

Reléová identifikace v uzavřené regulační smyčce pomocí programovatelného automatu Tecomat Foxtrot

Bc. Alžběta Hornychová*¹

¹ ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky, Technická 4, 166 07 Praha 6, Česká republika

Abstrakt

Práce se věnuje problematice reléové identifikace v uzavřeném regulačním obvodu. Pro programovatelný automat Tecomat Foxtrot byl napsán program reléové identifikace soustavy s jedním vstupem a jedním výstupem modelem prvního řádu s dopravním zpožděním. Identifikace probíhá v okolí pracovního bodu určeného expertním odhadem hodnoty akční veličiny. Z průběhu výstupu z relé, který je akční veličinou, a výstupu ze soustavy, tedy regulované veličiny, se vypočte statická citlivost soustavy a normalizované dopravní zpoždění. Z normalizovaného dopravního zpoždění a parametrů relé se následně výpočtem určí časová konstanta a dopravní zpoždění soustavy. Tento způsob identifikace je vhodný pro nalezení modelů, z nichž pak budou určeny parametry PID, PI a PD regulátorů.

Klíčová slova: reléová identifikace; programovatelný automat; Tecomat; model prvního řádu s dopravním zpožděním

1. Úvod

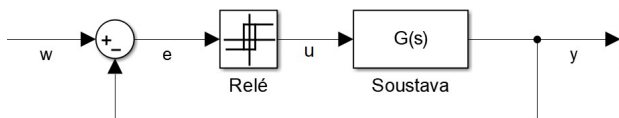
Pro přesné řízení soustavy je třeba znát její matematický model. Jednou z mnoha cest k jeho určení je reléová identifikace v uzavřeném regulačním obvodu. Ta má oproti jiným identifikačním metodám tu výhodu, že po dobu identifikace je systém řízen a riziko nežádoucí reakce systému na akční veličinu, jako je například dosažení technologicky nepřijatelného stavu, je tak minimalizováno.

Reléová identifikace v uzavřeném regulačním obvodu je vhodná pro soustavy s rychlou odezvou, jako je například reakce výkonu čerpadla na změnu napájecího napětí. S klesající rychlostí odezvy soustavy narůstá časová náročnost identifikace.

Metoda reléové identifikace použitá v tomto článku byla zpracována v práci Ph.D. Josefin Berner [1].

2. Reléová identifikace

Reléová identifikace v uzavřeném regulačním obvodu dle [1] probíhá při zapojení podle schématu na obr. 1, kde w je žádaná veličina, e je regulační odchylka, u je výstupem z relé a vstupem do soustavy – tedy akční veličinou – a y je výstupem ze soustavy – regulovanou veličinou.



Obr. 1. Schéma zapojení soustavy pro identifikaci.

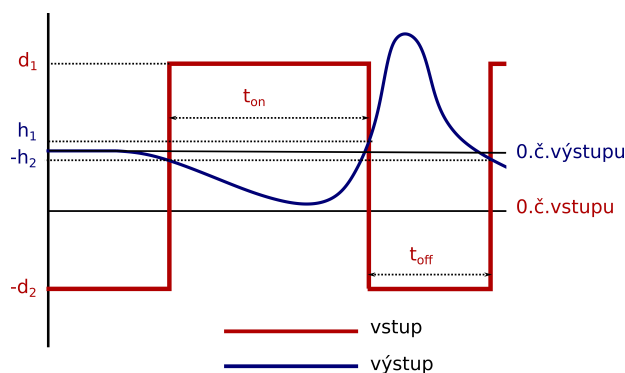
Soustava bude v okolí pracovního bodu popsána modelem

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + sT} e^{-sL}, \quad (1)$$

kde K_p je statická citlivost soustavy, L je dopravní zpoždění a T je časová konstanta. Jde o model prv-

ního řádu s dopravním zpožděním (FOTD-First order system with time delay).

Samotný proces identifikace má několik fází. Nejprve je třeba určit pracovní bod, v němž bude soustava identifikována. Hodnota vstupu do soustavy u_0 v pracovním bodě je dána inženýrským odhadem na základě předchozí znalosti systému pro žádanou hodnotu výstupu w . Po ustálení výstupní veličiny se odečte hodnota výstupu soustavy v pracovním bodě y_0 . Takto určený pracovní bod pak udává polohu nulových čar vstupu a výstupu.



Obr. 2. Schéma parametrů regulace.

Od nulových čar se pak určují hodnoty vstupu a výstupu soustavy.

$$u_{abs} = |u - u_0| \quad (2)$$

$$y_{abs} = |y - y_0| \quad (3)$$

V nalezeném pracovním bodě se naměří velikost šumu a z něho se určí hranice pro přepínání relé. Z odezvy na exponenciální nárůst akční veličiny u_{abs} se určí horní a dolní poloha relé. S takto určenými parametry relé se přejde k samotné identifikaci. Z ustálených průběhů akční veličiny, tedy z reléového signálu, a regulované veličiny se následně vypočtou parametry modelu prvního řádu s dopravním zpožděním.

*Kontakt na autora: Alzbeta.Korabkova@fs.cvut.cz

2.1. Reléová identifikace pomocí Tecomatu Foxtrot

Program pro reléovou identifikaci soustav byl napsán a odzkoušen na programovatelném automatu (PLC) Tecomat Foxtrot firmy Teco a.s. PLC je vybaveno analogovými a digitálními vstupy a výstupy. Jejich počet závisí na konkrétním modelu PLC. Za účelem identifikace byl použit jeden analogový vstup a jeden analogový výstup.

2.1.1. Tecomat Foxtrot

Za účelem psaní programových skriptů pro produkty firmy Teco a.s. bylo speciálně vyvinuto programové rozhraní Mosaic. To umožňuje programovat podle normy IEC 61 131-3 v jazycích Ladder diagram (LD, jazyk příčkového diagramu), Function block diagram (FBD, jazyk funkčního blokového schématu), Instruction list (IL, jazyk seznamu instrukcí) a Structured text (ST, jazyk strukturovaného textu).

Pro potřeby této aplikace byl zvolen jazyk Structured text. Jde o vyšší programovací jazyk, který umožňuje používat iterační smyčky, jako je FOR a WHILE, nebo větvení podmínkami (např. IF a CASE OF). Je také vhodný pro programování nových funkčních bloků.

2.1.2. Programové řešení reléové identifikace

Vstupem do identifikačního programu jsou čtyři parametry, které musí uživatel nastavit před spuštěním programu. Prvním je žádaná veličina w , tj. hodnota, které by měl co nejlépe odpovídat výstup soustavy y_0 v pracovním bodě. Pokud by po identifikaci následovalo nastavení PID, PI nebo PĎ regulátoru, regulátor by reguloval soustavu na tuto hodnotu regulované veličiny.

Druhým parametrem je počáteční hodnota akční veličiny u_0 , což je odhadnutý vstup do systému, po jehož nastavení se soustava ustálí v blízkosti žádané hodnoty w . Čtveřici parametrů pak zakončují maximální povolená horní u_{max} a dolní u_{min} hranice akčního zásahu.

Ve chvíli, kdy uživatel nastaví všechny parametry, je možné program spustit nastavením hodnoty *start* na *TRUE*, v tomto případě stisknutím tlačítka *Start*. Následně jsou zkontrolovány vložené vstupní parametry. V případě, že některý z parametrů neodpovídá logice programu (např. hodnota dolní meze u_{min} je vyšší než horní mez u_{max}), program vypíše chybovou hlášku a vrátí se zpět do stavu před spuštěním. Pokud jsou všechny parametry nastaveny správně, program se spustí.

Proces identifikace začíná čekáním na ustálený výstup soustavy y při konstantním vstupu u_0 . Při ustálení regulované veličiny je určen výstup v pracovním bodě y_0 a po definovaný čas je zaznamenávána nejvyšší (y_h) a nejnižší (y_d) hodnota výstupu. Z nich je pak vypočtena velikost šumu

$$n_0 = \frac{y_h - y_d}{2}. \quad (4)$$

Z velikosti šumu jsou následně vypočteny hodnoty pro přepínání relé h_1 a h_2 , které udávají jeho hysterezi. V práci [1] platí

$$h = h_1 = h_2 = 2n_0. \quad (5)$$

Při této práci se kvůli nelineárnímu chování většiny soustav ukázalo vhodnější, když

$$h_1 \neq h_2, \quad (6)$$

proto bylo zvoleno

$$h_1 = 2n_0 \quad (7)$$

$$h_2 = 1, 4h_1. \quad (8)$$

Nastavení poloh relé začíná exponenciálním nárůstem akční veličiny u dle vztahu

$$u = e^{\frac{1}{3}(t-t_0)} + (u_0 - 1), \quad (9)$$

kde t_0 je čas počátku exponenciálního nárůstu a t je aktuální čas. Zloměk v exponentu zpomaluje její růst. Nárůst akční veličiny skončí tehdy, když

$$y \geq 3h_1 + y_0, \quad (10)$$

nebo když akční veličina dosáhne hodnoty u_{max} . Horní poloha relé d_1 se pak rovná této maximální dosažené hodnotě vstupu u při jejím exponenciálním růstu. Dolní poloha relé d_2 je dána vztahem

$$d_2 = u_0 - 0,7(d_1 - u_0). \quad (11)$$

Uvážíme-li, že soustava kmitá kolem hodnoty výstupní veličiny y_0 odpovídající pracovnímu bodu, pak musí platit

$$d_1 > u_0 > d_2. \quad (12)$$

Přepínání relé pak probíhá podle pravidel

$$u(t) = \begin{cases} d_1 & \text{pokud } y(t) < y_0 - h_2 \\ d_1 & \text{pokud } y(t) < y_0 + h_1 \text{ a } u(t^{-1}) = d_1 \\ d_2 & \text{pokud } y(t) > y_0 + h_1 \\ d_2 & \text{pokud } y(t) > y_0 - h_2 \text{ a } u(t^{-1}) = d_2 \end{cases}, \quad (13)$$

kde $u(t^{-1})$ je hodnota akční veličiny v předcházejícím okamžiku. Pokud tedy je hodnota regulované veličiny y nižší než součet $y_0 + h_1$, zůstává relé v horní poloze. Jakmile regulovaná veličina dosáhne této hranice, přepne se relé do dolní polohy a v ní setrvá, dokud regulovaná veličina neklesne pod hodnotu $y_0 - h_2$. Při takové hodnotě regulované veličiny dojde k přepnutí relé zpět do horní polohy.

Aby bylo možné provést výpočty parametrů relé, je třeba zajistit asymetrii relé. Proto je nutné dodržet podmínku [1] pro stupeň asymetrie relé

$$\gamma = \frac{\max(d_1, d_2)}{\min(d_1, d_2)} > 1. \quad (14)$$

Pro určení normalizovaného dopravního zpoždění $0 \leq \tau \leq 1$ je potřeba poměr časů, kdy je relé v horní a dolní poloze.

$$\rho = \frac{\max(t_{on}, t_{off})}{\min(t_{on}, t_{off})}, \quad (15)$$

kde t_{on} je čas, po který je relé v poloze d_1 a t_{off} je čas, po který je relé v dolní poloze d_2 [1]. Pro normalizované dopravní zpoždění platí

$$\tau = \frac{\gamma - \rho}{(\gamma - 1)(0,35\rho + 0,65)}. \quad (16)$$

Pokud τ vychází záporně, nebo větší než 1, je třeba přenastavit polohy relé d_1 a d_2 . Jejich úpravu volíme podle hodnot maximální a minimální výchylky

výstupní veličiny y_{max} a y_{min} přes meze hystereze h_1 a h_2 . Když $y_{max} > 1$ a $y_{min} > 1$, tak

$$d_1 = u_0 + 0,8(d_1 - u_0) \quad (17)$$

$$d_2 = u_0 + 0,8(d_2 - u_0). \quad (18)$$

Pokud $1 \geq y_{max} > 0,5$ a $1 \geq y_{min} > 0,5$, tak

$$d_1 = u_0 + 0,9(d_1 - u_0) \quad (19)$$

$$d_2 = u_0 + 0,9(d_2 - u_0). \quad (20)$$

Pokud $0,5 \geq y_{max} > 0,1$ a $0,5 \geq y_{min} > 0,1$, tak

$$d_1 = u_0 + 0,95(d_1 - u_0) \quad (21)$$

$$d_2 = u_0 + 0,95(d_2 - u_0). \quad (22)$$

Pokud $y_{max} \leq 0,1$ a $y_{min} \leq 0,1$, tak

$$d_1 = u_0 + 1,1(d_1 - u_0) \quad (23)$$

$$d_2 = u_0 + 1,1(d_2 - u_0). \quad (24)$$

Pokud $y_{max} \leq 0,1$ a $y_{min} \leq 0,1$ a navíc $d_1 = u_{max}$, tak

$$d_2 = u_0 + 0,9(d_2 - u_0). \quad (25)$$

Pokud $y_{max} \leq 0,1$ a $y_{min} \leq 0,1$ a navíc $d_2 = u_{min}$, tak

$$d_1 = u_0 + 0,9(d_1 - u_0). \quad (26)$$

Pokud $y_{max} > 0,1$ a $y_{min} \leq 0,1$, tak

$$d_1 = u_0 - 0,1 \quad (27)$$

$$d_2 = u_0 - 0,1. \quad (28)$$

Když $y_{min} > 0,1$ a $y_{max} \leq 0,1$, tak

$$d_1 = u_0 + 0,1 \quad (29)$$

$$d_2 = u_0 + 0,1. \quad (30)$$

Nastavení parametrů relé probíhá tak dlouho, dokud neplatí $0 \leq \tau \leq 1$. Pak se přejde k samotné identifikaci. Statická citlivost soustavy K_p se vypočítá z

$$K_p = \frac{I_y}{I_u} \quad (31)$$

$$I_y = \int_{t_p} (y(t) - y_0) dt \quad (32)$$

$$I_u = \int_{t_p} (u(t) - u_0) dt = u_{on} t_{on} - u_{off} t_{off} \quad (33)$$

$$t_p = t_{on} + t_{off} \quad (34)$$

$$u_{on} = d_1 - u_0 \quad (35)$$

$$u_{off} = u_0 - d_2, \quad (36)$$

kde t_p je perioda kmitu, u_{on} je navýšení akční veličiny oproti pracovnímu bodu při horní poloze relé a u_{off} je snížení akční veličiny oproti pracovnímu bodu při dolní poloze relé [2]. Pro výpočet statické citlivosti je třeba, aby I_u nebylo nulové, proto musí být relé asymetrické.

Normalizované dopravní zpoždění τ pro systém prvního řádu s dopravním zpožděním je definováno vztahem

$$\tau = \frac{L}{L + T}. \quad (37)$$

Z 37 plyne

$$\frac{L}{T} = \frac{\tau}{1 - \tau} \quad (38)$$

a

$$L = T \frac{\tau}{1 - \tau}. \quad (39)$$

Časová konstanta T je dána vztahem

$$T = \frac{t_{on}}{\ln \left(\frac{\frac{h_1 + h_2}{2|K_p|} - d_2 + e^{\frac{t}{T}} (d_1 + d_2)}{d_1 - \frac{h_1 + h_2}{2|K_p|}} \right)}. \quad (40)$$

Pokud dosadíme z (38) do (40) získáme časovou konstantu. Následně dosazením časové konstanty z (40) do (39) určíme velikost dopravního zpoždění.

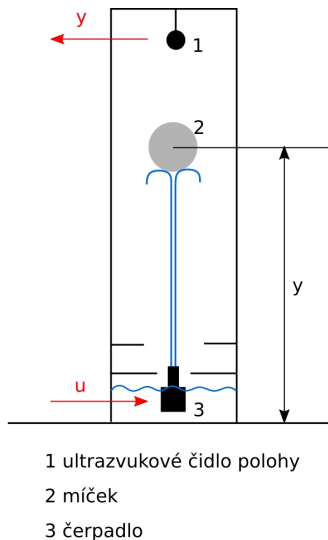
3. Ověření správnosti výsledků

K ověření správnosti vytvořeného řešení bylo PLC připojeno ke třem soustavám dostupným v laboratoři 111 na Fakultě strojní ČVUT v Praze, Technická 4. Jedná se o úlohy Vodní levitace a Teplovzdušný model, který byla použit ve dvou odlišných zapojeních, a to se žárovkou a s ventilátorem.

Pro ověření správnosti identifikace se používají frekvenční charakteristiky a přechodové charakteristiky.

3.1. Vodní levitace

Soustava Vodní levitace (obr. 3) je založena na efektu levitace míčku na vodním sloupci, který je způsoben vztlačovými silami vznikajícími v mezní vrstvě při obtékání míčku laminárním proudem kapaliny. V závislosti na velikosti proudu vody mění míček svoji vertikální polohu na takovou, která odpovídá rovnováze mezi gravitační silou a silami v mezní vrstvě. Aktuální polohu míčku měří ultrazvukové čidlo polohy [3]. Průtok kapaliny je dán aktuálním výkonem čerpadla, který závisí na napětí, což je akční veličina u a pro náš program také výstup z PLC. Poloha míčku je výstupem ze soustavy y , a tedy regulovanou veličinou. Vzhledem ke konstrukci soustavy, kdy při nízkém průtoku je poloha míčku ovlivněna okolím trysky a při vysokém průtoku se míček neudrží na proudu vody, je nutné držet napětí na čerpadle mezi 3V a 7V. Při vyšších napětích se také může stát, že voda rozstříkující se o míček zasáhne ultrazvukové čidlo polohy a měření se tím silně znepráší. Soustava má rychlou odezvu na akční zásah a v takto omezeném prostoru se její chování blíží chování lineárního systému.

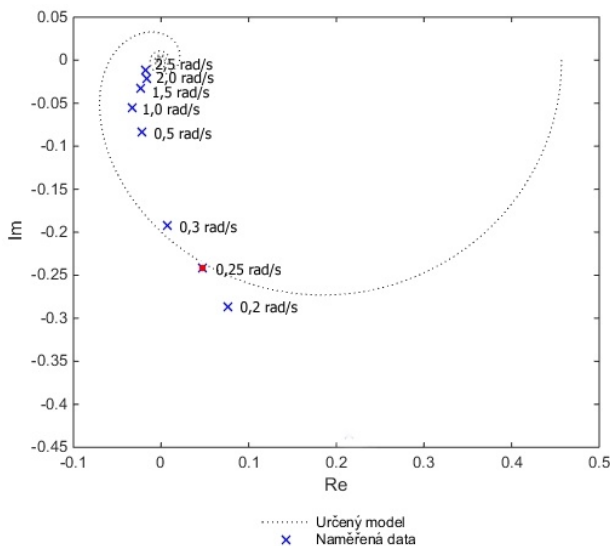


Obr. 3. Schéma soustavy vodní levitace.

Soustava byla identifikována pomocí výše popsaného programu. Nalezený model soustavy má tvar

$$G(s) = \frac{0,457}{1 + 5,381s} e^{-1,180s} \quad (41)$$

Pro ověření správnosti identifikace byly naměřeny body frekvenčních charakteristik soustavy v pracovním bodě. Při zapojení s PLC pro pracovní bod platí $u_0 = 5,5V$. Při zapojení bez PLC má v pracovním bodě akční veličina hodnotu $u_0 = 2,5V$. Přes rozdílné hodnoty akční veličiny se jedná o stejný pracovní bod. Rozdílnost je dána odlišným hardwarovým řešením zapojení soustavy.

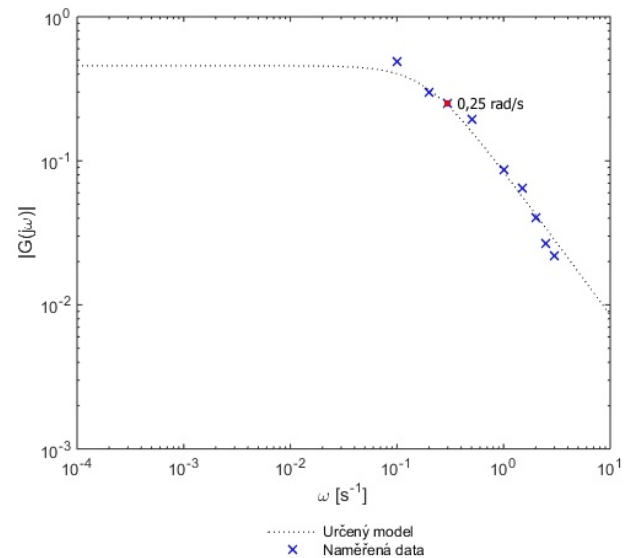


Obr. 4. Porovnání Nyquistovy frekvenční charakteristiky modelu pro pracovní bod se vstupem $u_0 = 5,5V$ a bodů Nyquistovy frekvenční charakteristiky reálné soustavy Vodní levitace. Bod odpovídající frekvenci, kterou soustava kmitala při reléové identifikaci, je vyznačen červeně.

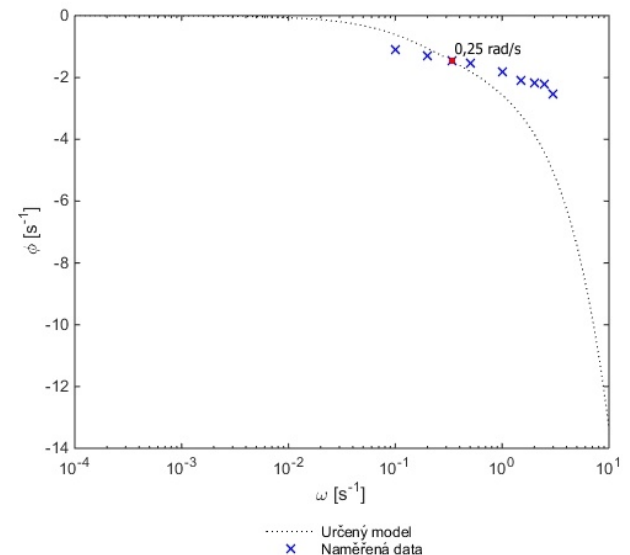
Pro potřeby porovnání výsledků měření se simulovanou soustavou odpovídající určenému modelu byly naměřeny statické charakteristiky a z nich vytvořena korelační křivka pro přepočítání naměřených hodnot tak, aby odpovídaly pracovnímu bodu při zapojení s PLC. Tím se však do měření vnáší nepřesnost. Další

nepřesnost vznikla skutečností, že čerpadlo nemění svůj výkon pouze podle napěťové úrovně napájení. Výkon čerpadla se mění také v závislosti na čase, po který je zapnuté.

Nyquistova frekvenční charakteristika modelu prochází bodem Nyquistovy frekvenční charakteristiky soustavy. Ten odpovídá svou frekvencí frekvenci spínání relé při identifikaci (obr. 4).



Obr. 5. Porovnání amplitudové frekvenční charakteristiky modelu pro pracovní bod se vstupem $u_0 = 5,5V$ a bodů amplitudové frekvenční charakteristiky reálné soustavy Vodní levitace. Bod odpovídající frekvenci, kterou soustava kmitala při reléové identifikaci, je vyznačen červeně.

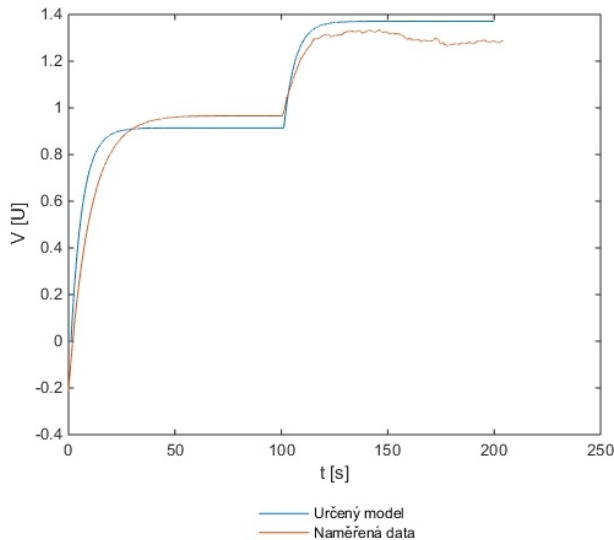


Obr. 6. Porovnání fázové frekvenční charakteristiky modelu pro pracovní bod se vstupem $u_0 = 5,5V$ a bodů fázové frekvenční charakteristiky reálné soustavy Vodní levitace. Bod odpovídající frekvenci, kterou soustava kmitala při reléové identifikaci, je vyznačen červeně.

Amplitudová frekvenční charakteristika modelu ukazuje na stejnou nebo velmi podobnou mezní frekvenci (obr. 5) u soustavy i modelu. Je však možné, že reálná soustava má větší statickou citlivost než určený

model. To proto, že bod charakteristiky reálné soustavy s největší amplitudou má větší amplitudu, než je nejvyšší amplituda u modelu. Fázová frekvenční charakteristika ukazuje, že u modelu klesá fáze rychleji, než u reálné soustavy. Ale v bodě, který svou frekvencí odpovídá frekvenci relé při identifikaci, se fázové charakteristiky shodují (obr. 6).

Přechodová charakteristika (obr. 7) byla naměřena při skoku na akční veličině z 5V na 6V.

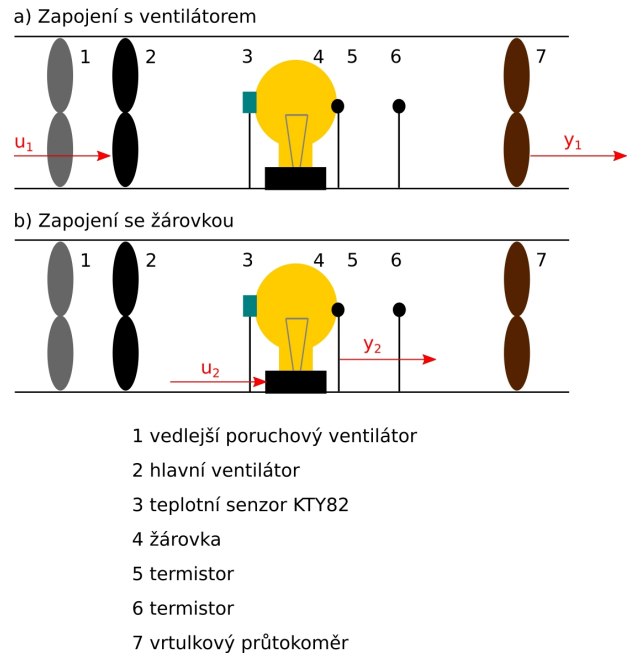


Obr. 7. Porovnání přechodové charakteristiky modelu v okolí pracovního bodu se vstupem $u_0 = 5,5V$ a skutečné přechodové charakteristiky soustavy Vodní levitace.

Určený model neodpovídá přesně naměřeným datům, avšak vzhledem k nutnosti přepočtu naměřených dat pomocí korelační křivky je možné považovat výsledek identifikace za uspokojivý.

3.2. Teplovzdušný model

Teplovzdušný model (obr. 8) je tvořen žárovkou, dvěma ventilátory, průtokoměrem, dvěma termistory a teplotním senzorem. Žárovka napájená ovládaným zdrojem širkově modulovaného napětí je tepelným zdrojem. V těsné blízkosti žárovky je umístěn termistor a teplotní senzor KTY82, druhý termistor je pak ve vzdálenosti 1 cm od baňky. Žárovka je umístěna v krytém tunelu. Tunel je na jednom konci osazen dvěma ventilátory, na vnitřní straně hlavním a na vnější straně vedlejším poruchovým ventilátorem, který působí proti hlavnímu ventilátoru. Na druhém konci tunelu je umístěn vrtulkový průtokoměr [4]. Pro potřeby vývoje a zkoušení programu byla soustava připojována k programovatelnému automatu Tecomat Foxtrot ve dvou konfiguracích, a to s ventilátorem a měřením průtoku vzduchu, nebo s žárovkou a měřením teploty.



Obr. 8. Schéma soustavy teplovzdušný model.

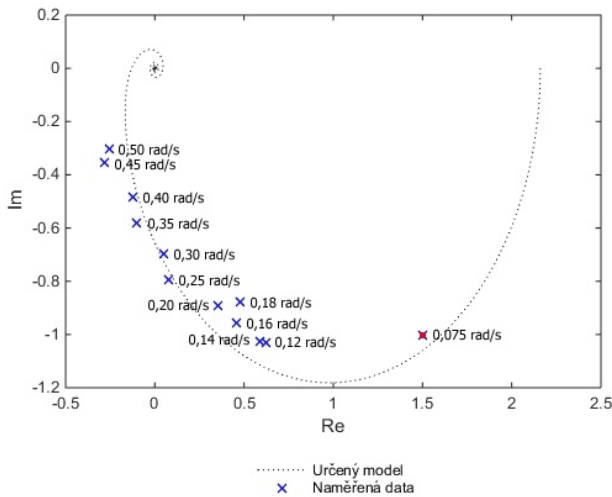
3.2.1. Teplovzdušný model – zapojení s ventilátorem

První variantou (obr. 8a) je zapojení soustavy tak, že akční zásah z PLC u_1 ovládá hlavní ventilátor. Výstupem soustavy je pak průtok vzduchu měřený vrtulkovým průtokoměrem. Řízenou veličinou je tedy průtok vzduchu y_1 . Jedná se o nelineární soustavu s rychlou reakcí na akční zásah a dopravním zpožděním daným délkou tunelu a mechanickými vlastnostmi ventilátoru.

Pro první variantu zapojení byl pomocí reléové identifikace určen model reálné soustavy v pracovním bodě odpovídajícím vstupnímu napětí na ventilátoru $u_0 = 2,5V$

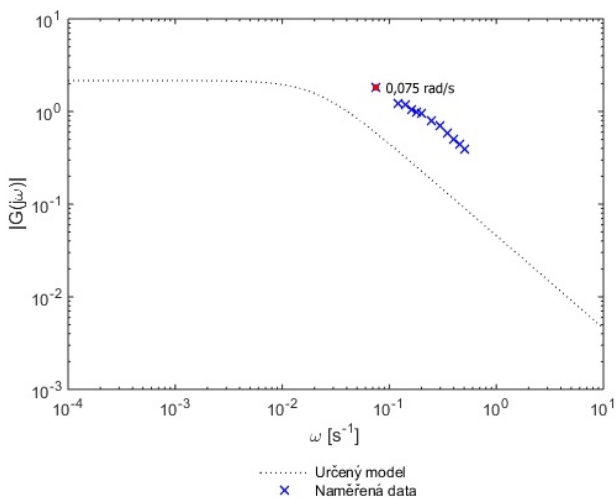
$$G(s) = \frac{2,160}{1 + 47,219s} e^{-4,660s}. \quad (42)$$

Následně byly naměřeny body frekvenčních charakteristik. Nyquistova frekvenční charakteristika modelu soustavy a reálné soustavy (obr. 9) si jsou svým průběhem značně podobné. Bod charakteristiky reálné soustavy odpovídající frekvenci kmitání relé při identifikaci leží blízko charakteristiky modelu.

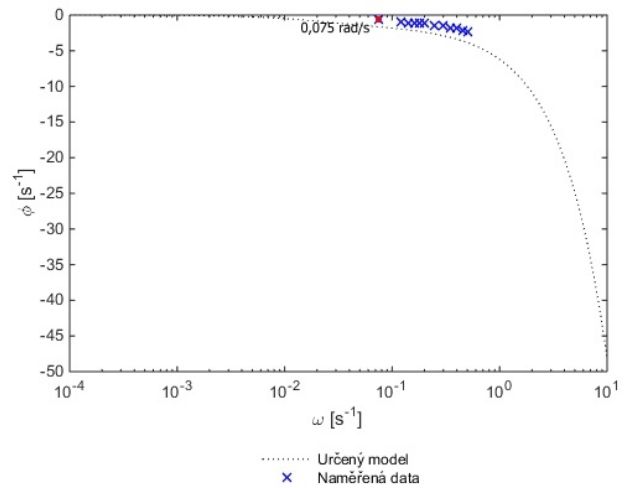


Obr. 9. Porovnání Nyquistovy frekvenční charakteristiky modelu soustavy pro pracovní bod se vstupem $u_0 = 2,5V$ a bodů Nyquistovy frekvenční charakteristiky reálné soustavy Teplovzdušný model – ventilátor. Bod odpovídající frekvenci, kterou soustava kmitala při reléové identifikaci, je vyznačen červeně.

Body amplitudové frekvenční charakteristiky reálné soustavy při zapojení s ventilátorem ukazují, že amplitudová charakteristika modelu má za mezní frekvenci stejný sklon (obr. 10) jako charakteristika soustavy. Pokud by měly být mezní frekvence stejné, pak by měl model menší statickou citlivost než reálná soustava. Pokud by měly být stejné statické citlivosti u modelu a soustavy, pak má soustava vyšší mezní frekvenci než model. Nepřesnost výsledného modelu mohla vzniknout superpozicí nepřesného určení statické citlivosti a časové konstanty.

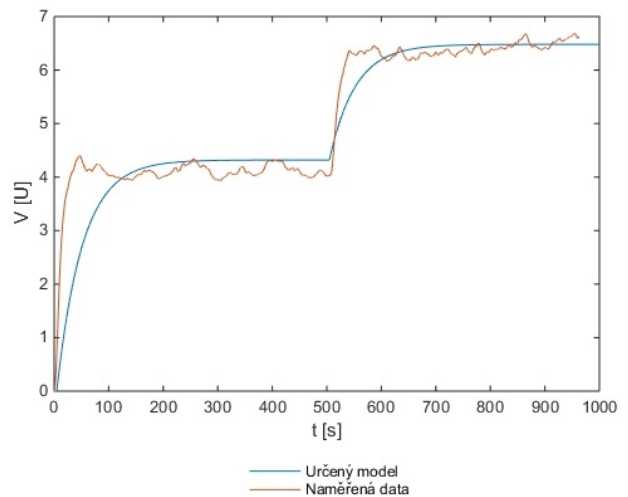


Obr. 10. Porovnání amplitudové frekvenční charakteristiky modelu soustavy pro pracovní bod se vstupem $u_0 = 2,5V$ a bodů amplitudové frekvenční charakteristiky reálné soustavy Teplovzdušný model – ventilátor. Bod odpovídající frekvenci, kterou soustava kmitala při reléové identifikaci, je vyznačen červeně.



Obr. 11. Porovnání fázové frekvenční charakteristiky modelu soustavy pro pracovní bod se vstupem $u_0 = 2,5V$ a bodů fázové frekvenční charakteristiky reálné soustavy Teplovzdušný model – ventilátor. Bod odpovídající frekvenci, kterou soustava kmitala při reléové identifikaci, je vyznačen červeně.

Body fázové frekvenční charakteristiky reálné soustavy kopírují průběh fázové frekvenční charakteristiky modelu (obr. 11). Přechodová charakteristika byla změřena na napětích 2V a 3V (obr. 12). Z jejího průběhu je patrné, že statická citlivost modelu je blízká statické citlivosti skutečné soustavy. U reálné soustavy však nedojde k ustálení, což je dáno velkým vlivem poruchových veličin na soustavu.



Obr. 12. Porovnání přechodové charakteristiky modelu v okolí pracovního bodu se vstupem $u_0 = 2,5V$ a skutečné přechodové charakteristiky soustavy Teplovzdušný model – ventilátor.

3.2.2. Teplovzdušný model – zapojení se žárovkou

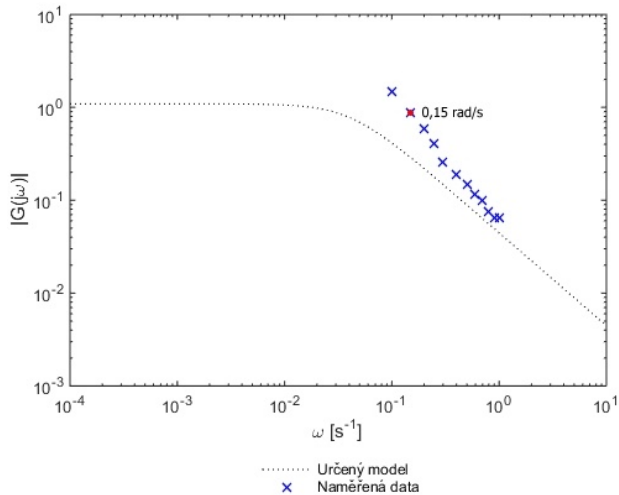
Druhou variantou Teplovzdušného modelu je použití žárovky, která je řízena akčním zásahem z PLC u_2 . Pomocí termistoru na baňce žárovky je měřena teplota skla žárovky. Ta je výstupem soustavy y_2 a řízenou veličinou (obr. 8b). Soustava reaguje na změnu akční veličiny pomalu a rychleji se zahřívá, než ochlazuje. Systém má nelineární vlastnosti.

Soustavě byl pomocí popsaného programu reléové identifikace nalezen v pracovním bodě, kde vstup do

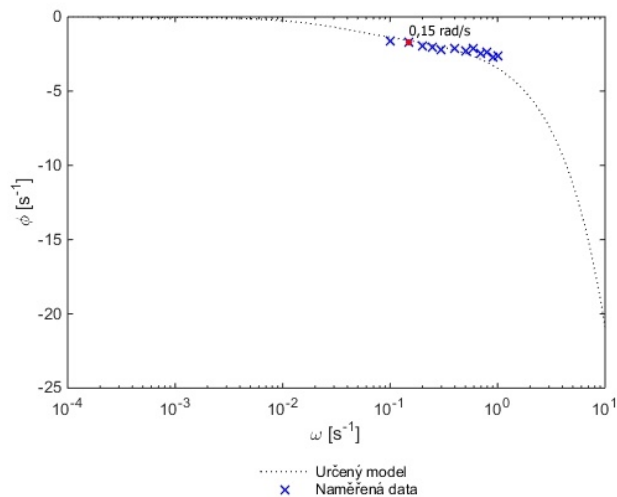
soustavy $u_0 = 2,3V$, model

$$G(s) = \frac{1,091}{1 + 24,470s} e^{-1,934s}. \quad (43)$$

Pro ověření správnosti určeného modelu byly naměřeny body frekvenční charakteristiky soustavy v pracovním bodě odpovídajícím $u_0 = 2,3V$ a simulovány charakteristiky určeného modelu v témže pracovním bodě.



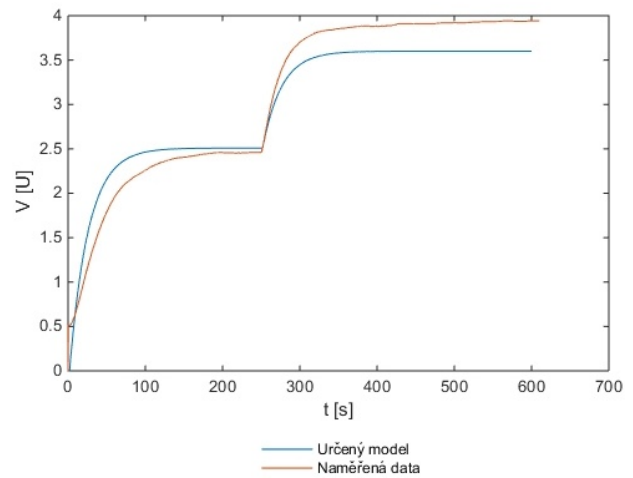
Obr. 13. Porovnání amplitudové frekvenční charakteristiky modelu pro pracovní bod se vstupem $u_0 = 2,3V$ a bodů amplitudové frekvenční charakteristiky soustavy Teplovzdušný model – žárovka. Bod odpovídající frekvenci, kterou soustava kmitala při reléové identifikaci, je vyznačen červeně.



Obr. 14. Porovnání fázové frekvenční charakteristiky modelu pro pracovní bod se vstupem $u_0 = 2,3V$ a bodů fázové frekvenční charakteristiky soustavy Teplovzdušný model – žárovka. Bod odpovídající frekvenci, kterou soustava kmitala při reléové identifikaci, je vyznačen červeně.

Body amplitudové frekvenční charakteristiky reálné soustavy ukazují, že soustava Teplovzdušný tunel v zapojení se žárovkou se chová spíše jako systém vyššího řádu (obr. 13). Body odpovídající vyšším frekvencím jsou bližší charakteristice modelu než ty s frekvencí nižší. Soustava by byla lépe popsána modelem vyššího řádu. Body fázové frekvenční charakteristiky reálné soustavy odpovídají průběhu fázové frekvenční charakteristiky určeného modelu (obr. 14).

Také byla naměřena a simulována přechodová charakteristika pro přechod z pracovního bodu do bodu se vstupem $u_0 = 3,3V$.



Obr. 15. Porovnání přechodové charakteristiky modelu v okolí pracovního bodu se vstupem $u_0 = 2,3V$ a skutečné přechodové charakteristiky soustavy Teplovzdušný model – žárovka.

Z přechodové charakteristiky (obr. 15) je patrné, že určený model se ustaluje rychleji než reálná soustava. Statická citlivost soustavy se se změnou vstupu u rychle mění. I když může být v pracovním bodě určena dobře, při změně vstupu o $1V$ je zde již patrná výrazná odchylka.

4. Závěr

Napsaný program pro PLC Tecomat Foxtrot dokáže identifikovat soustavy typu jeden vstup – jeden výstup modelem prvního řádu s dopravním zpožděním. Správnost funkce byla odzkoušena na třech reálných laboratorních úlohách – na soustavě vodní levitace, teplovzdušném modelu s ventilátorem nebo teplovzdušném modelu se žárovkou. U soustavy Vodní levitace je akční veličinou napětí na čerpadle a regulovanou veličinou poloha míčku na proudu vody. U teplovzdušného modelu s ventilátorem je akční veličinou napětí na ventilátoru a regulovanou veličinou průtok vzduchu. A pro teplovzdušný model se žárovkou je akční veličinou napětí na žárovce a regulovanou veličinou je teplota vzduchu.

Bylo požadováno, aby program bez zásahu uživatele přenastavil parametry relé a našel model soustavy. Ukázalo se, že určený model nemusí přesně odpovídat reálným soustavám, protože výsledný model závisí na nastavení parametrů relé. U soustav, které jsme použili, se tyto parametry lišily den ode dne, protože soustavy jsou již opotřebované a probíhají na nich výuka. Čím více regulovaná veličina při identifikaci překračuje meze hystereze, tím více se výsledek odlišuje od optimálního. Je také třeba vzít v úvahu, že reálné soustavy jsou nelineární a jejich nahrazení lineárním modelem s dopravním zpožděním je pouze jejich aproximací. Nelze tedy očekávat, že model popíše soustavu dokonale.

Pro lepší uplatnění popsaného programu i u soustav vyšších řádů by bylo vhodné rozšířit program i o výpočty parametrů soustavy druhého řádu s dopravním zpožděním. Bylo by však třeba vyřešit otázku, jak má program identifikace rozoznat, který model

použít. V [1] je rozpoznání vhodného modelu založené na velikosti normalizovaného dopravního zpoždění. Tato velikost však závisí na nastavení parametrů relé. V takovém případě by pak na nastavení relé závisel typ použitého modelu, což se nejeví jako správné řešení.

Použitá metoda reléové identifikace je určena k nalezení modelů soustav a následnému nastavení parametrů PID, PI a PD regulátorů. V práci [5] byly podle takto určených modelů nastaveny PID regulátory a regulace probíhala v dostatečné kvalitě pro systémy technologií, kde nevádí počáteční překmit.

Poděkování

Poděkování patří panu profesorovi Milanovi Hofreiterovi za odborné konzultace, panu inženýrovi Milanovi Byžžovskému za pomoc s řešením problémů při používání programu Mosaic, panu inženýrovi Jaroslavu Buškovi za pomoc s hardwarovým řešením připojení soustav a panu bakaláři Františku Hylmarovi za konzultace k psaní programu.

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS16/210/OHK2/3T/12.

Seznam symbolů

d_1	horní poloha relé (V)
d_2	dolní poloha relé (V)
$G(s)$	přenos soustavy (–)
h	mez hystereze relé (V)
h_1	horní mez hystereze relé (V)
h_2	dolní mez hystereze relé (V)
\bar{K}_p	statická citlivost (–)
L	dopravní zpoždění (ms)
s	Laplaceův operátor (–)
T	časová konstanta (ms)
t_p	doba trvání jedné periody (tm)
u	vstup do soustavy (V)
u_{abs}	vstup do soustavy vztážený k pracovnímu bodu (V)
u_{off}	odchylka horní polohy relé od pracovního bodu (V)
u_{on}	odchylka horní polohy relé od pracovního bodu (V)
$u(t^{-1})$	vstup do soustavy v předchozím okamžiku (V)
y	výstup ze soustavy (V)

y_0	výstup ze soustavy v pracovním bodě (V)
y_{abs}	výstup ze soustavy vztážený k pracovnímu bodu (V)
y_d	minimální hodnota výstupu soustavy v pracovním bodě (V)
y_h	maximální hodnota výstupu soustavy v pracovním bodě (V)
y_{max}	odchylka výstupu soustavy od horní meze hystereze (V)
y_{min}	odchylka výstupu soustavy od dolní meze hystereze (V)
t_{off}	čas, kdy je relé v dolní poloze (ms)
t_{on}	čas, kdy je relé v horní poloze (ms)
I_u	integrál ze vstupu do soustavy přes periodu kmitu (V · ms)
I_y	integrál z výstupu ze soustavy přes periodu kmitu (V · ms)
γ	stupeň asymetrie relé (–)
ϱ	poměr času, po který je relé v horní a dolní poloze (–)
τ	normalizované dopravní zpoždění (–)

Literatura

- [1] BERNER, Josefin. *Automatic Tuning of PID Controllers based on Asymmetric Relay Feedback*. Lund, 2015. Disertační práce. Lund university, Lund Institute of Technology, Department of Automatic Control, 2015.
- [2] BERNER, Josefin. *Improved Relay Autotuning using Normalized Time Delay*. In *2016 American Control Conference (ACC). Boston Marriott Copley Place, 06.07.2016 – 08.07.2016*. Boston, 2016, s. 1869–1875.
- [3] Vodní levitace – frekvenční vlastnosti. *Návody na laboratorní cvičení z automatického řízení*. [online]. [cit. 19.3.2018]. Dostupné z: <http://vlab.fs.cvut.cz/navody/files/F2.pdf>
- [4] Teplovzdušný model. *Návody na laboratorní cvičení z automatického řízení*. [online]. [cit. 19.3.2018]. Dostupné z: <http://vlab.fs.cvut.cz/navody/files/tvm.pdf>
- [5] HYLMAR, František. *Realizace a porovnání samo-ladících regulátorů za použití systému Tecomat Foxtrot*. In *Studentská tvůrčí činnost: sborník 2018*. V Praze: Fakulta strojní ČVUT, 2018. V době citování v přípravě.