

Určení parametrů anisochronního modelu soustavy pomocí releové identifikace a diferenciální evoluce

Bc. Alžběta Hornychová*¹

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

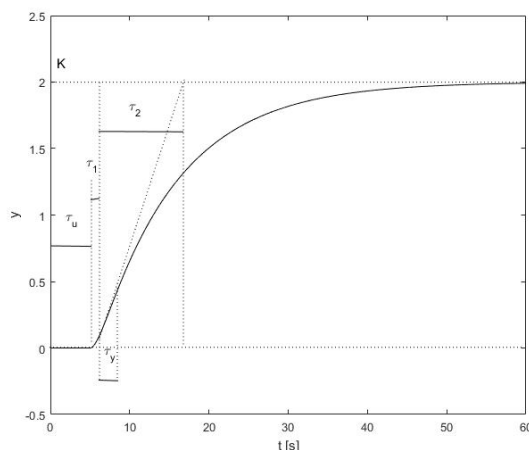
Abstrakt

Článek je věnován zpětnovazební identifikaci stabilních soustav, které jsou v okolí pracovního bodu popsateľné zvoleným anisochronním modelem. Pro odhad parametrů tohoto modelu byla použita releová identifikace s asymetrickým relé a diferenciální evoluce. Pomocí relé lze určit tři body Nyquistovy frekvenční charakteristiky soustavy. V případě astatických poruch je vhodné určit pouze dva a třetí ze statické charakteristiky. Ze tří známých bodů pak byly metodou diferenciální evoluce vypočteny parametry anisochronního modelu. Metoda byla aplikována na čtyři simulované soustavy a reálnou úlohu vodní levitace. Při zpřesnění výpočtu bodů z releové identifikace by popsaná metoda mohla mít praktické využití.

Klíčová slova: anisochronní model; releová identifikace; diferenciální evoluce; frekvenční charakteristika

1. Úvod

Pomocí anisochronního modelu je možné řídit lineární soustavy vyšších řádů. Většinou se pro určení jejich parametrů používá přechodová charakteristika. Zde bude ukázáno jak v případě známé statické citlivosti soustavy určit model na základě jediného měření, s relé připojeným k soustavě se zpětnou vazbou, pomocí výpočtu metodou diferenciální evoluce.



Obr. 1. Přechodová charakteristika anisochronního modelu.

1.1. Anisochronní model

Anisochronní model je univerzálním modelem vhodným pro popis lineárních soustav vyšších řádů. Na rozdíl od jednodušších modelů uvažuje nejen dopravní zpoždění na vstupu, ale také ve zpětné vazbě [1].

$$G_a(s) = \frac{K e^{-\tau_u s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + e^{-\tau_y s})}, \quad (1)$$

kde s je proměnnou z Laplaceovy transformace, K je koeficient statické citlivosti a τ_u je dopravní zpoždění na vstupu. τ_y je dopravní zpoždění zpětné vazby určené polohou inflexního bodu přechodové charakteristiky anisochronního modelu. τ_1 a τ_2 jsou časové konstanty.

Pro stabilní systém platí

$$\frac{\tau_y}{\tau_2} < \frac{\pi}{2}, \quad (2)$$

pro nekmitavý systém pak

$$\frac{\tau_y}{\tau_2} < \frac{1}{e}, \quad (3)$$

pro systém na mezi kmitání

$$\frac{\tau_y}{\tau_2} = \frac{1}{e} \quad (4)$$

a pro kmitavý systém

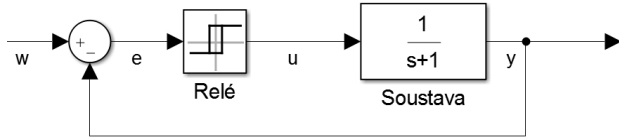
$$\frac{\tau_y}{\tau_2} > \frac{1}{e} \quad (5)$$

[1]. Za předpokladu, že známe tři body Nyquistovy frekvenční charakteristiky systému z nichž jeden odpovídá $\omega = 0$, pak získáme pět rovnic, které lze využít pro odhad parametrů modelu (1).

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

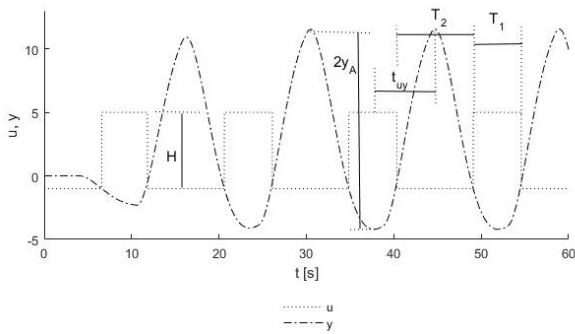
1.2. Releová identifikace

Pro nalezení tří bodů Nyquistovy frekvenční charakteristiky lze použít asymetrické relé. To umožňuje pomocí jediného měření při zapojení dle obr.2 zjistit všechny tři hledané body. Třetí bod charakteristiky je statickou citlivostí soustavy K , kterou je v případě statických poruch vhodné zjistit ze statické charakteristiky.



Obr. 2. Zapojení soustavy s relé pro identifikaci.

Z naměřených průběhů (obr.3) je možné odečíst T_1 , T_2 , y_A a t_{uy} ,



Obr. 3. Výstup relé u a výstup soustavy y.

pro které platí

$$T_p = T_1 + T_2, \quad (6)$$

$$\omega_u = \frac{2\pi}{T_p}, \quad (7)$$

$$\phi_u = \frac{\omega_u T_1}{2} = \frac{\pi T_1}{T_p}, \quad (8)$$

$$H = u_a + |u_b|, \quad (9)$$

$$A_u = \frac{2H}{\pi} \sin(\phi_u) \quad (10)$$

a

$$\phi_{uy} = -\omega_u t_{uy} \quad (11)$$

. Dosazením do

$$G_r(j\omega_u) = \frac{y_A}{A_u} e^{j\phi_{uy}} \quad (12)$$

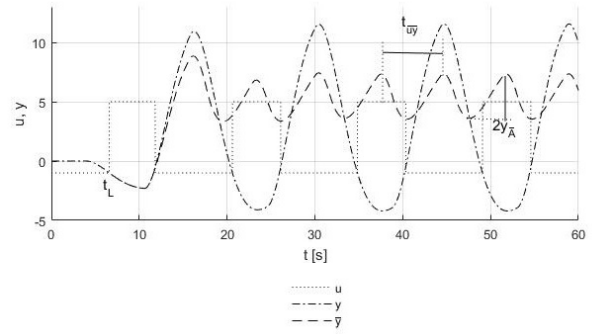
pak získáme první bod charakteristiky [2].

Pro signál oscilující s periodou $T_p/2$ pak platí

$$\bar{u}(t) = u(t) + u(t - \frac{T_p}{2}). \quad (13)$$

$$\bar{y}(t) = y(t) + y(t - \frac{T_p}{2}). \quad (14)$$

Z průběhu $\bar{y}(t)$ (obr.4) následně odečteme \bar{y}_A a $t_{\bar{u}\bar{y}}$.



Obr. 4. Výstup relé u a výstup soustavy y doplněný o průběh \bar{y} .

Dosazením do

$$\omega_{\bar{u}} = \frac{2\pi}{\frac{T_p}{2}} = 2\omega_u, \quad (15)$$

$$\phi_{\bar{u}} = 2\phi_u = \omega_u T_1 = \frac{\omega_{\bar{u}} T_1}{2} = \frac{2\pi T_1}{T_p}, \quad (16)$$

$$A_{\bar{u}} = \frac{2H}{\pi} \sin(\phi_{\bar{u}}), \quad (17)$$

$$\phi_{\bar{u}\bar{y}} = -\omega_{\bar{u}} t_{\bar{u}\bar{y}}, \quad (18)$$

a do

$$G_r(2j\omega_u) = \frac{\bar{y}_A}{A_{\bar{u}}} e^{j\phi_{\bar{u}\bar{y}}}, \quad (19)$$

dostaneme druhý bod Nyquistovy frekvenční charakteristiky [2]. Třetím bodem je přímo určena statická citlivost soustavy, která se vypočte dle vztahu

$$K = G_r(j0) = \frac{\int_t^{t+T_p} y(\tau) d\tau}{\int_t^{t+T_p} u(\tau) d\tau}, t \geq t_L. \quad (20)$$

Body charakteristiky je možné také vypočítat pomocí vztahů

$$G_r(j\omega_u) = \frac{\int_t^{t+T_p} y(\tau) e^{-j\omega_u \tau} d\tau}{\int_t^{t+T_p} u(\tau) e^{-j\omega_u \tau} d\tau}, t \geq t_L, \quad (21)$$

$$G_r(j\omega_{\bar{u}}) = \frac{\int_t^{t+T_p} \bar{y}(\tau) e^{-j\omega_{\bar{u}} \tau} d\tau}{\int_t^{t+T_p} \bar{u}(\tau) e^{-j\omega_{\bar{u}} \tau} d\tau}, t \geq t_L, \quad (22)$$

viz [2].

1.3. Diferenciální evoluce

Pro výpočet parametrů anisochronního modelu byla použita metoda diferenciální evoluce. Tento genetický algoritmus je vhodný k hledání globálních extrémů funkcí. Jeho výhoda spočívá ve tvorbě potomků ne ze dvou rodičů, jak je obvyklé, ale ze čtyř. Tak je lépe pokryt prohledávaný prostor, a stoupá rychlost řešení. Cílem procesu diferenciální evoluce je v průběhu cyklů zvaných generace, nalézt nejlepší populaci jedinců, vzhledem k dané funkci.

V každé generaci provádí následující kroky. Nejprve se stanoví se parametry určující chod evoluce, viz tab. 1

Tabulka 1. Parametry pro chod evoluce [3].

Název	Značka	Hodnoty	Optimum
Dimenze problému	D	dle řešeného problému	-
Mutační konstanta	F	$\langle 0; 2 \rangle$	většinou 0,3 – 1,9
Práh křížení	CR	$\langle 0; 1 \rangle$	většinou 0,8 – 0,9
Velikost populace	D	$\langle 2D; 100D \rangle$ v případě potřeby i více	10D
Počet generací	Generations	definuje uživatel	-

Poté se vytvoří populace vygenerováním jedinců podle vzorového vektoru. Každý jedinec sestává z $D + 1$ prvků, kdy poslední prvek je hodnota účelové funkce. Během každé generace probíhá cyklus, který zajišťuje, aby byl šlechtěn každý prvek populace. Postupně je brán každý jedinec a s ním proveden následující evoluční cyklus.

V samotném evolučním cyklu dochází nejprve k mutaci a pak ke křížení. V průběhu mutace je k předem vybranému jedinci zvolena trojice jedinců. Z této trojice se dva od sebe odečtou a tak vznikne tzv. diferenční vektor. Ten se pronásobí mutační konstantou F . Touto mutací získáme váhovaný diferenční vektor. Přičteme k němu třetího jedince a dostaneme tzv. šumový vektor. Proces křížení začíná přípravou zkušebního vektoru. Z cílového a šumového vektoru se vybírají postupně prvky a pro ně se generuje náhodné číslo mezi 0 a 1. Poté se porovnává s prahem křížení CR . Pokud je dané číslo menší než práh křížení, pak se do zkušebního vektoru zapíše prvek ze šumového vektoru, jinak se tam zapíše prvek z cílového vektoru. Hodnota účelové funkce zkušebního vektoru se porovná s účelovou funkcí cílového vektoru. Na pozici cílového vektoru je pak zapsán ten, který má hodnotu účelové funkce lepší - nižší. Tím je zajištěno, že se do nové populace dostane prvek s lepšími vlastnostmi [3].

Diferenciální evoluce je ukončena tehdy, když proběhne uživatelem nadefinovaný počet generací. Během každé generace se uchovává hodnota účelové funkce nejlepšího jedince ve vektoru historie, ten po ukončení evoluce znázorňuje průběh evolučního procesu.

2. Aplikace na simulační a experimentální data

Pro odzkoušení výpočtu parametrů anisochronního modelu, byly vybrány čtyři rozdílné simulační sou-

stavy, které pokrývají obvyklé pásmo přenosových funkcí pro stabilní soustavy s jedním vstupem a výstupem

$$G(s) = \frac{2e^{-2s}}{10s^2 + 11s + 1}, \quad (23)$$

$$G(s) = \frac{2e^{-4s}}{0.125s^3 + 0.75s^2 + 1.5s + 1} \quad (24)$$

$$G(s) = \frac{2e^{-0,5s}}{(s^3 + 2s^2 + 2s + 1)}, \quad (25)$$

$$G(s) = \frac{2e^{-4s}}{(s^2 + 0.4s + 1)} \quad (26)$$

a na reálnou úlohu levitace míčku na vodním sloupci.

Pro výpočet diferenciální evoluce byly nastaveny parametry tak, jak je uvedeno v tabulce 2

Tabulka 2. Parametry nastavené pro chod evoluce.

Název	Značka	Hodnota
Dimenze problému	D	4
Mutační konstanta	F	0.5
Práh křížení	CR	0.8
Velikost populace	D	40
Počet generací	Generations	30

Přesnost výpočtu parametrů modelu byla kontrolována pomocí účelové funkce Kr

$$Kr = |G_r(j\omega_u) - Ga(j\omega_u)| + |G_r(j\omega_{\bar{u}}) - Ga(j\omega_{\bar{u}})| \quad (27)$$

kde

$$Ga(j\omega_u) = \frac{Ke^{-\tau_u j\omega_u}}{(\tau_1 j\omega_u + 1)(\tau_2 j\omega_u + e^{-\tau_y j\omega_u})} \quad (28)$$

a

$$Ga(j\omega_{\bar{u}}) = \frac{Ke^{-\tau_u j\omega_{\bar{u}}}}{(\tau_2 j\omega_{\bar{u}} + 1)(\tau_2 j\omega_{\bar{u}} + e^{-\tau_y j\omega_{\bar{u}}})}. \quad (29)$$

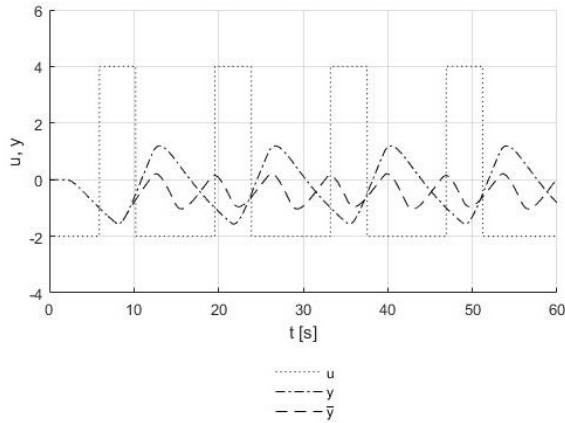
Výpočty byly prováděny pomocí skriptu v programu MATLAB.

2.1. Simulační data

U simulovaných soustav byla odzkoušena releová identifikace. V programovém prostředí MATLAB-Simulink bylo provedeno zapojení soustavy dle obr.2 a naměření závislosti výstupu a vstupů na čase. Statická citlivost byla určována dle vztahu (20).

2.1.1. Aplikace na 1. soustavu

K simulované soustavě (23) bylo připojeno relé dle schématu 2. Po určení periody T_p byl dopočítán dle (14) průběh výstupu soustavy \bar{y} pro $T_p/2$.



Obr. 5. Výstup relé u a výstup soustavy y a \bar{y} .

Z průběhů (obr.5) byly odečteny parametry $H = 6$, $T_1 = 4.30s$, $T_2 = 9.37s$, $T_p = 13.67s$, $t_{uy} = 4.98$, $y_A = 1.3805$, $t_{\bar{u}\bar{y}} = 4.52$, $\bar{y}_A = 0.5523$.

Dosažením do vztahů (6), (7), (8), (9), (10), (11) a (12) vypočítáme první bod Nyquistovy frekvenční charakteristiky

$$G_r(0.4596j) = -0.2848 - 0.3259j. \quad (30)$$

A z (6), (15), (16), (9), (17), (18) a (19) vychází druhý bod charakteristiky

$$G_r(0.9193j) = -0.0832 + 0.1335j. \quad (31)$$

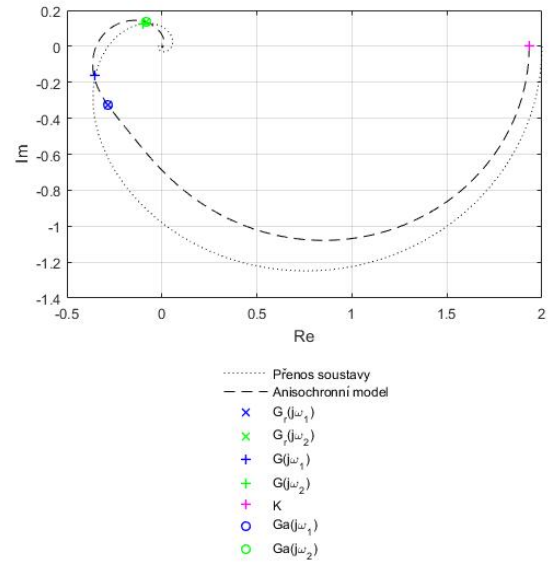
Z (20) byla vypočtena statická citlivost soustavy $K = 1.9324$.

Pomocí diferenciální evoluce byly ze známých bodů (30), (31) a statické citlivosti K vypočteny parametry anisochronního modelu (1). Výsledný anisochronní model pro soustavu má tvar

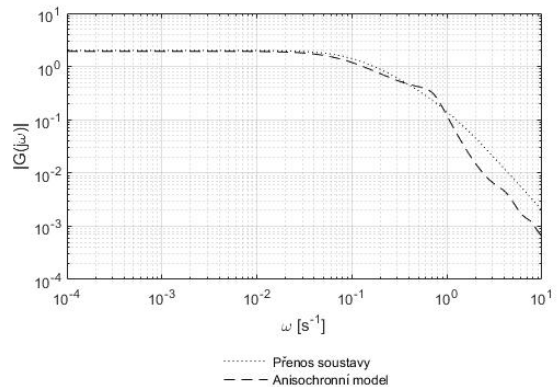
$$Ga(s) = \frac{2e^{-1.1032s}}{(13.1670s + 1)(2.1806s + e^{-1.7986s})}. \quad (32)$$

Hodnota účelové funkce pro vypočtené parametry je $8.5611 \cdot 10^{-11}$.

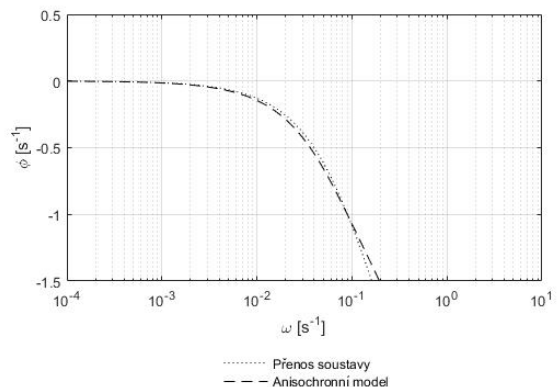
Modelu (32) odpovídá Nyquistova frekvenční charakteristika 6, Bodeho amplitudová charakteristika 7 a Bodeho fázová charakteristika 8.



Obr. 6. Nyquistovy frekvenční charakteristiky soustavy a anisochronního modelu.



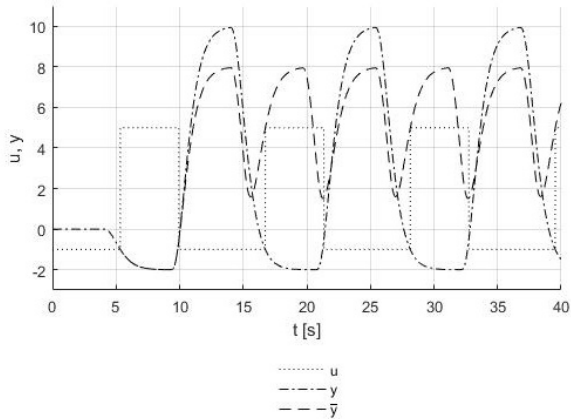
Obr. 7. Bodeho amplitudové charakteristiky.



Obr. 8. Bodeho fázové charakteristiky.

2.1.2. Aplikace na 2. soustavu

K simulované soustavě (24) bylo připojeno relé dle schématu 2. Po určení periody T_p byl dopočítán dle (14) průběh výstupu soustavy \bar{y} pro $T_p/2$.



Obr. 9. Výstup relé u a výstup soustavy y a \bar{y} .

Z průběhů (obr.9) byly odečteny parametry $H = 6$, $T_1 = 4.60s$, $T_2 = 6.80s$, $T_p = 11.40s$, $t_{uy} = 6.24$, $y_A = 5.9245$, $t_{\bar{y}} = 6.06$, $\bar{y}_A = 3.1740$.

Dosažením do vztahů (6), (7), (8), (9), (10), (11) a (12) vypočítáme první bod Nyquistovy frekvenční charakteristiky

$$G_r(0.4596j) = -0.2848 - 0.3259j. \quad (33)$$

A z (6), (15), (16), (9), (17), (18) a (19) vychází druhý bod charakteristiky

$$G_r(0.9193j) = -0.0832 + 0.1335j. \quad (34)$$

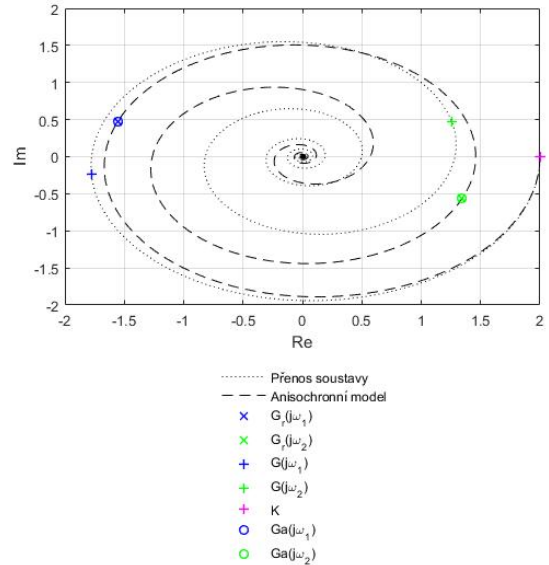
Z (20) byla vypočtena statická citlivost soustavy $K = 2.0074$.

Pomocí diferenciální evoluce byly ze známých bodů (33), (34) a statické citlivosti K vypočteny parametry anisochronního modelu (1). Výsledný anisochronní model pro soustavu má tvar

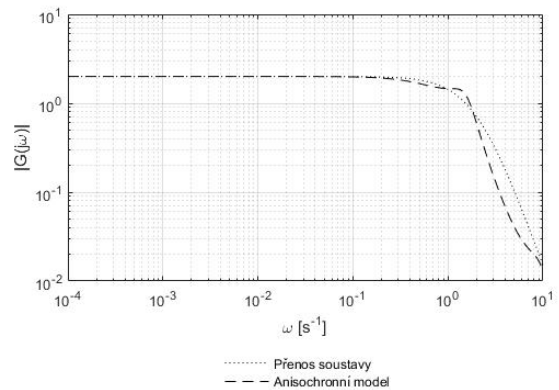
$$Ga(s) = \frac{2e^{-4.7103s}}{(1.7119s + 1)(0.9614s + e^{-0.8521s})}. \quad (35)$$

Hodnota účelové funkce pro vypočtené parametry je $2.7318 \cdot 10^{-7}$.

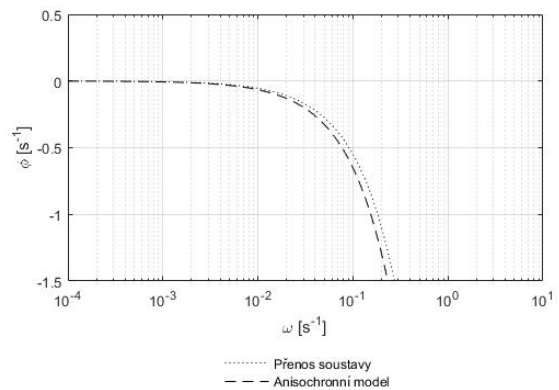
Modelu (35) odpovídá Nyquistova frekvenční charakteristika 10, Bodeho amplitudová charakteristika 11 a Bodeho fázová charakteristika 12.



Obr. 10. Nyquistovy frekvenční charakteristiky soustavy a anisochronního modelu.



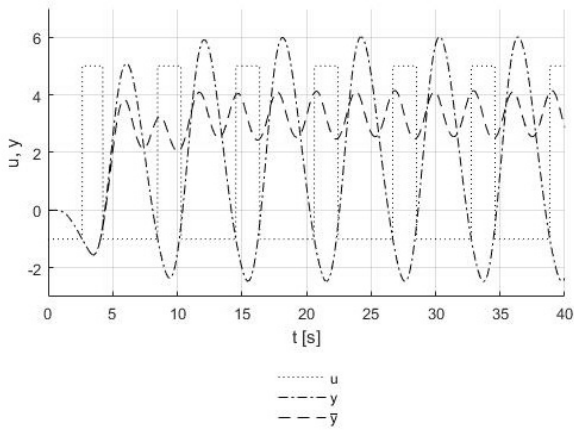
Obr. 11. Bodeho amplitudové charakteristiky.



Obr. 12. Bodeho fázové charakteristiky.

2.1.3. Aplikace na 3. soustavu

K simulované soustavě (25) bylo připojeno relé dle schématu 2. Po určení periody T_p byl dopočítán dle (14) průběh výstupu soustavy \bar{y} pro $T_p/2$.



Obr. 13. Výstup relé u a výstup soustavy y a \bar{y} .

Z průběhů (obr.13) byly odečteny parametry $H = 6$, $T_1 = 1.83s$, $T_2 = 4.25s$, $T_p = 6.08s$, $t_{uy} = 2.715$, $y_A = 4.241$, $t_{\bar{y}} = 2.275$, $\bar{y}_A = 0.7755$.

Dosažením do vztahů (6), (7), (8), (9), (10), (11) a (12) vypočítáme první bod Nyquistovy frekvenční charakteristiky

$$G_r(0.4596j) = -0.2848 - 0.3259j. \quad (36)$$

A z (6), (15), (16), (9), (17), (18) a (19) vychází druhý bod charakteristiky

$$G_r(0.9193j) = -0.0832 + 0.1335j. \quad (37)$$

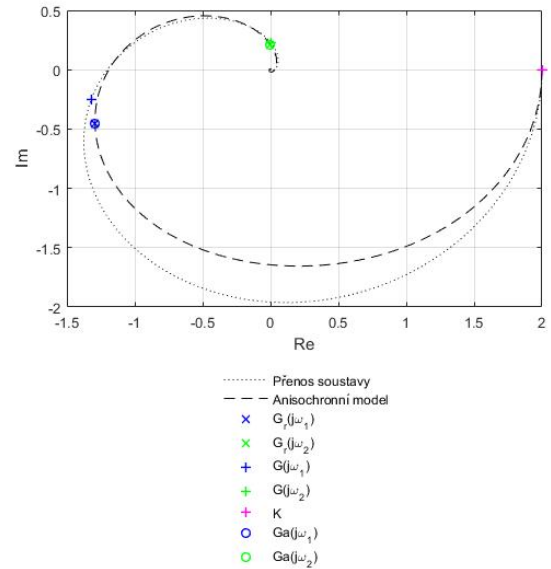
Z (20) byla vypočtena statická citlivost soustavy $K = 2.0002$.

Pomocí diferenciální evoluce byly ze známých bodů (36), (37) a statické citlivosti K vypočteny parametry anisochronního modelu (1). Výsledný anisochronní model pro soustavu má tvar

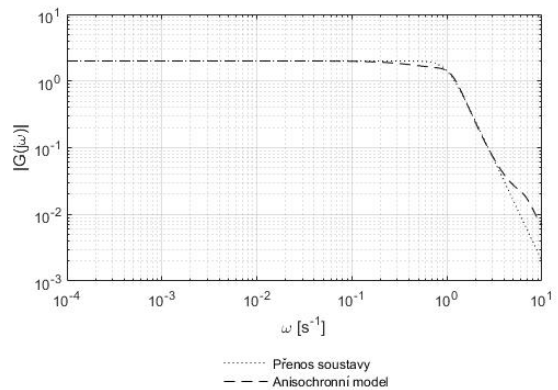
$$Ga(s) = \frac{2e^{-0.7297s}}{(1.8734s + 1)(1.4233s + e^{-1.1369s})}. \quad (38)$$

Hodnota účelové funkce pro vypočtené parametry je $1.0397 \cdot 10^{-8}$.

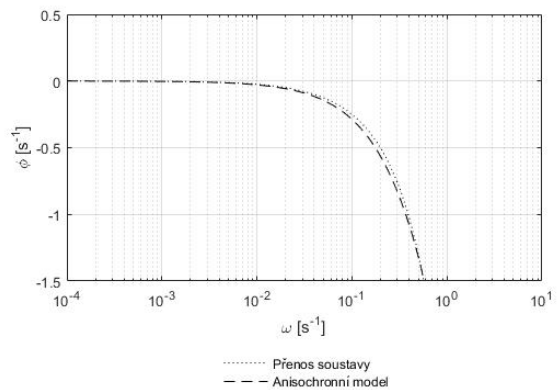
Modelu (38) odpovídá Nyquistova frekvenční charakteristika 14, Bodeho amplitudová charakteristika 15 a Bodeho fázová charakteristika 16.



Obr. 14. Nyquistovy frekvenční charakteristiky soustavy a anisochronního modelu.



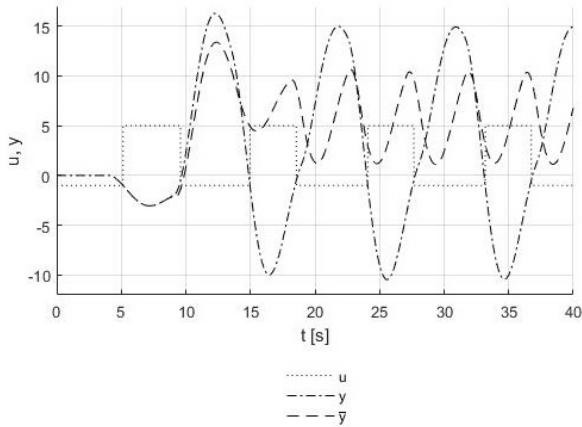
Obr. 15. Bodeho amplitudové charakteristiky.



Obr. 16. Bodeho fázové charakteristiky.

2.1.4. Aplikace na 4. soustavu

K simulované soustavě (26) bylo připojeno relé dle schématu 2. Po určení periody T_p byl dopočítán dle (14) průběh výstupu soustavy \bar{y} pro $T_p/2$.



Obr. 17. Výstup relé u a výstup soustavy y a \bar{y} .

Z průběhů (obr.17) byly odečteny parametry $H = 6$, $T_1 = 3.55s$, $T_2 = 5.55s$, $T_p = 9.10s$, $t_{uy} = 5.045$, $y_A = 12.675$, $t_{\bar{y}} = 1.465$, $\bar{y}_A = 4.633$.

Dosazením do vztahů (6), (7), (8), (9), (10), (11) a (12) vypočítáme první bod Nyquistovy frekvenční charakteristiky

$$G_r(0.4596j) = -0.2848 - 0.3259j. \quad (39)$$

A z (6), (15), (16), (9), (17), (18) a (19) vychází druhý bod charakteristiky

$$G_r(0.9193j) = -0.0832 + 0.1335j. \quad (40)$$

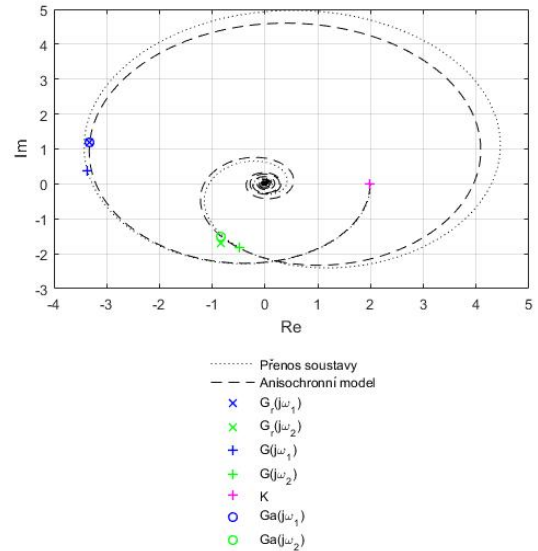
Z (20) byla vypočtena statická citlivost soustavy $K = 1.9881$.

Pomocí diferenciální evoluce byly ze známých bodů (39), (40) a statické citlivosti K vypočteny parametry anisochronního modelu (1). Výsledný anisochronní model pro soustavu má tvar

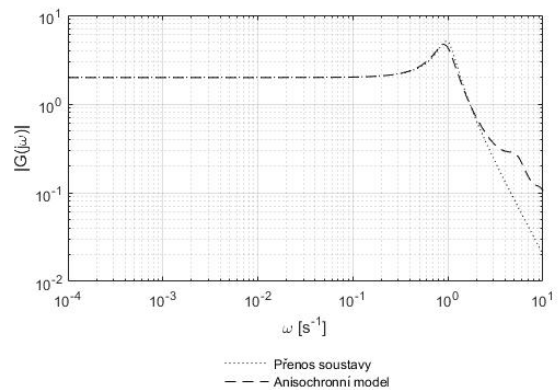
$$Ga(s) = \frac{2e^{-4.5526s}}{(0.1000s + 1)(1.4351s + e^{-1.4454s})}. \quad (41)$$

Hodnota účelové funkce pro vypočtené parametry je 0.21374.

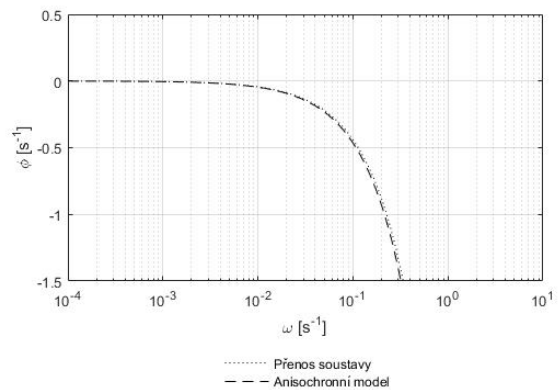
Modelu (41) odpovídá Nyquistova frekvenční charakteristika 18, Bodeho amplitudová charakteristika 19 a Bodeho fázová charakteristika 20.



Obr. 18. Nyquistovy frekvenční charakteristiky soustavy a anisochronního modelu.



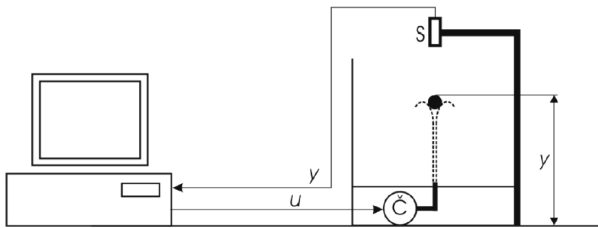
Obr. 19. Bodeho amplitudové charakteristiky.



Obr. 20. Bodeho fázové charakteristiky.

2.2. Experimentální data

Metoda byla aplikována na úlohu Vodní levitace (obr.21), která je postavená v laboratoři 111 v budově Fakulty strojní Českého vysokého učení technického v Praze.

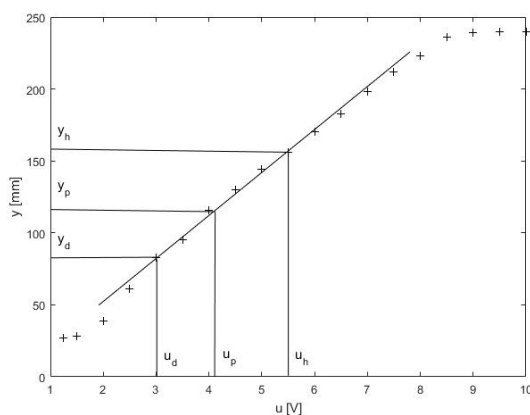


Obr. 21. Schéma úlohy vodní levitace [1].

Díky vztlakovým silám, které vznikají v mezni vrstvě při obtékání míčku laminárním proudem kapaliny, dochází k efektu levitace míčku. Průtok kapaliny závisí na aktuálním výkonu čerpadla Č, který je řízen napěťovým signálem u . Při vyšších průtocích dochází k rovnováze gravitační síly a síly od proudu kapaliny ve větších výškách y , než při nižších průtocích. Aktuální poloha míčku je snímána ultrazvukovým senzorem S . Napěťový signál y z čidla je veden do do měřicí karty počítače, kde je zpracován.

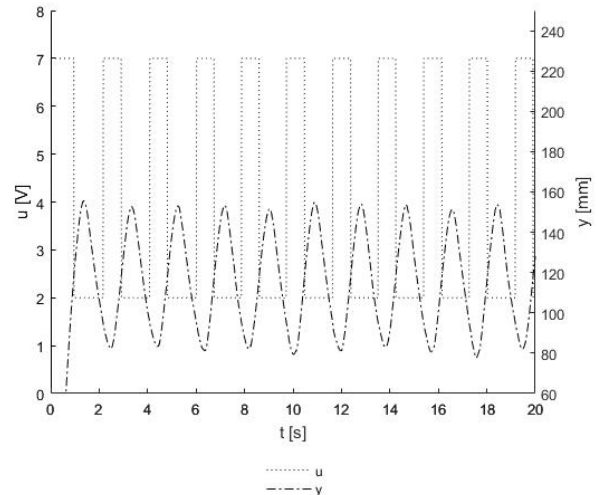
2.2.1. Měřená úloha

Pro určení statické citlivosti soustavy byla naměřena její statická charakteristika. K čerpadlu byl přiveden konstantní napěťový signál a byla měřena odpovídající poloha míčku. Po zopakování měření pro různé hodnoty napětí, byla vynesena statická charakteristika (obr.22). Ze statické charakteristiky bylo určeno pásmo, ve kterém se soustava chová lineárně a v jeho přibližném středu určen pracovní bod.



Obr. 22. Statická charakteristika s vyznačeným pásmem linearity.

Při zapojení dle obr.2, byl naměřen průběh výšky míčku y při řízení úlohy pomocí relé.



Obr. 23. Průběh výstupu relé u a soustavy y .

2.2.2. Výpočet

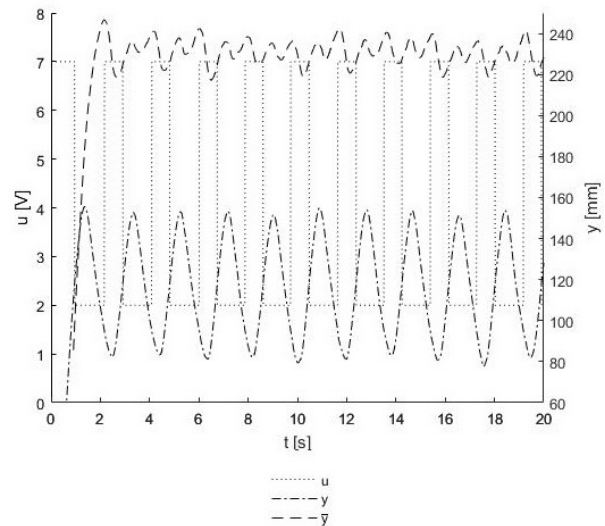
Ze statické charakteristiky (obr.22) byla pro pásmo linearity určena statická citlivost K .

$$K_s = \frac{y_h - y_d}{u_h - u_d} = \frac{156 - 83}{5.5 - 3} = 29.2. \quad (42)$$

Z průběhů na obr.23 bylo určeno

$$T_p = 1.83s. \quad (43)$$

Následně pak ze vztahu (14) byl vypočten předpokládaný průběh výstupu y pro $T_p/2$.



Obr. 24. Průběh výstupu relé u a soustavy y .

Z průběhů na obr.24 byly odečteny parametry potřebné pro výpočet bodů Nyquistovy frekvenční charakteristiky.

$$H = 6, T_1 = 3.55s, T_2 = 5.55s, T_p = 9.10s, t_{uy} = 5.045, y_A = 12.675, t_{\bar{u}y} = 1.465, \bar{y}_A = 4.633.$$

Pak z (6), (7), (8), (9), (10), (11) a (12) vypočteme

$$G_r(3.4334j) = -10.4128 - 5.2046j. \quad (44)$$

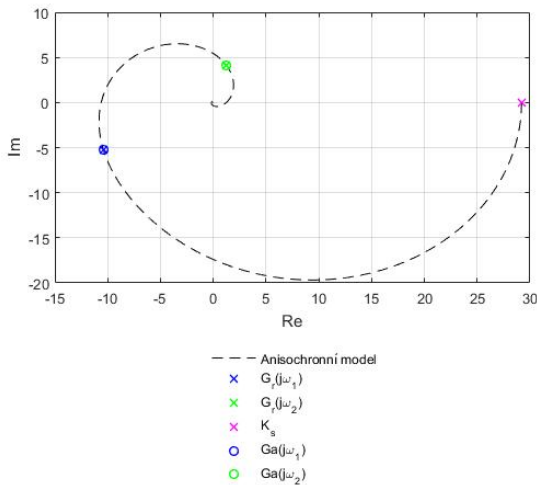
A z (6), (15), (16), (9), (17), (18) a (19) vychází

$$G_r(6.8669j) = 1.2662 + 4.0872j. \quad (45)$$

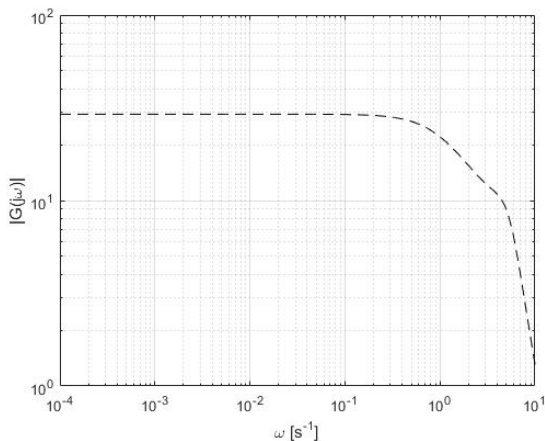
Pomocí diferenciální evoluce byly vypočteny parametry anisochronního modelu (1). Výsledný anisochronní model pro soustavu má tvar (46).

$$Ga(s) = \frac{29.2e^{-0.2892s}}{(0.9201s + 1)(0.3007s + e^{-0.2354s})} \quad (46)$$

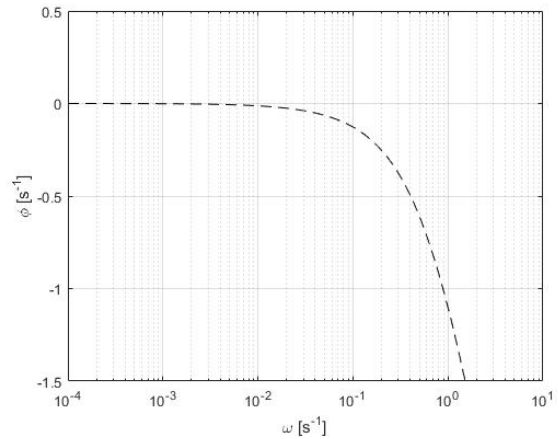
Modelu (46) odpovídá Nyquistova frekvenční charakteristika 25, Bodeho amplitudová charakteristika 27 a Bodeho fázová charakteristika 26.



Obr. 25. Nyquistovy frekvenční charakteristiky soustavy dle anisochronního modelu.



Obr. 26. Bodeho amplitudová charakteristika.



Obr. 27. Bodeho fázová charakteristika.

3. Závěr

Na simulovaných soustavách a na reálné soustavě byla vyzkoušena releová identifikace, k určení dvou bodů Nyquistovy frekvenční charakteristiky. Ukázalo se, že výpočet bodů z odečtených rozměrů průběhů není zcela přesný. Pro simulovanou soustavu (32) byl bod odpovídající frekvenci spínání relé $T_p/2$ určen s dostatečnou přesností, avšak bod odpovídající frekvenci spínání relé T_p byl určen poněkud nepřesně a to s odchylkou od své skutečné polohy téměř 0.1. Tato odchylka má vzhledem k velikosti skutečné statické citlivosti $K = 2$ již vliv na přesnost vypočteného modelu. Výrazně větší chybou bylo zatížení určení bodů charakteristiky u soustavy (35). Tato skutečnost je způsobena tvarem odezvy soustavy na relé. Ten má za následek nejasnosti v poloze bodů, ze kterých se mají odečítat parametry pro výpočet bodů. Podobnou odchylkou jsou zatíženy vypočtené body i u soustav (38) a (41). Možným řešením výše popsaného problému by mohlo být použití vztahů (21) a (22) k výpočtu bodů charakteristiky, pro které není třeba z průběhů určovat tolik parametrů jako při námi použitým výpočtu. Statickou citlivost se dařilo určit přesně. Jedině pro soustavu (32) byla určena poněkud nepřesně a to s odchylkou 0.0676, která pro předpokládanou statickou citlivost $K = 2$ činí skoro 3.5%.

Metoda diferenciální evoluce se ukázala být vhodným nástrojem pro výpočet parametrů anisochronního modelu. Většinou nalezla řešení s přesností větší než $1 \cdot 10^{-5}$. Pouze u soustavy (41) této přesnosti nedosáhla, což může být dáno špatnou identifikací soustavy, pro níž nemuselo být možné najít takto přesné řešení.

Z Bodeho frekvenčních charakteristik je patrné, že v okolí bodu, ve kterém nahrazujeme soustavu anisochronním modelem, odpovídají charakteristiky anisochronního modelu charakteristikám soustav.

Pokud by se podařilo zpřesnit identifikaci soustavy, například výše navrhovaným způsobem, mohl by mít tento způsob určení modelu soustavy široké využití v praxi.

Poděkování

Děkuji panu profesorovi Milanu Hofreiterovi za odborné konzultace k výše popsané problematice a panu Jakubu Havlíčkovi za rady k programovému řešení v prostředí MATLAB.

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

Seznam symbolů

A_u	amplitudový poměr při T_p (-)
$A_{\bar{u}}$	amplitudový poměr při $T_p/2$ (-)
G_a	přenos anisochronního modelu (-)
G_r	bod Nyquistovy frekvenční charakteristiky určený releovou identifikací (-)
H	rozmezí mezi horní a dolní polohou relé (-)
K	statická citlivost (-)
K_s	statická citlivost určená ze statické charakteristiky (-)
K_r	účelová funkce (-)
s	operátor Laplaceovy transformace (-)
t	čas (s)
t_{uy}	posunutí výstupu soustavy oproti výstupu relé při T_p (s)
t_L	čas prvního sepnutí relé (s)
$t_{\bar{u}\bar{y}}$	posunutí výstupu soustavy oproti výstupu relé při $T_p/2$ (s)
T_1	doba po kterou je relé sepnuto (s)
T_2	doba po kterou je relé vypnuto (s)
T_p	perioda spínání relé (s)
u_a	výstup relé při sepnutí (-)
u_b	výstup relé při vypnutí (-)
\bar{u}	výstup relé při $T_p/2$ (-)
y_A	amplituda výstupu soustavy odpovídající periodě spínání relé T_p (s)
$y_{\bar{A}}$	amplituda výstupu soustavy odpovídající periodě spínání relé $T_p/2$ (s)
\bar{y}	výstup soustavy při $T_p/2$ (-)
τ_1	časová konstanta anisochronního modelu (s)
τ_2	časová konstanta anisochronního modelu (s)

τ_u	dopravní zpoždění výstupu soustavy (s)
τ_y	dopravní zpoždění zpětné vazby (s)
ϕ	je fázový posun (s^{-1})
ϕ_u	fázový posun výstupu relé při T_p (s^{-1})
$\phi_{\bar{u}}$	fázový posun výstupu relé při $T_p/2$ (s^{-1})
ϕ_{uy}	fázový posun výstupu soustavy vůči výstupu relé při T_p (s^{-1})
$\phi_{\bar{u}\bar{y}}$	fázový posun výstupu soustavy vůči výstupu relé při $T_p/2$ (s^{-1})
ω	frekvence (s^{-1})
ω_u	frekvence z releové identifikace odpovídající periodě spínání relé T_p (s^{-1})
$\omega_{\bar{u}}$	frekvence z releové identifikace odpovídající periodě spínání relé $T_p/2$ (s^{-1})

Literatura

- [1] HOFREITER, Milan. *Parametr identification of anisochronic models*. In *DAAAM scientific book 2002*. Vienna DAAAM International, 2002. s. 247-252. ISBN 3-901509-30-5.
- [2] HOFREITER, Milan. *Shifting Method for Relay Feedback Identification*. In *IFAC PAPERSONLINE. 8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control (MIM)*. Troyes, 28.06.2016 - 30.06.2016. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 2016, s. 1933-1938. ISSN 2405-8963.
- [3] ZELINKA, Ivan. *Umělá inteligence: v problémech globální optimalizace*. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 192 s. ISBN 8073000695.
- [4] Vodní levitace - frekvenční vlastnosti. *Návody na laboratorní cvičení z automatického řízení*. [online]. [cit. 1.4.2017]. Dostupné z: <http://vlab.fs.cvut.cz/navody/files/F2.pdf>