

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Regulace teploty vody v systému vysokotlakého
vstřikování**

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na optimalizaci regulátoru teploty vody ve vysokotlakém systému vstřikování.

Klíčová slova

Regulátor, regulovaná soustava, přechodová charakteristika, vysokotlaké vstřikování

Abstract

The master theses presents the principles of the optimisation for regulation in the high pressure injection system.

Key words

Regulator, regulated system, transition characteristic, high pressure injection

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 12.6.2017

Václav Jaroš

(Nepovinná část)

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Jandovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce a svému zaměstnavateli firmě Krones za čas a prostředky určené k realizaci práce.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 PRINCIP REGULACE TEPLoty VODY V SYSTÉMU VYSOKOTLAKÉHO VSTŘIKOVÁNÍ	10
1.1 STRUKTURA SYSTÉMU	10
1.2 BLOKOVÉ SCHÉMA A OZNAČENÍ SOUČÁSTÍ.....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA. 11
1.3 OVLÁDÁNÍ A NASTAVENÍ	11
1.4 FUNKCE SYSTÉMU A PROBLÉMY.....	12
2 SIMULAČNÍ MODEL REGULOVANÉ SOUSTAVY	13
2.1 IDENTIFIKACE DLE FYZIKÁLNÍ ROZVAHY	13
2.1.1 Návrh simulačního modelu.....	13
2.1.2 Vzorce a výpočty fyzikálních veličin.....	14
2.1.3 Porovnání přechodových charakteristik.....	15
2.2 IDENTIFIKACE POMOCÍ PŘECHODOVÉ CHARAKTERISTIKY	16
2.2.1 Odvození přenosu	16
2.2.2 Návrh simulačního modelu.....	17
2.2.3 Porovnání přechodových charakteristik.....	19
3 NÁVRH PARAMETRŮ REGULÁTORU	20
3.1 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY	20
3.2 OPTIMALIZACE PARAMETRŮ REGULÁTORU.....	22
3.2.1 Simulace pomocí odezvy na skokovou změnu teploty	22
3.2.2 Simulace pomocí frekvenčních charakteristik	24
4 MOŽNOST OVĚŘENÍ ZÍSKANÝCH PARAMETRŮ REGULÁTORU V REÁLNÉ SOUSTAVĚ ..	27
ZÁVĚR	28
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	1

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na návrh regulátoru pro ohřev vody v systému vysokotlakého vstřikování. Čím dál častěji se v praxi setkáváme s potřebou regulovat popř. řídit nějakou fyzikální veličinu. Trendem současné doby se stává automatizace procesu pomocí řídicích systémů, které jsou schopny spolehlivě tuto úlohu pro naše potřeby zastat. V mé práci bych se chtěl věnovat regulaci teploty vody, která slouží jejímu následnému vstřikování přes trysku do pivních lahví těsně před tím, než jsou zazátkovány. Tento proces se používá k zamezení styku piva se vzduchem, což prodlužuje jeho trvanlivost. Nyní celý systém dle mého názoru není optimálně nastaven a jsou nutné úpravy parametrů regulátoru. Optimalizace výrazně sníží chybovost celého zařízení, zrychlí produkci a prodlouží životnost jednotlivých součástí např. zamezíme přehřívání topné spirály. Regulátor je součástí řídicího systému firmy Siemens S7 a jeho nastavením je regulována teplota vody pulzní šířkovou modulací. Algoritmus samotného regulátoru je nepřístupný a chráněný výrobcem. Lze tedy pouze měnit jeho nastavení, což je pro tento proces postačující. Výrobce umožňuje též optimalizaci funkce tzv. auto-tuning, která však vzhledem k pomalému nárůstu teploty a vysokému výkonu spirály není zcela vhodná. Logická posloupnost kroků je tedy sestavit zjednodušený simulační model, nastavit vhodné parametry regulátoru a ověřit správnost nastavených parametrů v reálných podmínkách. Text je rozdělen do čtyř částí. První se zabývá principem vysokotlakého vstřikování, druhá uvádí zjednodušený simulační model regulované soustavy. Třetí část popisuje návrh regulátoru, jeho matematický popis, charakteristiky a výpočty. Poslední část obsahuje implementaci parametrů regulátoru v praxi a závěr.

Seznam symbolů a zkratk

A_v	Koeficient přestupu tepla do vody [W.K^{-1}]
A_s	Koeficient přestupu tepla spirály [W.K^{-1}]
C_s	Tepelná kapacita spirály [J.K^{-1}]
C_n	Tepelná kapacita nádoby [J.K^{-1}]
c_v	Měrná tepelná kapacita vody [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
LMN	Výstup z regulátoru [%]
Q_v	Objemový průtok [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$]
Q_m	Hmotnostní průtok [kg.s^{-1}]
P_a	Ztráty do vzduchu [W]
P_c	Vypočítaný výkon spirály [W]
P_n	Jmenovitý výkon spirály [W]
P_r	Ztráty do okolí [W]
P_s	Výkon spirály [W]
P_v	Výkon do vody [W]
PWM	Pulse width modulátor – pulzní šířková modulace
PID	Proporcionálně – integračně – derivační
ρ	Hustota vody [kg.m^{-3}]
t_r	Teplota okolí [$^{\circ}\text{C}$]
t_{set}	Požadovaná teplota vody [$^{\circ}\text{C}$]
t_{vin}	Vstupní teplota vody [$^{\circ}\text{C}$]
MATLAB	Matrix laboratory

1 Princip regulace teploty vody v systému vysokotlakého vstřikování

Celý systém je určen pro zvýšení trvanlivosti veškerých druhů pív. Využívá se ve velké míře u značek, které jsou určeny k exportu do zahraničí. Jedná se o regulaci teploty vody vysokotlakého vstřikování do naplněné láhve s pivem. Anglický název "high pressure injection system", zkratka HPI. Ve zkratce se jedná o to, že po naplnění láhve je hladina piva pod hrdlem, láhev je otevřená a produkt v kontaktu s okolní atmosférou. Láhve se pohybují po pásovém dopravníku. Pokud láhev projede pod tryskou, je do ní vstříknuta voda zahřátá na 80 °C. Tlak vody se mění v závislosti na rychlosti dopravníku, teplota zůstává konstantní. Při vstříknutí vody do láhve s pivem, které má teplotu cca 8 °C, dojde k vypěnění piva a na hrdle se vytvoří "bílá čepice". Láhev je poté okamžitě uzavřena korunovou zátkou, jak ji známe z prodejen. Pěna se ztratí, když láhev vyjede z "pastéru". Je to v podstatě tunel nad pásovým dopravníkem, kdy se láhev prudce ohřeje a opět prudce zchladí. Teplota stoupá do středu tunelu a za ním opět klesá. Lze si teplotní stavy představit jako kopec, kde uprostřed tunelu je teplota nejvyšší a na krajích nejnižší.

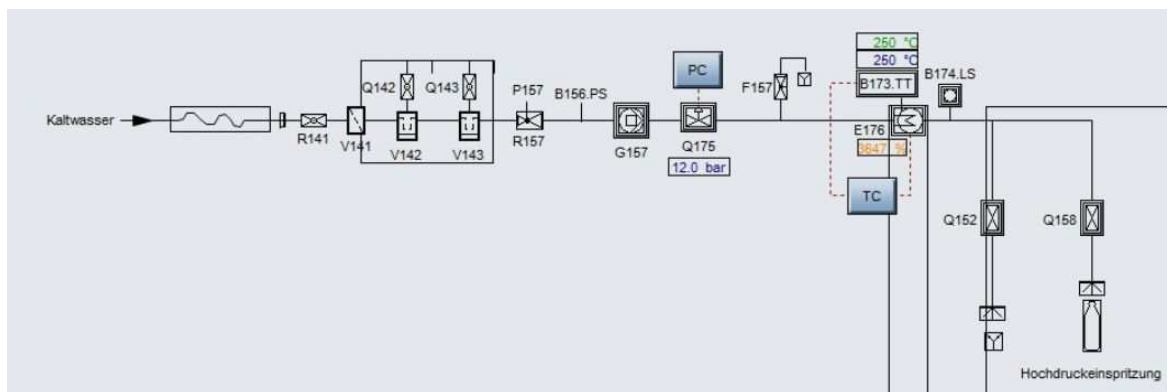
1.1 Struktura systému

Skládá se z čerpadla, které je dodáváno jako celek, který obsahuje bistabilní regulační ventil a proporcionální vysokotlaký ventil. Přívod vody musí být v rozmezí 1,5 - 4 bary. Po přivedení vzduchu přes bistabilní ventil, se čerpadlo automaticky odvzdušní a zůstane v základní poloze, což je patrné z úniku vody. Po přivedení vzduchu na vysokotlaký ventil pracuje čerpadlo v automatickém režimu až do doby, kdy uzavřeme přívod vzduchu do vysokotlakého ventilu. Výstup z čerpadla je konstantní a tlak vody ovládáme přes regulační ventil umístěný za ním, řídicím systémem a analogovým signálem v rozmezí 4 až 20 mA, což odpovídá rozmezí tlaku 0-10 barů.

Za regulačním ventilem, kde je nastaven požadovaný tlak se voda dostává do nádoby, kde je též umístěna topná spirála, která ohřívá vodu na požadovanou teplotu. Ta je měřena přes čidlo PT100 a na analogovou kartu je poté přes měnič opět poslán signál v rozmezí 4 – 20 mA, který odpovídá teplotě 0 – 150 °C. Teplotu regulujeme přes řídicí systém a ohřátá voda putuje dále přes trysku do láhve, případně druhou cestou do odpadního kanálu, aby byl zajištěn konstantní průtok a nedošlo k náhlé změně aktuálních parametrů, což může způsobit přehřátí spirály.

Vodu se snažíme udržovat na konstantní teplotě 80 °C, což se za současného stavu nedaří, kvůli změnám tlaku v systému a velké energii, která je předávána přes topnou spirálu do vody, která má v nádobě poměrně malý objem (ca 250 ml). Z tohoto důvodu je nutná kontrola parametrů regulátoru a jejich případná optimalizace.

1.2 Blokové schéma a označení součástí

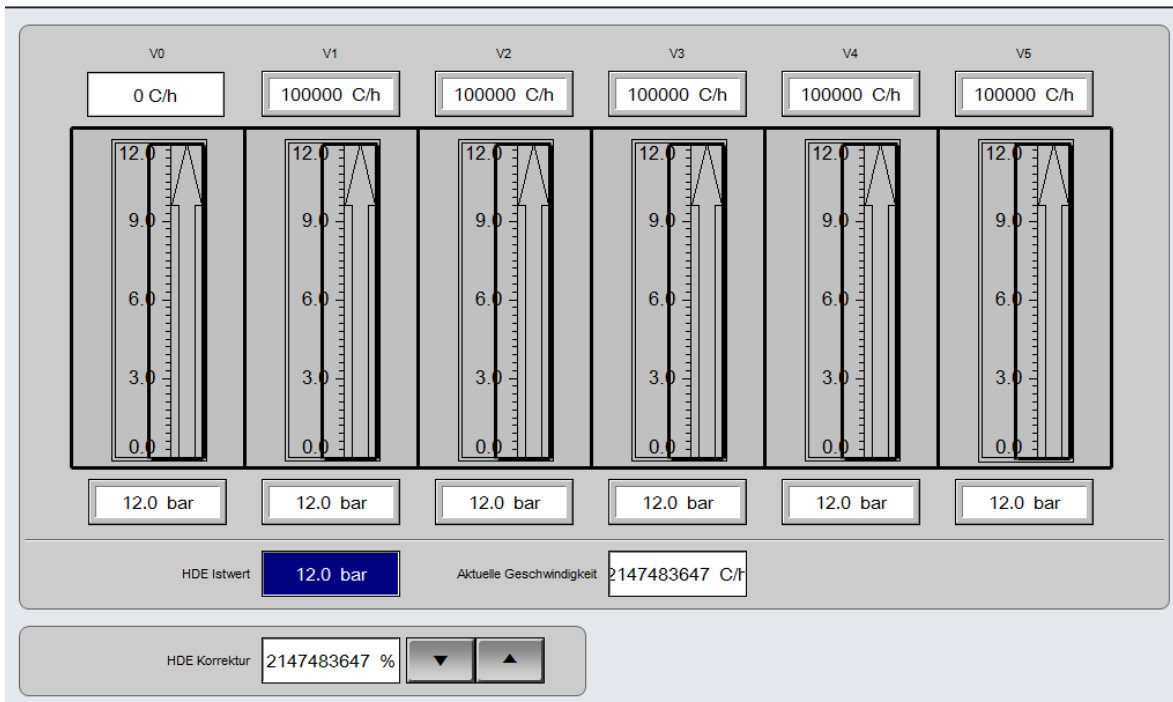


Obr. 1.1 Blokové schéma oběhu vody [1]

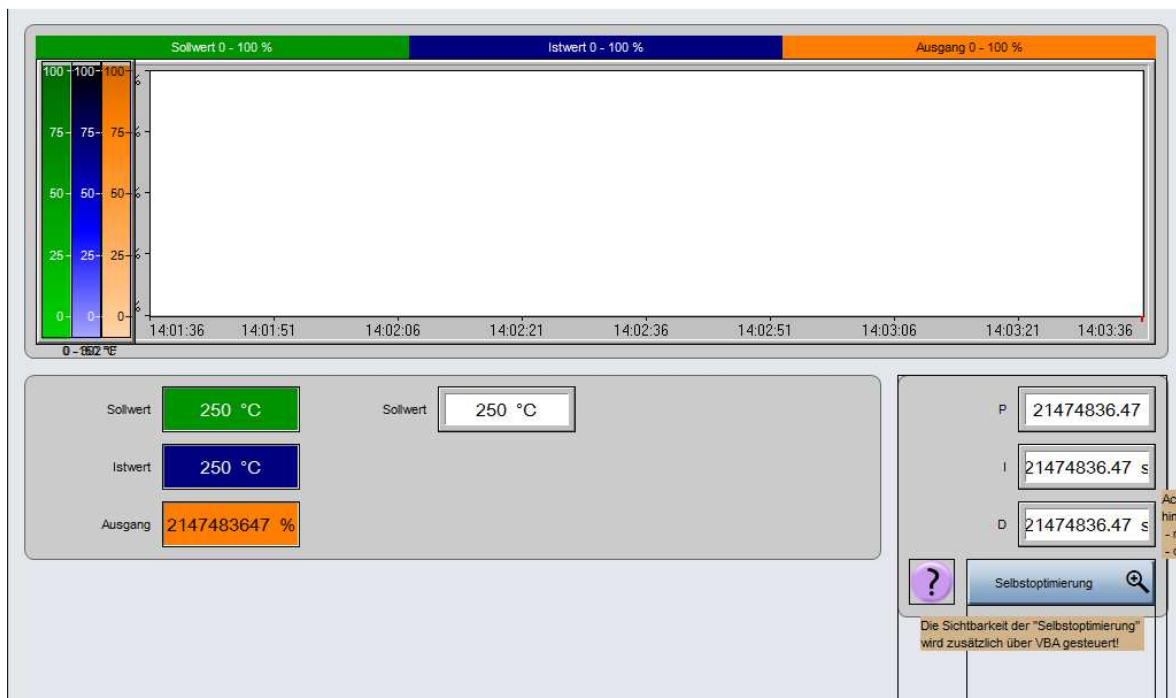
Na předchozím *Obr. 1.1* je vidět vstup vody, zpětná klapka V141, poté několik vodních filtrů V142 – 143, tlakový regulační ventil P157, kterým nastavujeme vstupní tlak do čerpadla G157. Jedná se o ruční nastavení, které kontrolujeme na manometru B156.PS, abychom nastavili konstantní tlak a hlavně zamezili případným změnám tlaku z vodovodního řádu. Přes čerpadlo a regulační ventil putuje voda do nádoby, kde je umístěna topná spirála E176. Kontrola stavu vody je hlídána hladinovou sondou B174.LS, při malém množství vody je ohřev vody automaticky vypnut. Ohřátá voda je poté vstříkována do naplněné láhve s produktem přes ventil Q158, nebo do kanálové výpusti přes ventil Q152.

1.3 Ovládání a nastavení

Veškeré komponenty je možné ovládat případně simulovat přes dotykový panel, na kterém je znázorněno blokové schéma z *Obr. 1.1*. Ručního ovládání využíváme např. při kontrole systému, nebo rychlém odvodu tepla při vysoké teplotě. Za provozního stavu je celý systém v automatickém režimu. Veškeré ovládání a kontroly jsou prováděny řídicím systémem. Při optimalizaci nastavujeme pouze požadovanou teplotu vody ve stupních Celsia, šest regulačních stupňů pro nastavení tlaku vody, při různých provozních rychlostech stroje *Obr. 1.2* a parametry PID regulátoru teploty *Obr. 1.3*. Na následujících obrázcích jsou pro představu znázorněny parametry pro nastavení systému:



Obr. 1.2 Nastavení tlaku vody při různých provozních rychlostech [1]



Obr. 1.3 Nastavení požadované teploty a parametrů PID regulátoru [1]

1.4 Funkce systému a problémy

Při prvotním spuštění produkce je nejprve celý systém odzdušněn a naplněn vodou. Čerpadlo je stále v provozu a je otevřena kanálová výpusť. Topná spirála započne s ohříváním vody na požadovanou teplotu. Po dosažení povolené hystereze se nejprve otevře přívod lahví do zařízení, kanálová výpusť se uzavře, voda nyní proudí přes trysku a

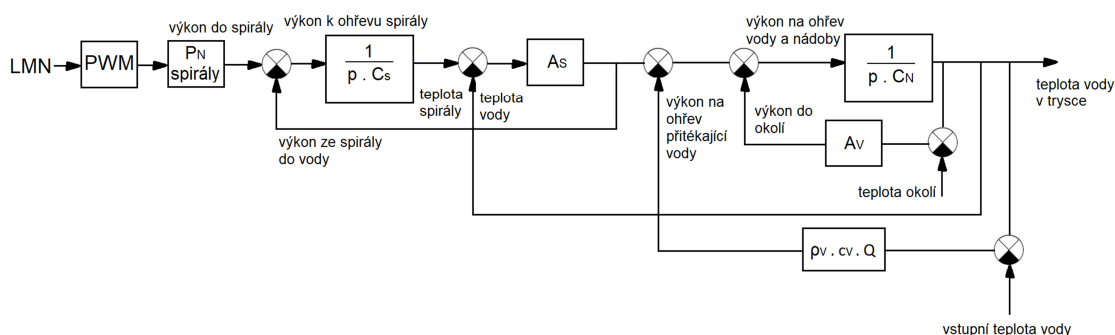
rychlost stroje začíná stoupat až do maxima. To má za následek zvýšení tlaku vody v systému vstřikování a částečnému snížení aktuální teploty vody, neboť průtok se zvýšil. Tuto anomálii regulátor bez problémů zvládne a při ustálení rychlosti stroje a tlaku vody je jeho výstup konstantní. Horká voda proudí přes trysku do lahví a produkce běží kontinuálně. Problém nastává při změně podmínek, např. přerušení produkce nebo zastavení stroje. V tomto případě dojde k poklesu tlaku, což má za následek snížení průtoku a vlivem fyzikálních změn v systému dojde k nárůstu teploty vody, který regulátor se stávajícími parametry není schopen omezit. Nápravu vidím v úpravě parametrů složek P, I a D regulátoru s ohledem na kontrolu mezních stavů tlaku 2 bary a 10 barů.

2 Simulační model regulované soustavy

2.1 Identifikace dle fyzikální rozvahy

2.1.1 Návrh simulačního modelu

Abychom navrhli simulační model soustavy, je třeba popsat fyzikální děje, které se v celém systému odehrávají. Musíme počítat nejen s ohřevem vody, která je v nádobě, ale bereme v úvahu i vodu, která neustále přitéká do nádoby. Z hlediska termiky dochází na rozhraní dvou látek s různou teplotou k přenosu tepla z jedné látky do druhé. V našem případě se jedná o ztrátové teplo, které ohřívá kovovou nádobu, přes kterou se energie předává do okolí. Sumou všech složek, což je součet přeneseného výkonu do vody a všech ztrát do okolí nám musí vyjít aktuální výkon, z LMN pak dopočítáme jmenovitý výkon spirály. Pro výpočet je potřeba znát aktuální průtoky vody při mezních stavech tlaku 2 bary a 10 barů, měrnou tepelnou kapacitu materiálu nádoby a vody, objem nádoby, vstupní teplotu vody a teplotu okolí. Z výše popsaných jevů lze nyní navrhnout zjednodušený model regulační soustavy s ohledem na všechny fyzikální děje, které v něm probíhají. Je důležité do návrhu tyto procesy zahrnout, neboť zásadně ovlivňují fungování regulátoru. Na *Obr. 2.1* je znázorněn simulační model této soustavy. V následující kapitole provedeme výpočty všech výkonů i ztrát pro ověření správnosti. Výsledkem musí být jmenovitý výkon spirály udávaný výrobcem.



Obr. 2.1 Simulační model regulované soustavy

2.1.2 Vzorce a výpočty fyzikálních veličin

Ze základních fyzikálních znalostí a vzorců lze vypočítat všechny veličiny potřebné k určení přechodové charakteristiky. Označení veličin, jednotky a vzorce nalezeny na [2]. Průtoky vody pro tlak 2 a 10 barů zjištěny od výrobce trysky stejně jako měrná tepelná kapacita nádoby a spirály. Nádoba je z oceli typu V4A 14404 [3]. Veličiny C_s , A_s , C_n a A_v byly odladěny na základě shody simulace s naměřenými průběhy. Nejprve však byly měření zjištěny odezvy na skok pro oba tlaky v reálných podmínkách a při uzavření regulační smyčky. Všechny uvedené vzorce jsou stejné pro oba tlaky. Rozdílné jsou průtoky vody, tím se analogicky výpočty liší v hodnotách. Níže jsou chronologicky seřazeny vzorce pro výpočet jednotlivých veličin.

Nejprve je třeba převést aktuální průtoky vody z jednotek $[\text{l} \cdot \text{min}^{-1}]$ na $[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$:

$$Q_m = \frac{Q_v}{1000 \cdot 60} \times \rho \quad (2.1)$$

Následně spočítáme výkony a ztráty a ověříme spočítaný výkon spirály s jeho jmenovitou hodnotou:

$$P_v = Q_m \times c_v \times (t_{set} - t_{vin}) \quad (2.2)$$

$$P_s = \frac{LMN}{100} \times P_n \quad (2.3)$$

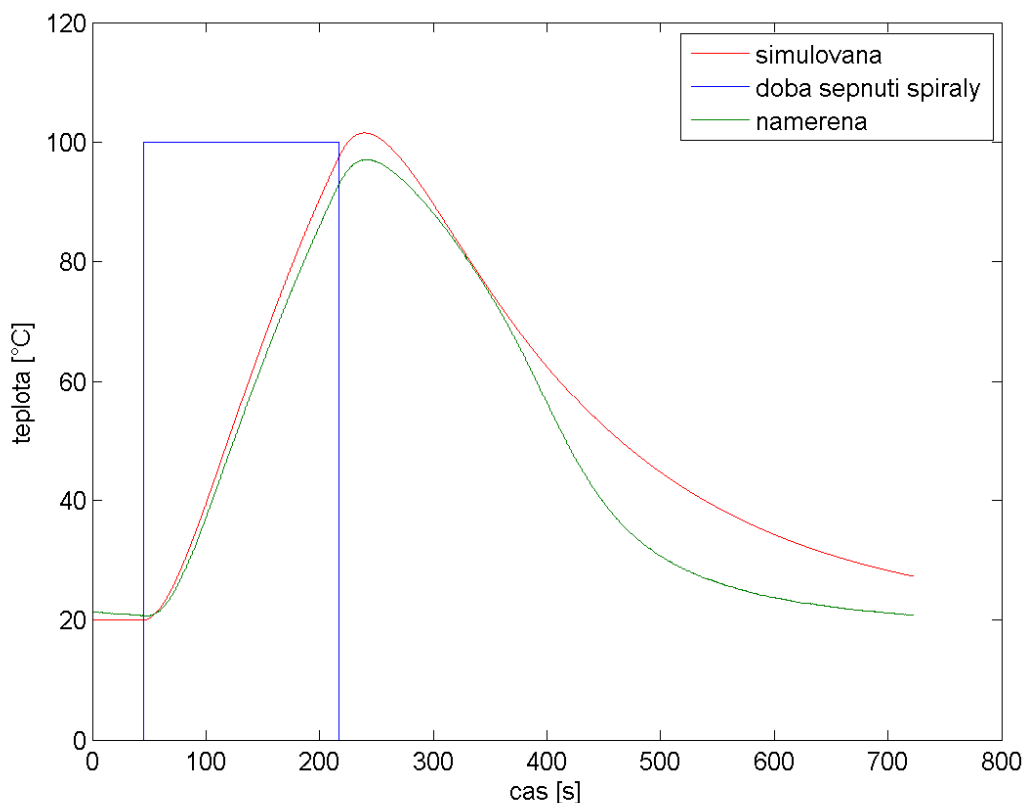
$$P_a = P_s - P_v \quad (2.4)$$

$$P_c = \frac{\frac{P_v(2bar)}{100} - \frac{P_v(10bar)}{100}}{\frac{LMN(2bar)}{100} - \frac{LMN(10bar)}{100}} \quad (2.5)$$

Vypočítaná hodnota výkonu spirály vychází 1998,24 W a jmenovitá činí dle udání výrobce 2000 W. V programu MATLAB nyní provedeme ověření naměřené a vypočítané přechodové charakteristiky.

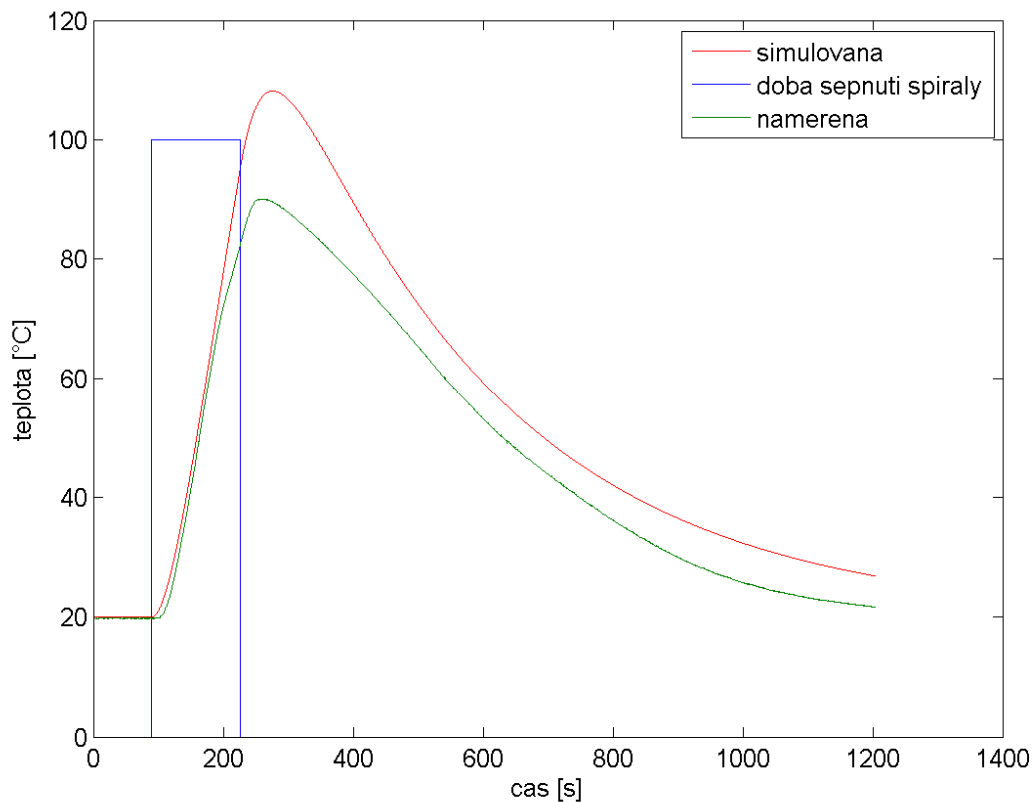
2.1.3 Porovnání přechodových charakteristik

Při simulaci v MATLABu zjišťujeme, že se přechodové charakteristiky při tlaku 10 barů prakticky překrývají. Červená křivka znázorňuje vypočítané hodnoty a zelená vykresluje naměřené hodnoty *Obr. 2.2*.



Obr. 2.2 Přechodové charakteristiky při tlaku 10 barů

Výrazné rozdíly ovšem pozorujeme při opačné mezní hodnotě tlaku 2 bary. Zde se křivky naopak rozcházejí. Barevná odlišnost je stejná, jako v předchozím případě. Z *Obr. 2.3* je patrné, že jsou rozdíly nejen v amplitudách, ale i ve strmosti ochlazování.



Obr. 2.3 Přechodové charakteristiky při tlaku 2 bary

Tato identifikace tedy není pro realizaci návrhu příliš vhodná. Volíme jiný způsob identifikace popsáný v následující kapitole.

2.2 Identifikace pomocí přechodové charakteristiky

2.2.1 Odvození přenosu

V tomto případě aproximujeme soustavu operátorovým přenosem jako astatickou, protože není možné změřit celou přechodovou charakteristiku soustavy, neboť by došlo k varu. Proto je soustava identifikována jako astatická, i když ve skutečnosti astatická není. Nejprve určíme směrnici asymptoty, která protíná časovou osu v bodě, z něhož určíme pořadnici. Poté určíme zesílení a časovou konstantu. Pomocí jednoduché funkce a následnému odečtení hodnoty z tabulky určíme řád soustavy. Přenos odvodíme z jednoduchých vzorců.[4]

Nejprve odečteme hodnoty z průběhu přechodové charakteristiky otevřené smyčky:

$$t_1 = 28,2$$

$$y(t_1) = 3,4$$

Ze vzorce uvedeném v [4] určíme zesílení:

$$K_V = \operatorname{tg}(\alpha) = \frac{\Delta y(t)}{\Delta t} \quad (2.6)$$

Pro výpočet poměru použijeme vzorec pro funkci [4]:

$$f_{(n)} = \frac{y(t_1)}{K_V \times t_1} \quad (2.7)$$

Odečteme n z Tabulky 1 uvedené v [4]. Nyní ze vzorce [4] určíme časovou konstantu:

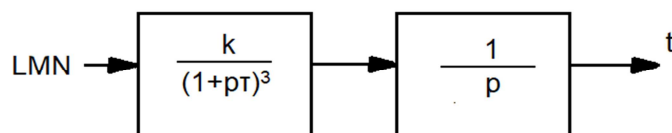
$$t_1 = n \times T \Rightarrow T = \frac{t_1}{n} \quad (2.8)$$

Přenos tedy bude vypadat následovně:

$$F_{(p)} = \frac{k}{(p\tau + 1)^3} \times \frac{1}{p} \quad (2.9)$$

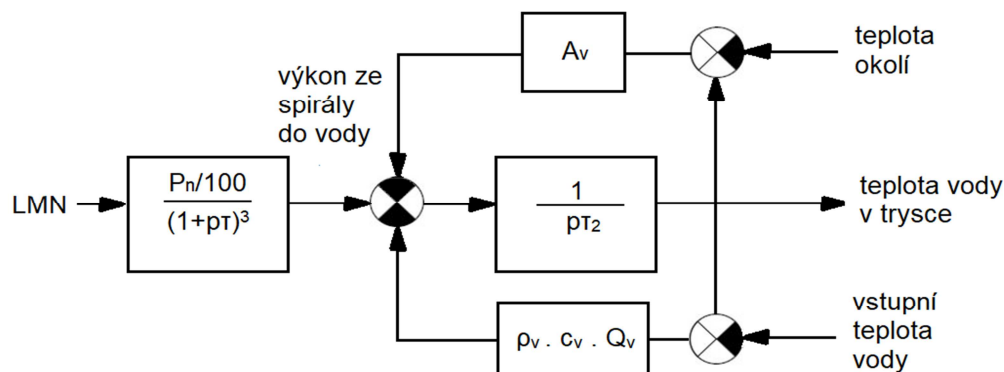
2.2.2 Návrh simulačního modelu

K určení konstant a realizaci modelu musíme nejprve rozdělit stávající simulační model a provést výpočty. Dle předchozí kapitoly by návrh modelu měl odpovídat pouze dvěma blokům, které jsou na *Obr. 2.4*.

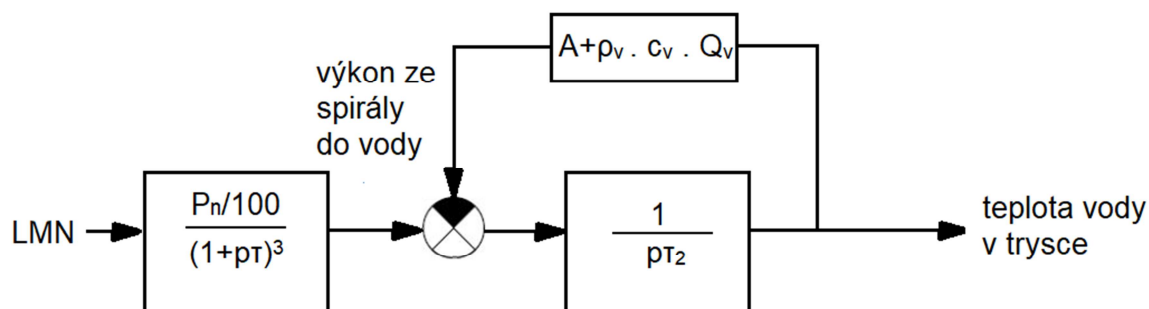


Obr. 2.4 Přenos aproximací astatické soustavy

K realizaci regulátoru ale potřebujeme znát k aperiodickému a integračnímu bloku i blok, který reprezentuje průtok studené vody (chlazení). Nyní si model překreslíme do jiné podoby a provedeme výpočet dle veličin, které známe z identifikace soustavy pomocí fyzikální rozvahy. Na *Obr. 2.5* a *Obr. 2.6* vidíme doplnění o ztráty a ochlazování, které představují pro pozdější návrh parametrů regulátoru problém. Pokud bychom je do realizace návrhu neuvadli, regulátor by nepracoval správně.



Obr. 2.5 Doplnění přenosu o ztráty



Obr. 2.6 Úprava přenosu – sloučení bloků

τ již známe z operátorového přenosu. Konstantu k vyjádříme jako:

$$k = P_n \times \frac{1}{\tau_2} \quad (2.10)$$

kde τ_2 zde představuje veličinu C_n . Z Obr. 2.6 nyní jednoduchou úpravou vyjádříme k_2 a dostaneme tak přenos pro blok F_2 s parametry k_3 a τ_3 . Hodnoty výpočtů se budou samozřejmě pro oba mezní tlaky lišit.

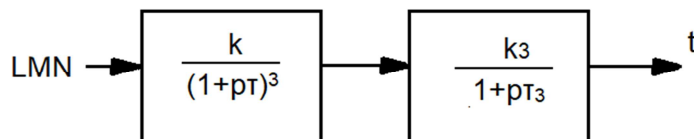
Konstantu k_2 vyjádříme ze vztahu:

$$k_2 = A_v + Q_m \times \rho_v \times c_v \quad (2.11)$$

Na základě těchto údajů vyjádříme úpravou přenos pro blok F_2 :

$$F_2 = P_n \times \frac{\frac{1}{p \times \tau_2}}{1 + \frac{1}{p \times \tau_2} \times k_2} = \frac{\frac{1}{p \times \tau_2}}{\frac{p \times \tau_2 + k_2}{p \times \tau_2}} = \frac{\frac{1}{k_2}}{1 + p \times \frac{\tau_2}{k_2}} = \frac{k_3}{1 + p \times \tau_3} \quad (2.12)$$

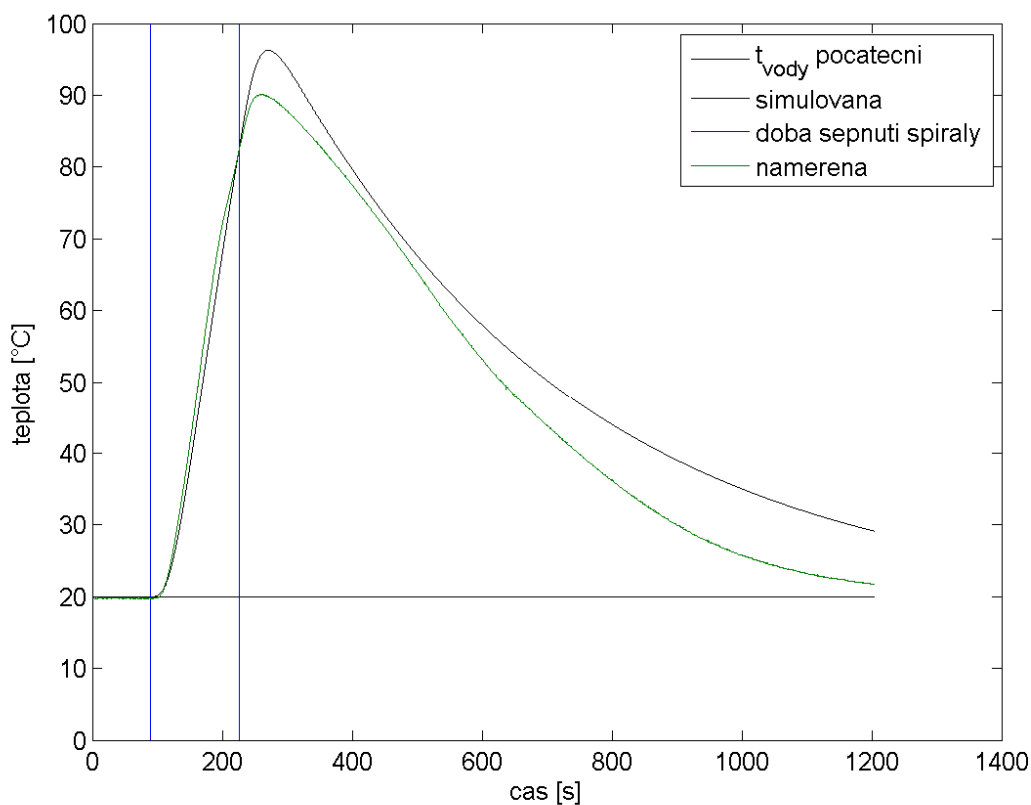
Výsledný simulační model tedy bude vypadat dle následujícího obrázku Obr. 2.7.



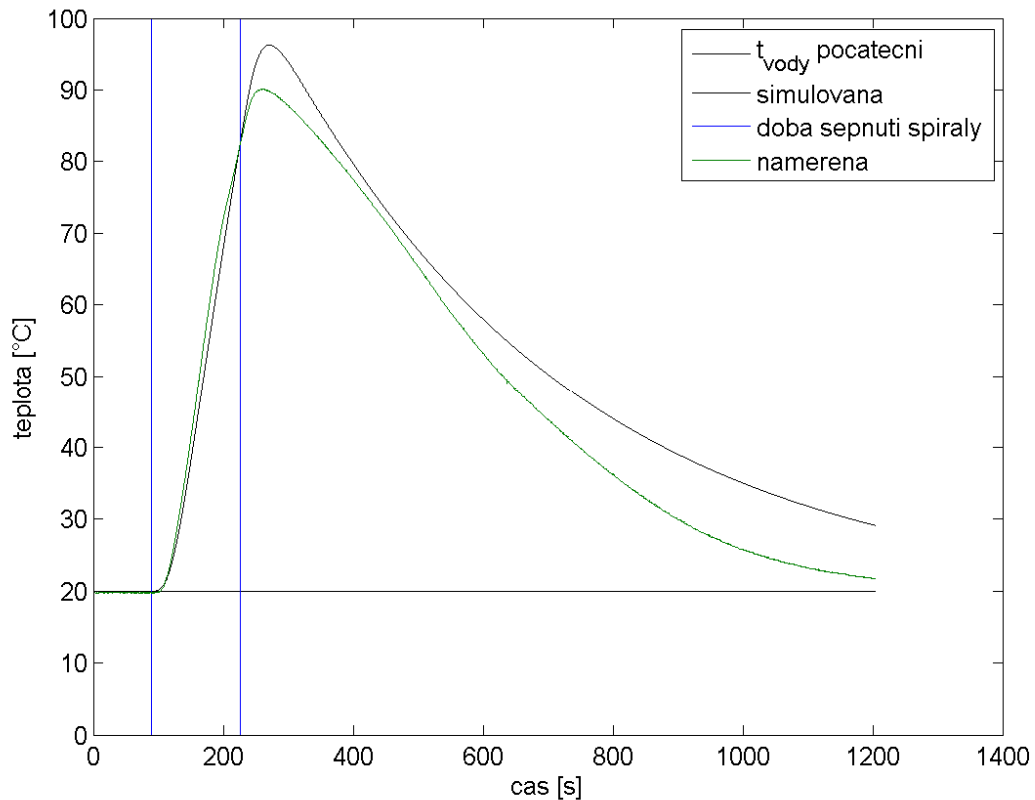
Obr. 2.7 Zjednodušený model regulované soustavy pro vykreslení frekvenčních charakteristik

2.2.3 Porovnání přechodových charakteristik

Stejně jako v předchozím případě provedeme srovnání přechodových charakteristik taktéž v MATLABu. Zde už nám obě charakteristiky vychází podstatně lépe pro oba mezní tlaky. Na Obr. 2.8 a Obr. 2.9 jsou opět barevně odlišeny naměřená od vypočítané.



Obr. 2.8 Přechodové charakteristiky při tlaku 10 barů



Obr. 2.9 Přechodové charakteristiky při tlaku 10 barů

Návrh tedy provedeme pomocí této identifikace. Abychom mohli vykreslit frekvenční charakteristiky, museli jsme odvodit matematický model soustavy pomocí Laplaceovy transformace.

3 Návrh parametrů regulátoru

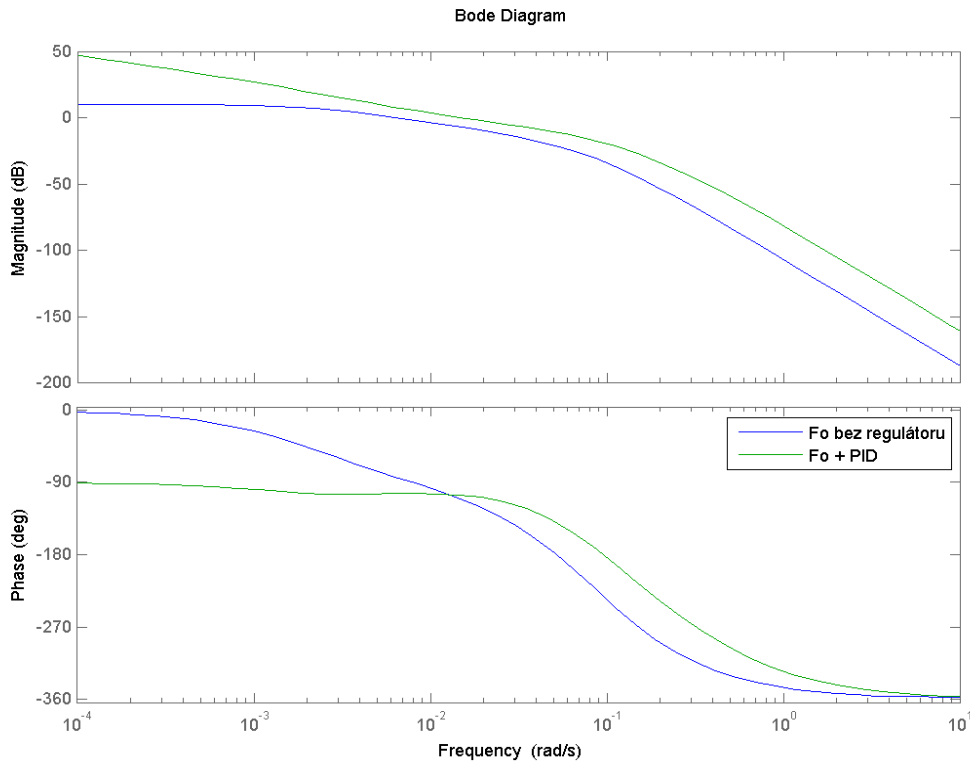
Parametry navrhne dle identifikace z přechodových charakteristik. Provedeme porovnání simulace a naměřených hodnot.

3.1 Frekvenční charakteristiky

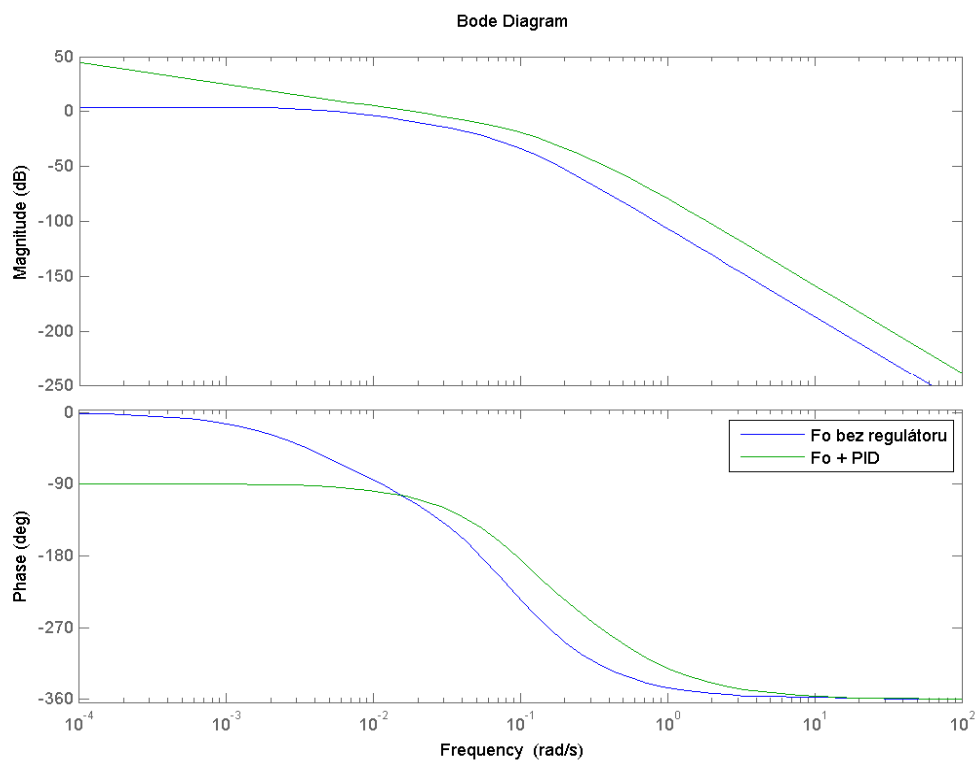
Opět v MATLABu vytvoříme skript pro frekvenční charakteristiky obou mezních tlaků, abychom zjistili, jak jsou jednotlivé frekvence zatlumeny a fázově posunuty oproti vstupnímu signálu. Oba dva bloky z *Obr. 2.7* graficky sečteme. Matematický zápis je v následující rovnici:

$$F_0 = F_1 \times F_2 \quad (3.1)$$

Zjistíme $\omega_{\text{řezu}}$ a frekvenční přenos. Na *Obr. 3.1* je frekvenční charakteristika pro tlak 2 bary a na *Obr. 3.2* pro tlak 10 barů. Charakteristiky zakreslujeme do logaritmických souřadnic. Bezpečnost ve fázi jsem zvolil $\varphi_b = 70^\circ$, převrácenou hodnotu integrační časové konstanty $1/T_r$ dekádu doleva od frekvence řezu, převrácenou hodnotu derivační časové konstanty $1/T_d$ půl dekády doprava od frekvence řezu, šířka pásma derivace půl dekády (opatrný návrh).



Obr. 3.1 Frekvenční charakteristika (2 bary)

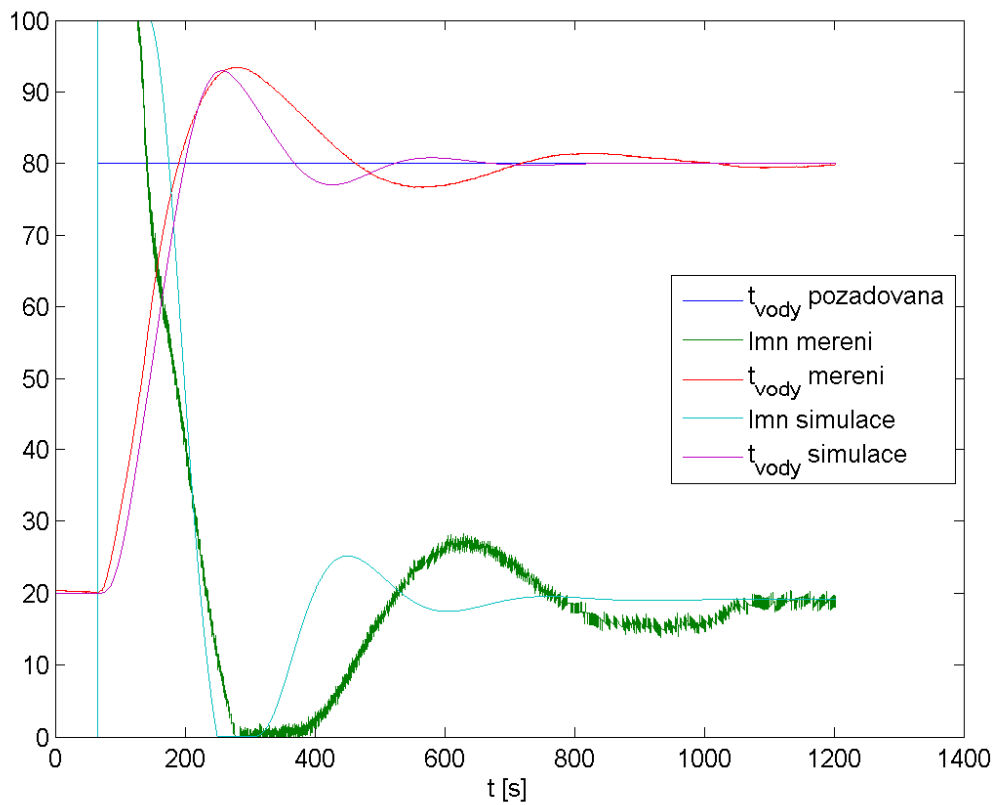


Obr. 3.2 Frekvenční charakteristika (10 barů)

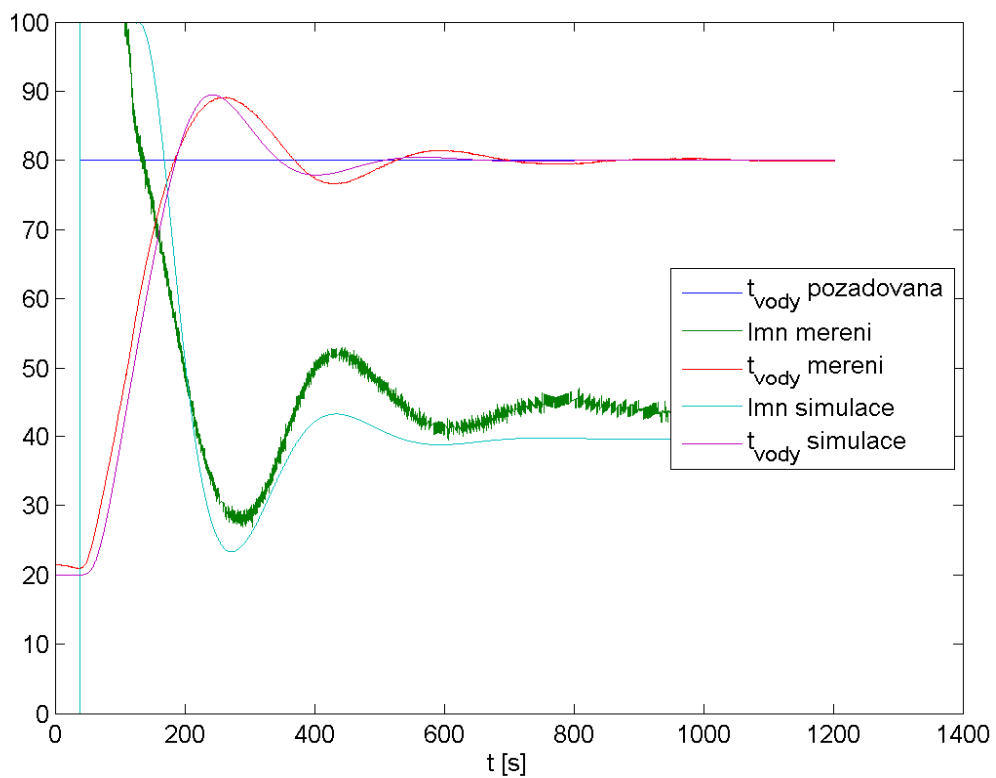
3.2 Optimalizace parametrů regulátoru

3.2.1 Simulace pomocí odezvy na skokovou změnu požadované teploty

Skript návrhu byl zpracován v MATLABu. Pro ověření správnosti funkce simulačního modelu provedeme simulaci odezvy na skokovou změnu požadované teploty vody s originálními parametry regulátoru, které byly použity při měření. Ověření parametrů bylo provedeno pro oba mezní tlaky. Simulované charakteristiky jsou na *Obr. 3.3* pro 2 bary a na *Obr. 3.4* pro 10 barů.



Obr. 3.3 Přechodové charakteristiky s originálními parametry (2 bary)

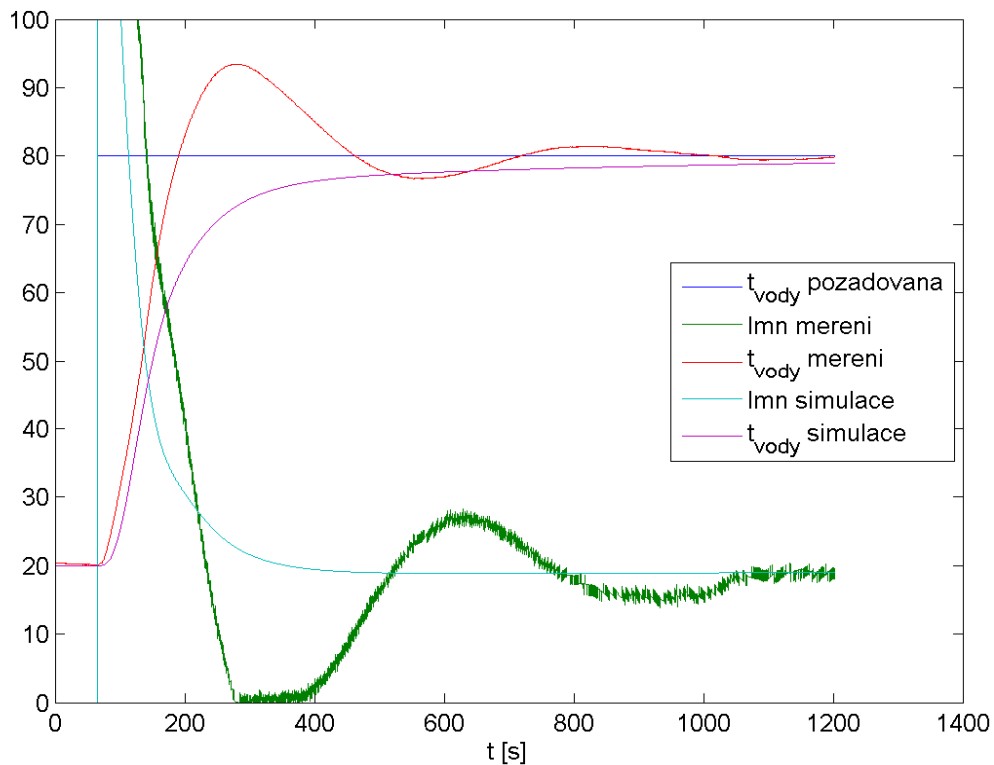


Obr. 3.4 Přechodové charakteristiky s originálními parametry (10 barů)

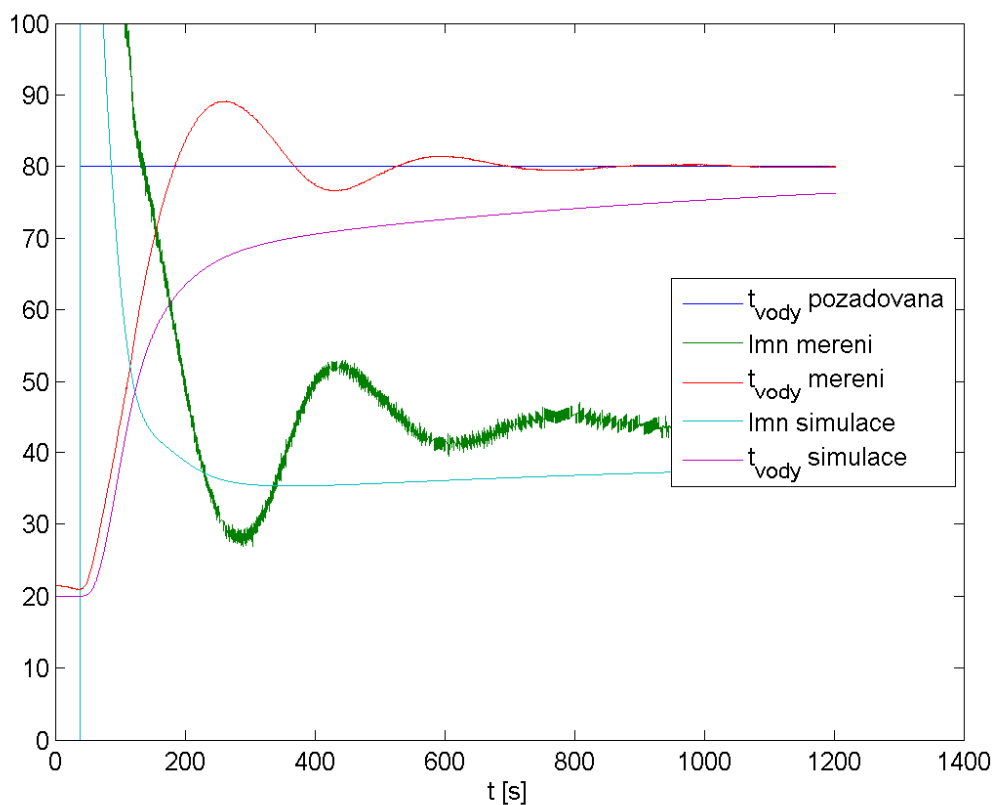
Ve všech případech vyšla simulace obdobně jako měření. Originální parametry regulátoru byly ověřeny i na modelu dle fyzikální rozvahy. Z tohoto hlediska modelu můžeme věřit a parametry odpovídají. Provedeme tedy ještě návrh PID parametrů na základě frekvenčních charakteristik.

3.2.2 Simulace pomocí frekvenčních charakteristik

Nejprve jsme provedli simulaci na základě parametrů odhadnutých z frekvenčních charakteristik. Opět jsme volili tlaky pro mezní stavy. Průběh charakteristik je na obrázku *Obr. 3.5* pro tlak 2 bary a na *Obr. 3.6* pro tlak 10 barů.

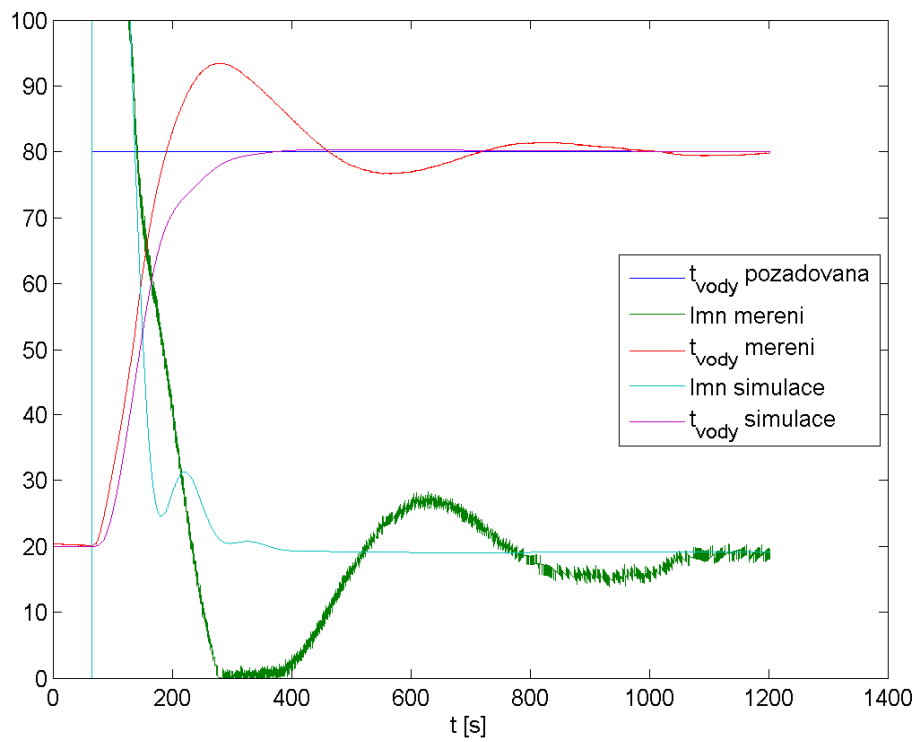


Obr. 3.5 Parametry dle odhadu z frekvenčních charakteristik (2 bary)

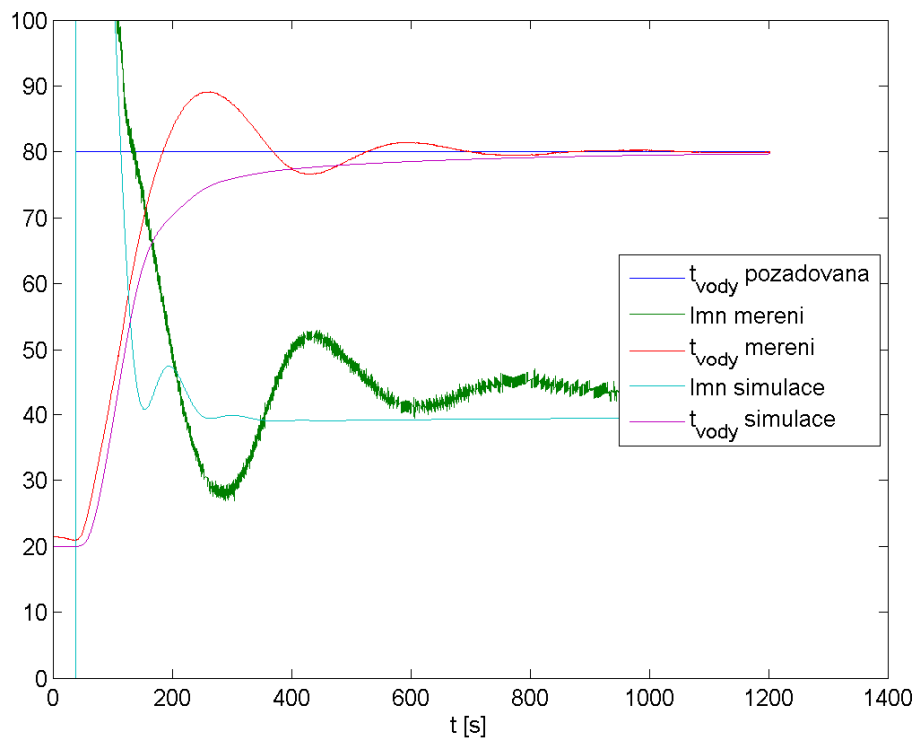


Obr. 3.6 Parametry dle odhadu z frekvenčních charakteristik (10 barů)

Zde se simulace po ověření i v modelu fyzikální rovnice značně rozcházejí. Provedli jsme proto nutnou úpravu parametrů regulátoru a jejich ověření u všech simulací. Skripty se zdrojovým kódem jsou uloženy na médiu v příloze. Simulace dle upravených parametrů je na obrázku *Obr. 3.7* pro 2 bary a na *Obr. 3.8* pro 10 barů.



Obr. 3.7 Simulace dle upravených parametrů (2 bary)



Obr. 3.8 Simulace dle upravených parametrů (10 barů)

4 Možnost ověření získaných parametrů regulátoru v reálné soustavě

Parametry u aktuálního stroje nelze ověřit, neboť zařízení je již instalováno u zákazníka.

Simulace ovšem vyšly natolik věrohodně, že výsledným parametrům můžeme věřit.

Z hlediska optimalizace navrhuji zakomponování průtoku, jako veličiny do regulátoru a v řídicím systému je nutné při vypnuté funkci spirály zastavit regulační proces. V opačném případě má regulátor integrováno dopředu a při příštím spuštění zařízení nebude fungovat optimálně.

Závěr

V této práci jsem splnil všechny body zadání s výjimkou ověření parametrů regulátoru v reálné soustavě. Aby to bylo věrohodné, musel bych parametry vyzkoušet na stejném zařízení. To bohužel není možné, protože stroj je již u zákazníka. Výrobní proces i s odladěním trvá přibližně tři týdny. Můžeme však konstatovat, že simulační model je natolik věrný, že navržené parametry v reálných podmínkách zlepšení přinesou.

Ze znalostí funkce je v první kapitole popsán celý systém vysokotlakého vstřikování. Jedná se o zařízení, které je součástí zařízení výrobní linky pro automatizované plnění lahví pivem, u které jsem zaměstnán. Nejprve bylo provedeno měření teploty při otevřené regulační smyčce pro mezní tlaky 2 bary a 10 barů s trvale sepnutým výstupem na topnou spirálu, tím byla zjištěna odezva na skok. Poté jsem měření zopakoval se zapnutým regulátorem a originálními parametry. S pomocí doporučených informačních zdrojů od vedoucího práce se mi podařilo najít dva způsoby, jak sestavit zjednodušený simulační model regulované soustavy. První popisuje návrh dle fyzikální rozvahy. S tímto modelem jsem nebyl spokojen, neboť přechodové charakteristiky neodpovídaly reálným podmínkám. Provedl jsem proto druhý návrh, kde byla použita metoda aproximace astatické soustavy operátorovým přenosem. Zde přechodové charakteristiky vycházejí daleko lépe a odpovídají hodnotám teplot, které byly změřeny v reálných podmínkách. Pro ověření správnosti modelu regulační soustavy jsem nejprve vytvořil přechodové charakteristiky teploty dle naměřených hodnot a simulace. Byla zde snaha nastavit parametry regulátoru tak, aby výsledná přechodová charakteristika teploty co nejvíce odpovídala naměřené ve všech čtyřech případech. To znamená pro oba mezní tlaky a pro oba návrhy modelu regulované soustavy. Poté byly výsledky porovnány a můžeme říct, že se simulace shoduje s reálnými podmínkami. Model regulované soustavy je tedy v pořádku a parametry regulátoru ze simulace se shodují s originálními.

Na základě modelu byly odvozeny frekvenční charakteristiky regulované soustavy.

Z těchto charakteristik byly odhadnuty parametry regulátoru a provedena simulace odezvy na skok požadované teploty. V souladu s konzervativním přístupem při návrhu parametrů regulátoru pomocí frekvenčních charakteristik byla výsledkem nedostatečná dynamika regulační smyčky, proto byly parametry regulátoru na základě simulací upraveny tak, aby bylo pro oba mezní tlaky a modely regulované soustavy dosaženo optimálních průběhů

Mezi perspektivní směry další práce patří zejména:

- další zpřesnění modelu regulované soustavy
- zahrnutí všech funkcí reálného regulátoru Siemens do simulačního modelu
- sledování změn průtoku přitékající studené vody (feedforward)
- v řídicím systému při vypnuté funkci vysokotlakého vstřikování přivést na požadovanou hodnotu regulátoru nulu kvůli omezení nárůstu integrační složky

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Obrazovky operačního panelu plnicího stroje – vytvořeno vývojovým střediskem firmy Krones.
- [2] Wikipedie. Otevřená encyklopedie [online]. [Cit. 16.9.2016] Dostupné z www.wikipedia.org
- [3] Konstrukční nákresy a soupis materiálu pro výrobní proces – strojní konstrukce firmy Krones.
- [4] Aproximace astatické regulované soustavy operátorovým přenosem. [online]. [Cit. 21.11.2016] Dostupné z: http://195.178.94.43/CAAC_PHP/CAAC/cesky/identifikace/apr_asvr/apr_asvr.php