněji rozebrat tento proces.

Jinou variantou pro sestavení modelu je aproximace reálného průběhu náběhu otopného tělesa. Samozřejmě aproximace vnese do výsledku určité nepřesnosti a omezení aplikace modelu, nicméně výsledky mohou být bohatě použitelné. Omezení využití modelu se může minimalizovat, ale je potřeba dalšího výzkumu v oblasti závislostí mezi potřebnými vstupy do aproximace a podmínkami použití otopného tělesa (tím myslím katalogové charakteristiky otopných těles, teploty vody a interiéru atd.).

2.3.4. Regulace výkonu otopného tělesa

Dynamické chování otopného tělesa, které je potřeba simulovat se vyskytne, pokud výkon otopného tělesa bude regulován (samostatné procesy chladnutí a ohřevu jsou také dynamické, ale nejsou tak zajímavé pro práci, jak je spojení ohřevu a chladnutí, což je dosažitelné regulátorem). V této práci bude simulována „nejčastější aplikace regulačních prvků v ČR, tedy deskové otopné těleso, osazené termostatickým regulačním ventilem s hlavicí, tj. spojitým P-regulátorem, který se však bude chovat jako regulátor nespojitý a bude nabývat pouze dvou hodnot – otevřeno/zavřeno“ [6].

2.3.5. Dopravní zpoždění

Termínem dopravní zpoždění se nejčastěji rozumí čas potřebný na přemístění informace nebo hmoty. Jinými slovy dopravní zpoždění je čas který uplyne od okamžiku, kdy regulátor provádí změnu zásahové veličiny do okamžiku, kdy regulovaný systém vykáže odezvu na změnu akční veličiny.

V případě této práce se dopravní zpoždění vyskytne v čase potřebném na zpracování signálu a pak v čase potřebném na dopravu teplonosné látky do otopného tělesa.

3. PRAKTICKÁ ČÁST

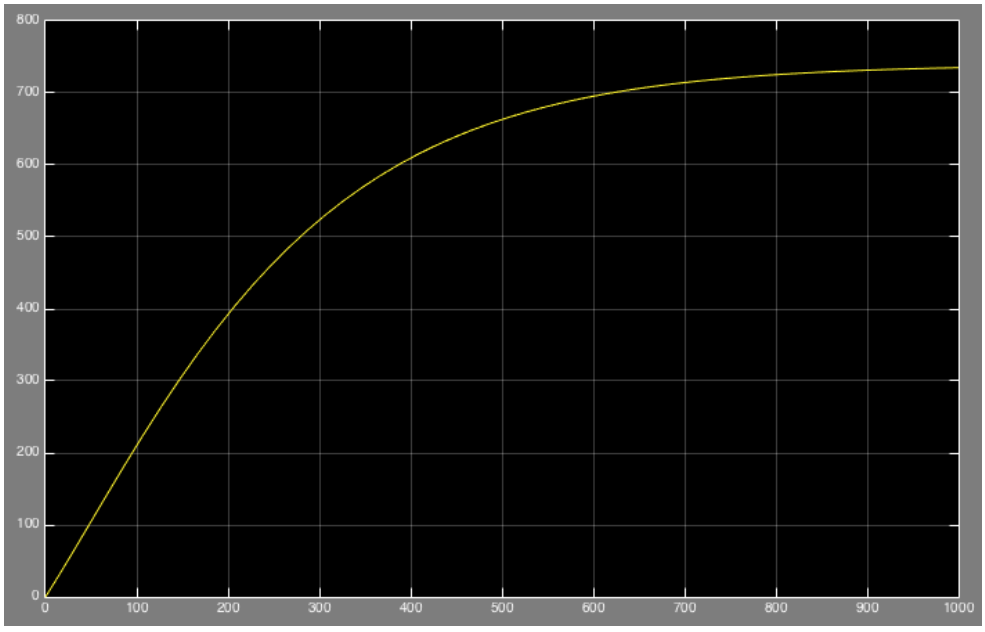
3.1. Náběh otopné plochy

Na tomto místě práce uvedu celý průběh sestavení simulačního modelu od počátečných myšlenek, které pak vedly k určitým komplikacím do konečné varianty, která umožnila pozorovat věrohodné výsledky.

Hlavním cílem a zároveň problémem bylo sestavit vhodný systém, který by správně simuloval náběh otopného tělesa, protože rovnice (15), která popisuje tepelnou bilanci otopného systému je nepoužitelná na dynamický děj. Navíc, řád této diferenciální rovnice neodpovídá předpokládanému řádu získanému na základě experimentů. S předpokladem, že modelování chladnutí nevyvolá žádné problémy, rozhodnul jsem se rozdělit celý proces simulace regulace na simulaci náběhu a simulaci chladnutí. V tomto případě pro složení celé simulace dohromady je potřeba přepínat aktivní děj v daný okamžik běhu simulace.

3.1.1. Rozbor všech podkladů

Před začátkem vypracování úkolů této práce jsem dostal od vedoucího podklady, které by mohly pomoci. V těchto podkladech byl sestavený model uvedený v [6] (viz obr. 3-3). V modelu je simulován náběh otopného tělesa.



Obr. 3-1 Výstupní graf náběhu výkonu otopného tělesa z původního modelu

Vedoucí naznačil problémy modelu:

- Nepřesnost výsledků je kolem 10 až 20 %.
- V modelu je náběh otopného tělesa nahrazen přechodem prvního řádu (viz obr. 3-1)

Jelikož jsem neměl zkušenosti se sestavením větších modelů v Simulinku, musel jsem tento model prostudovat. Rovnicí, na které jsou založeny všechny přepočty tohoto modelu je kalorimetrická rovnice (17).

$$\dot{m}_w . c_w . \Delta t = Q \tag{17}$$

kde

$\dot{m}_w$ – hmotnostní tok vody [kg.s^{-1}]

c_w – měrná tepelná kapacita vody [J.kg^{-1}.K^{-1}]

Δt – teplotní rozdíl [K]

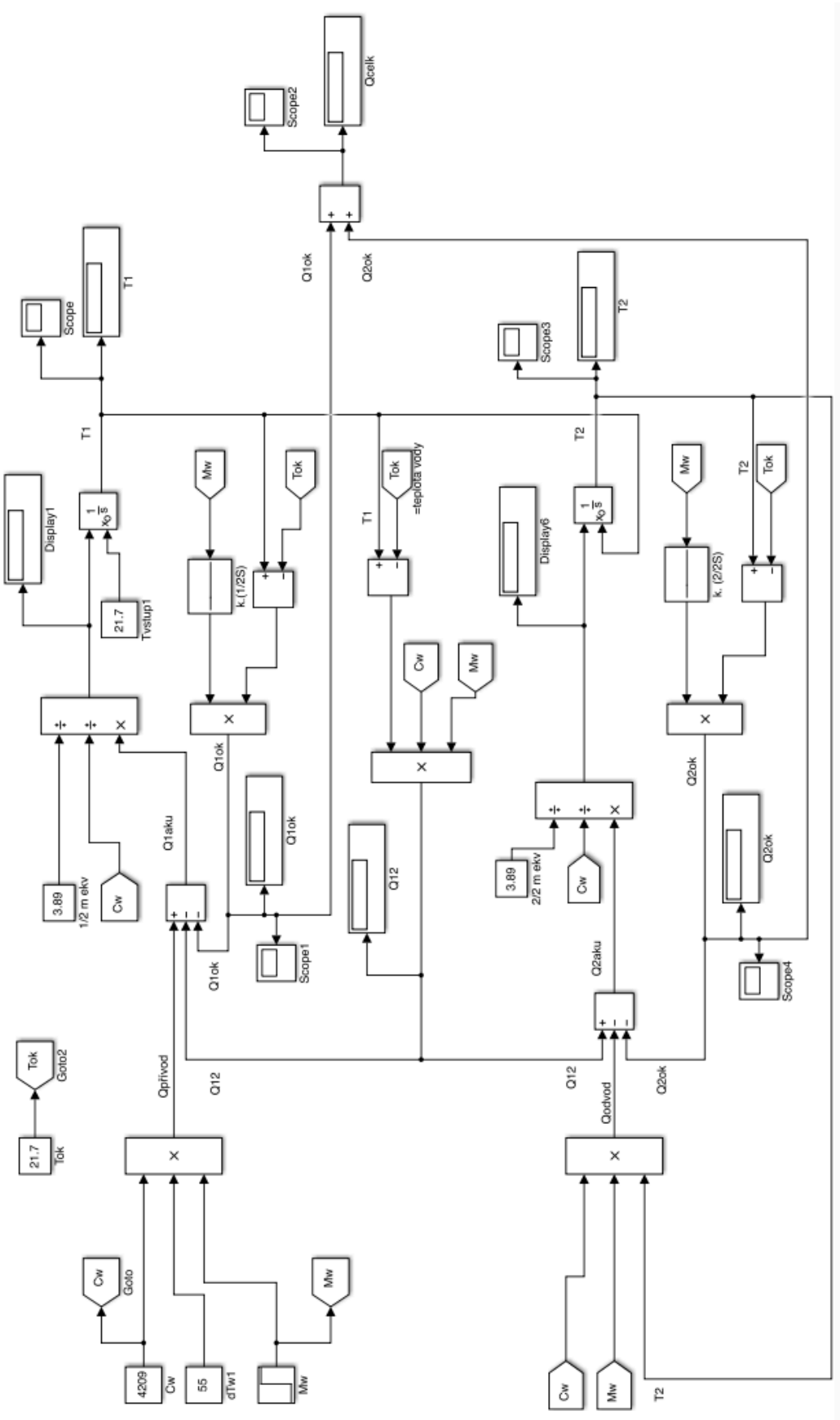
Q – tepelný výkon [W]

Důležité je, že sestavený model dělí otopné těleso na dvě poloviny jak je uvedeno na obr. 3-2. Každá polovina je simulována zvlášť, potom jsou výsledky spojeny. Toto řešení mě inspirovalo na první metodu popsanou v 3.1.2.

Obr. 3-2 Rozdělení otopného tělesa v původním modelu

Také byly v podkladech důležité výtažky z [6] a elektronické tabulky obsahující hodnoty naměřené během experimentu.

Prvním nápadem bylo rozdělit otopné těleso na více sektorů a provést podobnou simulaci jako v modelu na obr. 3-3. Myšlenka předpokládá, že po celém sektoru je teplota konstantní a těleso je sestaveno z těchto sektorů, které mezi sebou předávají teplo. Postupné zvyšovaní celkového počtu sektorů by mohlo vylepšovat model z ohledu přesnosti.

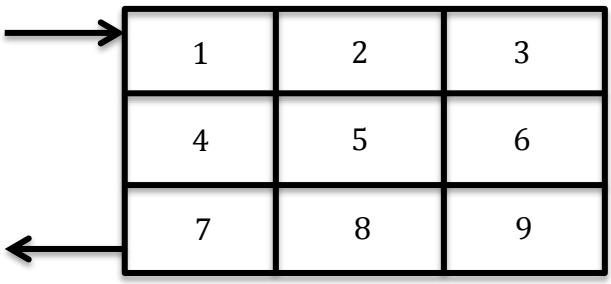


Obr. 3-3 Model otopného tělesa s použitím kalorimetrické rovnice a rozdělením na horní a dolní poloviny

3.1.2. Metoda „přestupu teploty mezi sektory“

Pokud bych byl schopen simulovat průběh změny teploty po celé ploše otopného tělesa, bylo by možné dopočítat průběh výkonu. Proto jsem se v této části zabýval jenom změnami teploty.

Pro začátek jsem rozdělil otopné těleso na 9 částí (viz obr. 3-4). Dospěl jsem ale k problému, že nebylo jednoznačně jasné, v jakém podílu se bude šířit teplo do přilehlých sektorů.



Obr. 3-4 Rozdělení otopného tělesa na devět částí

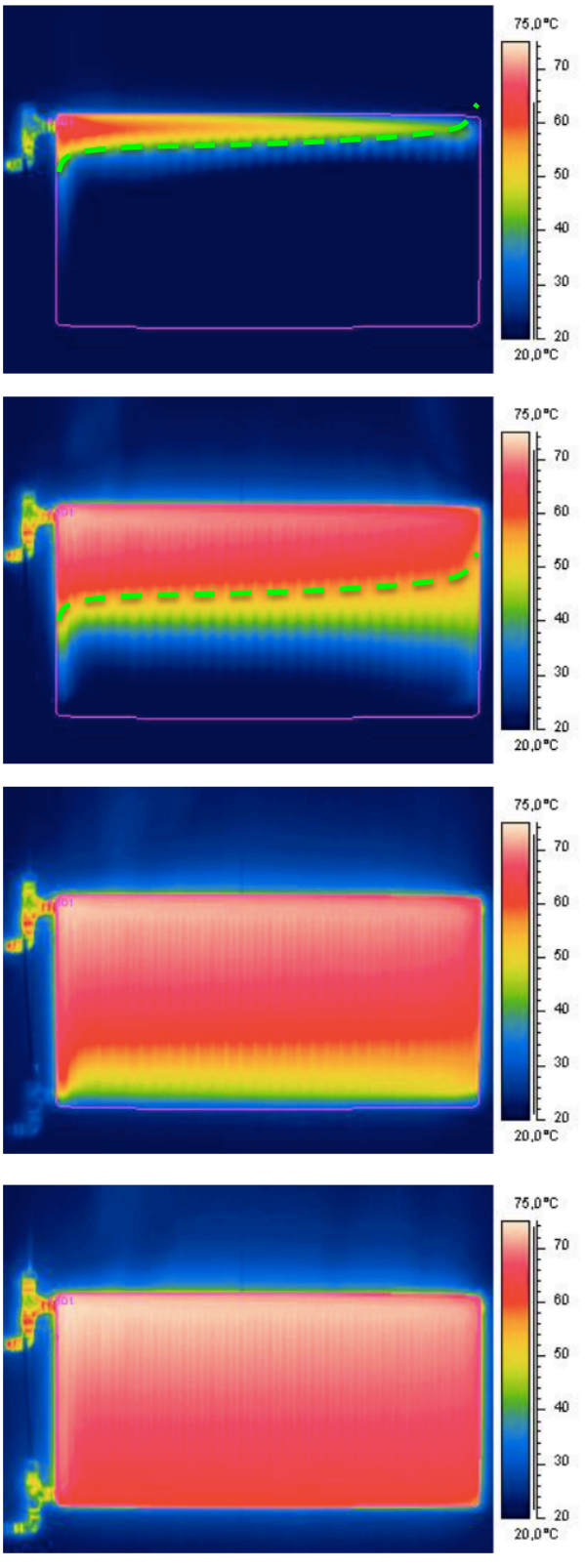
Pokusil jsem se zavést proměnnou, kterou jsem nazýval rychlost změny teploty přes čáru. Matematicky je to derivace teploty ve vodorovném nebo svislém směru. Tato rychlost by pravděpodobně měla záviset na rozdílu teplot mezi sousedními sektory otopného tělesa, na délce společné hrany sektorů a na směry přechodu (vodorovně nebo svisle). V průběhu snahy vyjádřit tuto veličinu přes klasické, běžně používané proměnné jsem k žádným výsledkům nedospěl. Navíc nebylo úplně jasné jak řešit změnu teploty přes společný bod diagonálně spojených sektorů.

Vzhledem k vyskytujícím se komplikacím spojeným s tímto způsobem řešení úlohy, bylo důležité najít další způsob simulace.

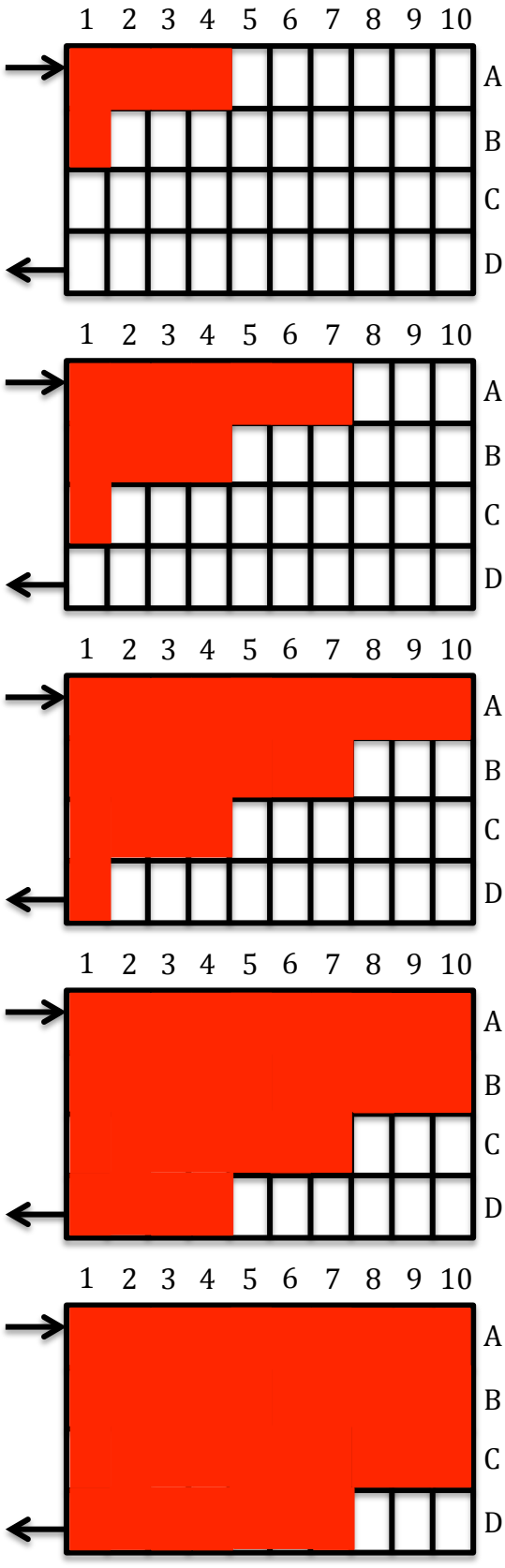
3.1.3. Metoda postupného zapínaní sektorů

Na základě problému s předchozí metodou, jsem se rozhodl v nové metodě opět využít rozdělení otopného tělesa na sektory, ale za jiných podmínek. V tomto případě jsem předpokládal:

- Otopné těleso je rozděleno celkem na 40 sektorů
- Sektory jsou uspořádány do 10 sloupců (1 až 10) a do 4 řádků (A až D)
- Po celém sektoru je teplota konstantní



Obr. 3-6 Termogram náběhu OT KL 10-500x1000, zapojení jednostranně shora - dolů s dokreslenou křivkou náběhu [6]



Obr. 3-5 Náběh modelu otopného tělesa podle metody postupného zapínaní sektorů

- Ve všech sektorech náběh teploty probíhá podle stejné funkce
- Náběh dalšího sektoru v řádku začne v okamžiku, kdy v předchozím sektoru teplota dosáhne 60 ºC
- Náběh prvního sektoru dalšího řádku začne v okamžiku, kdy začne náběh čtvrtého sektoru v předchozím řádku

Tyto předpoklady jsem zvolil po vyhodnocení obr. 3-6. Na termogram jsem dokreslil „křivku náběhu“, která prochází pod přibližně stejným úhlem téměř po celé délce náběhu. Křivka náběhu je čárkovaně zobrazena na obr. 3-6. Ke konci náběhu se postupně stává vodorovnou. Celý simulovaný průběh by vypadal jak je uvedeno na obr. 3-5.

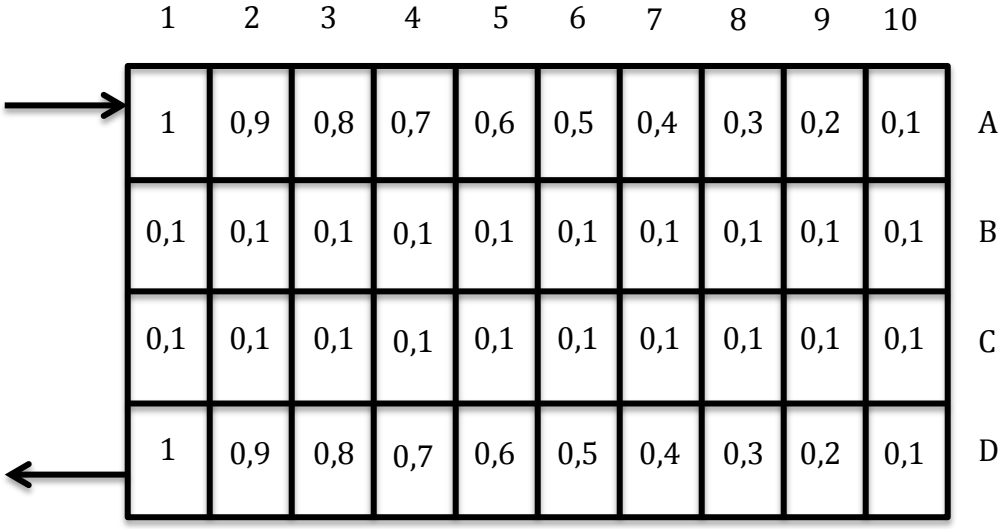
Při porovnání reálného a modelovaného náběhů, je vidět, že model není přesný, ale základní tendence držení křivky náběhu je splněna. Problémem je že ke konci by model měl vyrovnat čáru náběhu na vodorovnou, což se podle uvedených předpokladů v tomto modelu nedělo.

3.1.4. Metoda zapínaní sektorů svislým směrem

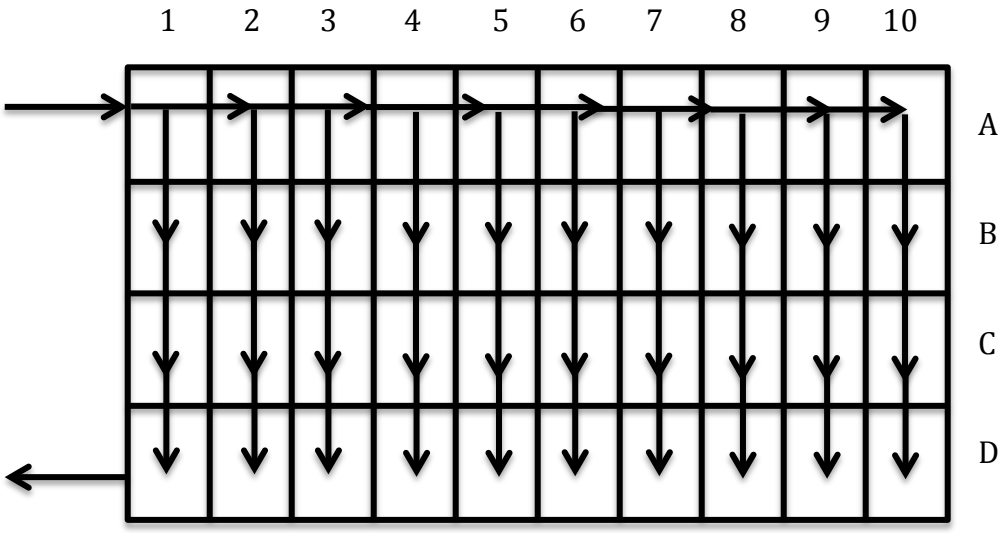
Další metoda vznikla přepracováním předchozí. Předpoklady pro tuto metodu jsou:

- Otopné těleso je rozděleno celkem na 40 sektorů
- Sektory jsou uspořádány do 10 sloupců (1 až 10) a do 4 řádků (A až D)
- Po celém sektoru je teplota konstantní
- Ve všech sektorech náběh teploty probíhá podle stejné funkce, ale s ohledem na hmotnostní tok příslušného sektoru
- Hmotnostní tok vstupní do otopného tělesa je $\dot{m}$
- Hmotnostní tok v sektorech v řádcích A a D se zmenšuje směrem od sloupce 1 ke sloupci 10 o $0{,}1.\dot{m}$ na sloupec (viz obr. 3-7)
- Hmotnostní tok v sektorech v řádcích B a C je $0{,}1.\dot{m}$ (viz obr. 3-7)
- Náběh dalšího sektoru začne v okamžiku, kdy v předchozím sektoru teplota dosáhne 60 ºC
- Směr zapínání sektorů je na obr. 3-8

Takto proložená cesta zapínaní sektorů přibližně odpovídá cestě vody uvnitř otopného tělesa. Pro použití této metody také nestačily známé vstupy. Není známa funkce, podle které by nabíhaly jednotlivé sektory otopného tělesa. Pokusy o vyjádření a nalezení teto funkce nebyly úspěšné.



Obr. 3-7 Rozložení součinitelů hmotnostních toků v sektorech otopného tělesa



Obr. 3-8 Cesta zapínání sektorů metodou svislého směru

Všechny popsané metody nebyly uplatněny v programu, protože se v každém případě vyskytovalo nadměrné množství neznámých. Například, známé teploty jsou jenom vstupní do sektoru 1A a výstupní ze sektoru 1D. Nicméně každá z uvedených metod může být implementována v programu, pokud programátorovi nabídneme vhodnou funkci náběhu.

3.1.5. Lagrangeův a Eulerův pohled na tekutinu

Po velkém množství pokusů oživit jednu z výše uvedených metod, jsem našel zajímavou informace pro tuto práci v [7]. Dále uvedu vlastní překlad nejdůležitější části pro práce.

V článku pro simulace otopného tělesa jsou použité dva modely, jeden je založen na Lagrangeovo pohledu na tekutinu, druhý je založen na Eulerovo pohledu na tekutinu. „Tyto dva modely jsou použité v daném výzkumu, aby bylo možné využít výhody obou. Například, pro zjištění teploty zpátečky, je třeba uvažovat dopravní zpoždění a model založený na Lagrangeovem pohledu může být použit ke sledování výkonu zpátečky v každém kroku simulace. Nicméně pro zjištění výkonu otopného tělesa potřebujeme mít známou střední povrchovou teplotu otopného tělesa. Je to příliš komplikované sledovat všechny elementy otopného tělesa z Lagrangeova pohledu. A proto je model založený na Eulerovo pohledu použit k výpočtu střední povrchové teploty otopného tělesa, což problém zjednoduší“ [7].

Během konzultace s vedoucím bylo domluveno nepokračovat ve výzkumu směrem uvedeným v [7]. Vedoucím byla nabídnuta alternativní cesta k řešení úlohy.

3.1.6. Simulace na základě rovnice pro výpočet výkonu otopného tělesa

Nabídnutá cesta vychází z rovnici pro výpočet výkonu otopného tělesa (18).

$$\dot{Q} = k.S_L.\Delta t \tag{18}$$

kde

$\dot{Q}$ – výkon otopného tělesa [W]

k – součinitel prostupu tepla [$W.m^{-2}.K^{-1}$]

S_L – aktivní teplosměnná plocha otopného tělesa [m^2]

Δt – rozdíl teplot (otopné těleso – prostředí) [K]

Použitím (18) vyjádřím poměr skutečného výkonu k výkonu jmenovitému.

$$\frac{\dot{Q}_{sk}}{\dot{Q}_N} = \frac{k.S_{L,sk}.\left(t_{p,sk} - t_{i,sk}\right)}{k_N.S_{L,N}.\left(t_{p,N} - t_{i,N}\right)} \tag{19}$$

kde

$\dot{Q}$ – výkon otopného tělesa [W]

k – součinitel prostupu tepla [$W.m^{-2}.K^{-1}$]

indexy

N - jmetovitý

i - interiér

S_L – aktivní teplosměnná plocha otopného tělesa [m^2] p - povrchová

t – teplota [K] sk – skutečný

Za předpokladem, že je možné vyměnit poměr součinitelů přestupu tepla teplotním exponentem n dostanu (20).

$$\frac{\dot{Q}_{sk}}{\dot{Q}_N} = \frac{S_{L,sk}}{S_{L,N}} . \left(\frac{t_{p,sk} - t_{i,sk}}{t_{p,N} - t_{i,N}} \right)^n \tag{20}$$

Dále zavedu proměnné β a b.

$$\beta = \frac{S_{L,sk}}{S_{L,N}} \tag{21}$$

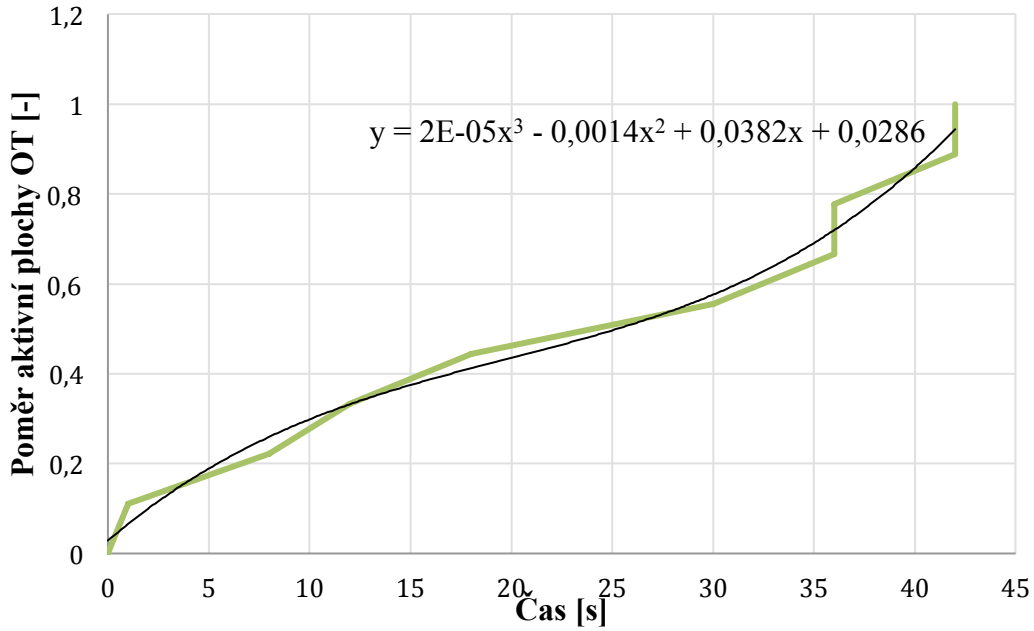
$$b = \left(\frac{t_{p,sk} - t_{i,sk}}{t_{p,N} - t_{i,N}} \right) \tag{22}$$

Dosazením rovnic (21) a (22) do rovnice (20) dostanu (23).

$$\frac{\dot{Q}_{sk}}{\dot{Q}_N} = \beta . b^n \tag{23}$$

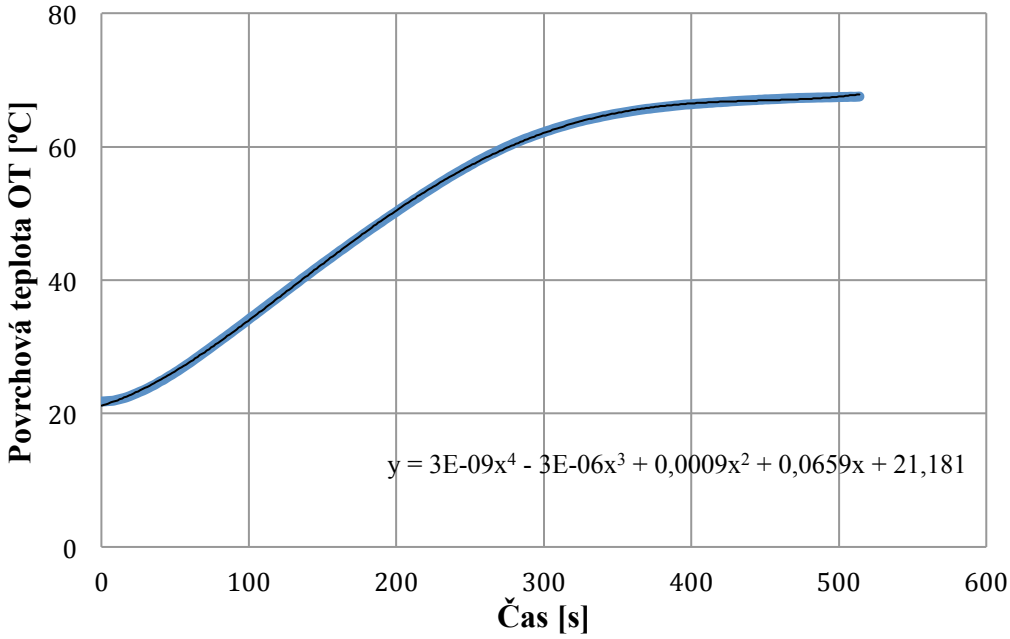
Rovnice (23) uplatnitelná nejen v ustáleném stavu otopného tělesa, ale může být použita i během dynamického děje.

Proměnná β nabývá hodnot od 0 do 1. Je to poměr aktivní teplosměnné plochy k celkové teplosměnné ploše otopného tělesa.



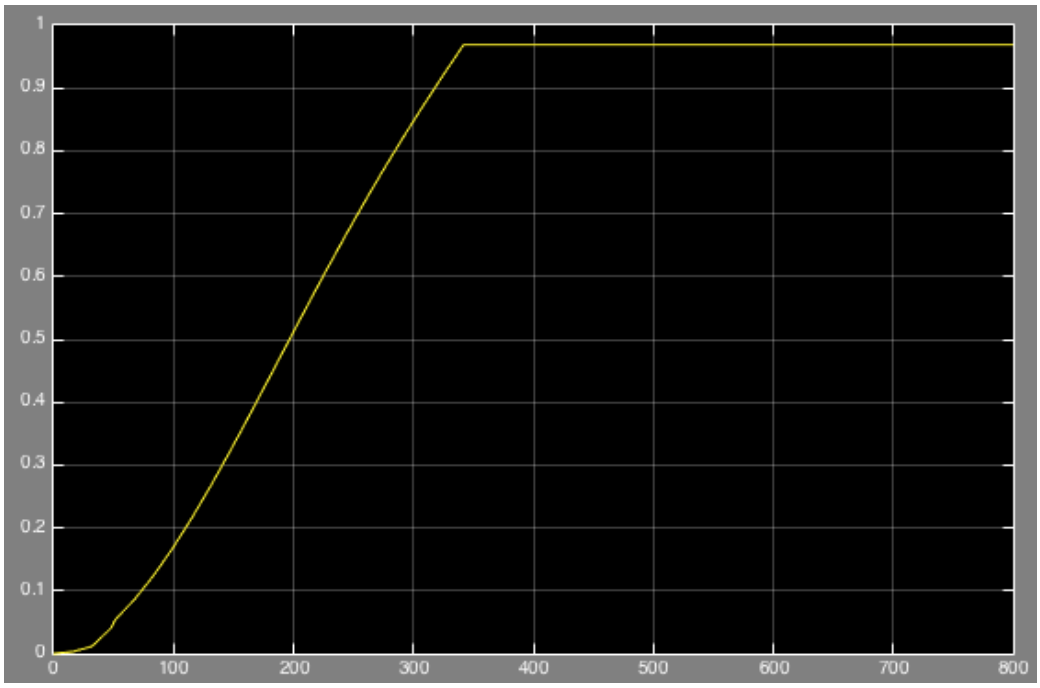
Obr. 3-9 Závislost poměru aktivní teplosměnné plochy na čase

Proměnná b se skládá ze tří konstant a jedné proměnné $t_{p,sk}$. Pro odzkoušení výše uvedených výpočtů v Simulinku jsem pomocí Excelu vyjádřil průběh β (viz obr. 3-9) a průběh $t_{p,sk}$ (viz obr. 3-10) z experimentálních hodnot.

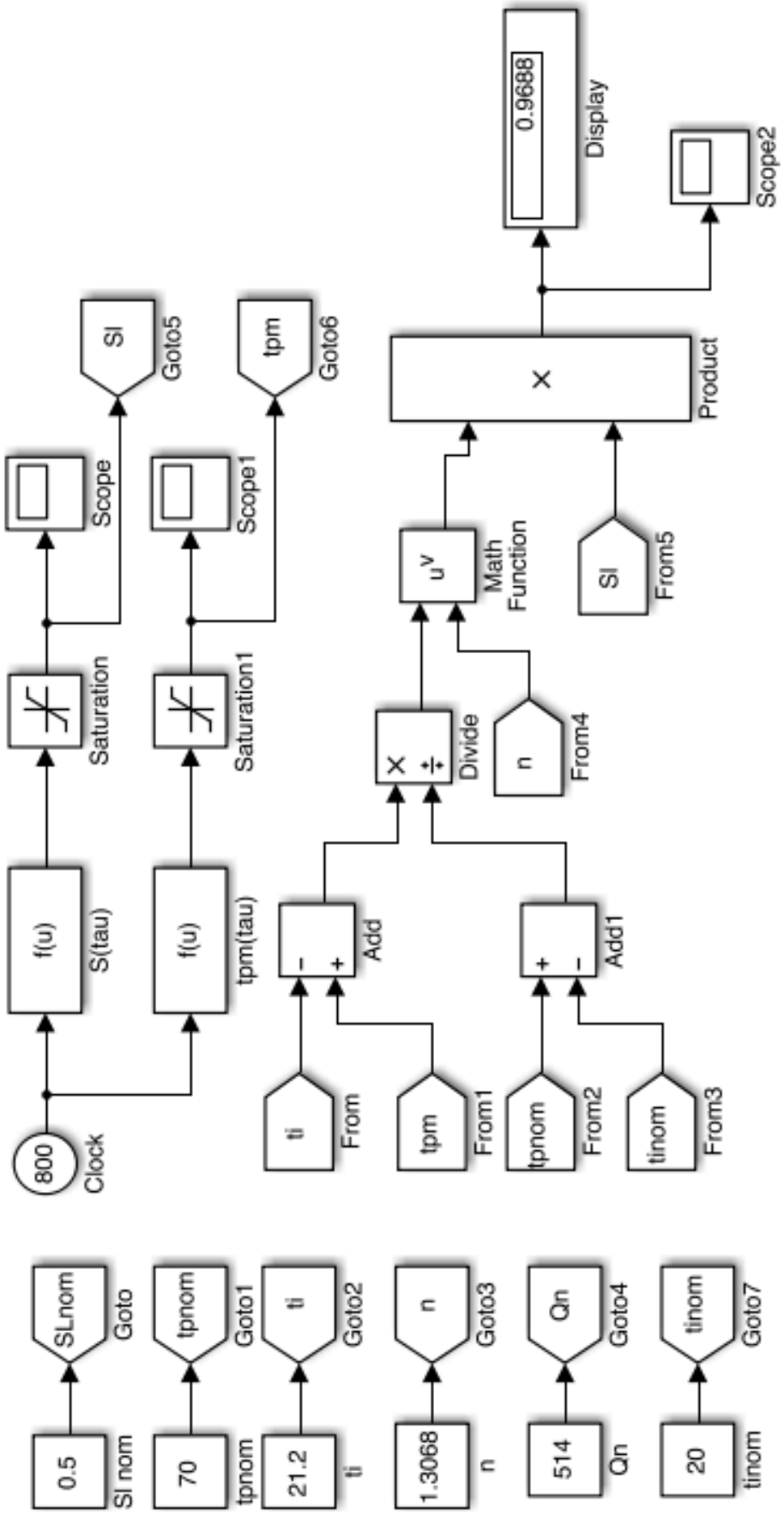


Obr. 3-10 Experimentální závislost střední povrchové teploty na čase

Na obr. 3-12 je sestavený model, který bude základem pro vyvinutí finálního modelu.



Obr. 3-11 Průběh poměru výkonů v prvním modelu



Obr. 3-12 Model pro ověření rovnice

Je vidět, že graf (viz obr. 3-11) není správný, ale maximální hodnota odpovídá reálné ustálené hodnotě. Přelomení čáry na maximální hodnotě grafu je vyvoláno tím, že v průběhu teploty je ve stejném čase stejný zlom. Do rovnice je potřeba zajistit správnější vstupy.

3.1.7. Aproximace průběhu teploty

Na konzultaci s vedoucím byla projednána cesta dalšího řešení úlohy. Bylo dohodnuto, že aproximace experimentálního průběhu teploty bude soustavou druhého řádu. Na začátek jsem aproximaci vypočítal ručně.

Podle postupu aproximace pomocí experimentálních hodnot bylo vypočítáno:

$$t_2 = 0{,}284.\, t_1 \tag{24}$$

$$\alpha = 1 = \frac{T_2}{T_1} \tag{25}$$

$$T_1 = T_2 = T \tag{26}$$

$$t_1 = 1{,}256.\,(T_1 + T_2) = 2.1{,}256.\,T = 2{,}512.\,T \tag{27}$$

$$T = \frac{t_1}{2{,}512} \tag{28}$$

$$t_1 = 234\ s$$

$$t_2 = 0{,}284.234 \approx 66\ s$$

$$y(t_2) = 0{,}14598$$

$$T = \frac{234}{2{,}512} = 93{,}15\ s$$

Jako vstupní signál do přenosové funkce uvažuji skokovou změnu teploty přívodní vody, na počátku o teplotě okolního vzduchu a poté o jmenovité teplotě vstupní vody. Výstupním signálem je náběh střední povrchové teploty otopného tělesa z teploty okolí na experimentální maximální střední povrchovou teplotu otopného tělesa. Zesílení K_0 přenosové funkce se spočítá podle vztahu (24).

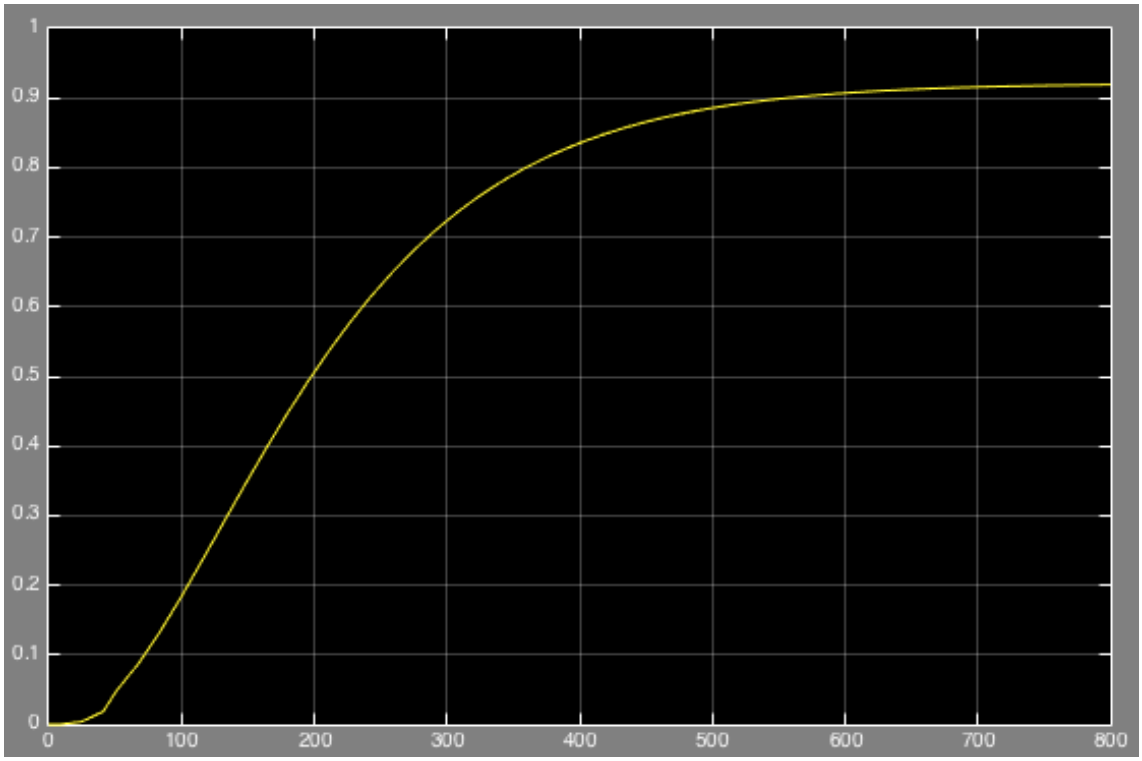
$$K_0 = \frac{\Delta y}{\Delta x} \tag{29}$$

kde

K_0 – zesílení přenosové funkce

Δx – skoková změna na vstupu

Δy – změna výstupu z přechodové funkce vyvolaná skokovou změnou na vstupu



Obr. 3-13 Průběh poměrného výkonů v modelu s pevným přenosem

Z experimentálních dat dostaneme:

$$\Delta y = y_{max} - y_{min} = t_{p,max} - t_i \tag{30}$$

$$\Delta y = 68{,}16 - 21{,}2 == 46{,}96\ °C$$

kde

y_{max} – ustálená hodnota výstupu z přechodové funkce

y_{min} – hodnota výstupu před skokovou změnou vstupu

$t_{p,max}$ – ustálená hodnota střední povrchové teploty po náběhu

t_i – teplota okolí

$$\Delta x = x_{max} - x_{min} = t_{w1} - t_i \tag{31}$$

$$\Delta x = 75 - 21{,}2 = 53{,}8\ °C$$

kde

x_{max} – hodnota vstupu do skokové změny

x_{min} – hodnota vstupu po skokové změně

t_{w1} – teplota přiváděné vody

t_i – teplota okolí

$$K_0 = \frac{46{,}96}{53{,}8} = 0{,}8729$$

Dosažením T a K_0 do rovnice (8) dostaneme přenos aproximované funkce druhého řádu.

$$G(s) = \frac{0{,}8729}{(93{,}15.s + 1)^2} = \frac{0{,}8729}{8676{,}9225.s^2 + 186{,}3.s + 1}$$

Tímto přenosem v modelu může být nahrazena experimentální závislost povrchové teploty na čase. Nově sestavený model je na obr. 3-14.

Ve výstupním grafu průběhu poměrného výkonu (viz obr. 3-13) odpovídá tvar přechodového jevu tvaru reálného průběhu.

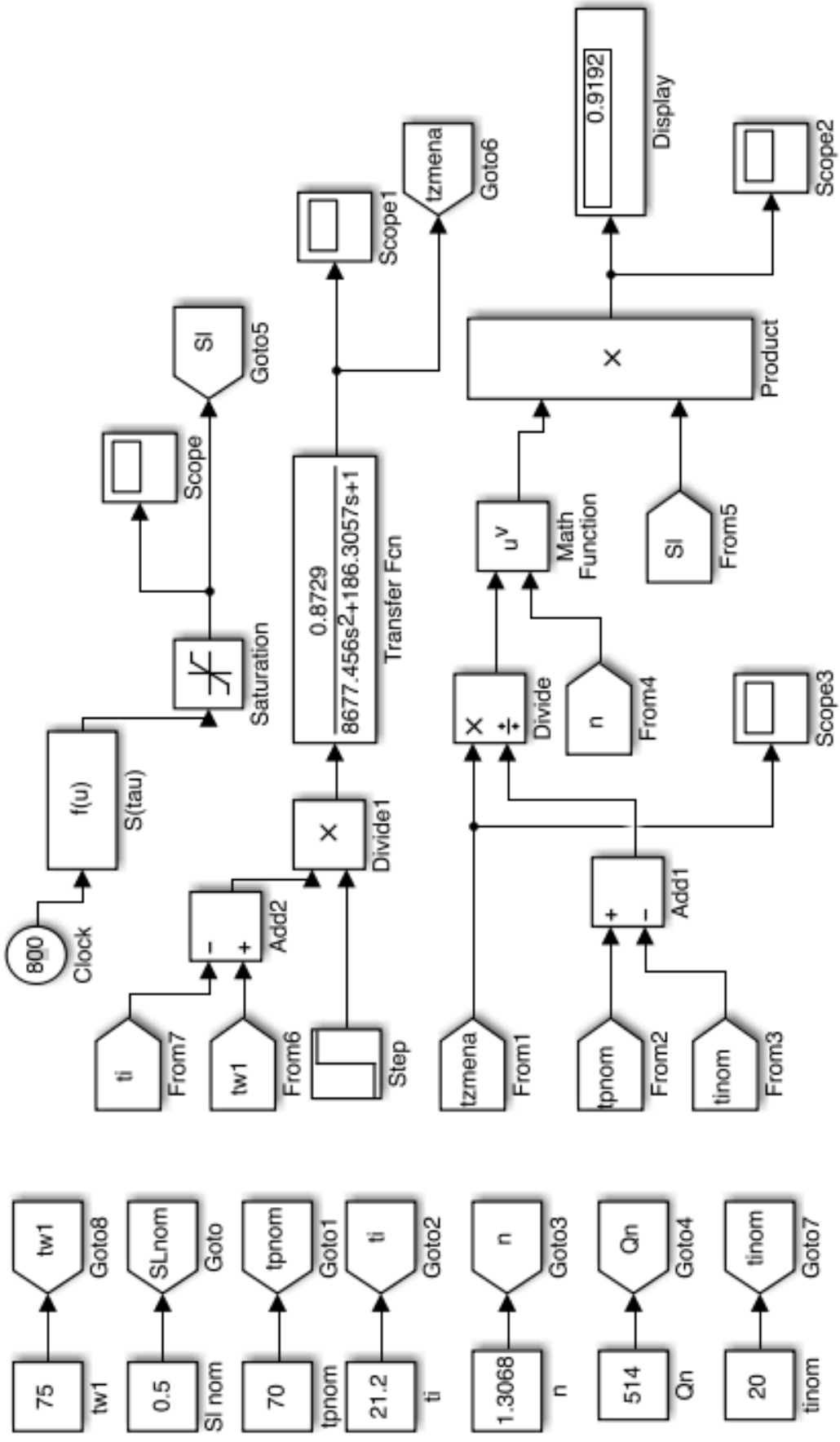
3.1.8. Realizace flexibilního přenosu aproximované funkce

Předchozí model umožňoval použití pevně stanoveného přenosu funkce. Pro flexibilnější řešení je nutné zahrnout celý proces aproximace do modelu a pak vypočtené hodnoty zesílení a časových konstant dosadit do přenosové funkce.

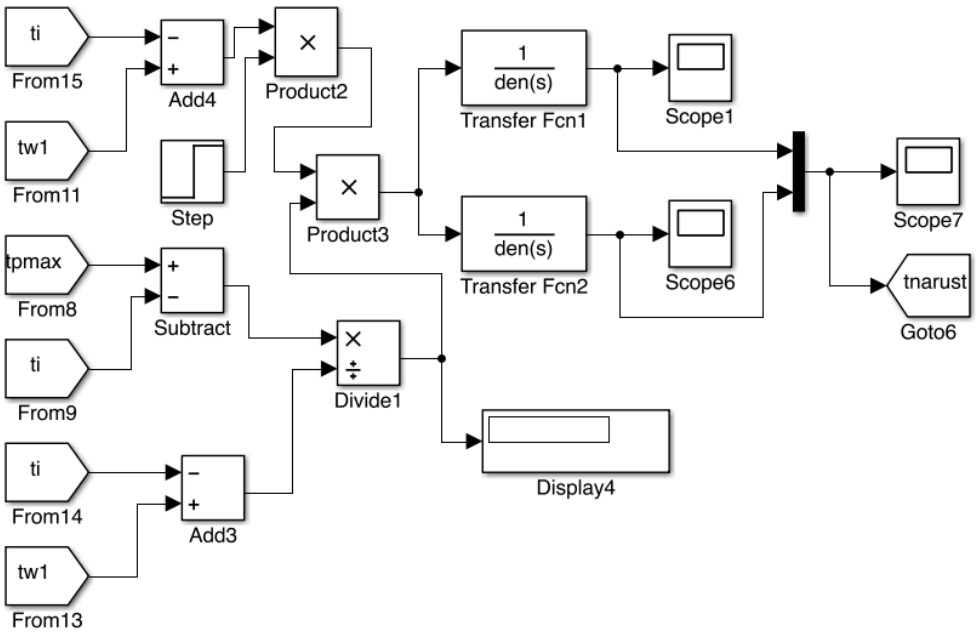
Jediná nalezená možnost vložení proměnných do bloku přenosu je pomocí proměnných uložených v pracovním prostředí MATLABu. To znamená že postup celé simulace musí být následující:

1. Zadání vstupních hodnot do programu
2. Provedení aproximace
3. Uložení výstupu aproximace do pracovního prostředí MATLABu
4. Simulace na základě vstupů z pracovního prostředí

Pokud na začátku simulace nebudou existovat nutné vstupy v pracovním prostředí, simulace se ukončí chybou. To vede k nevhodné úpravě modelu – k rozdělení na dva programy. Do prvního se zahrnou body postupu 1 až 3 (viz obr. 3-17), ve druhém bude samotná simulace (viz obr. 3-15).

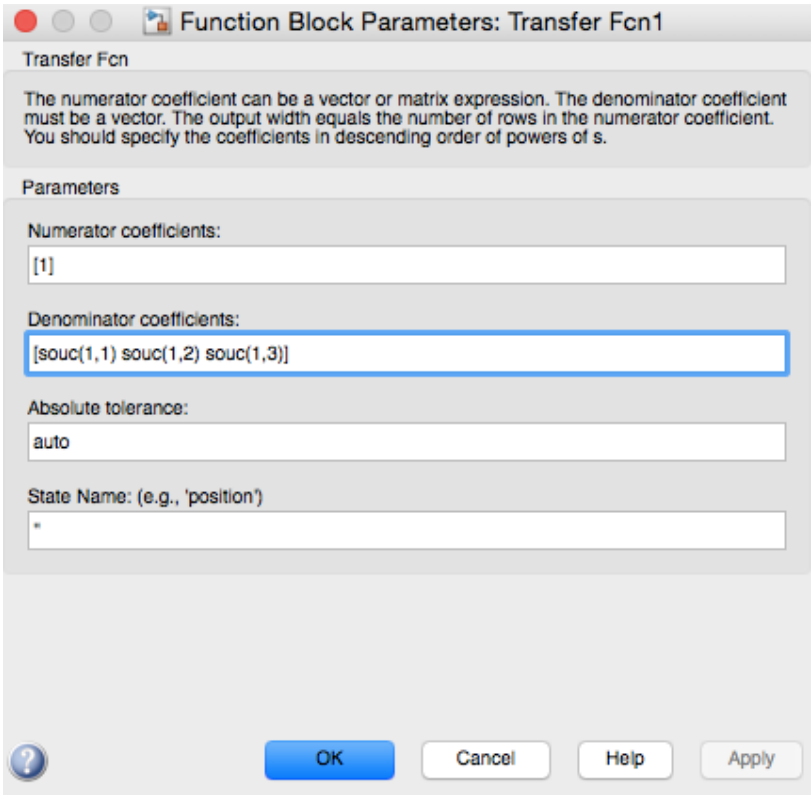


Obr. 3-14 Simulační model s pevným přechodem

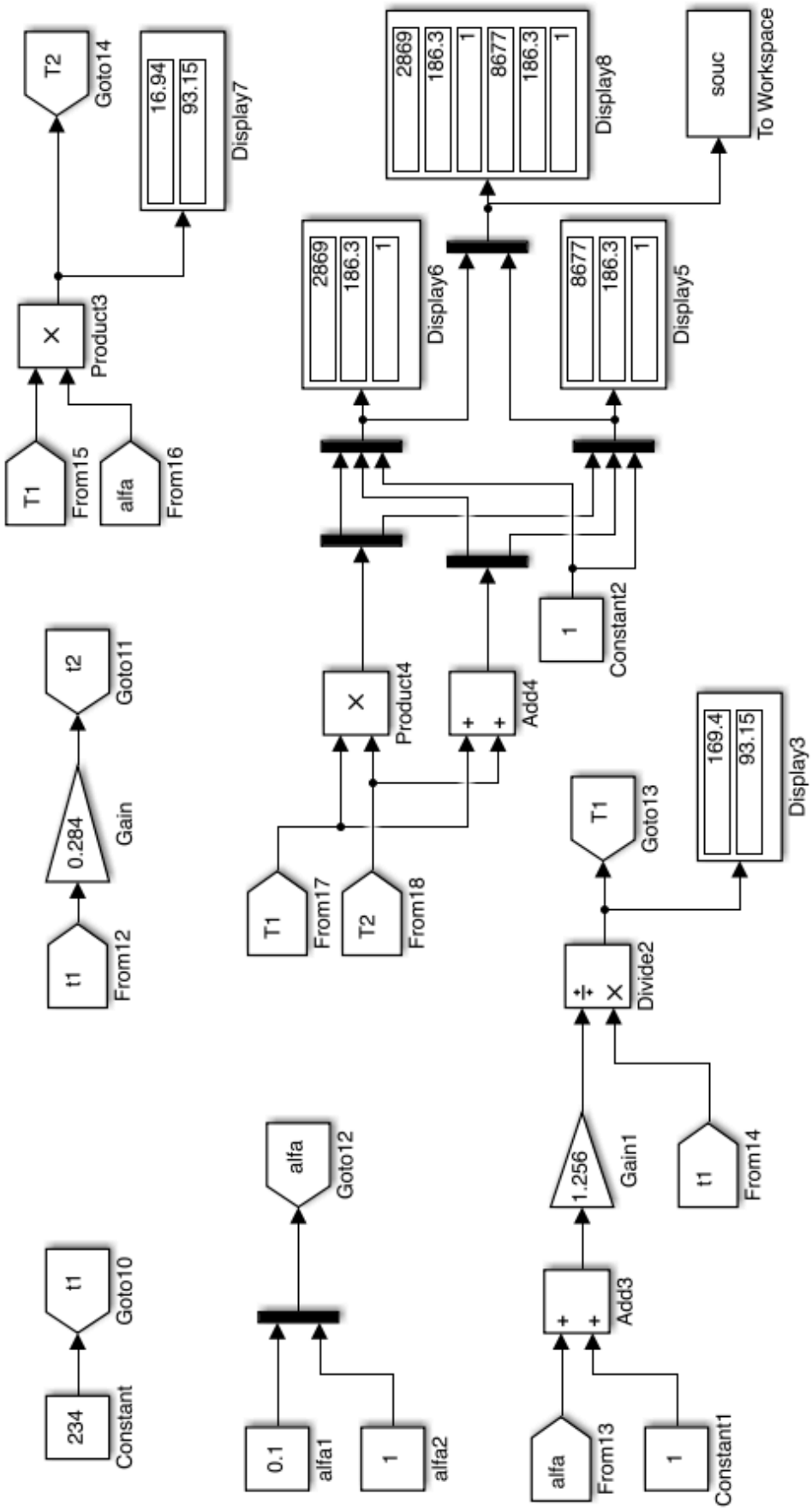


Obr. 3-15 Použití přenosových funkcí s proměnnými součiniteli

Zároveň jsem zavedl v této etapě vypracování modelu výpočet dvou případů aproximace. Model vypočítává dvě skupiny součinitelů pro přenosovou funkci, jedna skupina je pro $\alpha = 0{,}1$ pro přenosovou funkci se dvěma různými časovými konstantami, druhá je pro $\alpha = 1$ pro přenosovou funkci s jednou časovou konstantou.



Obr. 3-16 Nastavení proměnných součinitelů v bloku přenosové funkce

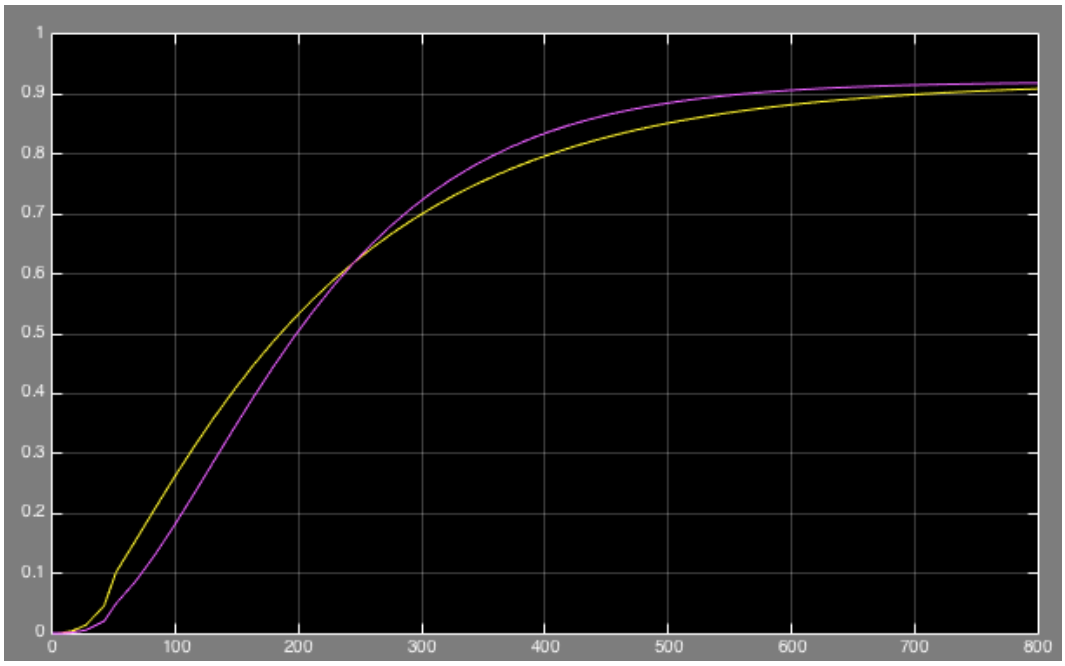


Obr. 3-17 Aproximace funkce

Uvedené řešení dává stejné výsledky, jako předchozí, navíc má dva kanály (dva případy aproximace, viz obr. 3-18) a podporuje flexibilnější aproximaci na základě vstupních dat, na rozdíl od předchozí verze, která měla pevně danou přenosovou funkci. Jak je napsáno výše hlavní nevýhodou této verze modelu je rozdělení na dva soubory a nutnost spuštění programu pro výpočet aproximace před spuštěním samotné simulace.

3.1.9. Jednosouborový model s flexibilním přenosem

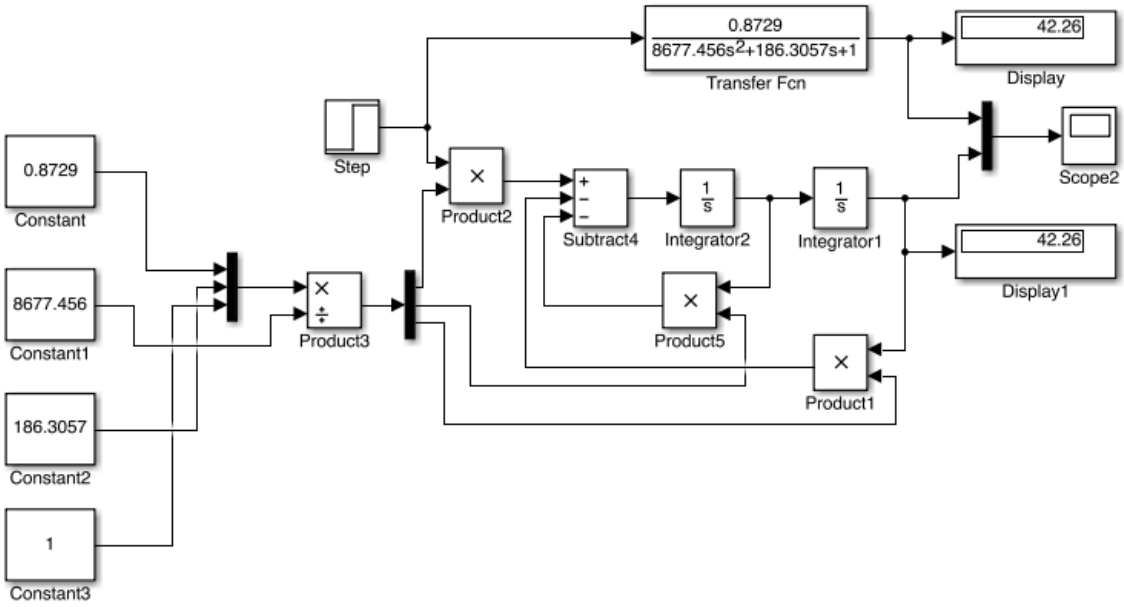
Sloučení celého modelu do jednoho souboru potřebovalo vyměnit bloky přenosové funkce za určité konstrukce, které by prováděly stejné výpočty a zároveň by měly možnost připojení vstupu s hodnotami potřebných součinitelů. Jedna z možností je nahradit bloky přenosové funkce konstrukcí složené z integrátorů (viz obr. 3-19, dolní větev).



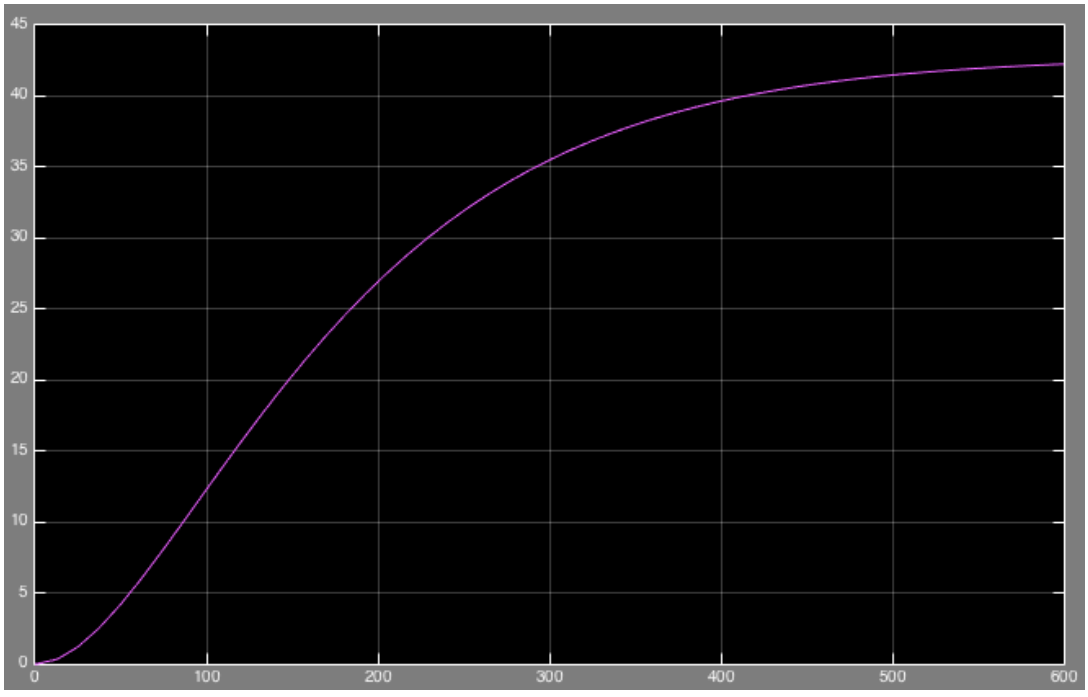
Obr. 3-18 Výstupní graf se dvěma kanály

Daná konstrukce je založena na tom, že integrátor je blokem přenosové funkce s přenosem $G(s) = \frac{1}{s}$. Sestavením a spojením integrátorů mezi sebou a s konstantami je možné dosáhnout stejných výsledků, jako u přenosových funkcí. Pro ověření funkčnosti jsem sestavil porovnávací model, ve kterém je nahoře zapojená přenosová funkce a dole je zapojena náhradní konstrukce z integrátorů. Výsledky výpočtů každé varianty jsou zobrazené v blocích *Display*. Celkový průběh přechodů je složen do dvou kanálů

jednoho signálu a je zobrazen na obr. 3-20. Jde o dvě absolutně stejné křivky, proto není vidět na grafu dvě různé křivky.



Obr. 3-19 Model porovnávající přenosovou funkci a strukturu s integrátory



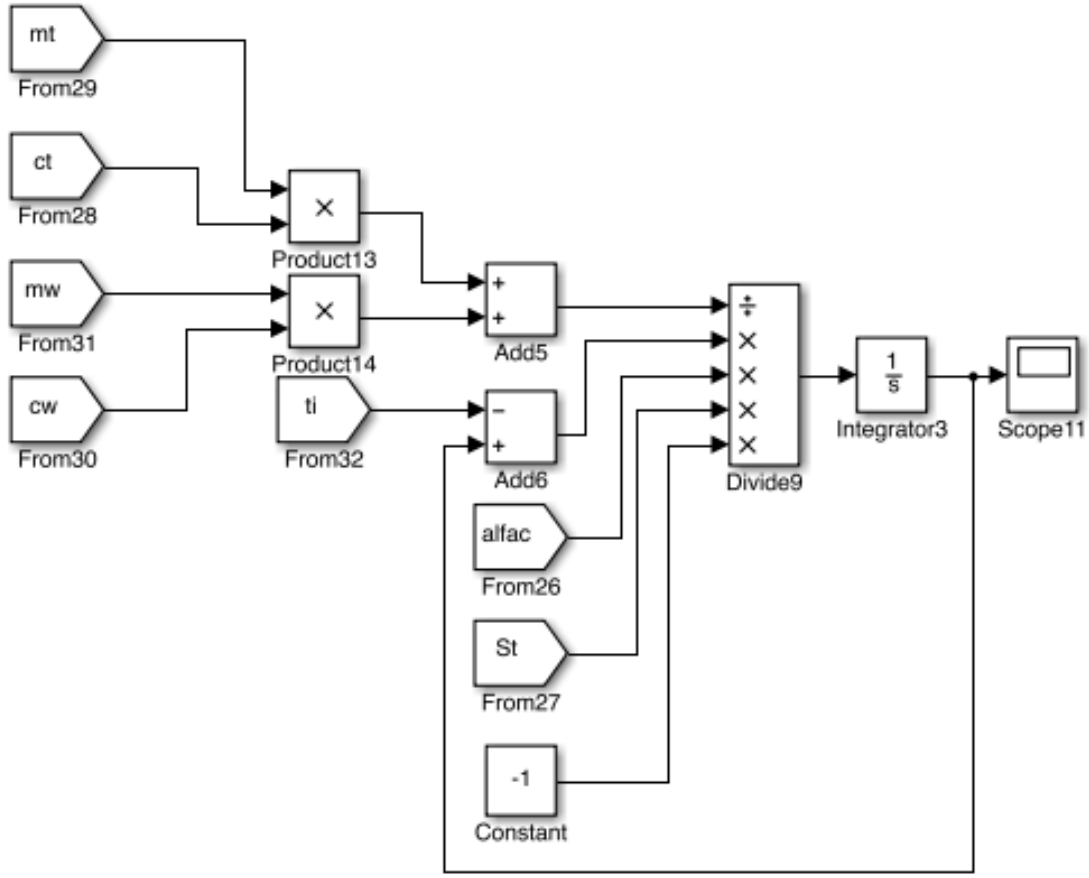
Obr. 3-20 Výsledný dvoukanálový graf porovnávacího modelu

V této etapě práce jsem ukončil práci na náběhu otopné plochy.

3.2. Chladnutí otopného tělesa

Chladnutí otopného tělesa je jednodušším jevem, než ohřev, ale i chladnutí je v modelu popsané s určitými omezeními nebo předpoklady.

V kapitole 2.3.1. je krátký rozbor daného procesu. V Simulinku byl sestaven model chladnutí (viz obr. 3-21).

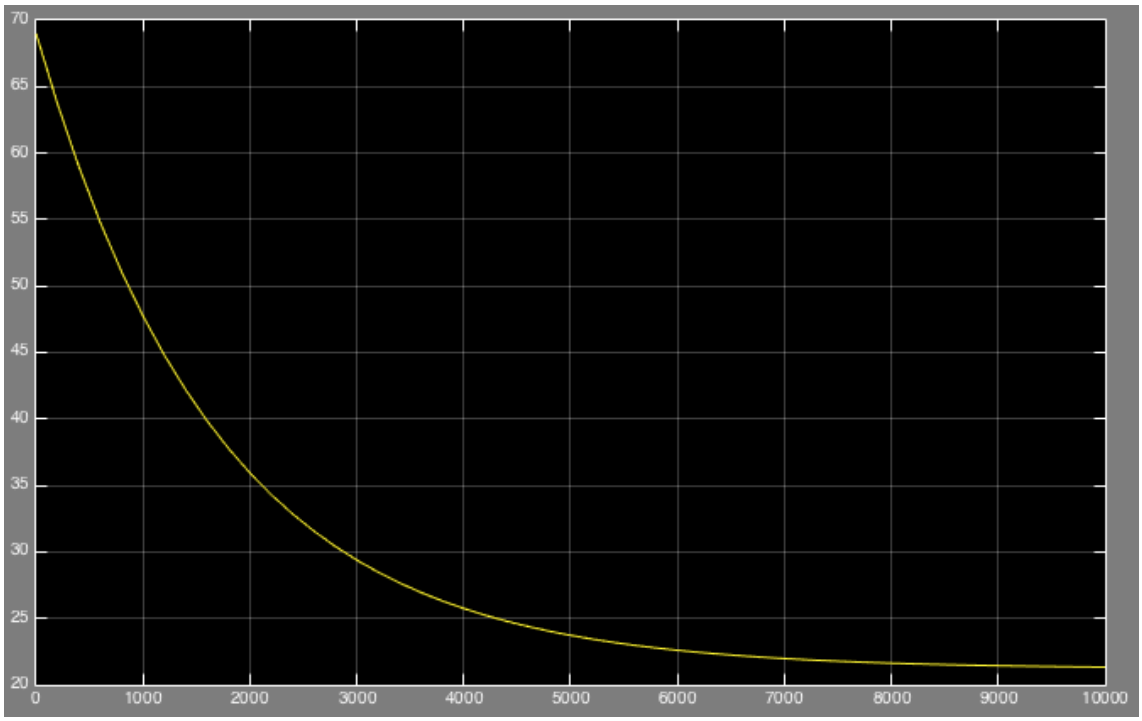


Obr. 3-21 Model chladnutí otopného tělesa

Na obr. 3-22 je simulovaný průběh teploty, který je výstupem z modelu chladnutí otopného tělesa. Největší nepřesností tohoto modelu je odhadovaný součinitel přestupu tepla u teplosměnné plochy.

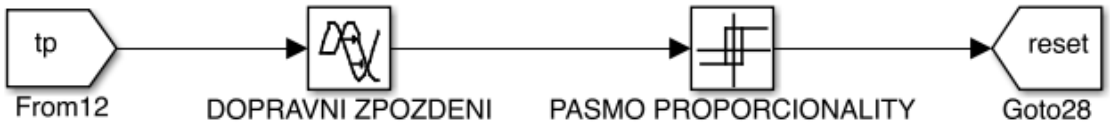
3.3. Regulace otopného tělesa

Nejčastější možností regulace je osazení tělesa termostatickým regulačním ventilem s hlavicí. Je to P regulátor, ale v tomto případě se bude chovat jako nespojitý dvoupolohový regulátor.



Obr. 3-22 Výstupní graf z modelu chladnutí otopného tělesa

Pro simulace regulátoru jsem použil blok *Relay*, což je dvoupolohový regulátor s hysterezí. V systému se vyskytne dopravní zpoždění, které je simulováno blokem *Transport Delay*. Doba dopravního zpoždění je odhadována. Na základě zpožděné hodnoty teploty blok *Relay* generuje logický signál, který řídí celou simulaci a který jsem pojmenoval *reset*. Na základě tohoto signálu je rozhodováno, jestli v daném okamžiku probíhá ohřev otopné plochy nebo její chladnutí. Větev generace řídicího signálu je na obr. 3-23.



Obr. 3-23 Větev generace řídicího signálu

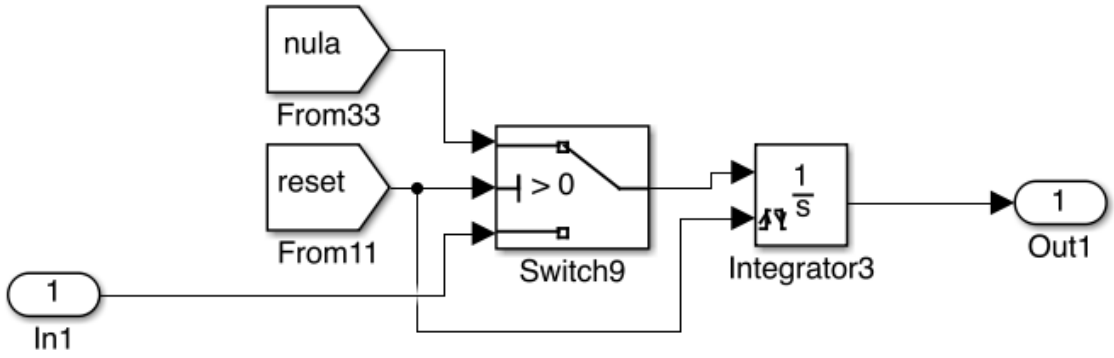
3.4. Spojení náběhu, chladnutí, regulace otopného tělesa

Pro spojení všech výše uvedených procesů je potřeba zajistit následující body:

- Během simulace náběhu, musí být zastavena simulace chladnutí
- Během simulace chladnutí, musí být zastavena simulace náběhu

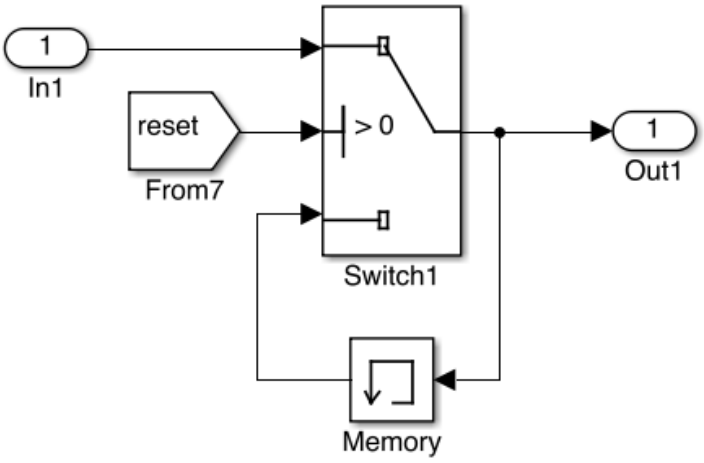
- Dosažená teplota na konci simulace náběhu musí být použita v simulaci chladnutí jako konstantní počáteční podmínka
- Dosažená teplota na konci simulace chladnutí musí být použita v simulaci náběhu jako konstantní počáteční podmínka
- Před začátkem simulace chladnutí nebo ohřevu musejí být příslušné integrátory vynulovány

Vypínání simulace je realizováno pomocí bloků *Switch*, které odpojují systém výpočtů vstupující do integrátoru z hlavního systému na základě signálu *reset*. Zároveň se provádí vynulování integrátoru řídicím signálem. Konstrukce je zobrazena na obr. 3-24.



Obr. 3-24 Konstrukce vypínání simulace

Pro zajištění správných počátečních podmínek je potřeba udržovat některé signály na dosažené veličině. Pro tyto účely jsem sestavil konstrukci, kterou nazývám *Hold*. Umožňuje udržovat hodnotu signálu na určité úrovní, pokud řídicí veličina splňuje podmínku uvedenou v bloku *Switch*.

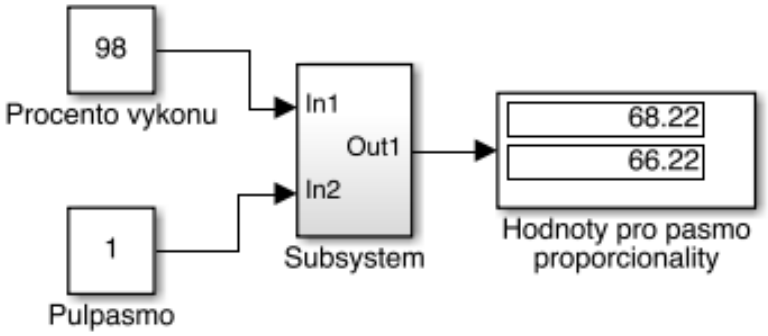


Obr. 3-25 Konstrukce Hold

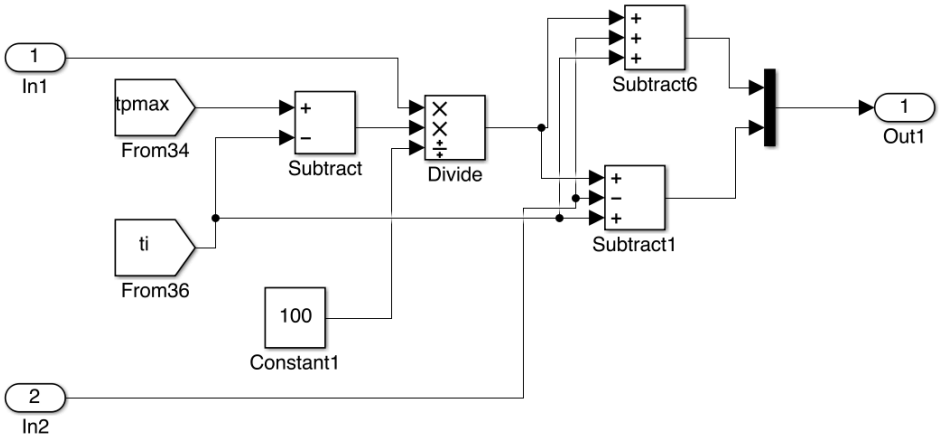
Pokud řídicí signál *reset* bude splňovat podmínku bloku *Switch1*, kterou je podmínka větší, než nula, bude se pozorovat stejný signál na výstupu, jako na vstupním bloku *In1*. V okamžiku, kdy *reset* přestane být větším, než nula, *Switch1* se přepne na druhý vstup, do kterého vstupuje signál o velikosti výstupu v předchozím kroku simulace (viz obr. 3-25).

3.5. Finální model

Finální model vznikl spojením všeho výše uvedeného dohromady s drobnými úpravami. Aby byl přehledný, velké části modelu byly zabaleny do podsystému. Pak jsem ještě přidal malý výpočtový mechanismus, pomocí kterého lze určit potřebná nastavení bloku *Relay*, který určuje pásmo proporcionality (viz obr. 3-26 a obr. 3-27).



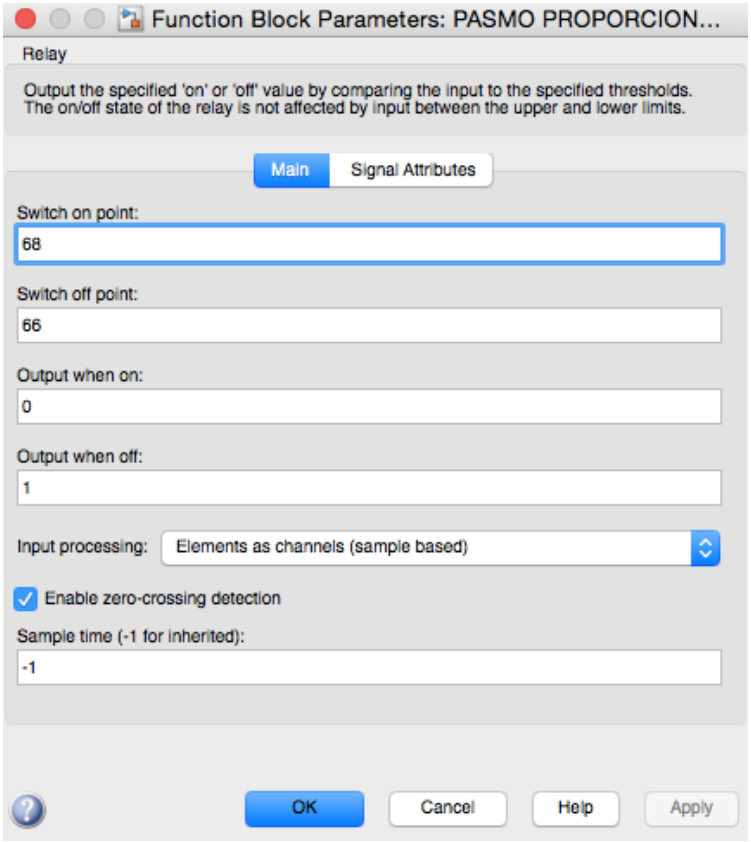
Obr. 3-26 Mechanismus pro výpočet nastavení pásma proporcionality



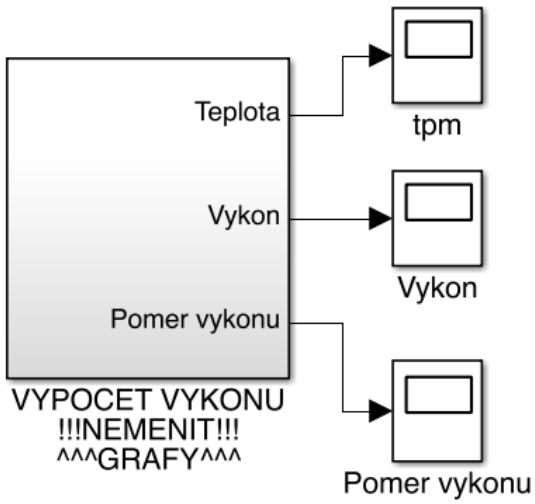
Obr. 3-27 Podsystém mechanismu pro výpočet nastavení pásma proporcionality

Pro výpočet je potřeba do bloku *Procento vykonu* zadat potřebné procento výkonu (max. 98 %) a do bloku *Pulpasmo* zadat polovinu hodnoty pásma proporcionality. Pak se po spuštění simulace v bloku *Hodnoty pro pasmo proporcionality* objeví dvě čísla,

která se dávají do nastavení bloku *PASMO PROPORCIONALITY* se zaokrouhlením (viz obr. 3-28).



Obr. 3-28 Nastavení bloku PASMO PROPORCIONALITY



Obr. 3-29 Bloky pro pozorování výstupních grafů

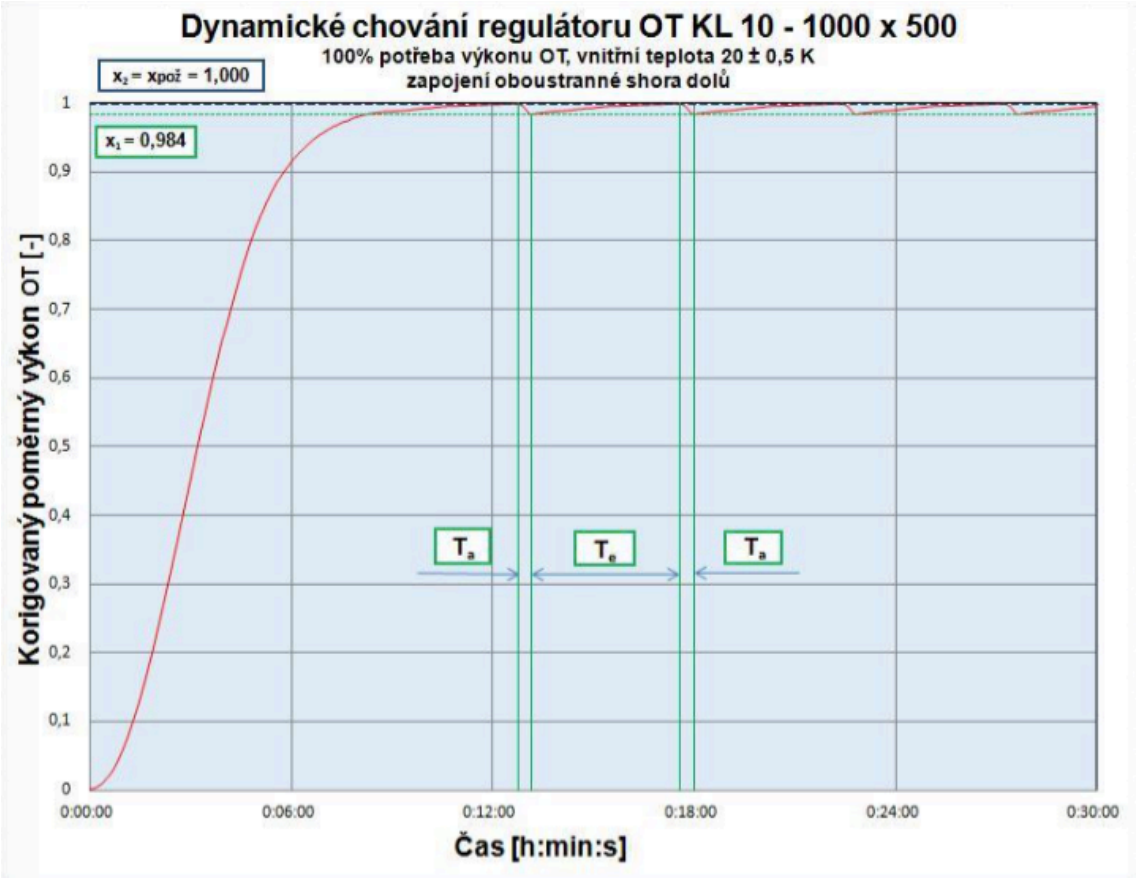
Po nastavení bloku *PASMO PROPORCIONALITY* se musejí nastavit ostatní vstupní hodnoty, které se nacházejí v podsystémech s poznámkou *##MENIT##*. Po nastavení

všech vstupních dat se může spustit simulace. Za výstupy z modelu jsou považovány grafy střední povrchové teploty, skutečného výkonu a poměru výkonů, které jsou k nalezení v příslušných blocích (viz obr. 3-29).

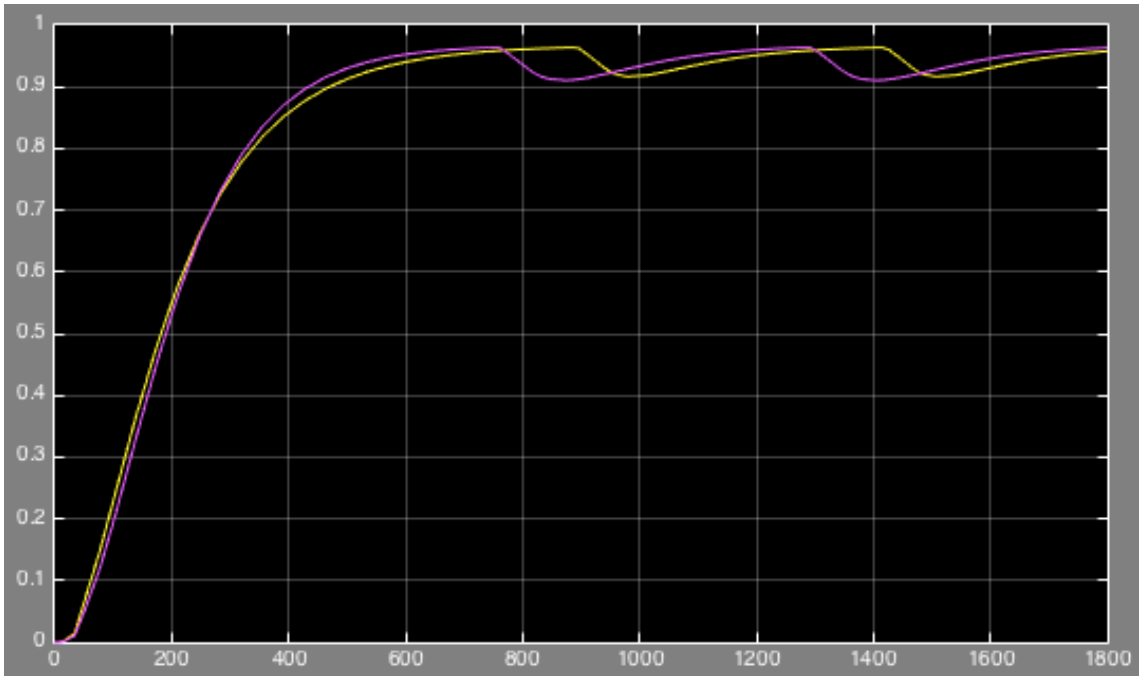
3.6. Porovnání grafických výstupů z experimentu a ze simulačního modelu

V této kapitole budu porovnávat grafické výstupy z experimentu z [6] s grafickými výstupy ze sestaveného simulačního modelu. Porovnání ale bude jenom orientační, protože v [6] jsou uvedené grafy pro oboustranné zapojení otopného tělesa a v této práci bylo řešeno simulování jednostranně zapojeného otopného tělesa. Také nepřesnost porovnání pro případ 100% výkonu je neschopnost simulačního modelu vypočítávat výkony větší, než 98 %. Další nepřesnost vnáší to, že v grafech [6] je uveden korigovaný poměrný výkon, ze simulace vystupuje poměrný výkon nekorigovaný.

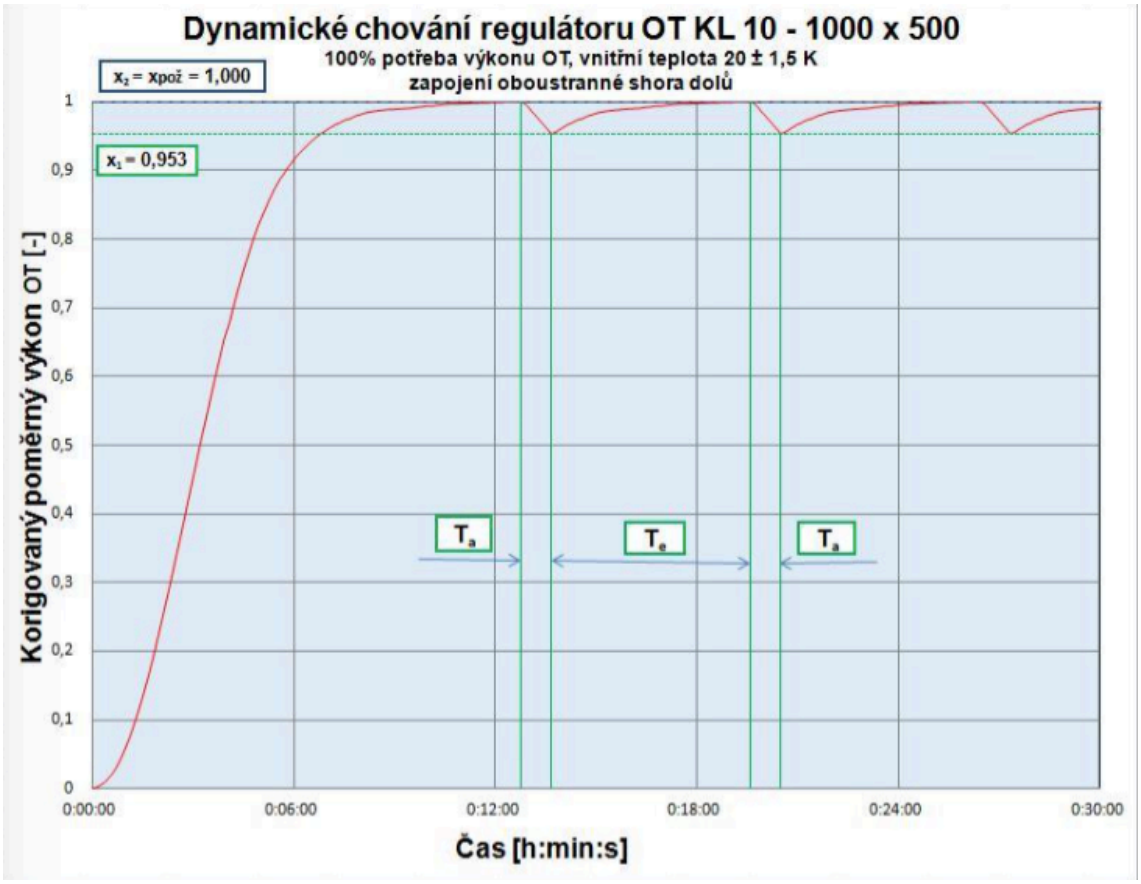
Z porovnání grafů (viz obr. 3-30 až obr. 3-41) je vidět, že model vykazuje větší setrvačnost, než reálné otopné těleso. Dalším zřejmě viditelným rozdílem je to, že poměrný výkon z modelu je vždy o 0,05 až 0,1 menší, než je poměrný výkon reálného tělesa. O příčinách rozdílů bude pojednáno v závěru.



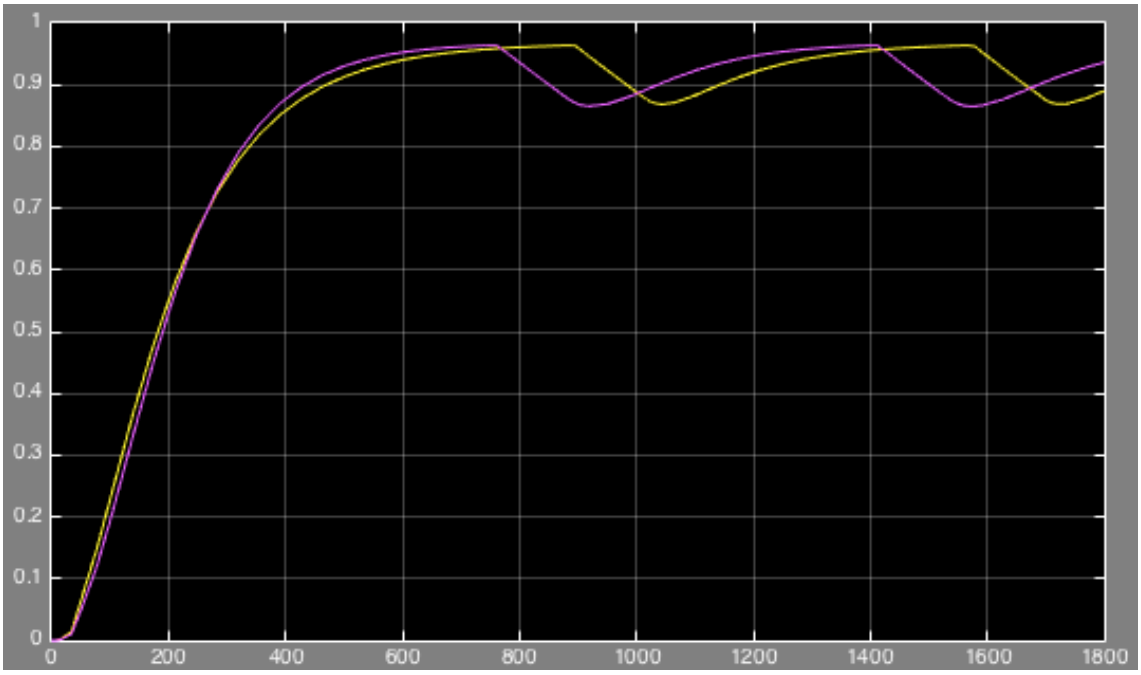
Obr. *3-30 Průběh dynamického chování nespojitého regulátoru ve spojení s deskovým otopným tělesem KL 10 - 1000x500, vnitřní teplota 20 ± 0,5 K* [6]



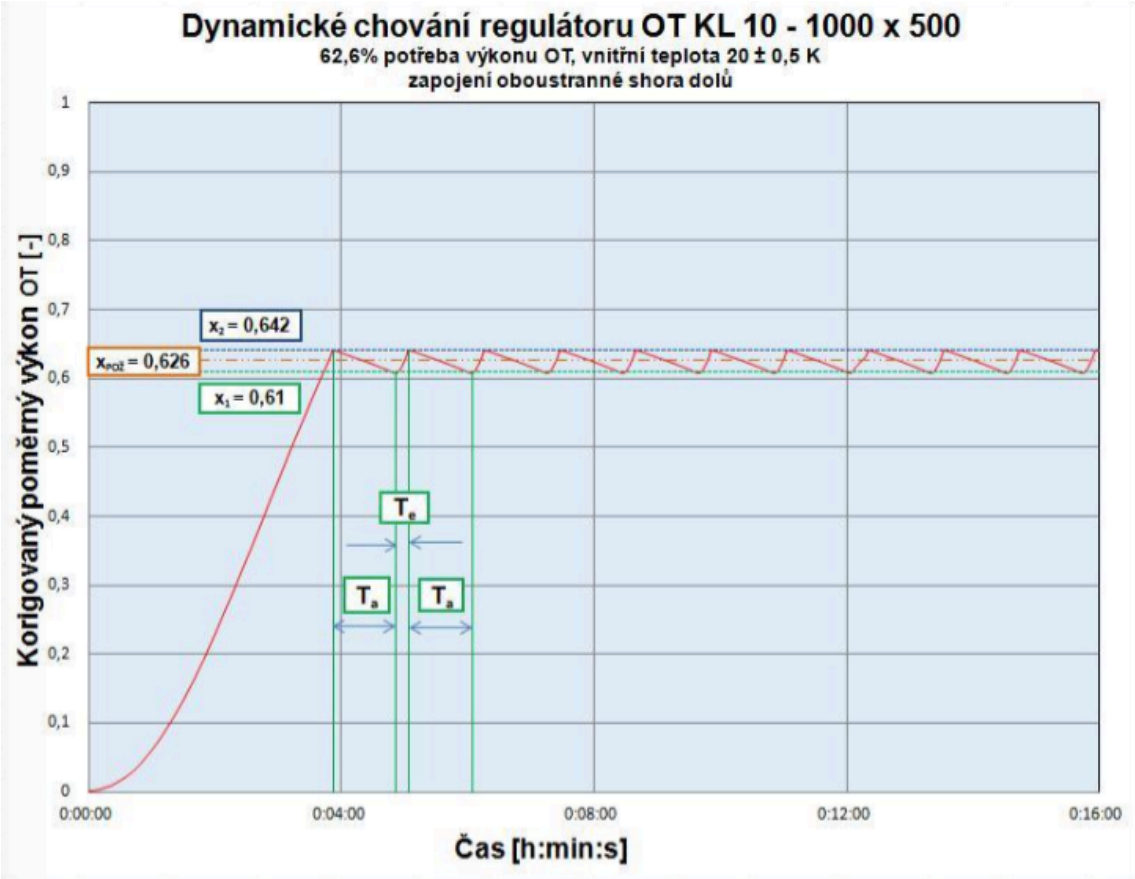
Obr. 3-31 Průběh hodnoty poměrného výkonu ze simulačního modelu, výkon 98 %, pásmo proporcionality 1 K



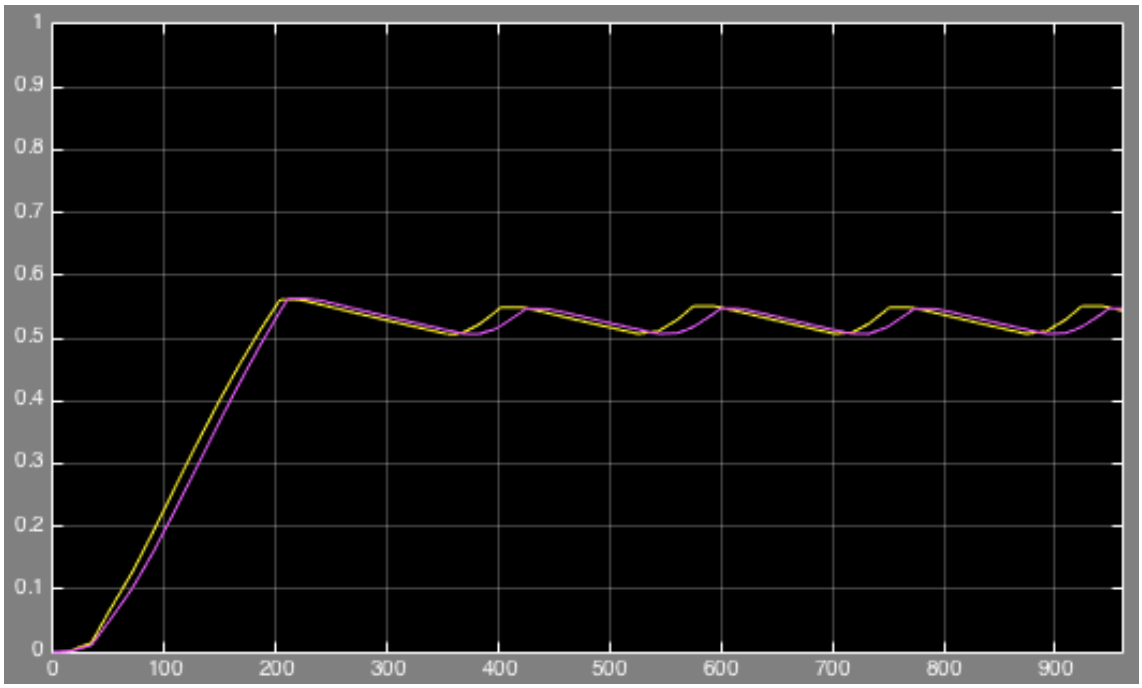
Obr. 3-32 Průběh dynamického chování nespojitého regulátoru ve spojení s deskovým otopným tělesem KL 10 - 1000x500, vnitřní teplota 20 ± 1,5 K [6]



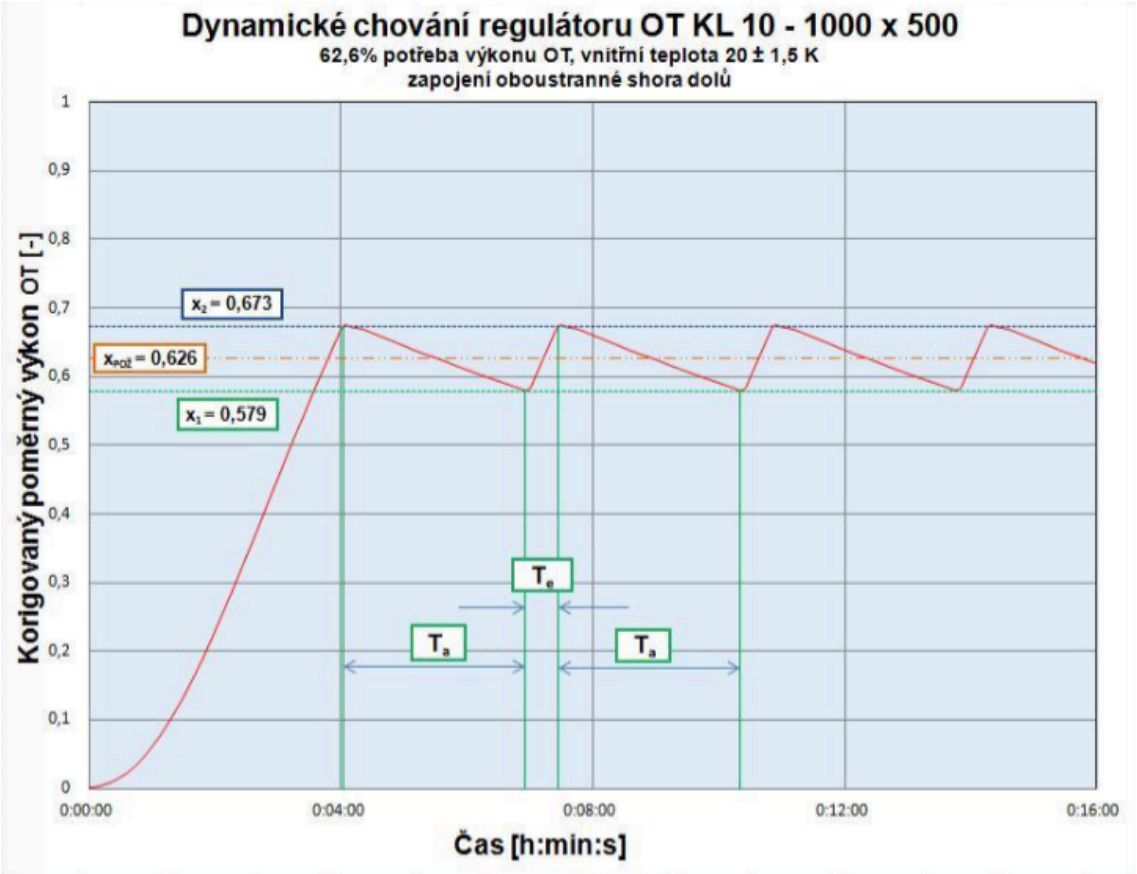
Obr. 3-33 Průběh hodnoty poměrného výkonu ze simulačního modelu, výkon 98 %, pásmo proporcionality 3 K



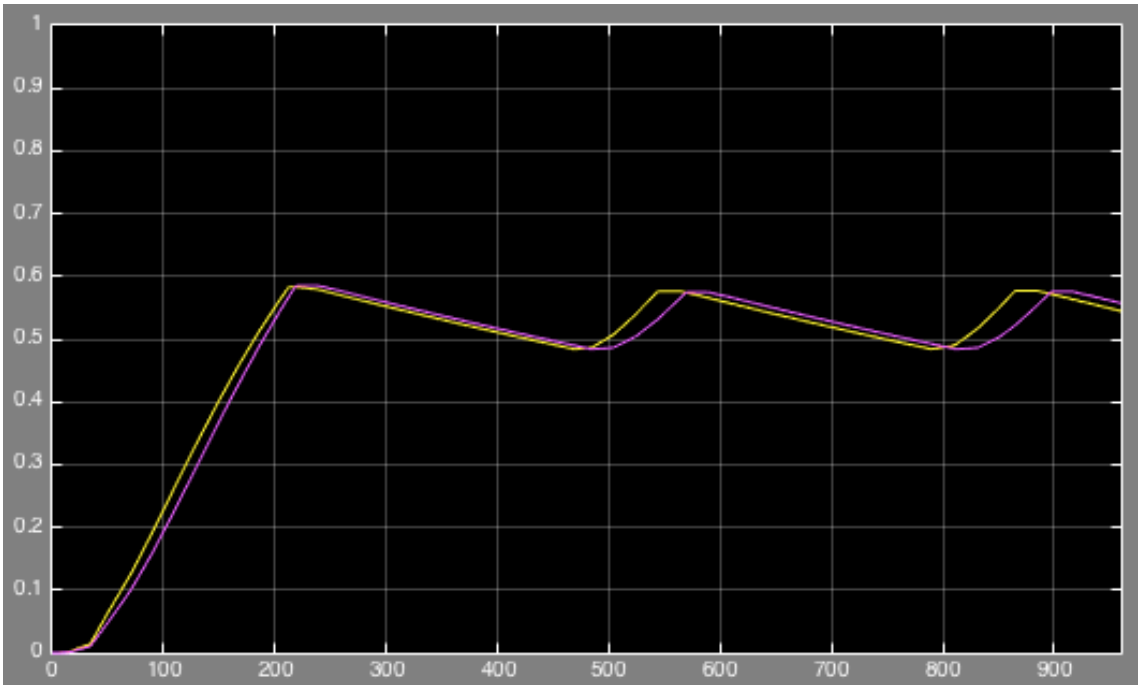
Obr. 3-34 Průběh dynamického chování nespojitého regulátoru ve spojení s deskovým otopným tělesem KL 10 - 1000x500, vnitřní teplota 20 ± 0,5 K [6]



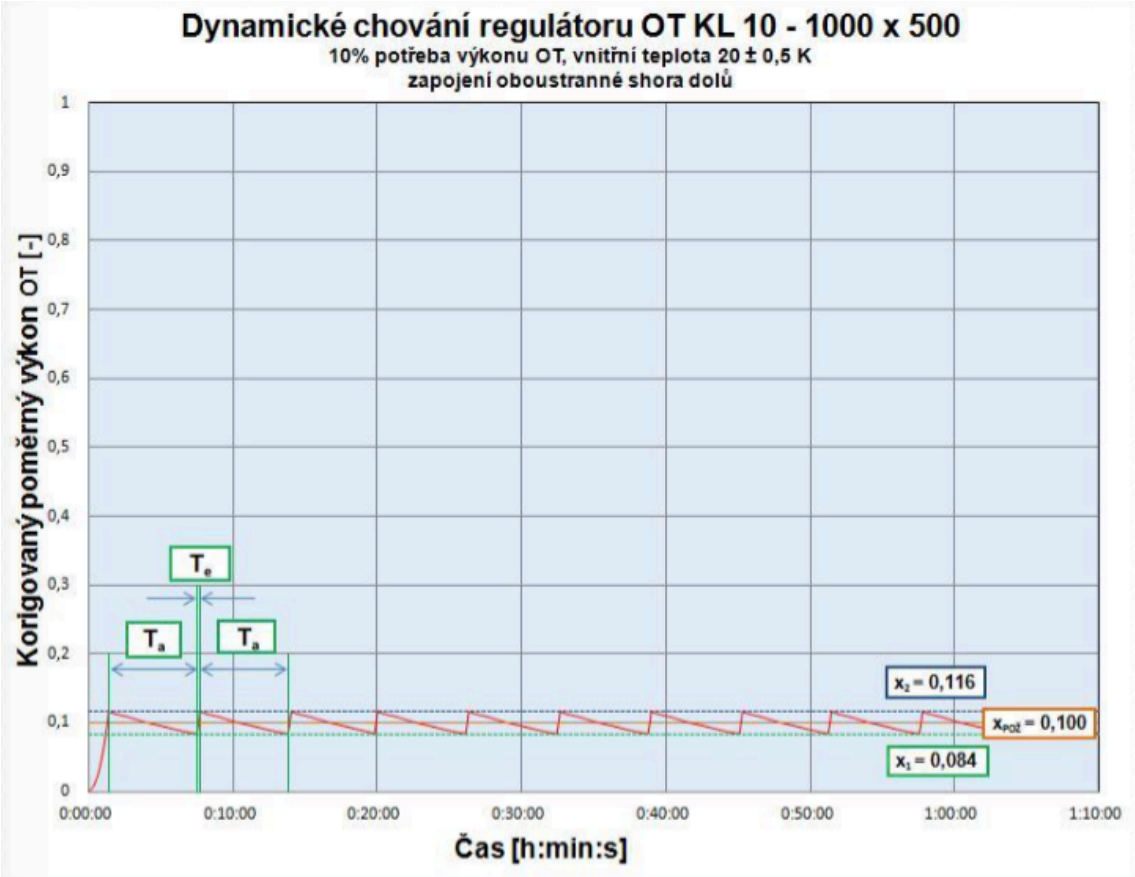
Obr. 3-35 Průběh hodnoty poměrného výkonu ze simulačního modelu, výkon 62,6 %, pásmo proporcionality 1 K



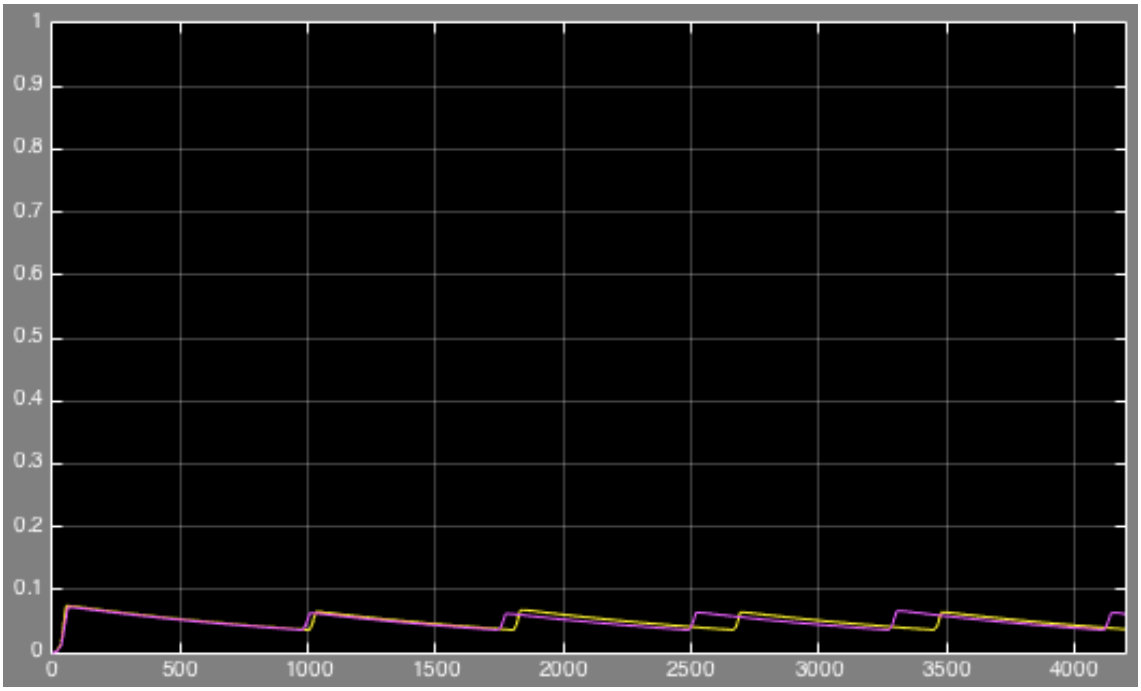
Obr. 3-36 Průběh dynamického chování nespojitého regulátoru ve spojení s deskovým otopným tělesem KL 10 - 1000x500, vnitřní teplota 20 ± 1,5 K [6]



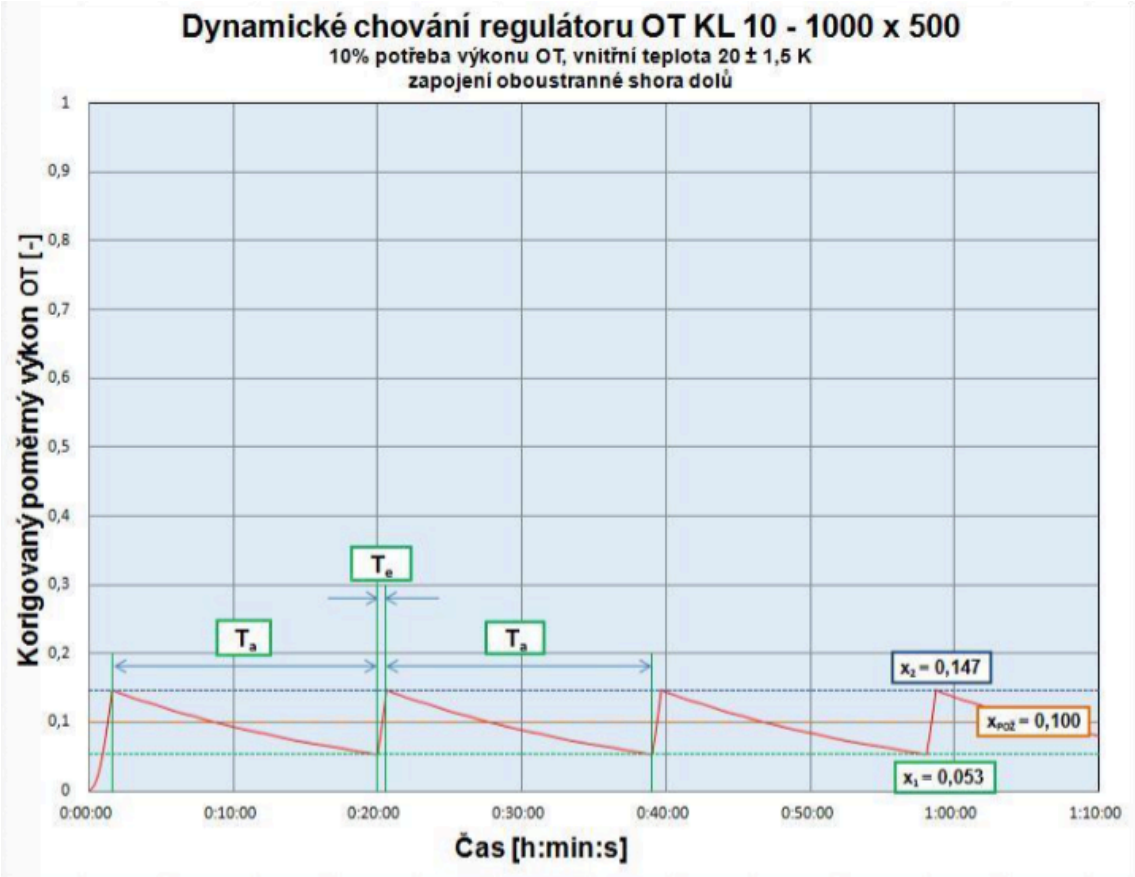
Obr. 3-37 Průběh hodnoty poměrného výkonu ze simulačního modelu, výkon 62,6 %, pásmo proporcionality 3 K



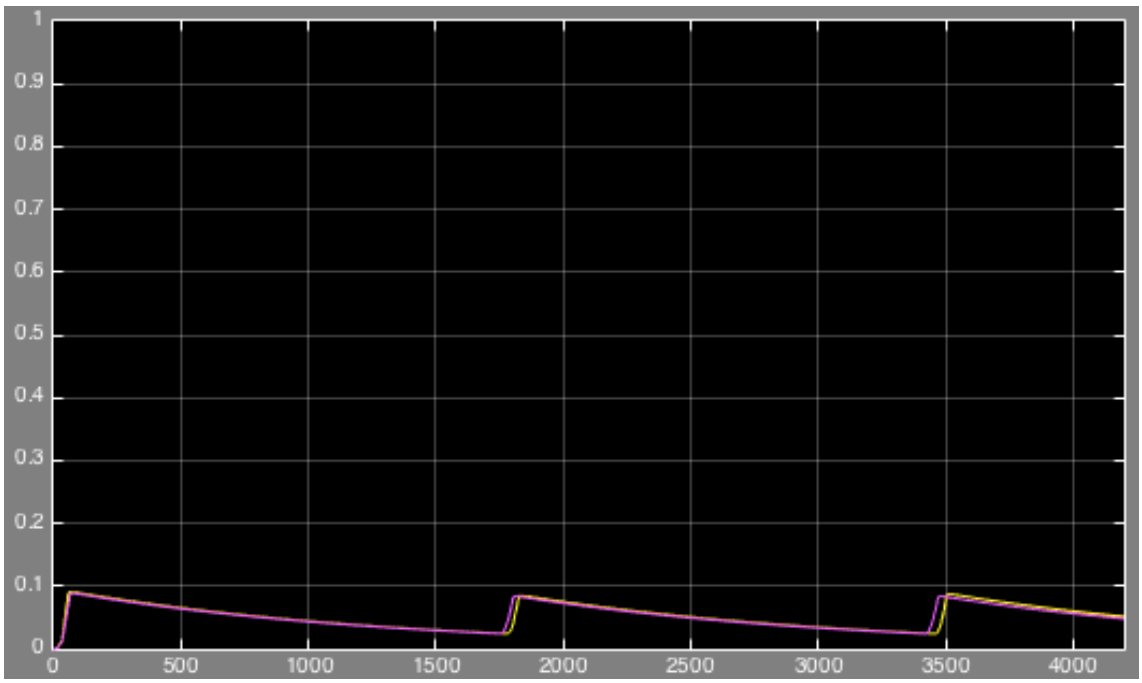
Obr. 3-38 Průběh dynamického chování nespojitého regulátoru ve spojení s deskovým otopným tělesem KL 10 - 1000x500, vnitřní teplota 20 ± 0,5 K [6]



Obr. 3-39 Průběh hodnoty poměrného výkonu ze simulačního modelu, výkon 10 %, pásmo proporcionality 1 K



Obr. 3-40 Průběh dynamického chování nespojitého regulátoru ve spojení s deskovým otopným tělesem KL 10 - 1000x500, vnitřní teplota 20 ± 1,5 K [6]



Obr. 3-41 Průběh hodnoty poměrného výkonu ze simulačního modelu, výkon 10 %, pásmo proporcionality 3 K

4. ZÁVĚR

Na začátku práce jsem si stanovil za cíl prostudovat děje probíhající v otopném tělese a navrhnout simulační program, který by měl respektovat reálné chování otopného tělesa. Jako podklady pro práci jsem dostal od vedoucího výsledky z experimentů provedených v laboratořích Ústavu techniky prostředí FS ČVUT.

Během prostudování otopného tělesa jsem zjistil, že náběh otopné plochy je složitým dějem, který není obecně popsán rovnicí. Je možné použít rovnice základní tepelné bilance, ale jenom v ustáleném stavu, což pro dynamický proces není vhodné. Při pokusech použít tuto rovnici k popsání procesu ohřevu otopného tělesa se vyskytuje problém různých řádů rovnic. Rovnice tepelné bilance je diferenciální rovnice prvního řádu, na jiné straně reálný děj vypadá jako systém druhého nebo vyššího řádu.

Na rozdíl od ohřevu, rovnice chladnutí odvozená z rovnice tepelné bilance celkem odpovídá reálnému procesu chladnutí a může být použita během simulace dynamického chování otopného tělesa.

Prozkoumal jsem možnosti simulačního prostředí Simulink, což je nadstavbou MATLABu. Probral jsem a pak jsem popsal různé bloky použité pro sestavení simulačního modelu otopného tělesa. Pro některé z nich jsem uvedl příklady použití v modelu.

Jelikož náběh otopného tělesa nebyl matematicky popsán, začal jsem zkoušet různé metody, které by mohly být uskutečněné při modelování otopného tělesa. Všechny metody jsou popsány v praktické části této práce. Konečně pomocí rady vedoucího byla vyvinuta rovnice, na které se zakládá model. Bohužel tato rovnice celkem nevyřešila problém simulace náběhu otopné plochy. Proto bylo rozhodnuto použít aproximace funkce z grafu experimentálních hodnot.

Použitím aproximace jsem omezil aplikovatelnost modelu na konkrétní otopné těleso KL 10 – 1000 x 500 a konkrétní místnost. Pro rozšíření použití modelu je potřeba další zkoumání chování modelu a otopného tělesa za jiných podmínek, což znamená další experimenty. Aproximace byla provedena podle metody prof. Strejce. To znamená, že je potřeba jako vstup zadat čas kdy nastane 72% změna v přechodové funkci. Tato veličina není běžně dodávaná výrobci otopných těles, to může znamenat jednak potřebu nalezení závislosti mezi výrobci dodávanými hodnotami, jednak nepoužitelnost této

metody v dané oblasti, protože by to znamenalo, že se musí provést experiment pro zjištění potřebné veličiny, čemuž se v této práci pokouším vyhnout.

V druhé polovině práce jsem popsal v modelu použité konstrukce a vysvětlil jejich funkce.

Na konci práce jsem porovnával grafické výstupy z modelu s grafickými výstupy z experimentu. Na první pohled a tvarově jsou grafy více méně shodné, ale při bližším zkoumání je vidět, že rozdíly dokonce nejsou zanedbatelné. Simulovaný model vykazuje větší setrvačnost a dosahuje menších poměrných výkonů. Příčiny takového rozdílu spočívají v následujících bodech:

- Reálná data jsou z experimentu s jiným zapojením
- V reálných datech je uveden korigovaný výkon, v simulačních datech - nekorigovaný
- Během sestavení modelu náběhu otopného tělesa jsem vycházel z experimentálních dat, ve kterých je uvedeno, že teplota okolí je téměř konstantní. Proto pro simulace bylo zjednodušeno, že teplota okolí je po celé době simulace konstantní. V tomto případě nebyla žádná změna regulované veličiny, proto jsem zvolil, že regulovanou veličinou bude střední povrchová teplota tělesa. Tím pádem pásmo proporcionality se vztahuje na střední povrchovou teplotu, ne na teplotu okolního vzduchu, jak by to mělo být.

Poslední bod je podle mého názoru dost zásadním problémem tohoto modelu. Pro vyřešení je potřeba sestavovat model celého prostoru, ve kterém se bude nacházet otopné těleso, aby bylo možné definovat přesněji toky tepla v prostoru a tím ovlivňovat změnu teploty okolí, na kterou se pak naváže zpětná vazba s P-regulátorem. Je možné, že toto řešení bude dávat přesnější výsledky.

Tento model může být použit jako základ pro další výzkum v oblasti dynamického chování otopných ploch. Bohužel v dané podobě je model stále nepřesný pokud jde o regulaci pomocí P-regulátoru v režimu nespojitého dvoupolohového regulátoru. Pokud jde o samostatné simulace náběhu nebo chladnutí otopného tělesa model vykazuje dost přesné výsledky. Ale je třeba pamatovat, že přesné výsledky jsou pro konkrétní otopné těleso a konkrétn prostor. Vazba modelu s jinými otopnými tělesy a prostory není zkoumána. Pravděpodobně by šlo o změnu určitých vstupních konstant.

5. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] BAŠTA, Jiří. *Regulace v technice prostředí staveb*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014, 193 s. ISBN 978-80-01-05455-0.

[2] *Aproximace přechodových charakteristik metodou prof. Strejce* [online]. 2000 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: http://old.spsul.cz/pdf/strejc.pdf

[3] *Aproximace přenosových funkcí pomocí přechodové charakteristiky* [online]. [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kat_fyz/externi/kat_fyz_5377/Kap09/Kap_09.htm

[4] BOHÁČ, Jindřich a Jiří BAŠTA. Dynamické chování otopných těles s ohledem na regulační zásah. In: *Sborník z konference Vytápění Třeboň 2013*. Třeboň, 2013, s. 120-124. ISBN 978-80-02-02431-6.

[5] BAŠTA, Jiří a Luděk JANČÍK. *Setrvačnost náběhu a chladnutí otopných těles* [online]. 2010 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: http://vytapeni.tzb-info.cz/otopne-plochy/6310-setrvacnost-nabehu-a-chladnuti-otopnych-teles

[6] BOHÁČ, Jindřich. *Dynamické chování otopných těles*. Praha, 2012. Diplomová práce.

[7] XU, Baoping, Lin FU a Hongfa DI. Dynamic simulation of space heating systems with radiators controlled by TRVs in buildings. *Energy and Buildings* [online]. 2008, **40**(9): 1755-1764 [cit. 2015-06-01]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.03.004. ISSN 03787788. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778808000650

[8] PETRÁŠ, Dušan, Otília LULKOVIČOVÁ, Jiří BAŠTA, Ján TAKÁCS, Karel KABELE a Jiří HIRŠ. *Vytápění rodinných a bytových domů*. 1. české vyd. Bratislava: Jaga, 2005, 246 s. Vytápění. ISBN 80-807-6020-9.

6. SEZNAM PŘILOH

P1 ..... Digitální tabulka s výsledky z experimentu v laboratoři (na CD)

P2 ..... Model otopného tělesa poskytnutý vedoucím práce (na CD)

P3 ..... Model otopného tělesa vypracovaný v průběhu práce (na CD)