ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ŘÍDÍCÍ TECHNIKY

Bakalářská práce 2006

Podpora výuky dynamických systémů – III

Vypracoval: Dušan Troják

Vedoucí práce: Ing. František Vaněk

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

V Praze dne …….. ……

Podpis

České vysoké učení technické v Praze, fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

Školní rok:2005/2006

Zadání bakalářské práce

Student: Dušan Troják

Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: Laboratoř dynamických systémů – III.

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s modely kuličky na desce (BP), vodáren (V4) a servomechanismu Zuri (S3).
2. Proveďte základní statická měření na všech uvedených modelech.
3. Proveďte změření přechodových charakteristik na všech přidělených modelech.
4. Proveďte změření frekvenční charakteristiky u modelů, kde to je možné.
5. Zpracujte stručný návod na obsluhu modelu.
6. Vytvořte dokument na formát A1-A2 (umístěný na stěnu nad modelem), který bude obsahovat popis systému, HW-zapojení a ukázkový řídicí program v Simulinku.

Seznam odborné literatury: Dodá vedoucí práce

Vedoucí bakalářské práce: Ing. František Vaněk

Datum zadání bakalářské práce: zimní semestr 2005/06

Termín odevzdání bakalářské práce: 30. 6. 2006

Prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

L.S.

Prof. Ing. Zbyněk Škvor, CSc.
děkan

V Praze, dne 1. 2. 2006

ANOTACE

Cílem této bakalářské práce je názorně ukázat principy identifikace soustavy. Dále pak vytvořit podpůrné materiály pro budoucí studenty, které jim umožní lepší pochopení dané problematiky. Metody identifikace jsou ukázány na dvou modelech. První model představují spojené servomechanismy Zuri 92-04, druhý model je pak Vodárna TQ. K těmto modelům byly vytvořeny podpůrné materiály ve formě plakátů a návodů.

ANNOTATION

Objective of this bachelor thesis is demonstrating principles of systems identifications. Next objective is creating of supporting materials for future students that help them better understanding of this broad issue. Methods of identifications are shown on two models. The first are coupled servomechanisms Zuri 92-40, the second is Waterworks TQ. For this models were formed supporting materials in form of posters and instructions.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Františkovi Vaňkovi za cenné informace a pomoc při kompletování mé práce. Děkuji také všem blízkým, kteří mě podporují ve studiu.

OBSAH

ÚVOD K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI……... 8

V4 - Model vodáren – TQ…….. 9

1 ÚVOD……..... 10

1.1 Matematický model a stavové rovnice…….. 10

1.1.1 Základní popis systému…… 10

1.1.2 Rovnice popisující systém…… 11

1.1.3 Stavové rovnice…… 13

1.2 Pracovní bod…….. 13

2 PŘECHODOVÁ CHARAKTERISTIKA SYSTÉMU……... 14

3 STATICKÉ CHARAKTERISTIKY……...……. 15

3.1 Charakteristika závislosti výšky hladiny ve druhém válci na vstupním napětí…… 15

3.2 Charakteristika závislosti průtoku generovaného čerpadlem na vstupním napětí…… 16

3.3 Charakteristika závislosti napětí kapacitního snímače na výšce hladiny…..... 17

4 URČENÍ PARAMETRŮ PRO REALIZACI NELINÁRNÍHO MODELU…...….. 18

4.1 Převodní vztah mezi vstupním napětím a generovaným tokem ($K_č$)...……. 18

4.2 Převodní vztah mezi výškou hladiny a napětím kapacitního snímače (K_y)….. 18

4.3 Plochy podstav válců S_1, S_2 ……..……... 19

4.4 Konstanty vyjadřující hydraulický odpor ventilů……..……19

4.5 Konstanty vyjadřující kapacitu nádob C_1, C_2……..……. 21

5 IDENTIFIKACE MODELU A URČENÍ PŘENOSU……...……...….. 21

5.1 Výpočet přenosu……...……. 22

6 NELINEÁRNÍ MODEL SOUSTAVY A SIMULACE……...…… 24

6.1 Nelineární model……...……...…. 24

6.2 Simulace odezvy na skokový vstupní signál a porovnání s přechodovou charakteristikou……...……...25

7 NAMĚŘENÁ FRAKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA……...…….. 25

8 ZÁVĚR……...……. 27

Spojené servomechanismy Zuri 92-04……..…….. 28

1 ÚVOD……...……... 29

1.1 Matematický model a stavové rovnice……...……... 29

1.1.1 Základní popis systému…… 29

1.1.2 Rovnice popisující systém……30

1.1.3 Stavové rovnice…… 30

2 STATICKÁ CHARAKTERISTIKA……...……..… 31

2.1 Charakteristika rychlosti otáčení na vstupním napětí……... 31

3 PŘECHODOVÁ CHARAKTERISTIKA A PRACOVNÍ BOD……...…… 32

4 URČENÍ PARAMETRŮ PRO REALIZACI MODELU……...…… 33

4.1 Určení konstanty pružiny……...……... 33

4.2 Určení brzdného tření a setrvačnosti hřídelí…….. 34

4.3 Určení elektrické konstanty motoru……...……... 36

4.4 Určení ostatních konstant……...……... 37

5 SIMULINKOVÝ MODEL SOUSTAVY A SIMULACE……...……... 38

5.1 Simulinkový model……...…… 38

5.2 Simulace odezvy na vstupní signál a porovnání……...……. 39

6 IDENTIFIKACE MODELU A URČENÍ PŘENOSU……...…. 40

6.1 Výpočet přenosu……...…. 40

6.2 Porovnání vypočteného přenosu s reálným systémem……...……... 43

7 FRAKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA……...……... 44

7.1 Měření frekvenční charakteristiky ……...……. 44

ZÁVĚR……...…..……... 46

ZHODNOCENÍ PRÁCE……...……... 48

Použité materiály a literatura.....……...……. 49

Použitý software……...……. 49

Obsah přiloženého CD……...……... 50

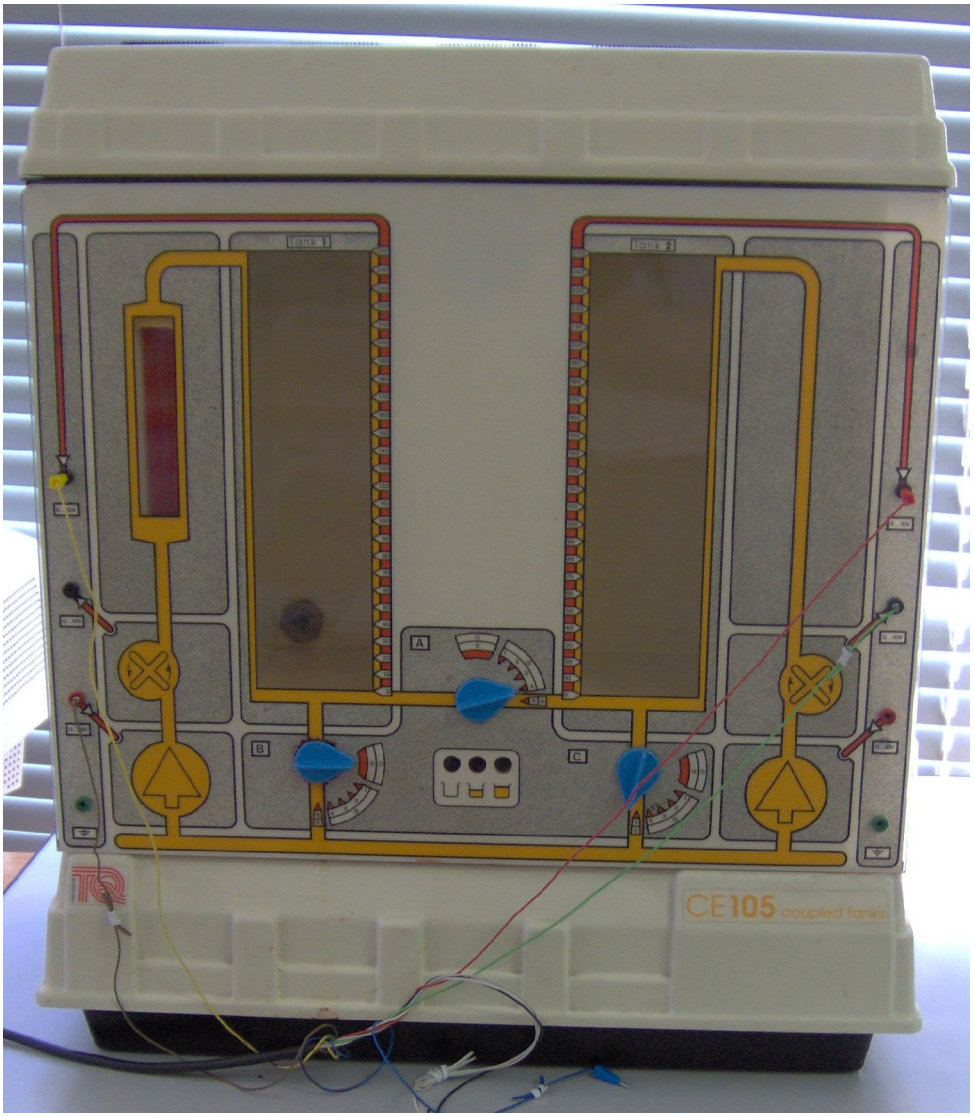
ÚVOD K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Cílem mé bakalářské práce je ukázat na konkrétních reálných systémech postup, kterým je možné tyto soustavy identifikovat a tím pádem získat přenos systému. Při identifikaci je nutné využít základních charakteristik systému, mezi které patří statické charakteristiky, přechodové charakteristiky frekvenční charakteristiky. Názornou ukázkou metod identifikace si tato bakalářská práce klade za cíl umožnění lepšího pochopení samotného postupu získání přenosu soustavy. Získané přenosy lze pak využít k návrhu regulátorů a řízení soustav. Identifikace tak umožňuje popsat neznámou soustavu přenosem, který popisuje její základní vlastnosti.

Dalším cílem této práce je vytvoření podpůrného materiálu pro budoucí studenty, mezi které patří návody k jednotlivým systémům (vodárna, spojené servomechanismy), plakáty obsahující obecné informace o těchto soustavách. Studenti tak budou mít možnost lépe se seznámit s danou soustavou. V návodech, které se týkají ovládání jednotlivých modelů, jsem se pokusil upozornit na různá úskalí, na která mohou budoucí studenti narazit.

Po domluvě s vedoucím bylo zadání této bakalářské práce redukováno. Na třetím modelu nemohlo být z technických důvodů provedeno měření.

V4 - Model vodáren – TQ

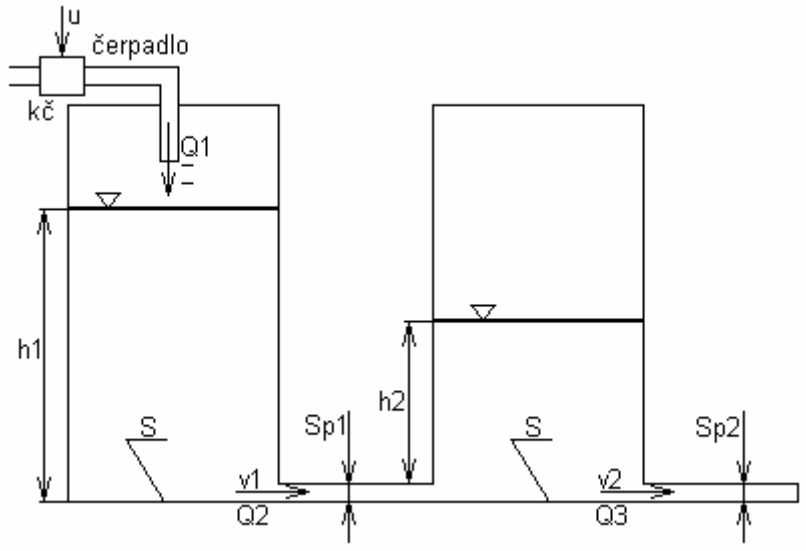


1 ÚVOD

1.1 Matematický model a stavové rovnice

1.1.1 Základní popis systému

Jedná se o dvě nádoby, které jsou spojené u dna trubičkou o průřezu Sp_1, z druhé nádoby voda vytéká potrubím o průřezu Sp_2. První nádoba je plněná čerpadlem. Měříme hladinu ve druhé nádobě. Vstupem do soustavy je napětí na čerpadlu, výstupem je napětí snímače výšky hladiny v druhé nádobě. Model je připojen k PC přes I/O kartu a je možné jej řídit prostředí Matlab + RealTime toolbox.



Obr. 1

Použité symboly:

h_1,h_2……Výšky hladin

S_{p1},S_{p2}……Průřezy potrubí

$k_č$…….Konstanta čerpadla

u……...Napětí na čerpadle

Q_1,Q_2,Q_3.....Objemové toky v potrubích

S……..Obsahy základen válcových nádob

v_1,v_2…….Rychlost proudící kapaliny

1.1.2 Rovnice popisující systém

Rychlost kapaliny proudící v potrubí je dána vztahem : $v = \sqrt{2gh}$ (1)

Objemový tok procházející potrubím mezi nádobami se spočítá jako součin rychlosti kapaliny a průřezu potrubí :

$$Q_2 = v_1 S_{p1} \tag{2.1}$$

obdobně tok vytékající kapaliny z druhého válce : $Q_3 = v_2 S_{p2}$ (2.2)

Tok Q_1 je dán vztahem $Q_1 = k_č u$, kde $k_č$ je konstanta čerpadla a u el. napětí. Změna objemu v nádobách je dána celkovým objemovým tokem do nebo z nádoby, to lze popsat takto:

$$Q_1 - Q_2 = \frac{d}{dt} h_1 S \quad \text{pro první nádobu} \tag{3.1}$$

$$Q_2 - Q_3 = \frac{d}{dt} h_2 S \quad \text{pro nádobu druhou.} \tag{3.2}$$

Teď použiji vztah (1) pro vyjádření rychlostí v_1 a v_2:

$$v_1 = \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \tag{4.1}$$

$$v_2 = \sqrt{2gh_2} \tag{4.2}$$

Dosadím vztahy (4) do vztahů (2), potom vztahy (2) do vztahů (3) a dostanu:

$$Q_1 - S_{p1}\sqrt{2g(h_1 - h_2)} = \frac{d}{dt} h_1 S \tag{5.1}$$

$$S_{p1}\sqrt{2g(h_1 - h_2)} - S_{p2}\sqrt{2gh_2} = \frac{d}{dt} h_2 S \tag{5.2}$$

Vyjádřím stavové rovnice, kde h_1,h_2 jsou stavové proměnné, Q_1 bude vstup, protože $Q_1 = k_č u$, y je výstup a platí y = h_2.

Stavové rovnice:

$$\dot{h}_1 = \frac{Q_1}{S} - \frac{S_{p1}}{S}\sqrt{2g(h_1 - h_2)} \tag{6.1}$$

$$\dot{h}_2 = \frac{S_{p1}}{S}\sqrt{2g(h_1 - h_2)} - \frac{S_{p2}}{S}\sqrt{2gh_2} \tag{6.2}$$

$$y = h_2 \tag{6.3}$$

Z předešlých rovnic (6.1) a (6.2) je patrné, že hlavní příčinnou nelinearity daného systému je přítomnost odmocniny a jí příslušející nelineární závislost rychlosti proudění kapaliny v potrubí na výšce hladiny.

Pro vyjádření stavových rovnic ve tvaru pracujícím s tlaky je potřeba udělat několik drobných úprav. Použiji vztah (1)

$$v = \sqrt{2hg}$$

pomocí něhož získám vztah mezi Q a p

$$Q = S \cdot v = \sqrt{\frac{2 \cdot S^2}{\rho}} \cdot \sqrt{p} \tag{7.1}$$

kde vztah $\sqrt{\frac{2 \cdot S^2}{\rho}}$ označím jako K_v (7.2)

Vztah mezi $\dot{h}$ a $\dot{p}$ získám následujícím způsobem ze vztahu:

$$p = \frac{1}{\mathrm{C}} \int Q \cdot dt \tag{7.3}$$

Dalšími úpravami dostávám

$$= \frac{1}{C}\int S \cdot v \cdot dt = \frac{1}{C}\int S \cdot \dot{h} \cdot dt$$

Což vede na vztah

$$\dot{h} = \frac{1}{S} C \cdot \dot{p} \tag{7.4}$$

1.1.3 Stavové rovnice

$$\dot{p}_1 = \frac{1}{C_1}\left(K_č \cdot u - K_{vm}\sqrt{p_1 - p_2}\right) \tag{8.1}$$

$$\dot{p}_2 = \frac{1}{C_2}\left(K_{vm}\sqrt{p_1 - p_2} - K_{vv}\sqrt{p_2}\right) \tag{8.2}$$

$$y = K_{ÿ} \cdot p_2 \tag{8.3}$$

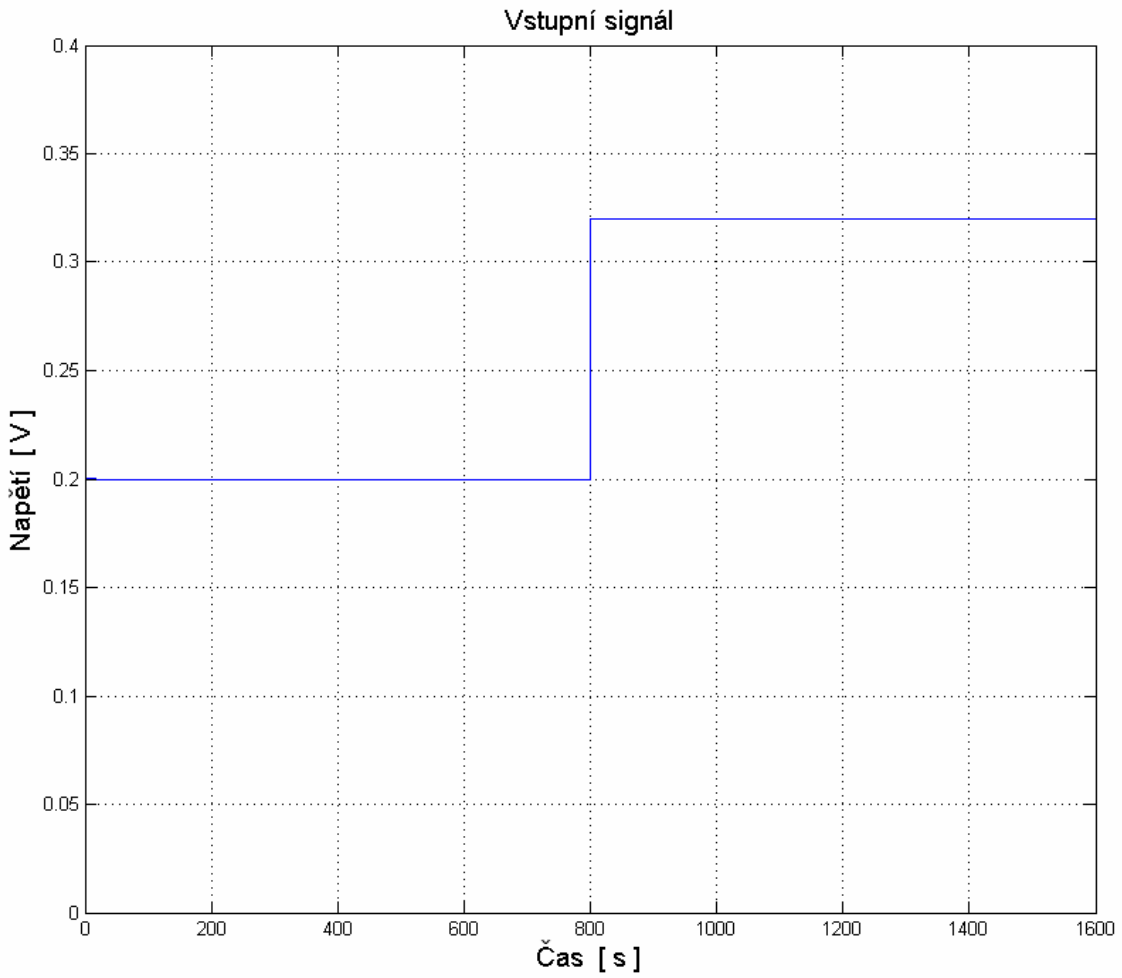
kde K_V jsou vnitřní konstanty přepouštěcího (K_{VM}) a vypouštěcího ventilu (K_{VV}). Výstupem ze simulace je napětí na snímači výšky hladiny ve druhem válci, toto napětí dostávám přes převodní vztah K_Y.

1.2 Pracovní bod

Nastavení pracovního bodu jsem zvolil dle pracovního rozsahu. Rozsah čerpadla se pohyboval při práci se simulinkovým modelem v rozmezí -1 až 1 (bezrozměrné jednotky). Pásmo, kdy čerpadlo pro dané napětí nečerpalo (pásmo necitlivosti), se nacházelo v rozsahu -1 až -0,4. Tudíž jsem zvolil hodnotu pracovního bodu přibližně v polovině pracovního rozsahu, a to v 0,2. Nastavení ventilů pro zvolený pracovní bod jsem volil tak, aby se docílilo takového stavu, kdy by v prvním válci byla hladina na úrovni 2/3 výšky válce a ve druhém válci by se hladina ustálila mírně nad 1/5 výšky válce. Tato podmínka byla zvolena z toho důvodu, aby se zajistil dostatečný rozdíl výšek hladin. Pokud by se sobě výšky hladin blížily, soustava by vykazovala chování podobné soustavě tvořené jedním válcem (nevhodné).

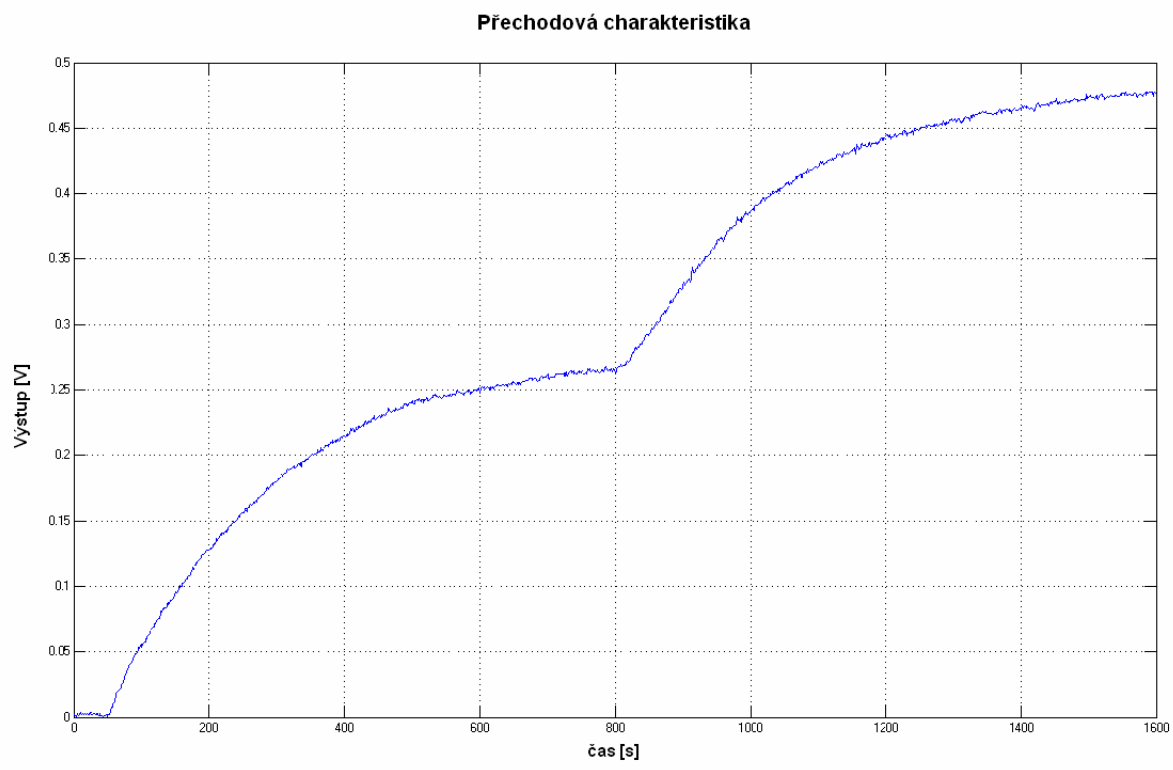
2 PŘECHODOVÁ CHARAKTERISTIKA SYSTÉMU

Přechodová charakteristika je definována jako odezva systému na jednotkový skok při nulových počátečních podmínkách. Tyto podmínky jsou splněny pro libovolný rovnovážný pracovní bod. Měření přechodové charakteristiky jsem provedl v určeném pracovním bodě. Mnou použitý vstup ale není jednotkový skok, použil jsem upravený signál, tvarem shodný s jednotkovým, ale lišící se amplitudou. Výška skoku byla zvolena o 10% větší, nežli původní hodnota vstupního signálu. Vstupní signál měl tedy tvar skoku z hodnoty 0,2 na 0,32. Čas skoku byl zvolen 800 sekund a to z toho důvodu, aby došlo k dostatečnému ustálení hladiny.



Graf 1

Takto vygenerovaný signál (graf 1) byl puštěn na vstup soustavy. Odezvou soustavy na předcházející vstupní signál byl následující výstup (graf 2). Tento výstup je hledaná přechodová charakteristika systému.



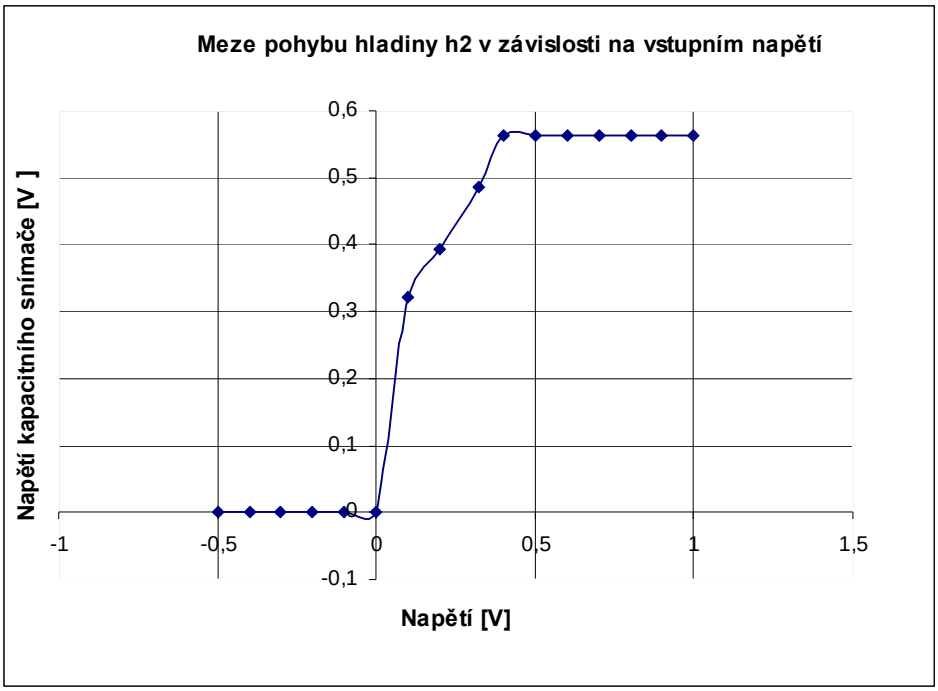
Graf 2

3 STATICKÉ CHARAKTERISTIKY

Statická charakteristika je závislost výstupní veličiny na veličině vstupní v ustáleném stavu.

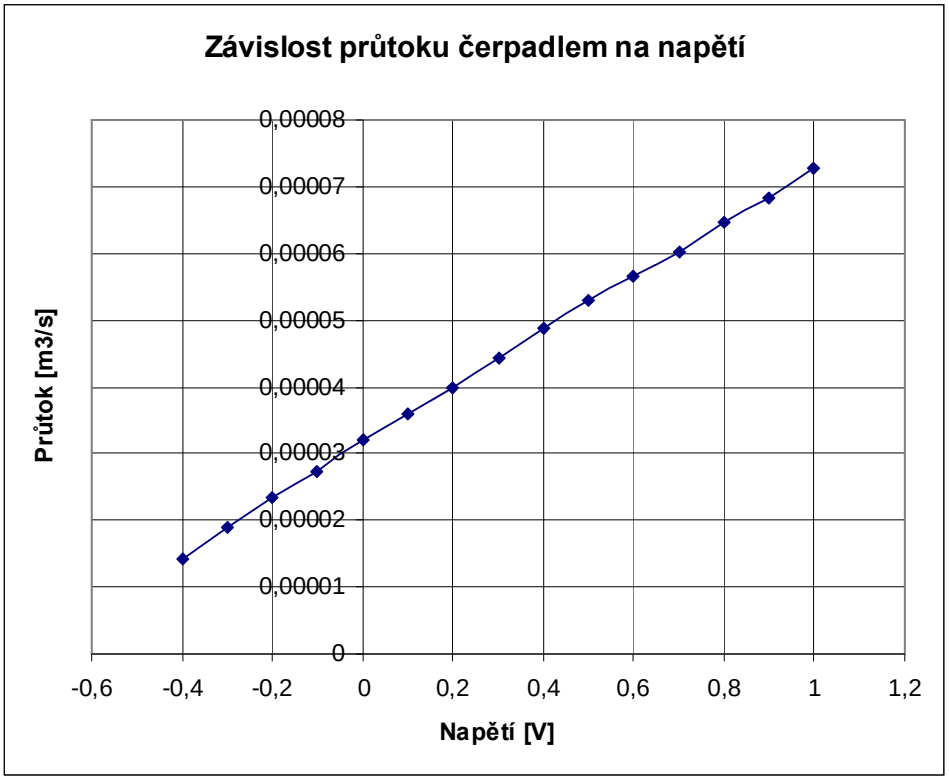
3.1 Charakteristika závislosti výšky hladiny ve druhém válci na vstupním napětí

Pro toto nastavení ventilů jsem proměřil charakteristiku závislosti výšky hladiny ve druhém válci na vstupním napětí. Horní mez hladiny h_2 je omezena přepadem prvního válce, kdy se voda již přelévá a první válec je zcela naplněn. Dolní mez je dána mírou otevření vypouštěcího ventilu, který pro malá vstupní napětí stačí odvádět přítok generovaný čerpadlem. Výsledek je vidět na grafu (graf 3).



Graf 3

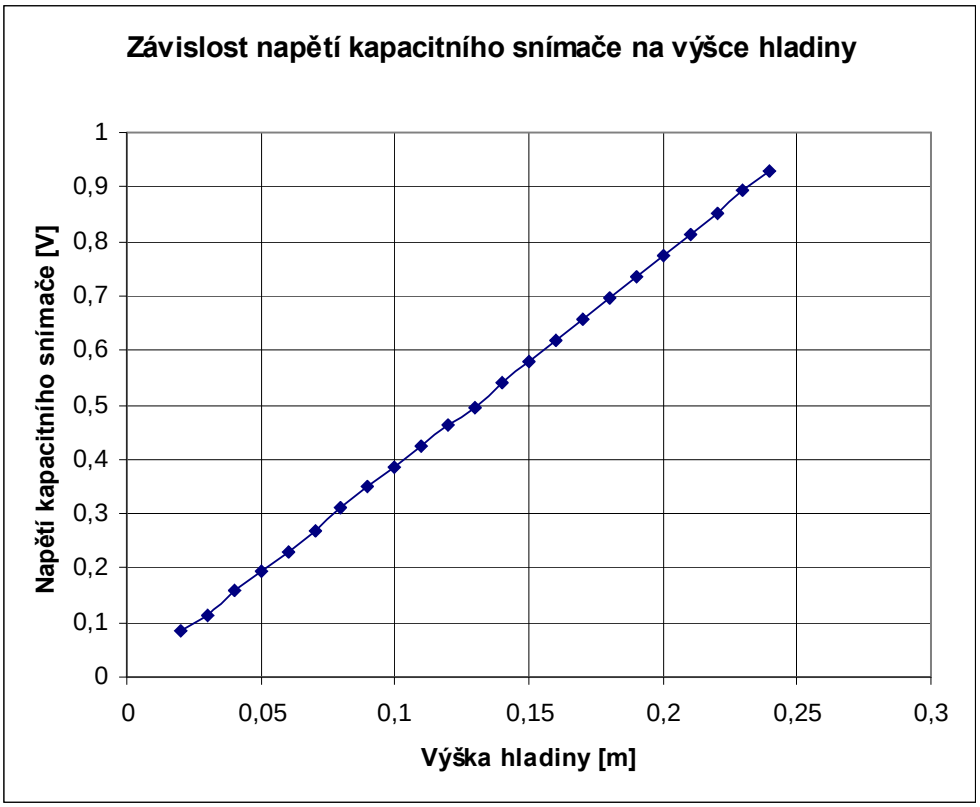
3.2 Charakteristika závislosti průtoku generovaného čerpadlem na vstupním napětí



Graf 4

Měření jsem provedl tak, že byl vypuštěn první válec a uzavřen jeho přepouštěcí ventil do druhého válce. Pro danou hodnotu napětí se po pevně nastavený časový interval 30 sekund čerpalo do prvního válce. Po 30 sekundách se čerpání přerušilo. Objem načerpané vody se posléze snadno odečetl ze stupnice válce. Výsledný průtok byl vypočítán následovně: $Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}$ kde ΔV je objem načerpané vody a Δt je doba čerpání.Výsledek je vidět na grafu (graf 4).

3.3 Charakteristika závislosti napětí kapacitního snímače na výšce hladiny



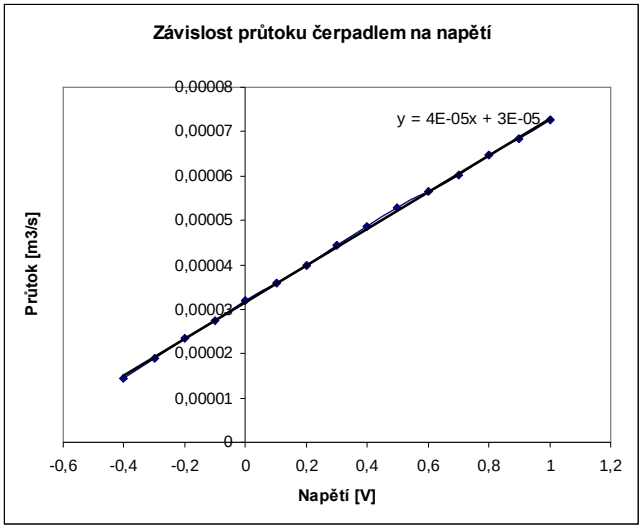
Graf 5

V tomto případě jsem postupoval tak, že se zcela napustil druhý válec. Oba ventily byly uzavřeny. Poté se přes vypouštěcí ventil postupně po jednotlivých krocích upouštělo a zároveň se odečítala hodnota výstupu kapacitního snímače. Při měření jsem zjistil aditivní poruchu kapacitního snímače, který nulovou hladinu detekoval záporným napětím -0.052V. Pro nulovou hladinu ale požadujeme nulové napětí snímače. Výsledkem je graf (graf 5).

4 URČENÍ PARAMETRŮ PRO REALIZACI NELINÁRNÍHO MODELU

4.1 Převodní vztah mezi vstupním napětím a generovaným tokem ($K_č$)

Graf 6:



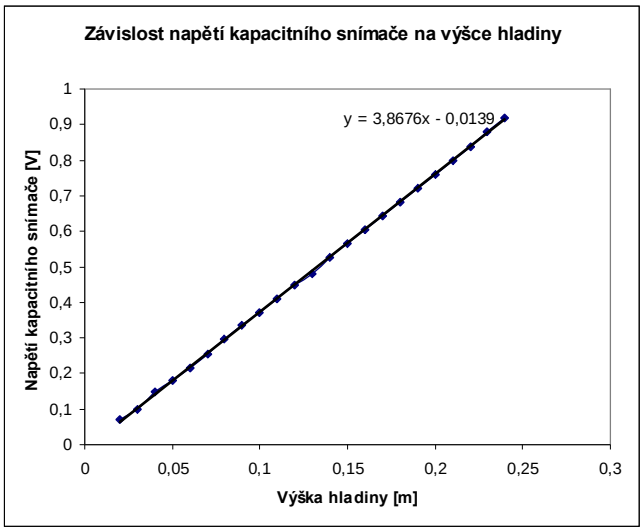
Pro určení tohoto vztahu jsem použil související naměřenou charakteristiku (graf 4). Naměřené hodnoty se proložily přímkou (spojnice trendu) a její výsledný tvar určil hledaný převodní vztah (graf 6):

$$y = 4 \cdot 10^{-5} x + 3 \cdot 10^{-5}$$

Kde hodnota y je výsledný průtok a x je dosazované vstupní napětí.

4.2 Převodní vztah mezi výškou hladiny a napětím kapacitního snímače (K_y)

Graf 7:



Opět jsem pro určení vztahu použil související charakteristiku (graf 5) a byl též opakován postup s proložením přímky (graf 7). Její rovnice je následující:

$$y = 3.867x - 0{,}0139$$

Kde hodnota y je výsledné napětí kapacitního snímače a x je dosazovaná výška hladiny.

4.3 Plochy podstav válců S_1, S_2

Plocha válců jsem určil pomocí vztahu $S = \frac{\Delta V}{\Delta l}$ kde ΔV je objem a Δl je délka válce, představující tento objem. Pro odečtený objem ΔV = 1,5 litru vyšla délka Δl =0,15 metru.

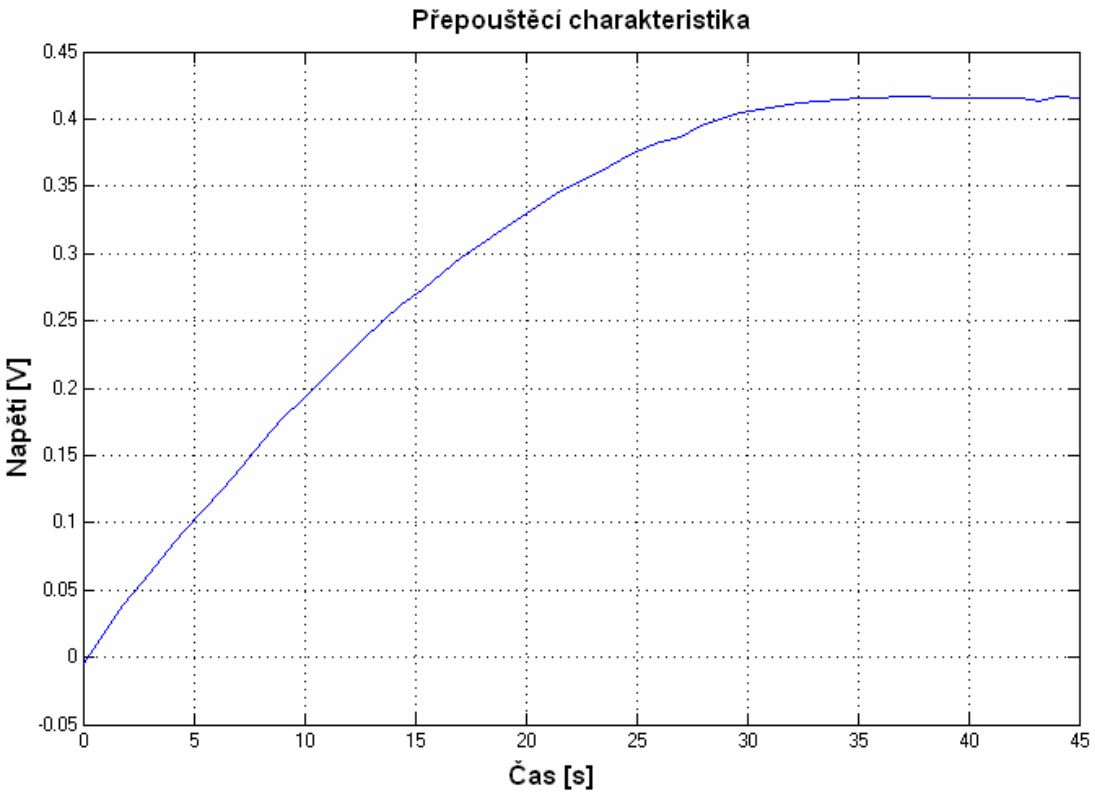
$$S_1 = S_2 = \frac{\Delta V}{\Delta l} = 0{,}01 \ [\ m^2\ ] \qquad (9)$$

4.4 Konstanty vyjadřující hydraulický odpor ventilů

Jak již bylo výše uvedeno (7.1) a (7.2) , konstantu Kv spočtu jako

$$K_v = \frac{Q}{\sqrt{p}} = \frac{\Delta V}{\Delta t \cdot \sqrt{\Delta h \cdot \rho \cdot g}}$$

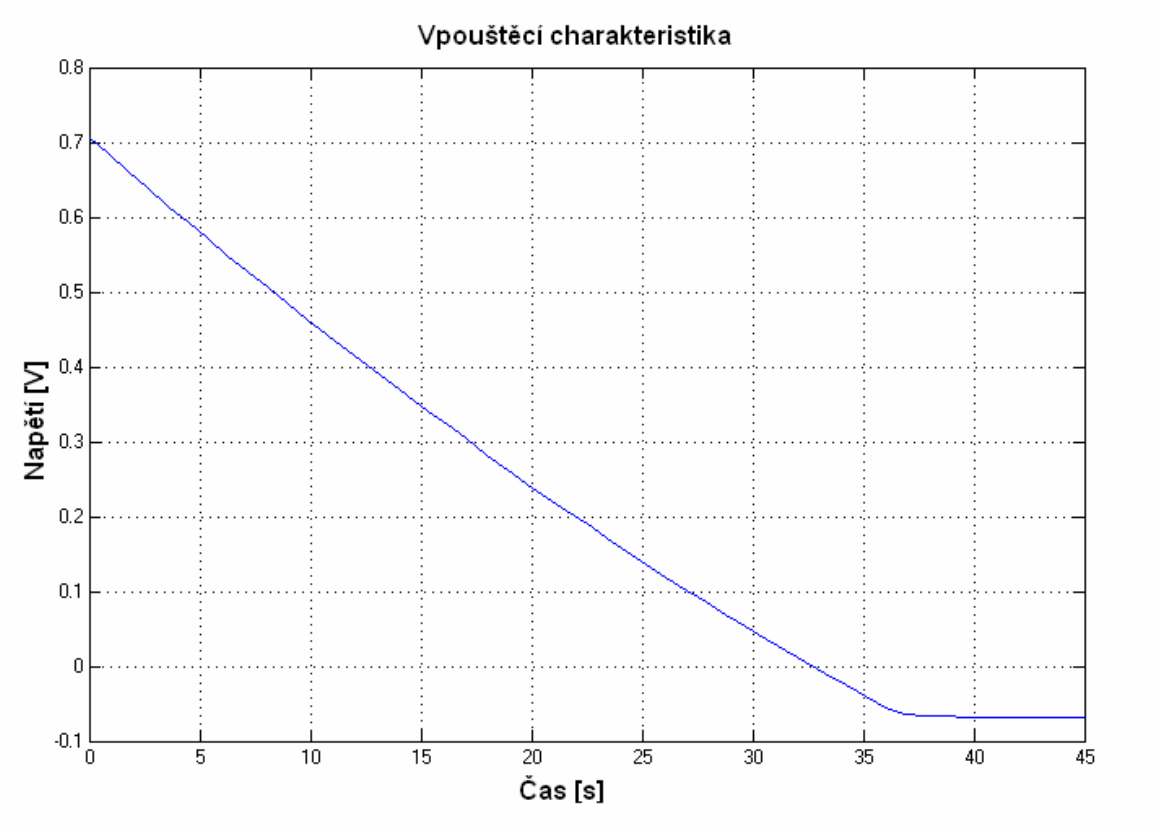
Potřebné údaje do tohoto vzorce získám z přepouštěcí (graf 8) a vypouštěcí (graf 9) charakteristiky:



Graf 8

Přepouštěcí charakteristiku jsem měřil tak, že jsem měřil časovou závislost změny výšky hladiny ve druhém válci, který byl na začátku prázdný. První válec byl na počátku měření napuštěn a po otevření přepouštěcího ventilu došlo k vyrovnání hladin. Vypouštěcí ventil byl po celou dobu měření zavřen.

$$K_{vm} = 0.9669 \cdot 10^{-6} \quad [m^{\frac{7}{2}} \cdot kg^{-\frac{1}{2}}] \quad .$$



Graf 9

Vypouštěcí charakteristiku jsem měřil tak, že jsem měřil časovou závislost změny výšky hladiny ve druhém válci, který byl na počátku plný. Od druhého válce byl oddělen uzavřeným přepouštěcím ventilem. Po otevření vypouštěcího ventilu došlo k vypuštění druhého válce. Zde je patrná dříve zmiňovaná aditivní porucha kapacitního snímače, který při nulové hladině ukazoval záporné napětí.

$$K_{vv} = 1.316 \cdot 10^{-6} \quad [m^{\frac{7}{2}} \cdot kg^{-\frac{1}{2}}]$$

Jednotky těchto konstant z fyzikálního hlediska nemají smysl. Jde o uměle zavedené konstanty a proto tyto jednotky vyšly takto nefyzikálně

4.5 Konstanty vyjadřující kapacitu nádob C_1, C_2

Ze vztahu (7.3) $p = \frac{1}{C}\int Q \cdot dt$ vyjádřím $C = \frac{V}{p} = \frac{S}{\rho \cdot g}$

Jelikož jsou nádoby stejné je $C = C_1 = C_2 = 1{,}019 \cdot 10^{-6}$ $[m^4 \cdot kg^{-1} \cdot s^2]$

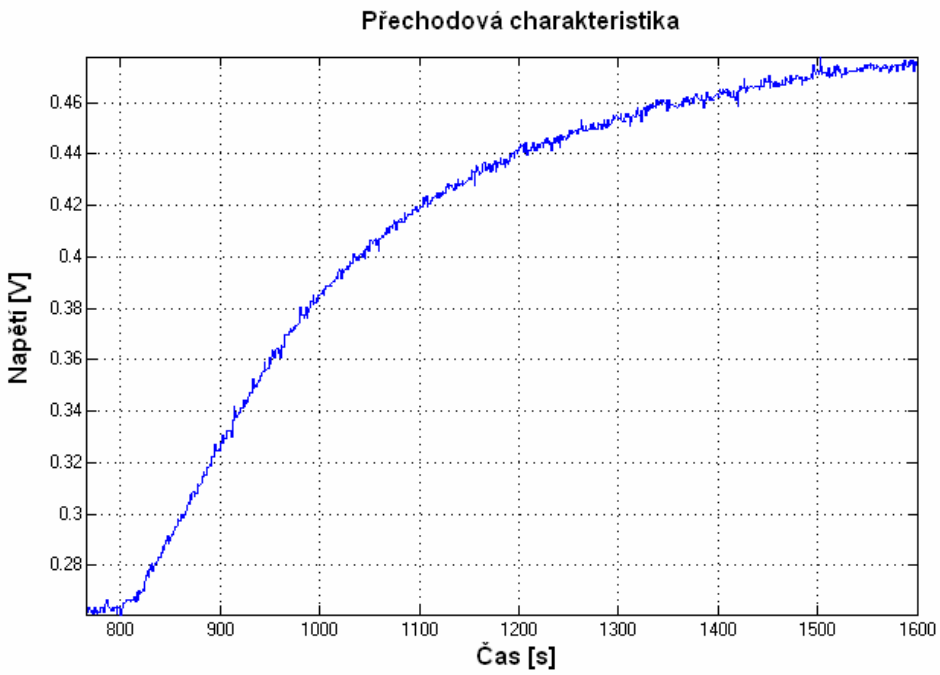
Při výpočtu jsem dosazoval hodnoty získané z předchozích výpočtů.

Nyní již mám vše potřebné k realizování nelineárního modelu. Ten vytvořím na základě získaných nelineárních rovnic. Zbývá ještě identifikace modelu z přechodové charakteristiky a určení přenosu.

5 IDENTIFIKACE MODELU A URČENÍ PŘENOSU

Přenosem systému nazýváme poměr Laplaceova obrazu výstupu ku Laplaceovu obrazu vstupu při nulových počátečních podmínkách. Vyjadřujeme ho tvarem:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$



Graf 10

Z přechodové charakteristiky (graf 10) je patrné, že se jedná zřejmě o statický systém vyššího řádu, který budu aproximovat vztahem (využil jsem literaturu [1]):

$$G(s) = \frac{K}{(1+sT)^n} \quad \text{nebo} \quad G(s) = \frac{K}{(1+sT_1)\cdot(1+sT_2)} \tag{10}$$

K zesílení systému

n řád systému

T n-násobná časová konstanta systému

Z grafu byly odečteny hodnoty časových konstant Tu a Tn.

Doba průtahu: Tu = 16s

Doba náběhu: Tn = 300 s

$$t_u = \frac{\mathrm{Tu}}{\mathrm{Tn}} = 0.053 \tag{10.1}$$

$t_u < 0.104$ a tudíž obecný přenos bude $G(s) = \dfrac{\mathrm{K}}{(1+\mathrm{T}_1\cdot s)\cdot(1+T_2\cdot s)}$

Z tabulek lze určit další parametr: t = 0.1

5.1 Výpočet přenosu:

Platí rovnice:

$$t = \frac{\mathrm{T}_2}{\mathrm{T}_1} \qquad \text{a} \qquad T_1 + T_2 = \frac{\mathrm{t}_1}{1{,}2564} \tag{10.2}$$

t_1 = 286 s (z grafu)

t_1 je čas , kdy výstupní veličina dosáhne 72% své maximální hodnoty

Mám tedy k dispozici dvě rovnice (10.2) o dvou neznámých:

$$0.1 = \frac{\mathrm{T}_2}{\mathrm{T}_1} \qquad \text{a} \qquad T_1 + T_2 = \frac{286}{1{,}2564}$$

Z těchto rovnic vypočtu konstanty: $T_1 = 206{,}94$ s, $T_2 = 20{,}69$ s .

Výsledný přenos s dosazenými hodnotami:

$$G(s) = \frac{1{,}8}{(1+20.69\cdot s)\cdot(1+206{,}69\cdot s)} = \frac{1{,}8}{4282s^2+227{,}6s+1} \qquad (10.3)$$

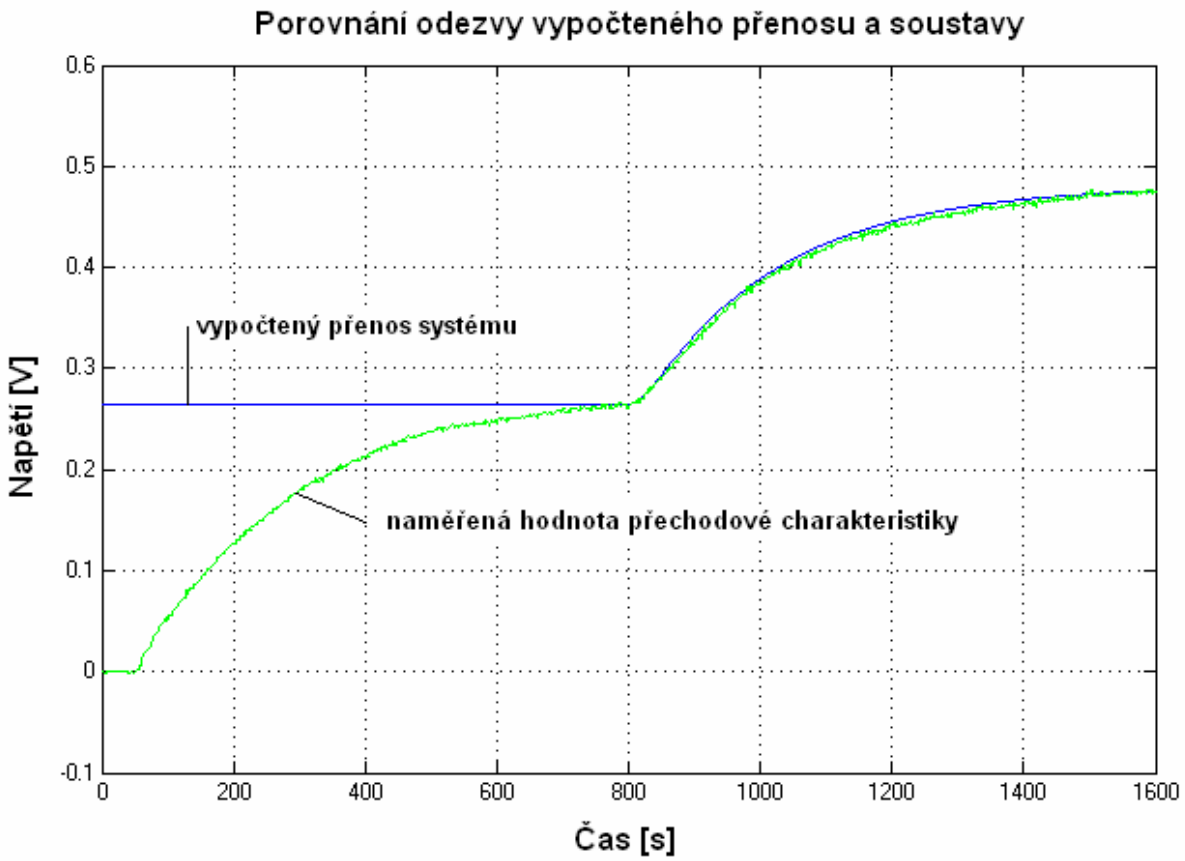
Hodnotu zesílení jsem určil experimentem pomocí matlabu při porovnávání odezvy přenosu a soustavy na skokový vstup.

Přenos lze ještě zpřesnit zahrnutím zpoždění čerpadla, které odpovídá tvaru $G(s) = \frac{1}{4s+1}$

=>

$$G(s) = \frac{1{,}8}{4282{,}1s^2+227{,}6s+1}\cdot\frac{1}{4s+1} = \underline{\frac{1{,}8}{1.713\cdot 10^4\, s^3+5192\, s^2+231{,}6\, s+1}} \qquad (10.4)$$

Porovnáním námi vytvořeného přenosu (10.4) a soustavy jsem dostal (graf 11):

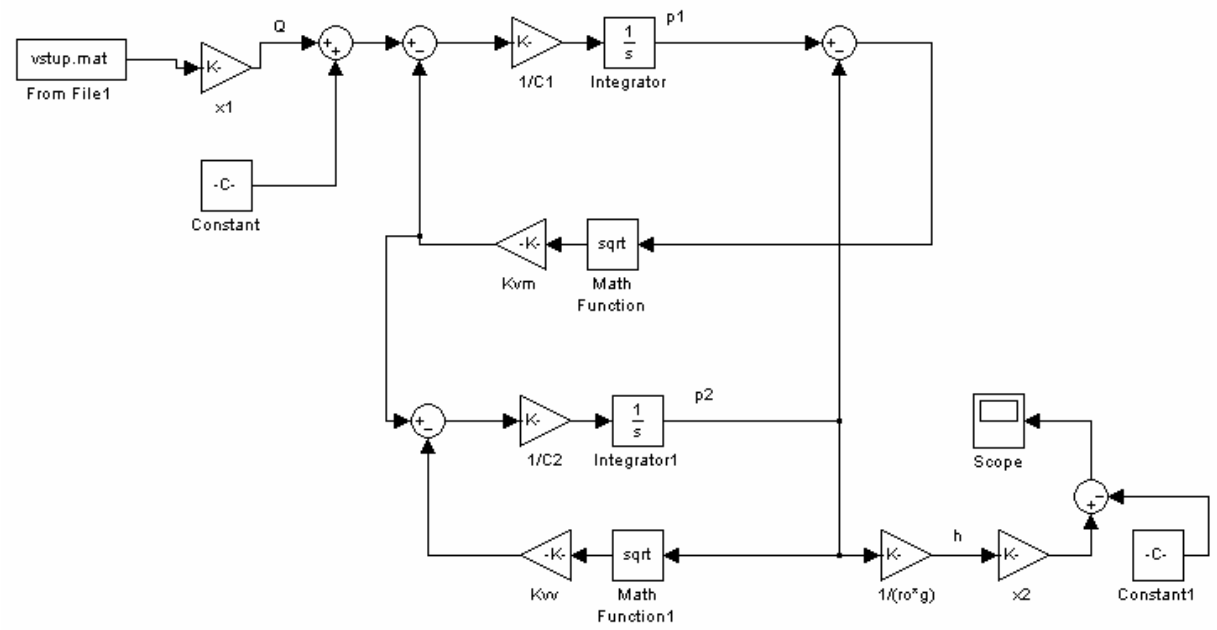


Graf 11

6 NELINEÁRNÍ MODEL SOUSTAVY A SIMULACE

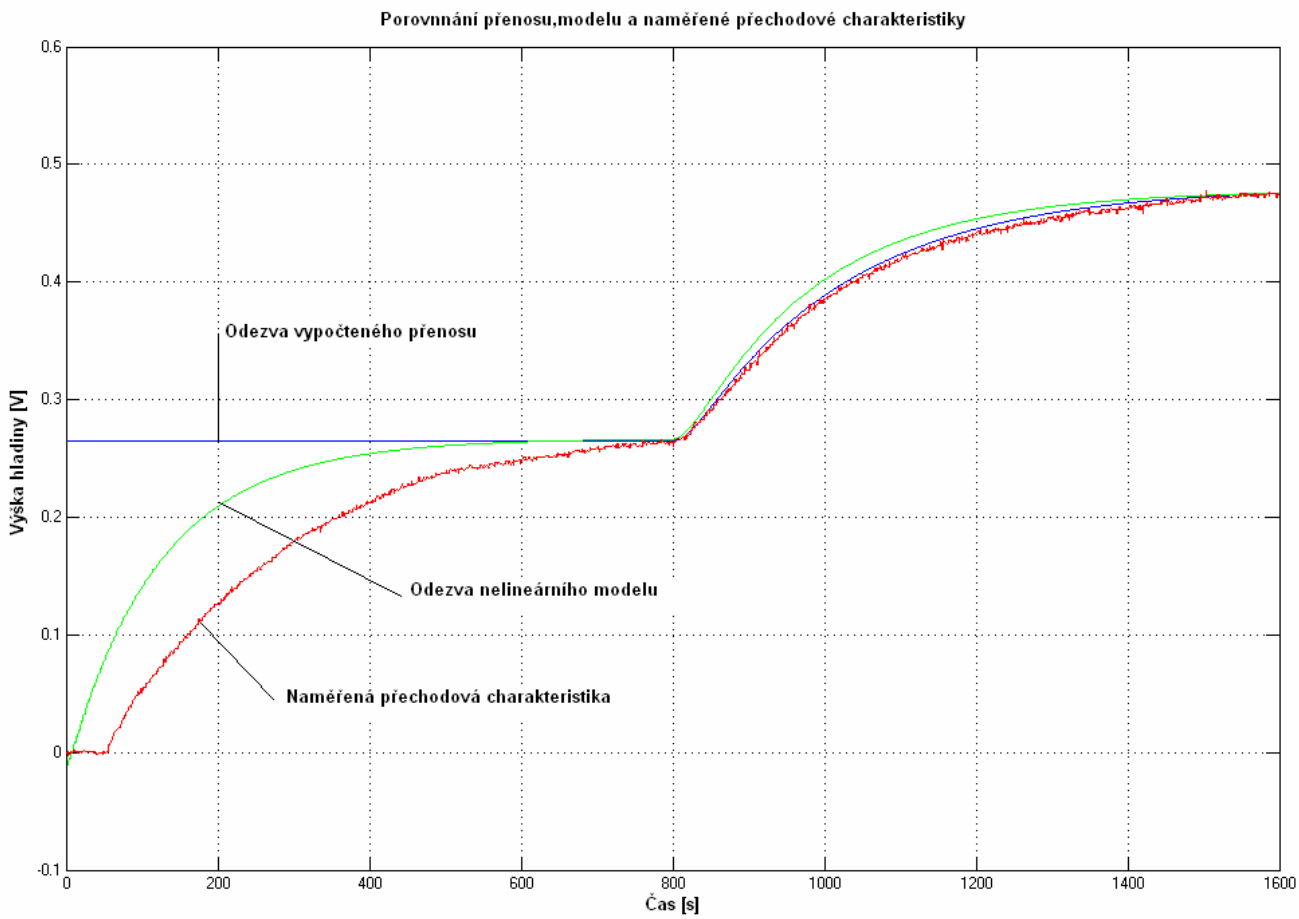
Simulaci jsem provedl na nelineárním modelu (obr. 2) sestaveného z nelineárních rovnic (8.*). Potřebné konstanty jsem získal postupy z předchozích bodů. Porovnání odezvy na skokový vstupní signál (graf 1) je vyneseno na grafu 12. Je patrné, že v okolí pracovního bodu a při následném skoku o 10%, jsem dosáhl přijatelného výsledku. Samotná simulace slouží jako kontrola měření. Vytvořené nelineární schéma s vypočtenými konstantami a převodními vztahy má tak kontrolní charakter. Ověřil jsem tak správnost stavových nelineárních rovnic a samotné měření charakteristik. Bylo nutné mírně upravit rovnici představující převod mezi vstupním napětím a tokem a korigovat možnou nepřesnost, která mohla být způsobena nepřesným měřením. Průběh generovaný modelem začíná v nule, ale průběh reálné soustavy nikoliv. To je způsobeno tím, že model nedokáže simulovat reálné chování odtokového ventilu, který pro malý průtok generovaný čerpadlem dokáže všechnu vodu přitékající do druhého válce odvádět. To je důvod, proč je určitý čas výška hladiny systému ve druhé nádobě nulová. Přepady jsem realizoval pomocí omezení integrálů.

6.1 Nelineární model



Obr. 2

6.2 Simulace odezvy na skokový vstupní signál a porovnání s přech. charakterstikou



Graf 12

7 NAMĚŘENÁ FRAKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA

Měření frekvenční charakteristiky probíhalo tak, že jsem na vstup pouštěl sinusový vstup a na výstupu jsme zaznamenával reakci soustavy. Výsledkem byla vstupní sinusovka a soustavou ovlivněný sinus výstupu. Frekvenční charakteristiku jsem získal tak, že jsem porovnával amplitudu vstupu a výstupu a fázové zpoždění výstupu oproti vstupu. Výsledné body frekvenční charakteristiky jsem získal z následujících vztahů:

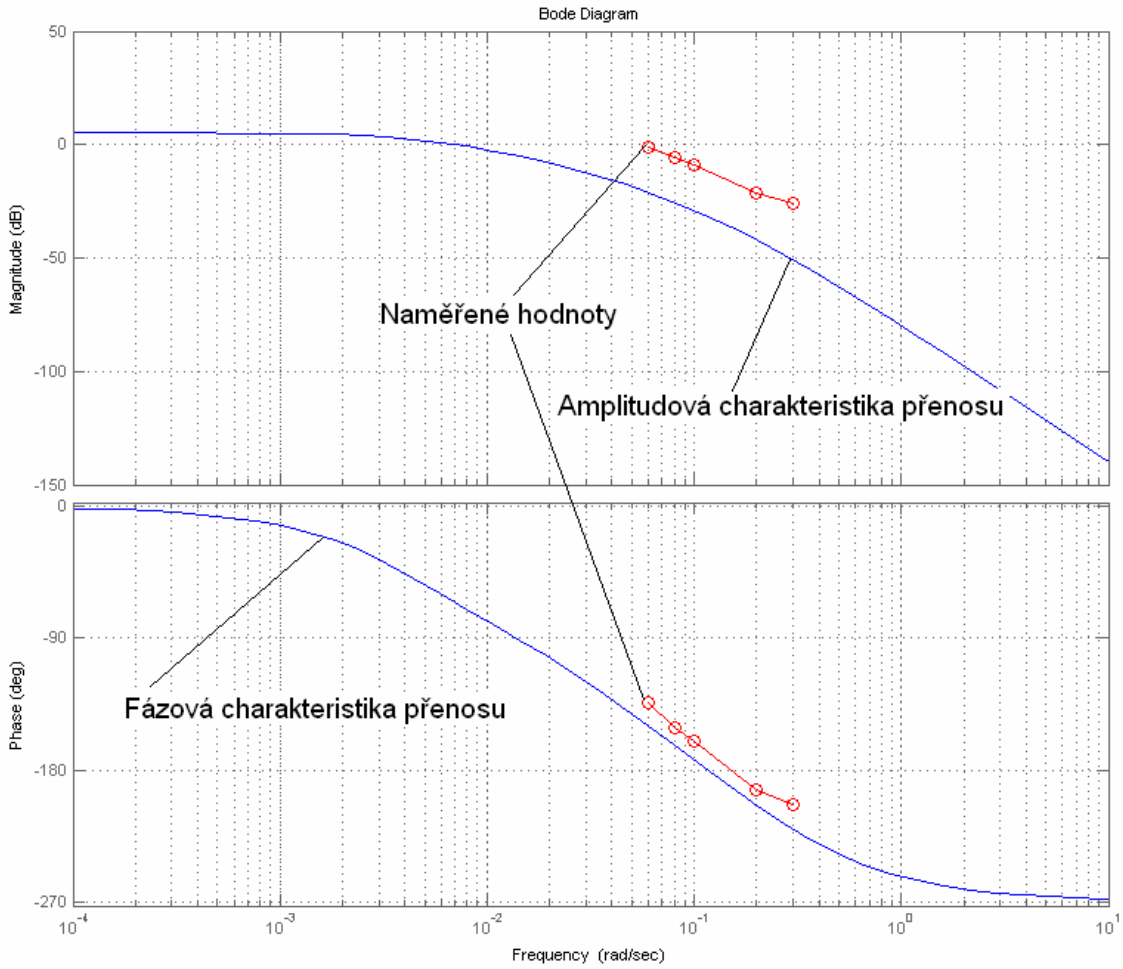
Amplitudová charakteristika:

$$A = 20\log\frac{U2}{U1}$$

Frekvenční charakteristika:

Potřebné fázové zpoždění jsem odečetl z porovnání vstupní a výstupní sinusovky

Smysl měřit reakci výstupu na vstup mělo pouze pro sinusový vstup o frekvenci kolem hodnoty 0.1 rad/s. Při měření pro nižší frekvence by bylo potřeba měřit neúměrně dlouhou dobu. U vyšších frekvencí již výstup nestihl reagovat na tak rychlé změny vstupu. Výsledná naměřená frekvenční charakteristika je vykreslena na grafu (graf 13).



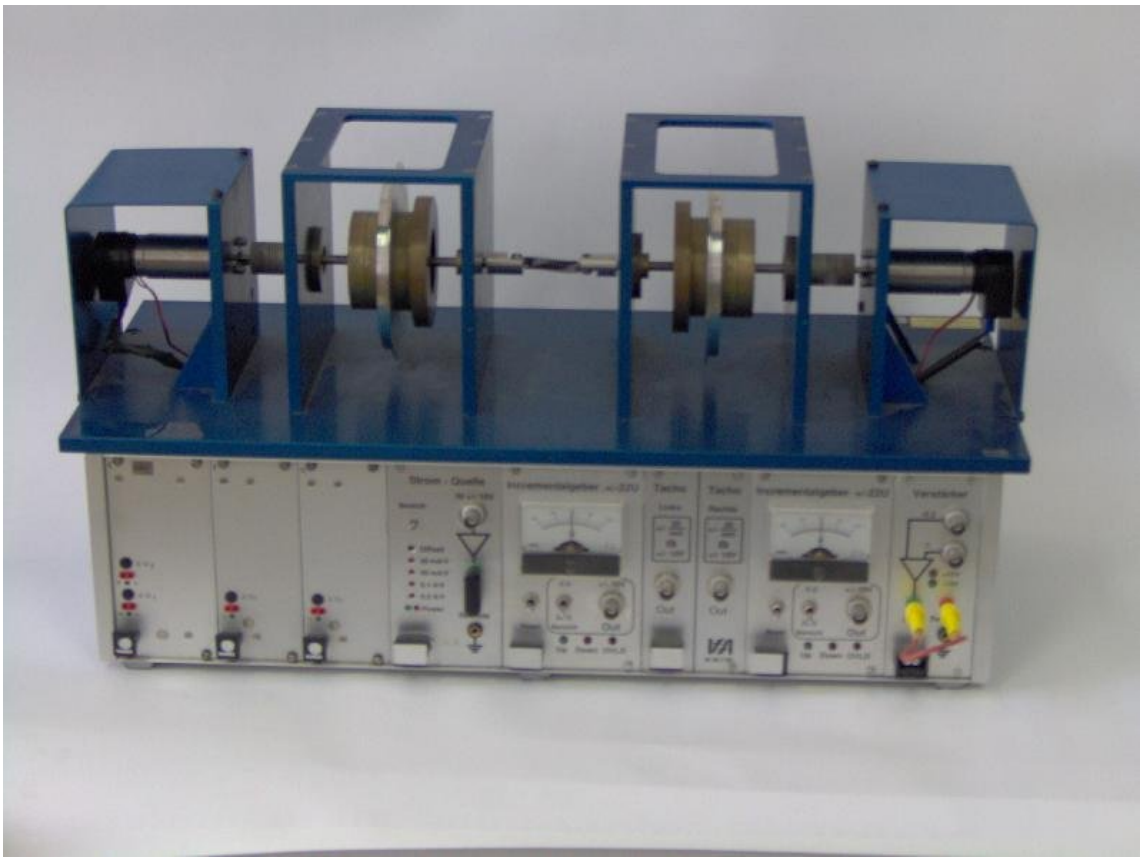
Graf 13

7 ZÁVER:

Seznámil jsem se s měřeným modelem a s úspěchem jsem identifikoval danou soustavu jako soustavu s přenosem 2. (10.3) respektive 3. řádu (10.4). Při samotném měření bylo třeba dbát na několik pravidel. Zejména je důležité vhodně zvolit nastavení ventilů a pracovní bod. K tomuto účelu mi posloužilo zjištění pracovního rozsahu vstupu čerpadla a následné vhodné nastavění ventilů. Pro identifikaci soustavy je potřeba naměřit přechodovou charakteristiku měřenou v tomto vhodně zvoleném pracovním bodě. Pro simulaci bylo potřeba změřit několik konstant a sestavit matematický model. I zde je potřeba zvolit vhodnou metodiku měření. Největší obtíže působí pomalost celé soustavy a s tím související časová náročnost jakéhokoliv měření. Toto je nutno brát v úvahu a předem s tímto faktorem počítat. Posledním krokem bylo změření frekvenční charakteristiky a výsledek lze komentovat jako uspokojivý. Odpovídal frekvenční charakteristice přenosu získaného identifikací. Rozdíl hodnot amplitudové charakteristiky naměřené a získané z přenosu určeného identifikací je nutno brát v úvahu při návrhu regulátorů, kdy regulátor navrhovaný dle získaného přenosu identifikací by nebyl navržen korektně vzhledem k rozdílu mezi těmito amplitudovými charakteristikami. Identifikace toho modelu z přechodové charakteristiky se jeví jako poměrně jednoduchá.

SPOJENÉ SERVOMECHANISMY

Zuri 92-04

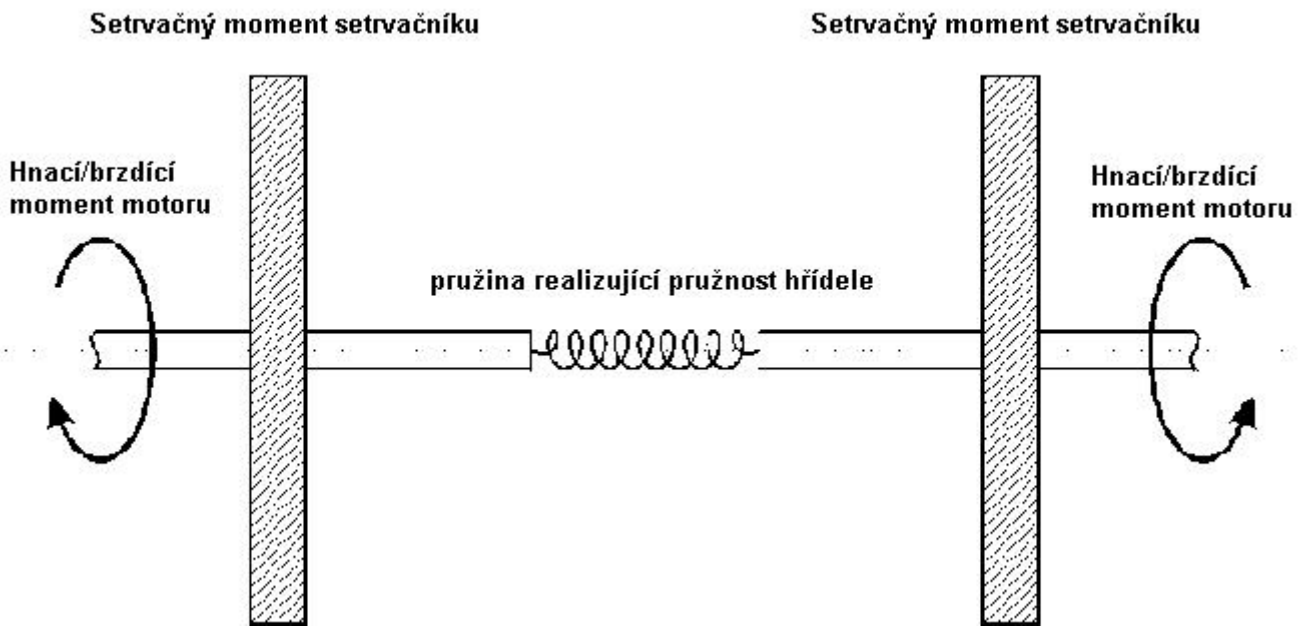


1 ÚVOD

1.1 Matematický model a stavové rovnice

1.1.1 Základní popis systému

Model servomechanismu "Zuri"92-04 je rychlostní servomechanismus vytvořený na katedře řízení technické university v Zurychu (IfA ETH). Model tvoří dva identické motory s pružně spojenými hřídelemi. Na každou hřídel je namontován motor, IRC snímač otáček (řídící jednotka převádí IRC-signál stejnosměrné napětí) a tachodynamo a je možné na něj namontovat doplňkové disky a tím změnit moment setrvačnosti příslušné hřídele. Hřídele jsou pružně spojeny pružinou ve střední části modelu. Aby bylo možné model řídit přímo z prostředí matlabu, je připojen k PC přes IO kartu PCI711 firmy Adventech.



Obr. 1

1.1.2 Rovnice popisující systém

Levá strana:

$$M_s = M_m \pm M_p - M_b$$

Pravá strana:

$$M_s = M_b \pm M_p$$

M_s je moment setrvačnosti

M_b brzdný moment tvořený třením a motorem

M_p moment vzniklý působením pružiny

1.1.3 Stavové rovnice

Při měření jsem používal pouze levý hnací motor.

Vstupní proměnná: U vstupní napětí motoru

Stavové proměnné: ω otáčky motorů

I proud motoru

Výstupní proměnné: φ poloha hřídelí

$$\dot{I} = \frac{1}{L}(-R \cdot I - K_e \cdot \omega + U) \tag{1.1.1}$$

$$\dot{\omega}_1 = -\frac{B_1 \cdot \omega_1}{J_1} + \frac{K_m \cdot I}{J_1 \cdot} - \frac{K_p \cdot \varphi_1}{J_1} + \frac{K_p \cdot \varphi_2}{J_1} \tag{1.1.2}$$

$$\dot{\omega}_2 = \frac{B_2 \cdot \omega_2}{J_2} + \frac{K_p \cdot \varphi_1}{J_2} - \frac{K_p \cdot \varphi_2}{J_2} \tag{1.1.3}$$

$$\dot{\varphi}_1 = \omega_1 \tag{1.1.4}$$

$$\dot{\varphi}_2 = \omega_2 \tag{1.1.5}$$

Z těchto rovnic je patrné, že musíme dodatečně zjistit hodnotu konstant B, J, K_p, K_e, K_m, R.

B konstanta vyjadřující působení tření

K_p konstanta pružiny

J setrvačnost setrvačníků

K_m převodní konstanta motoru (proud/točivý moment)

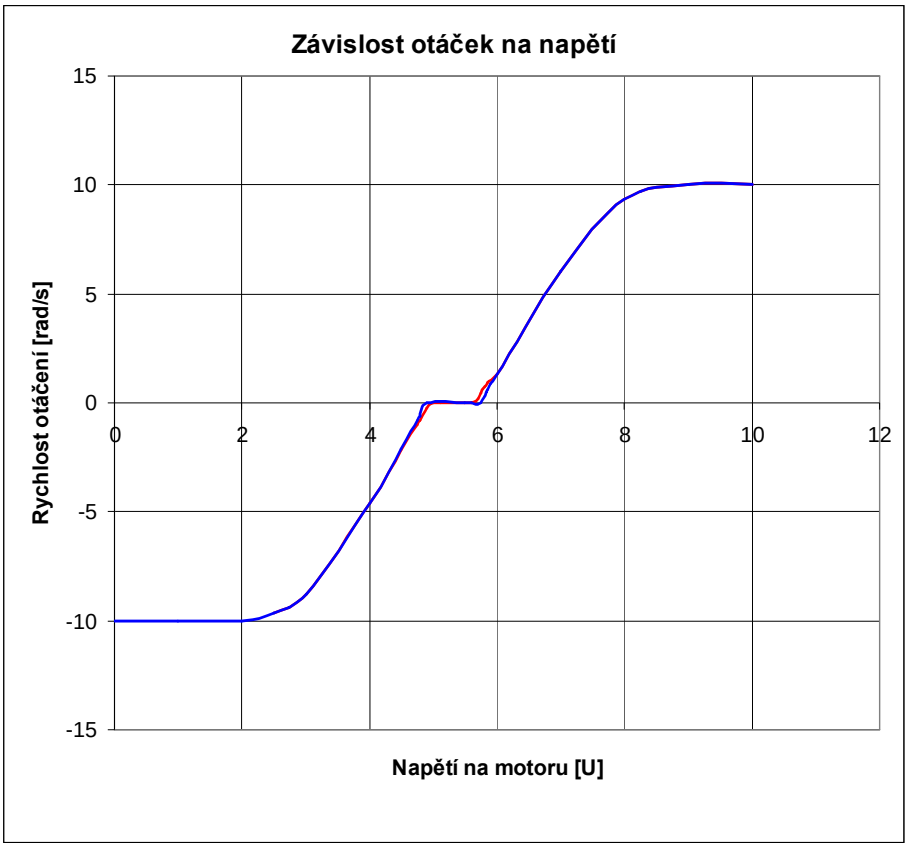
K_e elektrická konstanta motoru

R odpor vinutí motoru

Abychom získali hodnoty těchto konstant bude potřeba realizovat několik experimentů.

2 STATICKÁ CHARAKTERISTIKA

2.1 Charakteristika závislosti rychlosti otáčení na vstupním napětí



Graf 1

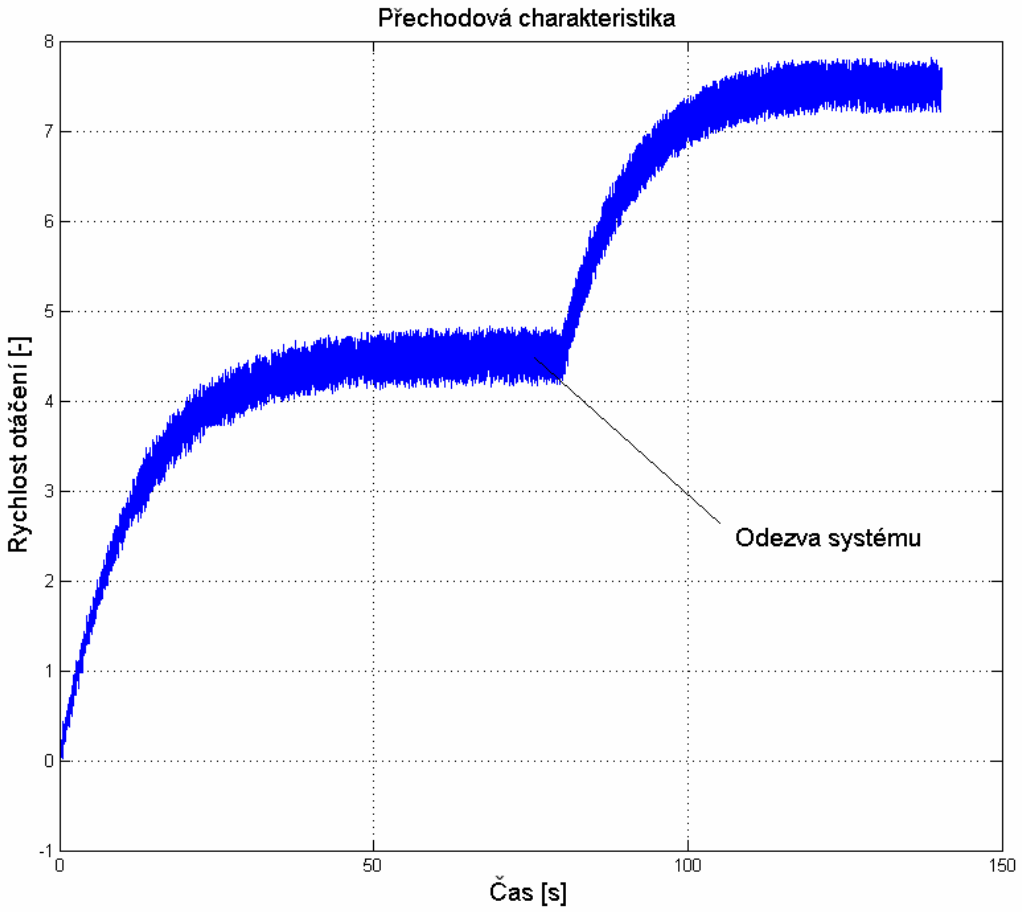
Statickou charakteristiku závislosti otáček na vstupním napětím jsem měřil změnou vstupního napětí a postup jsem několikrát opakoval, dokud nebylo naměřeno dostatek hodnot pro realizaci grafu (graf 1). Pracoval jsem v povoleném rozsahu 0 – 10V, kdy 0 odpovídala 5V. Nad 5V se motor točil jedním směrem a pod 5V opačným. Z naměřené charakteristiky je patrné mrtvé pásmo, kdy horní hranice, kdy se motor začal roztáčet, jsem

zjistil při hodnotě 5,75V. Spodní hranice byla 4,75V. Také jsem se pokusil zjistit vliv suchého tření, které ale po proměření vyšlo velmi malé. V grafu je naznačeno červenou spojnicí hodnot. Je patrné, že kolem hodnoty 5V existuje nesymetrie, co se týče jednotlivých mezních napětí mrtvého pásma.

3 PŘECHODOVÁ CHARAKTERISTIKA A PRACOVNÍ BOD

Pracovní bod jsem volil vzhledem k naměřenému mrtvému pásmu a povolenému maximálnímu vstupnímu napětí. Pro další měření stačí uvažovat jen jeden směr otáčení. Zvolil jsem proto hodnotu 7V.

Přechodovou charakteristiku jsem měřil obdobným způsobem jako u vodárny. Měřil jsem reakci systému na skok vstupní hodnoty z pracovního bodu 7V na 8V. Výsledkem je naměřená přechodová charakteristika (graf 2). Jednotky rychlosti otáčení jsou strojové [-].



Graf 2

4 URČENÍ PARAMETRŮ PRO REALIZACI MODELU

4.1 Určení konstanty pružiny

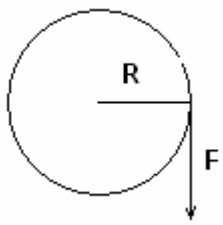
K určení této konstanty jsem využil závislosti momentu a výchylky hřídele.

$$M = K_p \cdot \Delta\varphi \qquad (4.1.1)$$

Abych mohl určit moment, potřeboval jsem působit silou, jejíž velikost budu znát. To jsem zrealizoval tak, že jsem k pravé hřídeli na jeden ze setrvačníků připevnil závaží o známé hmotnosti. Experiment jsem nastavil tak, aby závaží bylo v takové poloze, kdy výsledná síla je kolmá k rameni, přes které působí na hřídel. Schématicky je to znázorněno na obrázku (obr. 2). Výsledný moment jsem díky vhodnému nastavení vypočetl dle následujícího vztahu:

Obr. 2

$$M = R \cdot F \qquad (4.1.2)$$

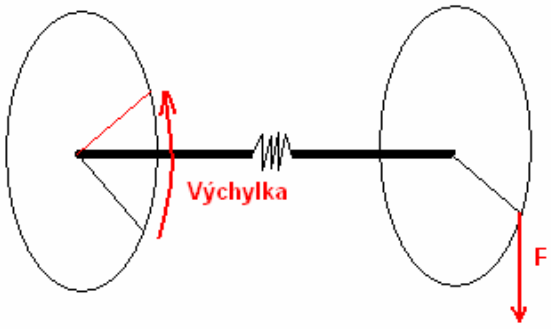


R je délka ramena, přes které působila síla F. Délka R byla 5 cm. Sílu F jsem vypočetl dle vztahu:

$$F = m \cdot g \qquad (4.1.3)$$

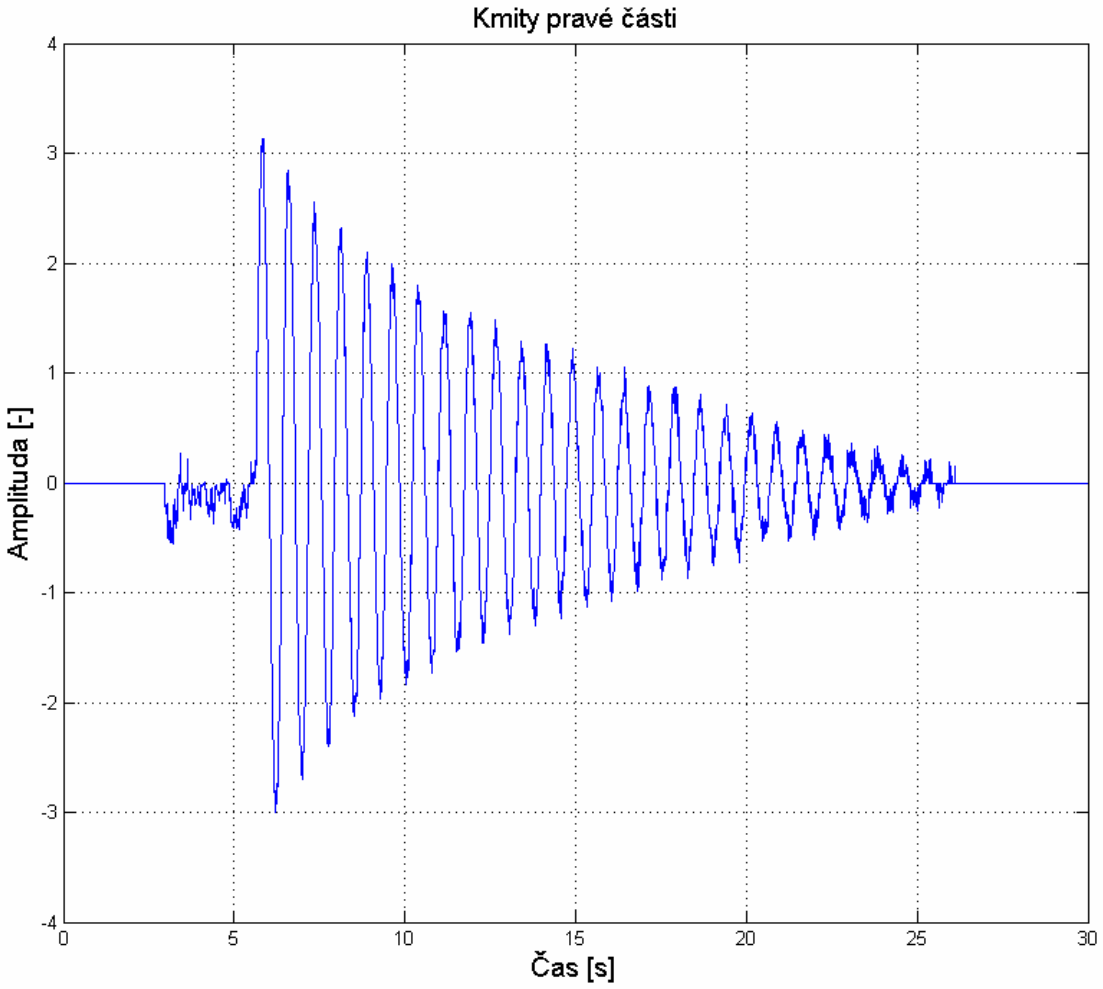
Kde m je hmotnost závaží, a g je tíhové zrychlení Země. Použité závaží mělo hmotnost 100g. Působící síla tak měla hodnotu 0.981 $[kg \cdot m \cdot s^{-2}]$. Po dosazení do vztahu (4.1.2) vyšla hodnota momentu 0.050 Nm. Hodnotu výchylky pro takto působící sílu jsem určil na 0.8796 radiánů ($50{,}4^{\circ}$). Schématicky je postup znázorněn na obrázku (obr. 3). Po dosazení takto určených hodnot do vzorce (4.1.1) jsem vypočetl $\boldsymbol{K_p = 0.0568}$ $[(N \cdot m)/rad]$.

Obr. 3



4.2 Určení brzdného tření a setrvačnosti hřídelí

K určení těchto konstant jsem musel využít experimentu, při kterém jsem pravou/levou část zafixoval a levou/pravou část rozkmital a změřil průběh kmitů. Pro levou část tyto kmity znázorňuje obrázek (graf 3). Pro pravé kmity je výsledek obdobný.



Graf 3

Z obrázku je patrné, že se jedná o tlumené kmitání, které popisuje následující rovnice(v grafu jsem použil značení jednotek [-] což představuje strojové jednotky):

$$\ddot{\varphi} + \frac{B}{J} \cdot \dot{\varphi} - \frac{K_p}{J} \cdot \varphi = 0 \qquad (4.2.1)$$

Použitím Laplaceovo transformace dostávám následující tvar:

$$s^2 + \frac{B}{J} \cdot s - \frac{K_p}{J} = 0 \qquad (4.2.2)$$

To odpovídá

$$s^2 + 2 \cdot b \cdot \omega_n \cdot s - \omega_n^2 = 0 \qquad (4.2.3)$$

Kde ω_n je frekvence tlumeného kmitání a b je konstanta tlumení tohoto kmitání.

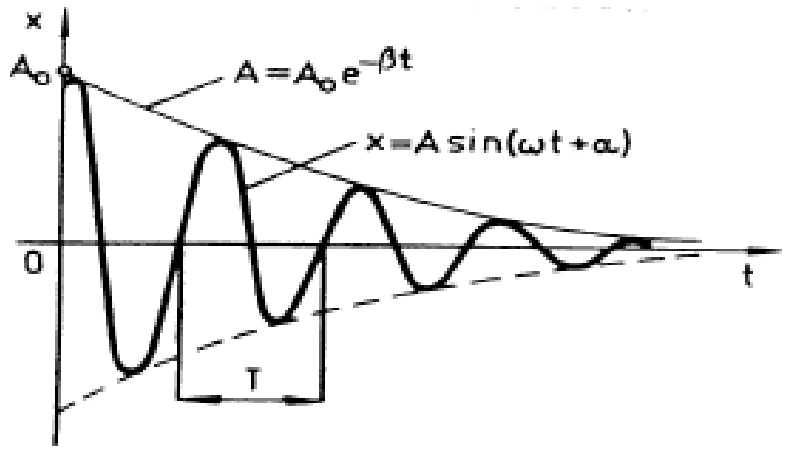
Je tedy patrné, že:

$$\frac{K_p}{J} = \omega_n^2 \qquad (4.2.4)$$

$$\frac{B}{J} = 2 \cdot b \cdot \omega_n \qquad (4.2.5)$$

Konstantu tlumení jsem vypočítal ze vztahu (4.2.6). Pro lepší názornost a odůvodnění použití tohoto vztahu uvádím obrázek (obr. 4).

$$A_2 = A_1 \cdot e^{-b \cdot t} \qquad (4.2.6)$$



Obr. 4

Po úpravě vztahu (4.2.6) dostávám:

$$b = \frac{\ln \frac{A_2}{A_1}}{T} \qquad (4.2.7)$$

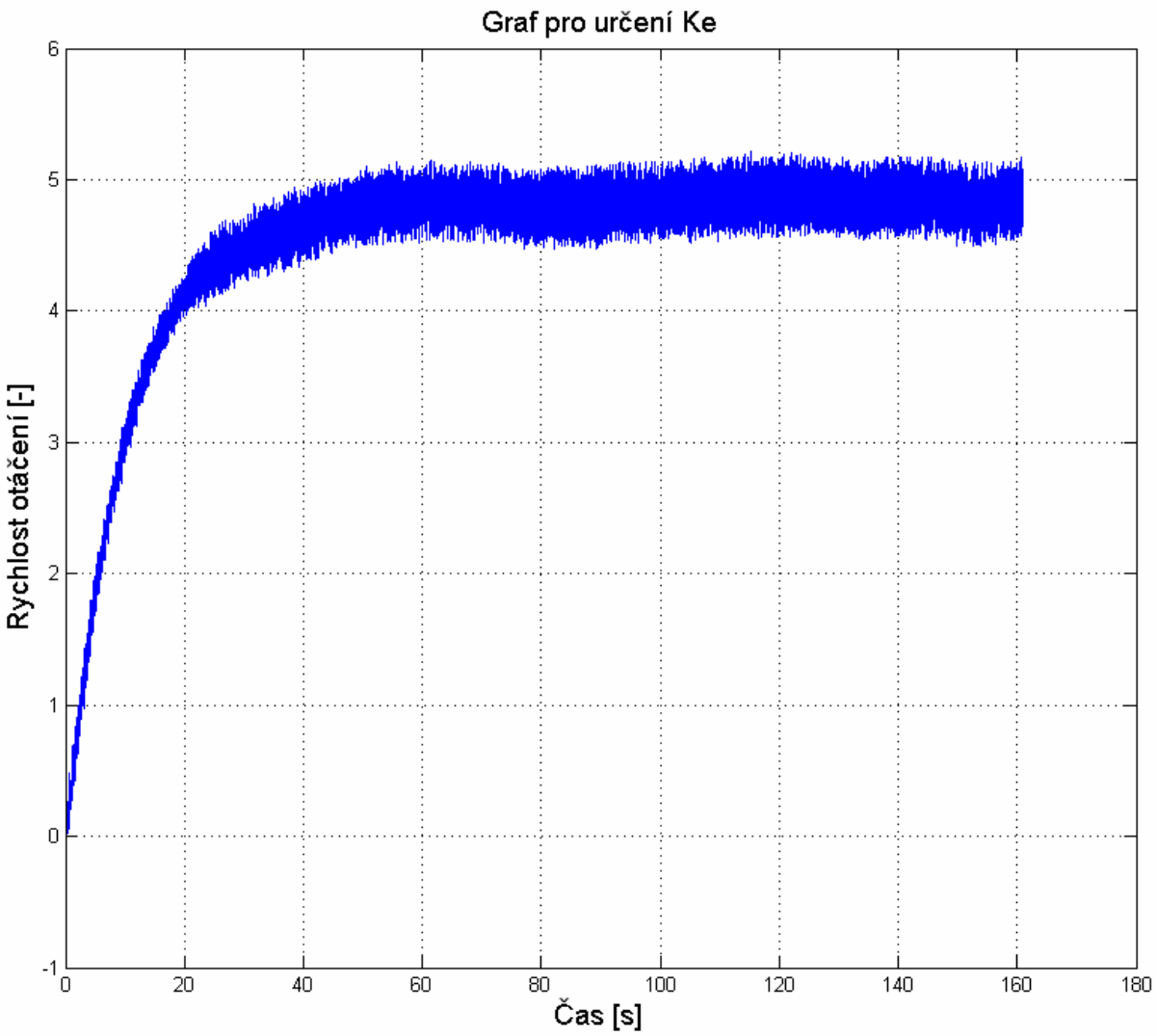
Pro zpřesnění výpočtu jsem k výpočtu nepoužil sousedící velikosti amplitudy, nýbrž amplitudy vzdálené přes několik period T. Z tvarů (4.2.4) a (4.2.5) již mohu dostat hledané hodnoty konstant B a J. ω_n jsem určil pro pravou i levou stranu. Díky tomu jsem mohl podle (4.2.4) vypočítat moment setrvačnosti J. Ta vyšla pro pravou stranu $\mathbf{J_1}$ = $8.85 \cdot 10^{-4}\,[kg \cdot m^2]$a pro levou stranu $\mathbf{J_2}$ = $8.53 \cdot 10^{-4}\,[kg \cdot m^2]$. V dalším kroku tak již mohu vypočítat konstantu vyjadřující tření soustavy B dle (4.2.5). Po dosazení vychází hodnota pro pravou stranu $\mathbf{B_1}$ = $2{,}62 \cdot 10^{-3}$ $[kg \cdot m^2 \cdot rad \cdot s^{-2}]$ a $\mathbf{B_2}$ = $2{,}65 \cdot 10^{-3}\,[kg \cdot m^2 \cdot rad \cdot s^{-2}]$.

4.3 Určení elektrické konstanty motoru k_e

K určení této konstanty jsem použil vztahu (1.1.1), kdy jsem nastavil na vstup konstantní napětí, otáčky tak byly také konstantní. Jelikož jsou otáčky a napětí konstantní, změna proudu v závislosti na čase bude nulová a vztah (1.1.1) mohu upravit na vztah (4.3.1). Část $R \cdot I$ mohu vzhledem k velikosti U zanedbat. Otáčky ve strojových jednotkách odečtu z obrázku (graf 4).

$$K_e = \frac{U - R \cdot I}{\omega} \qquad (4.3.1)$$

Po dosazení tak dostávám hodnotu k_e = 1.443 $[V \cdot rad^{-1} \cdot s]$.



Graf 4

4.4 Určení ostatních konstant motoru

K určení konstant R, L, K_m jsem již použil simulinkové schéma (obr. 5)**.** Tyto hodnoty jsem již musel určit experimentem, neboť jsem nenalezl jiný způsob, jak určit jejich hodnotu jiným způsobem.

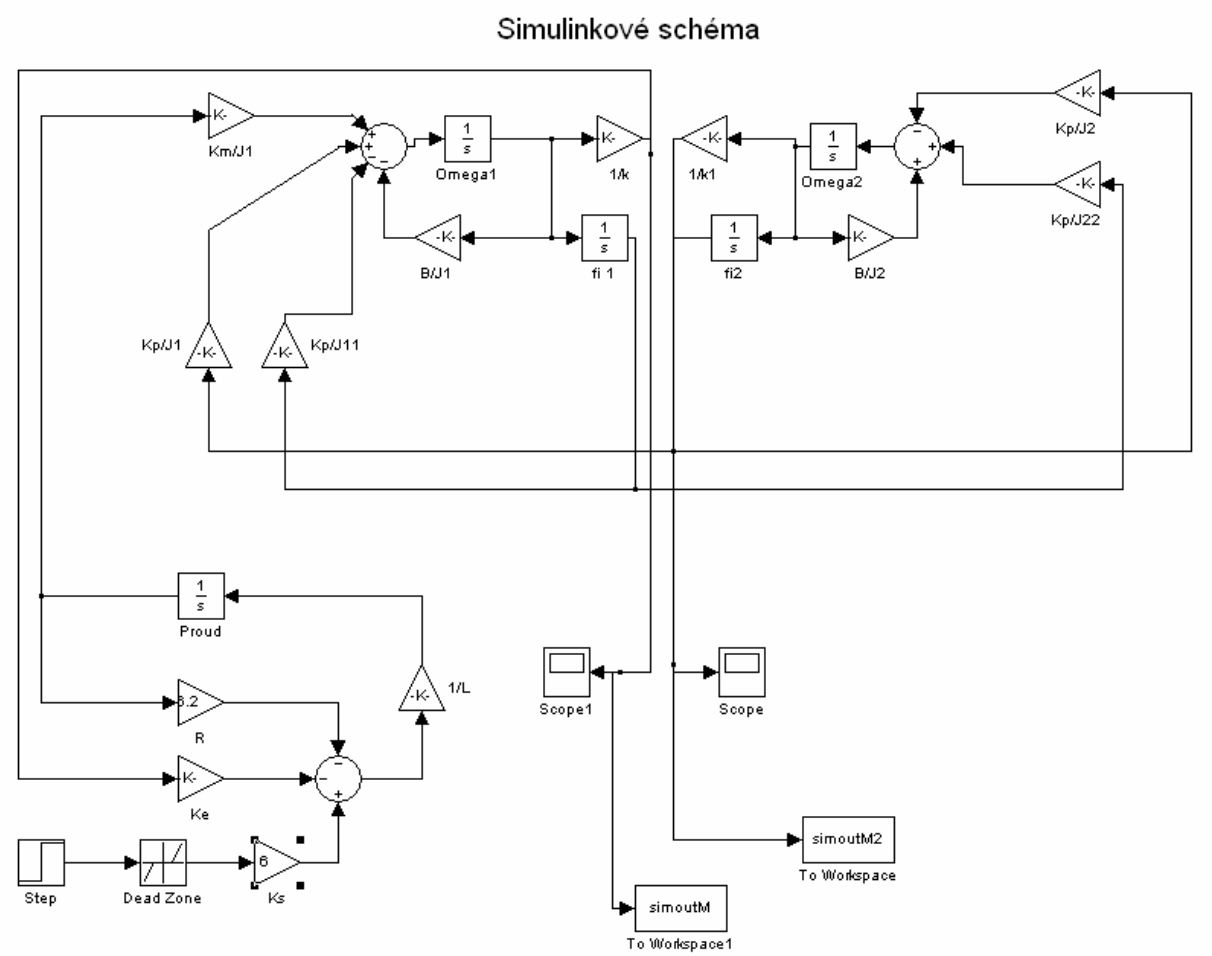
5 MODEL SOUSTAVY A SIMULACE

5.1 Simulinkový model

K realizaci modelu jsem využil odvozené rovnice (1.1.*). Dále bylo potřeba zavést další převodní konstantu *k*, neboť jsem potřeboval převádět fyzikální jednotky úhlové rychlosti na strojové. A to z toho důvodu, že převodní konstanta K_e pracuje se strojovými jednotkami. Konstantu *k* jsem určil tak, že jsem odečetl reálnou rychlost otáčení hřídele pomocí IRC čidla a zároveň rychlost otáčení vyjádřenou ve strojových jednotkách pomocí matlabu. Tyto dvě rychlosti lze spojit vztahem (5.1.1).

$$\omega_{fyz} = k \cdot \omega_{str} \tag{5.1.1}$$

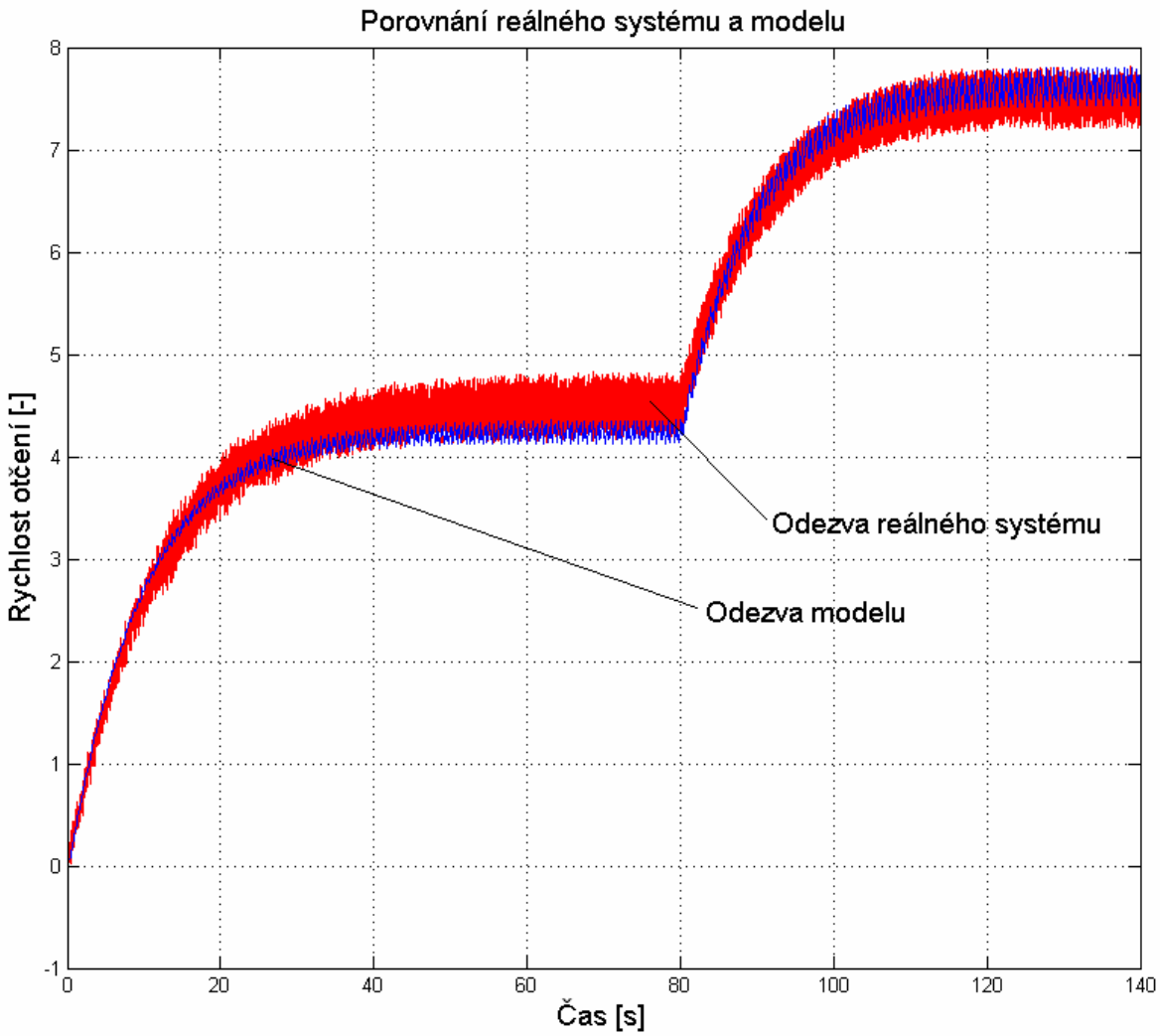
Po dosazení odečtených úhlových rychlostí je k = 26,078.



Obr. 5

5.2 Simulace odezvy na vstupní signál a porovnání

V další fázi jsem k nalezení zbývajících konstant použil metodu experimentu, kdy po několikanásobném zkoušení a porovnávání naměřené odezvy a odezvy modelu vyplynuly hledané hodnoty konstant. Bylo zjištěno, že soustava má ještě jednu konstantu K_s vyjadřující celkové zesílení systému. Nakonec bylo potřeba zohlednit mrtvé pásmo motoru a offset statické charakteristiky motoru. Výsledné simulinkové schéma je na obrázku (obr. 5). Výsledek simulace v porovnání s reálným modelem je na obrázku (graf 5). Graf 5 zároveň představuje přechodovou charakteristiku systému resp. modelu ve zvoleném pracovním bodě.



Graf 5

I přes poměrně obtížnou zjistitelnost některých konstant, vykazoval model poměrně dobrý výsledek. Nyní mohu ze stavových rovnic snadno určit přenos systému.

6 IDENTIFIKACE MODELU A URČENÍ PŘENOSU

6.1 Výpočet přenosu

Soustava je popsána soustavou diferenciálních rovnic (rovnice 1.1.1 – 1.1.5). Soustavu mohu popsat následující soustavou rovnic vyjadřující stavový popis:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \qquad (6.1.1)$$

$$\dot{y}(t) = C \cdot x(t) + D \cdot u(t) \qquad (6.2.2)$$

Kde x(t) je vektor, vyjadřující stavové veličiny systému:

$$\mathrm{x(t)} = \begin{bmatrix} i(t) \\ \omega_1(t) \\ \omega_2(t) \\ \varphi_1(t) \\ \varphi_2(t) \end{bmatrix} \qquad (6.2.3)$$

Jednotlivé stavové veličiny jsou patrné z rovnic (1.1.1 – 1.1.5) popř. ze simulinkového schématu (obr. 5).

Vektor u(t) charakterizuje vstupní veličiny, v mém případě uvažuji pouze jeden vstup, kterým je vstupní napětí.

$$\mathrm{u(t) = [u(t)]} \qquad (6.2.4)$$

Matice A,B,C,D jsou stavové matice systému (Při tvorbě těchto matic jsem zohlednil zjištěné celkové zesílení K_s a převodní konstantu k realizující převod fyzikálních jednotek rychlostí otáčení na strojové – viz simulinkové schéma (obr. 5)):

$$A = \begin{bmatrix} -R/L & -k_e/(L\cdot k) & 0 & 0 & 0 \\ k_m/J_1 & -B/J_1 & 0 & -K_p/J_1 & K_p/J_1 \\ 0 & 0 & B/J_2 & K_p/J_2 & -K_p/J_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 6/(26\cdot L) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Přenos systému mohu vypočítat ze vztahu:

$$G(s) = C\cdot(sI - A)^{-1}B + D \tag{6.2.5}$$

Vzhledem k náročnosti ručního výpočtu jsem přenos systému získal pomocí Matlabu. Výsledkem byly 4 přenosy. Jeden pro každý výstup. Výstupy tohoto systému jsou otáčky levého, pravého motoru. Poloha hřídele pravého a levého motoru. Pří mém měření byl měřen pouze jeden výstup, rychlost otáčení levého motoru. K němu přísluší přenos:

$$y_1:\quad G(s) = \frac{4.509\,s^3 - 13.35\,s^2 + 289.4\,s}{s^5 + 7.036\,s^4 + 123.7\,s^3 + 836.6\,s^2 + 85.46\,s + 3.505e^{-12}} \tag{6.2.6}$$

Je patrné, že hodnota $3.505e^{-12}$ je zanedbatelně malá a lze ji zanedbat. Pak lze provést vykrácení vytknutého s. Výsledný tvar je pak:

$$y_1:\quad \underline{G(s) = \frac{4.509\,s^2 - 13.35\,s + 289.4}{s^4 + 7.036\,s^3 + 123.7\,s^2 + 836.6\,s + 85.46}} \tag{6.2.7}$$

Pro rychlost otáčení pravého motoru vyšel přenos:

$$y_2: \quad G(s) = \frac{289.4\,s}{s^5 + 7.036\,s^4 + 123.7\,s^3 + 836.6\,s^2 + 85.46\,s + 3.505e^{-12}} \tag{6.2.8}$$

Opět lze provést s přenosem výše popsané úpravy a výsledek je pak:

$$y_2: \quad \underline{G(s) = \frac{289.4}{s^4 + 7.036\,s^3 + 123.7\,s^2 + 836.6\,s + 85.46}} \tag{6.2.9}$$

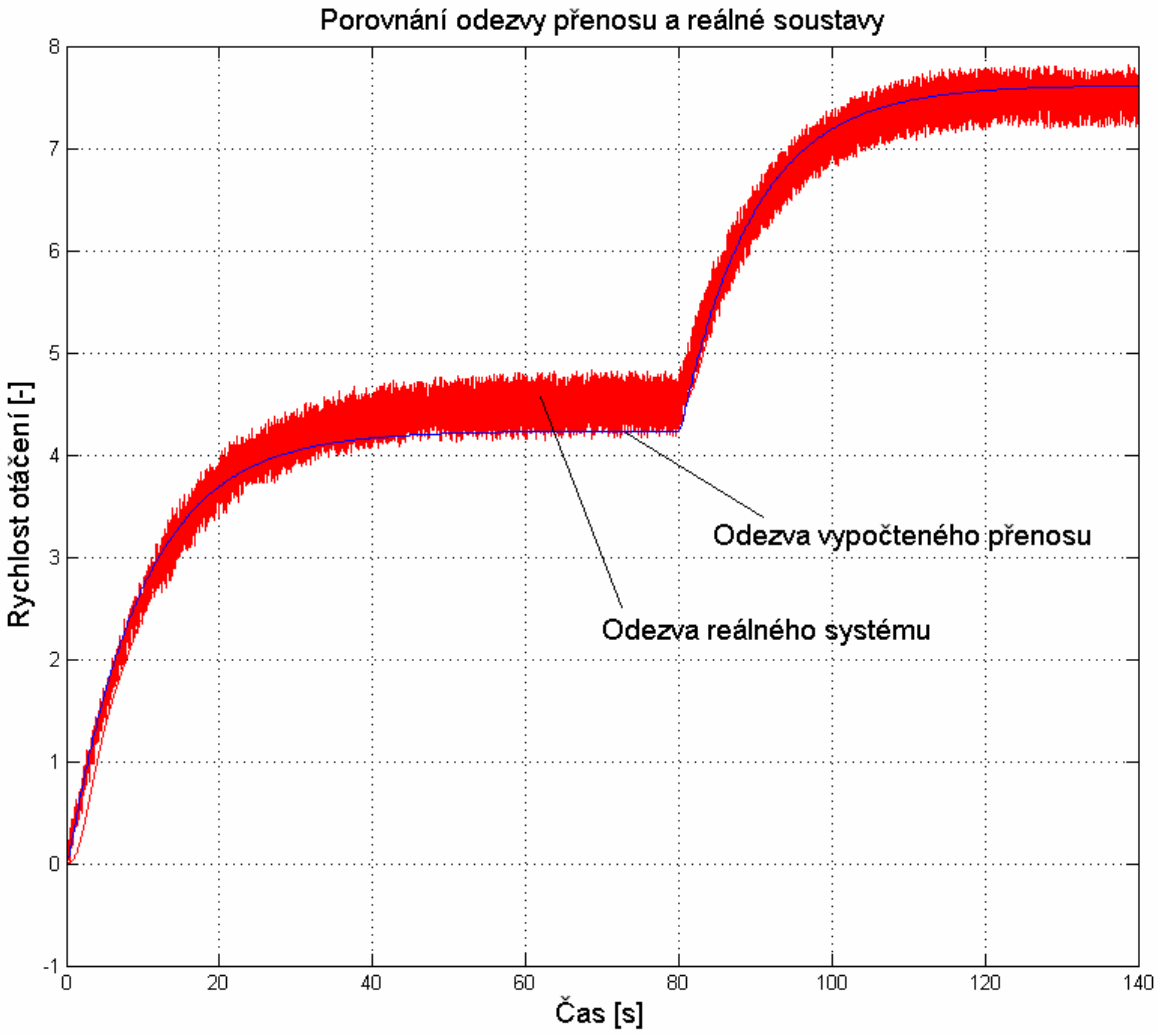
Pro polohu hřídele levého a pravého motoru vyšli přenosy :

$$y_3: \quad \underline{G(s) = \frac{4.509\,s^2 - 13.35\,s + 289.4}{s^5 + 7.036\,s^4 + 123.7\,s^3 + 836.6\,s^2 + 85.46s}} \tag{6.2.10}$$

$$y_4: \quad \underline{G(s) = \frac{289.4}{s^5 + 7.036\,s^4 + 123.7\,s^3 + 836.6\,s^2 + 85.46s}} \tag{6.2.11}$$

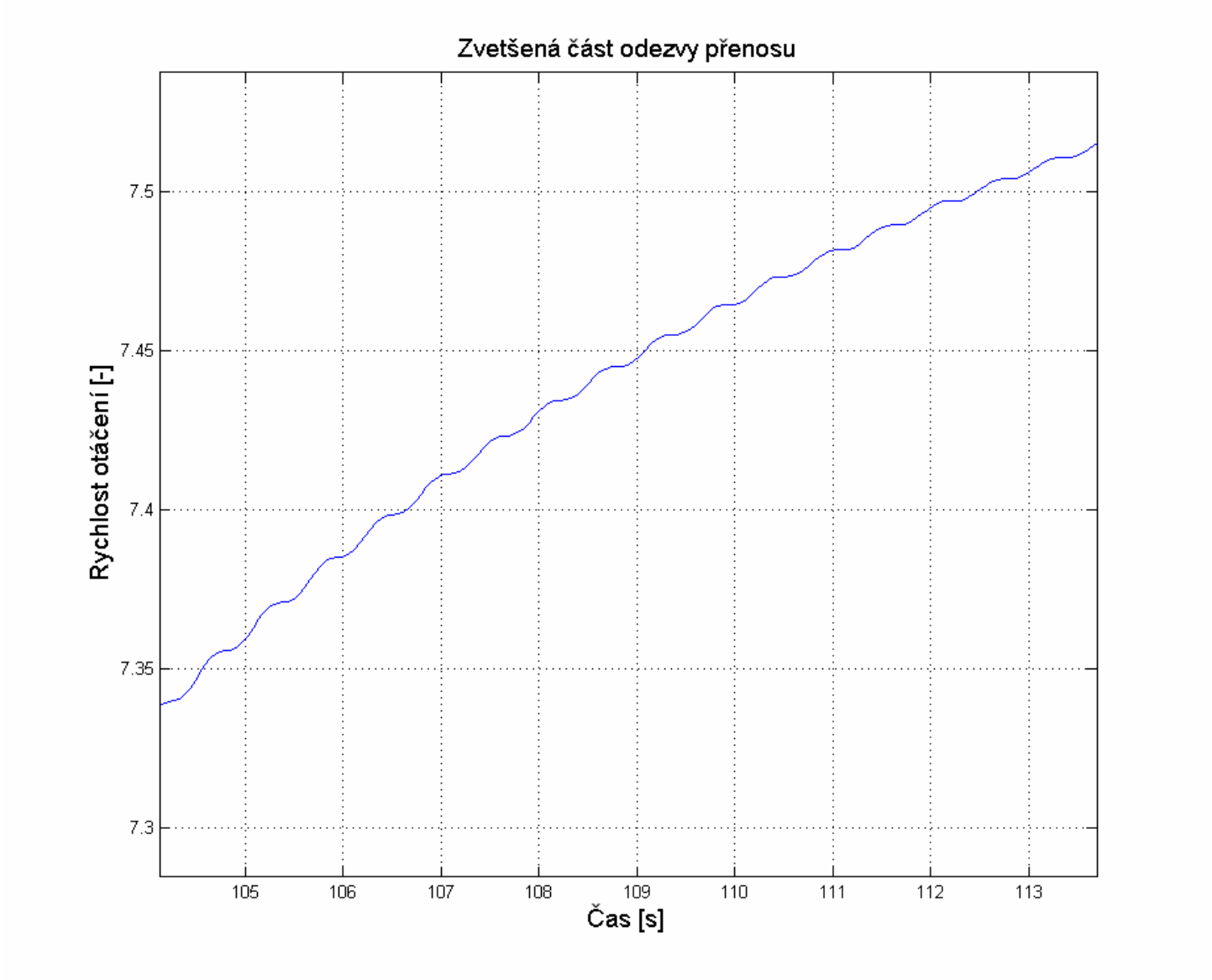
6.2 Porovnání vypočteného přenosu s reálným systémem

Jak je patrné z grafu (graf 6), výsledná odezva přenosu je uspokojivá a je patrné, že se podařilo dosáhnout předpokládané shody a ověřil jsem tak vypočtený přenos y_1. Pro ostatní výstupy by postup ověření byl obdobný.



Graf 6

Při zvětšení části průběhu přenosu (graf 7) je patrný předpokládaný kmitavý průběh.



Graf 7

7 FRAKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA

7.1 Měření frekvenční charakteristiky

Frekvenční charakteristiku této soustavy jsem měřil tak, že jsem na její vstup pouštěl sinusový průběh a sledoval a měřil odezvu výstupu. Výsledkem byla vstupní sinusovka a soustavou ovlivněný sinus výstupu. Frekvenční charakteristiku jsem získal tak, že jsem porovnával amplitudu vstupu a výstupu a fázové zpoždění výstupu oproti vstupu. Výsledné body frekvenční charakteristiky jsem získal z následujících vztahů:

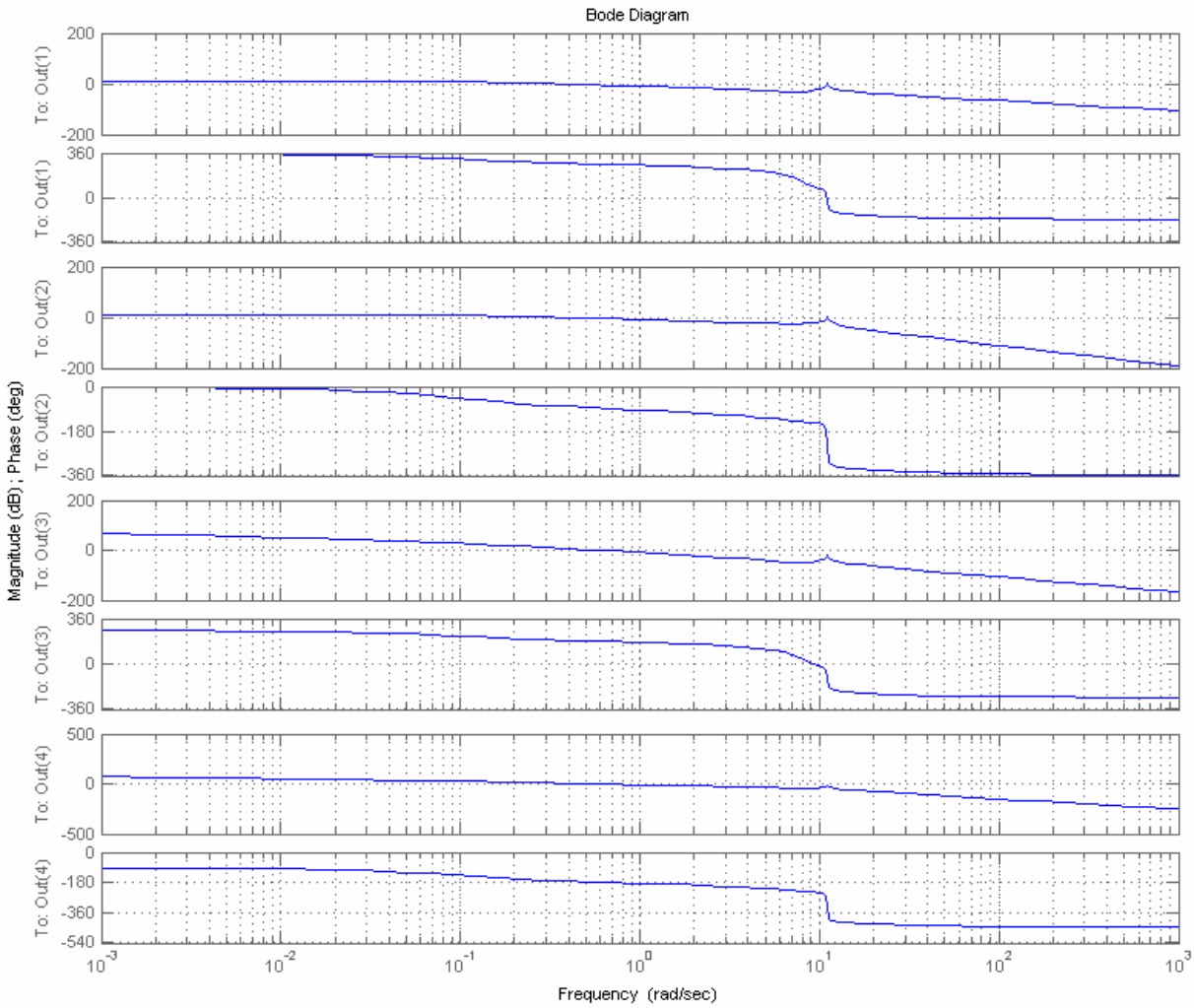
Amplitudová charakteristika:

$$A = 20\log\frac{U2}{U1}$$

Frekvenční charakteristika:

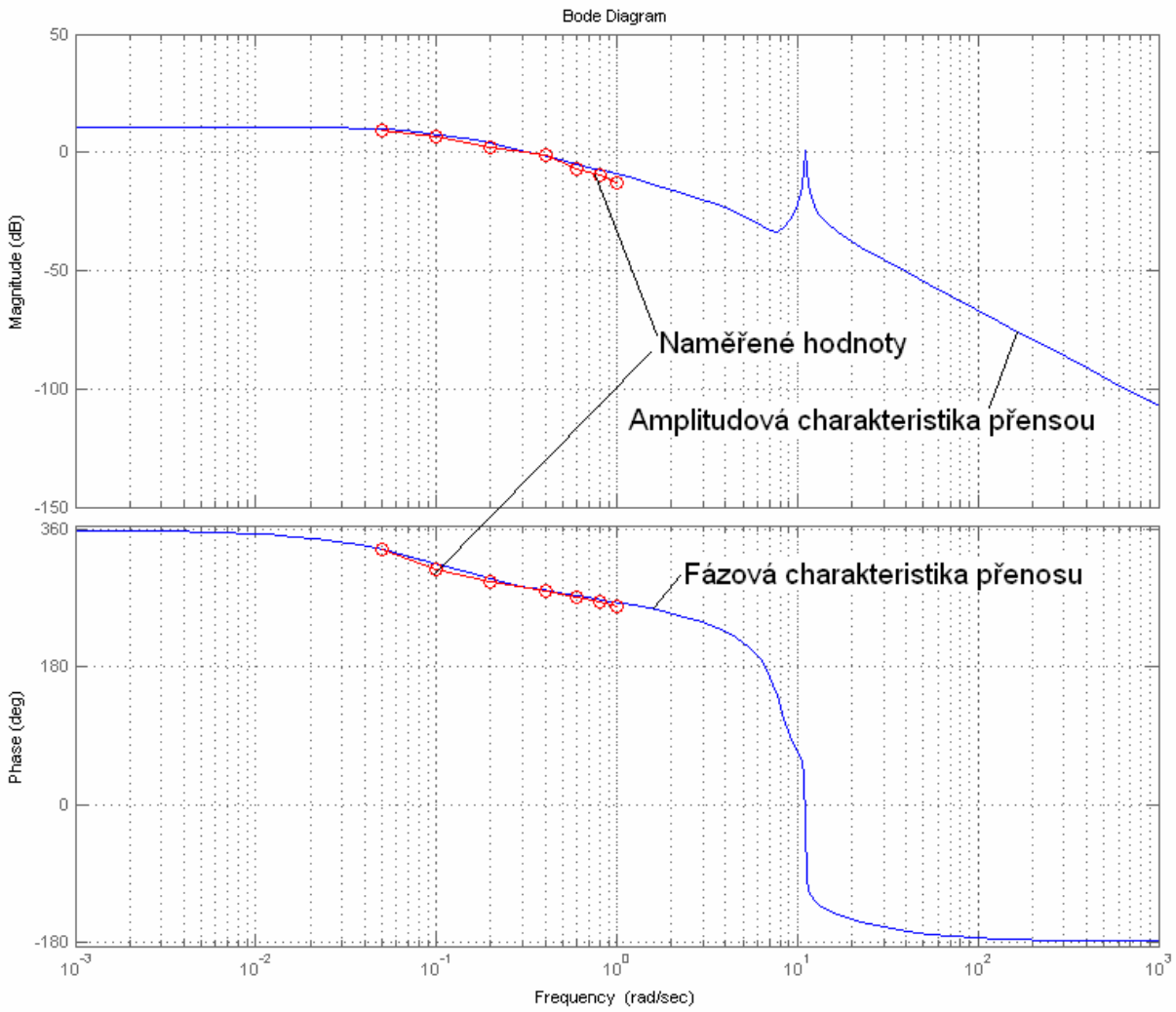
potřebné fázové zpoždění jsem odečetl z porovnání vstupní a výstupní sinusovky

Frekvenční charakteristiky vypočtených přenosů jsou následující (Graf 8):



Graf 8

Grafy (graf 8) jsou seřazeny následovně: y_1, y_2, y_3, y_4 od horního okraje stránky. Pro měření frekvenční charakteristiky jsem si vybral výstup y_1. Dále je třeba upozornit na známou chybu matlabu, kdy bez důvodu posunul jednotlivé fázové charakteristiky o 360^0. Naměřenou frekvenční charakteristiku jsem porovnával v jednom grafu s charakteristikou přenosu. Naměřená data fázové charakteristiky jsem ale musel posunout o 360^0 abych ji pak mohl porovnat. Výsledek porovnání je na obrázku (graf 9).



Graf 9

ZÁVĚR

Úkolem bylo změřit tento model a identifikovat ho s cílem získat přenos tohoto systému. V jednotlivých bodech jsem popsal způsob identifikace modelu a měření statické charakteristiky. Pro měření jsem uvažoval jeden vstup a jeden výstup (rychlost otáčení levého motoru), jelikož pro druhý výstup (rychlost otáčení pravého motoru) by byl postup identický.

Výsledná statická charakteristika se vyznačovala mrtvým pásmem, které bylo nesymetrické vůči teoretické nule vstupního rozsahu napětí (Graf 1). Pokusil jsem se také změří vliv suchého tření v této charakteristice, ale ten vyšel zanedbatelně malý. Z naměřené statické charakteristiky vyplynulo nastavení pracovního bodu na 7V a následně jsem pak změřil přechodovou charakteristiku v tomto bodě (graf 2). Identifikace modelu v tomto případě není možná přímo z přechodové charakteristiky, proto jsem zvolil postup, kdy jsem nejdříve odvodil matematický popis systému a na jeho základě jsem sestavil simulinkové schéma. Z tohoto popisu byly také patrné konstanty, které bylo potřeba zjistit. To jsem provedl výše uvedenými experimenty. Po dosazení naměřených konstant do modelu a následném ověření simulací jsem tak mohl získat výsledný přenos soustavy. Jelikož soustava má 4 výstupy, vyšly celkem 4 přenosy (6.2.7, 6.2.9, 6.2.10, 6.2.11). Přenosy byly celkem 5. řádu, kdy pro výstupy y_1 a y_2 se daly redukovat na 4.řád. Při vykreslení jednotlivých frekvenčních charakteristik (graf 8) se projevila známá chyba matlabu, který fázové charakteristiky posunul o 360^0. Z tohoto důvodu jsem naměřenou fázovou charakteristiku výstupu y_1 také posunul o 360^0 a umístil je do společného grafu. Závěrem bych chtěl říci, že identifikace tohoto modelu nepatří mezi ty jednoduché. Je potřeba vymyslet několik podpůrných experimentů, bez kterých by identifikace modelu probíhala jen obtížně (experiment se závažím…).

ZHODNOCENÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cíle této práce se mi povedlo splnit i přes různá úskalí. Předvedl jsem dvě různé metody identifikace, kdy ta první vychází z přechodové charakteristiky a je ukázána na modelu vodárny. Vytvořil jsem i její matematický popis, který tvořily nelineární rovnice. Na základě těchto rovnic jsem sestavil nelineární model soustavy a ukázal jsem postupy vedoucí k určení jednotlivých konstant a převodních vztahů. Druhý způsob identifikace je ukázán na modelu servomechanismu a spočíval ve vytvoření matematického modelu a následného simulinkového modelu. U této soustavy lze její nelinearitu zanedbat a její matematický popis je tak lineární. Z matematického popisu také vyplynuly konstanty, které bylo potřeba určit. Výsledný přenos se pak určil z převedení matematického popisu na stavový a následného využití stavových matic. Dále jsem vypracoval návody a plakáty, které, jak doufám, usnadní budoucím studentům práci na těchto modelech.

POUŽITÁ LITERATURA

[1] Materiál na stránkách předmětu Systémy a řízení, URL: http://dce.felk.cvut.cz/sari/download/other/prechod_skripta.pdf

[2] Horáček, P. Systémy a modely, 2. přepracované vydání PRAHA, ČVUT, 1999

[3] Online převod dokumentů do pdf, URL: www.pdfonline.com/convert_pdf.asp

[4] Dokumentace k modelu vodárny TQ, URL: www.tq.com

POUŽITÝ SOFTWARE

Matlab 7.0

Microsoft Word 2000

Microsoft Excel 2000

PowerPoint 2000

OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

Soubor *bakalarska_prace.pdf*

Soubor *bakalarska_prace.doc*

Adresář PLAKATY

Soubor S3.ppt	- plakát k modelu servomechanismů Zuri
Soubor V4.ppt	- plakát k modelu Vodárna TQ

Adresář NAVODY

Soubor S3.doc	- návod k modelu servomechanismů Zuri
Soubor V4.doc	- návod k obsluze modelu Vodárna TQ

Adresář NAMERENO

Soubor struktura_adresare.txt	- popisuje uspořádání adresářů

Ostatní adresáře dle struktury v přiloženém souboru struktura_adresare.txt