

Studijní opora předmětu **Systems Theory**

David Metela

Bakalářská práce
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **David Metela**
Osobní číslo: **A15569**
Studijní program: **B3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Informační a řídicí technologie**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Studijní opora předmětu Systems Theory**
Téma anglicky: **Study Support Materials for the "Systems Theory" Course**

Zásady pro vypracování:

1. Nastudujte náplň předmětu Systems Theory a vytvořte jeho český sylabus.
2. Analyzujte metody a úlohy, jež sylabus obsahuje, a sestavte slovník anglické terminologie vztahující se k probírané látce.
3. Vytvořte studijní oporu v anglickém jazyce pro daný předmět obsahující pro každou kapitolu stručný teoretický aparát a řešené příklady.
4. Popište programovací prostředky pro tvorbu webové prezentace, jež hodláte dále použít.
5. Vytvořte prezentaci jak formou snímků, tak i veřejně přístupných webových stránek obsahující vytvořené studijní opory v anglickém jazyce.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. FRANKLIN, Gene F., J. David POWELL a Abbas. EMAMI-NAEINI. Feedback control of dynamic systems. 5th ed. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall, 2006. ISBN 01-314-9930-0.
2. NOVÁK, Michal a Petra LANGEROVÁ. Dictionary of mathematical terminology: (Czech - English / English - Czech) = Slovník matematické terminologie : (česko - anglický / anglicko - český). Olomouc: Univerzita Palackého, 2015. ISBN 978-80-244-4743-8.
3. OGATA, Katsuhiko. System dynamics. 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall, 2004. ISBN 01-314-2462-9.
4. PEKAŘ, Libor. Syllabus seminářů předmětu Teorie systémů. In: Vyučování na FAI [online]. ver.2010b [cit. 2017-11-16]. Dostupné po přihlášení z: http://vyuka.fai.utb.cz/file.php?file=%2F175%2Fteorie_systemu%2FSyllabus_predmetu_Teorie
5. PROKOP, Roman, Radek MATUŠŮ a Zdenka PROKOPOVÁ. Teorie automatického řízení - lineární spojité dynamické systémy. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2006. ISBN 80-731-8369-2.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Libor Pekař, Ph.D.

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce:

15. prosince 2017

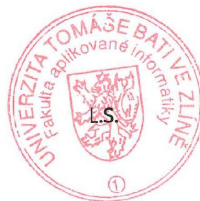
Termín odevzdání bakalářské práce:

25. května 2018

Ve Zlíně dne 15. prosince 2017



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu


Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 14.5.2018


.....
podpis diplomanta

ABSTRAKT

Předmětem této bakalářské práce je vytvoření českého sylabu předmětu Systems Theory a vytvoření studijní opory v anglickém jazyce prezentovaných formou snímků v PowerPointu a dostupných na webových stránkách. V teoretické části jsou shrnuté programovací prostředky webových stránek a prezentace. Dále je vytvořen slovník anglické terminologie, který se vztahuje k probírané látce předmětu. V praktické části je řešen komplexní příklad, na kterém jsou demonstrovány jednotlivé kapitoly předmětu Systems Theory.

Klíčová slova: Laplaceova transformace, Lineární spojité dynamické systémy, PowerPoint, HTML, Webové stránky, Teorie Systemů

ABSTRACT

The topic of this Bachelor thesis deals with the creation of Czech syllabus for the subject of Systems Theory and development of a study guide in English that will be presented in the form of Power Point slides and accessible online. The theoretical part presents web programming tools and presentations. That is followed by an English terminology dictionary related to the subject. The practical part solves a complex problem, demonstrating each chapter of the Systems Theory course.

Keywords: Laplace transform, Linear continuous dynamical systems, PowerPoint, HTML, Web sites, Systems Theory

„Teorie zůstane pouhou teorií, pokud nepřikročíme k činu.“

Jan Amos Komenský

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1 SYLABUS PŘEDMĚTU SYSTEMS THEORY.....	11
1.1 POJEM SYSTÉMU A JEHO KLASIFIKACE.....	11
1.2 LAPLACEOVA TRANSFORMACE.....	11
1.2.1 Přímá Laplaceova transformace.....	11
1.2.1.1 Vlastnosti Laplaceovy transformace.....	11
1.2.2 Zpětná Laplaceova transformace.....	12
1.2.2.1 Věta o residuích.....	12
1.2.2.2 Heavisideův rozvoj.....	13
1.3 VNĚJŠÍ POPIS LINEÁRNÍCH SPOJITÝCH DYNAMICKÝCH SYSTÉMŮ.....	13
1.3.1 Přenosová funkce.....	13
1.3.2 Vlastnosti přenosu.....	14
1.3.3 Přejchodová funkce a charakteristika.....	14
1.3.4 Impulsní funkce a charakteristika.....	14
1.3.5 Frekvenční přenos.....	15
1.3.6 Frekvenční charakteristiky.....	15
1.3.6.1 Nyquistova křivka.....	16
1.3.6.2 Bodeho křivky.....	16
1.3.7 Stabilita a její kritéria.....	16
1.3.7.1 Routh-Schurovo kritérium.....	17
1.3.7.2 Hurwitzovo kritérium.....	17
1.3.7.3 Michajlovovo-Leonhardovo kritérium.....	17
1.3.7.4 Nyquistovo kritérium.....	18
1.4 POPIS SYSTÉMŮ VE STAVOVÉM PROSTORU.....	18
1.4.1 Převod stavového popisu na přenos.....	18
1.4.2 Převod přenosu na stavový popis.....	18
1.4.2.1 Metoda postupné integrace.....	18
1.4.2.2 Metoda přímé integrace.....	19
1.4.3 Řešení stavových rovnic.....	20
1.4.3.1 Homogenní stavová rovnice.....	20
1.4.3.2 Nehomogenní stavová rovnice.....	21
1.4.4 Vlastnosti systémů.....	21
1.4.4.1 Řiditelnost a dosažitelnost.....	21
1.4.4.2 Pozorovatelnost a rekonstruovatelnost.....	22
1.5 DIOFANTICKÉ ROVNICE.....	22
1.5.1 Metoda neurčitých koeficientů.....	22
1.5.2 Zobecněný (rozšířený) Euklidův algoritmus.....	23
1.6 POLYNOMIÁLNÍ METODA NÁVRHU REGULÁTORU.....	24
1.6.1 1DOF systém řízení.....	24
1.6.1.1 Požadavky na kvalitu řízení.....	24
1.6.1.2 Volba stupňů polynomů.....	25
1.6.1.3 Výpočet parametrů regulátoru.....	25
2 ELEKTRONICKÁ STUDIJNÍ OPORA PŘEDMĚTU SYSTEMS THEORY.....	26

2.1	POWERPOINT PREZENTACE.....	26
2.2	WWW STRÁNKY.....	26
2.2.1	Jazyk HTML.....	27
2.2.1.1	Struktura zdrojového textu.....	27
2.2.1.2	Poznámky ve zdrojovém textu.....	28
2.2.1.3	Formátování textu.....	28
2.2.1.4	Barvy v dokumentu.....	30
2.2.1.5	Vkládání obrázků.....	31
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	32
3	KOMPLEXNÍ PŘÍKLAD PŘEDMĚTU SYSTEMS THEORY.....	33
3.1	VSTUPNĚ-VÝSTUPNÍ ANALÝZA A SYNTÉZA JEDNOROZMĚRNÉHO SPOJITÉHO LINEÁRNÍHO SYSTÉMU.....	33
3.1.1	Přenosová funkce systému.....	33
3.1.2	Nuly, póly, kmitavost, fázovost a statické zesílení systému.....	33
3.1.3	Impulsní funkce systému.....	34
3.1.4	Přechodová funkce systému.....	36
3.1.5	Frekvenční přenos systému.....	39
3.1.6	Amplitudově-fázová frekvenční charakteristika.....	40
3.1.7	Bodeho křivka.....	42
3.1.8	Regulátor systému.....	44
3.1.8.1	Póly jako vícenásobný reálný pól rovný dominantnímu pólu řízené soustavy.....	45
3.1.8.2	Zpětnovazební póly jako vícenásobný reálný pól rovný dvojnásobku dominantního pólu řízené soustavy.....	46
3.1.8.3	Zpětnovazební póly jako vícenásobnou komplexně sdruženou dvojici pólů, kde reálná část je číselně rovna jednomu z pólů řízené soustavy a imaginární část je rovna druhému z pólů řízené soustavy.....	47
3.2	ANALÝZA JEDNOROZMĚRNÉHO SPOJITÉHO LINEÁRNÍHO SYSTÉMU VE STAVOVÉM PROSTORU.....	52
3.2.1	Stavový popis systému.....	52
3.2.1.1	Přímá metoda.....	52
3.2.1.2	Metoda postupné integrace.....	52
3.2.2	Převod z vnitřního popisu na vnější.....	53
3.2.3	Řiditelnost a pozorovatelnost systému.....	54
3.2.3.1	Řiditelnost systému.....	54
3.2.3.2	Pozorovatelnost systému.....	55
3.2.4	Fundamentální matice systému.....	55
3.2.5	Stavová rovnice pro nulové počáteční podmínky.....	56
	ZÁVĚR.....	59
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	60
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	62
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	65
	SEZNAM TABULEK.....	66
	SEZNAM PŘÍLOH.....	67

ÚVOD

Systems Theory, česky teorie systémů je vědní obor, který je součástí teoretické kybernetiky. Zabývá se analýzou a syntézou stacionárních a dynamických systémů. Základy položil Ludwig von Bertalanffy na konci 40. let 20. století [1]. Teorie systémů zkoumá problémy napříč různými vědními obory (fyzika, ekonomika, sociologie, biologie apod.) a snaží se pochopit společné jevy, které se v nich objevují.

Cílem této bakalářské práce bylo vytvoření opory pro semináře předmětu Systems Theory na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně. K českému sylabu byla vytvořena jeho anglická verze, která je veřejně prezentována jako webové stránky a formou snímků v PowerPointu.

V teoretické části je popsána technologie webových stránek. Dále je shrnuta potřebná teorie jednotlivých výpočetních metod z předmětu Systems Theory, která se využívá v praktické části u komplexního příkladu. Další krok je sestavení slovníku anglické terminologie, který se vztahuje k probírané látce.

V praktické části je řešen komplexní příklad, který se skládá z více dílčích příkladů doplňující teoretický aparát v teoretické části bakalářské práce. U všech příkladů se vychází z jedné diferenciální rovnice, protože vzájemné příklady se prolínají a u některých se při ověřování správnosti řešení využívá výsledek z příkladu předcházejícího. Při analytických výpočtech je použit MS Excel, který se porovnává s nasimulovanými výpočty v prostředí Matlab/Simulink.

Na závěr je jako výstup vytvořena studijní opora v anglickém jazyce pro daný předmět obsahující pro každou kapitolu stručný teoretický aparát. Opora je prezentována jak formou snímků v PowerPointu, tak jako veřejně přístupné webové stránky, na kterých je ke stažení soubor samotné prezentace.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 SYLABUS PŘEDMĚTU SYSTEMS THEORY

Tato kapitola se věnuje teoretickému aparátu předmětu Systems Theory.

1.1 Pojem systému a jeho klasifikace

Systém je abstraktní pojem, jehož definice je značně obecná a komplikovaná. Systémem rozumíme množinu $S = (P, R, U, Y)$, kde P jsou prvky systému, R jsou relace mezi prvky systému, U vstupní a Y výstupní veličiny systému. Z hlediska teorie řízení dělíme vstupní veličiny na akční (které lze vědomě ovlivňovat), na měřitelné a neměřitelné poruchy. Výstupní veličiny mohou být opět měřitelné a neměřitelné [2].

1.2 Laplaceova transformace

Laplaceova transformace (dále jen L-T) je jedna ze základních matematických nástrojů teorie automatického řízení. Umožňuje transformaci funkcí z časové oblasti do oblasti komplexní. Zjednodušuje matematické operace, které bychom museli vykonat při analýze a syntéze systémů řízení [3].

1.2.1 Přímá Laplaceova transformace

Přímá L-T přiřazuje každé po částech spojitě reálné funkci $f(t)$ reálné proměnné t komplexní funkci komplexní proměnné podle vztahu [2]:

$$F(s) = L\{f(t)\} = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (1)$$

Pro existenci transformace (1) musí pro funkci $f(t)$ platit:

1. $f(t) = 0$ pro $t < 0$
2. existuje $M > 0$, $a > 0$ tak, že platí $|f(t)| \leq Me^{-at}$

Dalším důležitým způsobem určení L-T je využití slovníku Laplaceovy transformace.

1.2.1.1 Vlastnosti Laplaceovy transformace

Nejdůležitější vlastnosti L-T jsou [2; 4]:

1. Obraz první derivace:

$$L\left\{\frac{df(t)}{dt}\right\} = sF(s) - f(0) \quad (2)$$

Obraz obecné derivace:

$$L\left\{\frac{df^n(t)}{dt^n}\right\} = s^n F(s) - s^{n-1}f(0) - s^{n-2}f'(0) - \dots - sf^{(n-2)}(0) - f^{(n-1)}(0) \quad (3)$$

2. Obraz primitivní funkce:

$$L\left\{\int_0^t f(\tau)d\tau\right\} = \frac{1}{s}F(s) \quad (4)$$

3. Věta o počáteční a koncové hodnotě:

$$f(0) = \lim_{t \rightarrow 0} f(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} sF(s) \quad (5)$$

$$f(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0^+} sF(s) \quad (6)$$

4. Věta o posunutí:

$$L\{f(t - \tau)\} = e^{-\tau s}F(s) \quad (7)$$

5. Věta o určitém integrálu:

$$L\left\{\int_0^\infty f(\tau)d\tau\right\} = \lim_{s \rightarrow 0} F(s) \quad (8)$$

6. Linearita:

$$L\{\alpha f(t) + \beta g(t)\} = \alpha F(s) + \beta G(s) \quad (9)$$

1.2.2 Zpětná Laplaceova transformace

Zpětná L-T je definována vztahem:

$$f(t) = L^{-1}\{F(s)\} = \frac{1}{2\pi j} \oint F(s)e^{st} ds \quad (10)$$

1.2.2.1 Věta o residuích

Pro výpočet zpětné L-T můžeme využít větu o residuích [6]:

$$f(t) = \sum_{k=1}^n \operatorname{res}[F(s)e^{st}]_{s=p_i} = \lim_{s \rightarrow p_i} [(s - p_i)F(s)e^{st}] \quad (11)$$

kde p_i je nenásobný pól (kořen jmenovatele).

$$\operatorname{res}[F(s)e^{st}]_{s=p_i} = \frac{1}{(n-1)!} \lim_{s \rightarrow p_i} \frac{d^{n-1}}{ds^{n-1}} [(s-p_i)^n F(s)e^{st}] \quad (12)$$

kde p_i je n -násobný pól (kořen jmenovatele).

1.2.2.2 Heavisideův rozvoj

Zpětná L-T, která slouží složitějším racionálním lomeným funkcím, než jaké jsme schopni najít ve slovníku. Je vhodné ji rozložit na parciální zlomky [2].

1. Nenásobný pól p_i :

$$F(s) = \frac{A_1}{s-p_1} + \frac{A_2}{s-p_2} + \dots + \frac{A_n}{s-p_n} \quad (13)$$

kde

$$A_i = \lim_{s \rightarrow p_i} [(s-p_i)F(s)] = [(s-p_i)F(s)]_{s=p_i}, i = 1, \dots, n \quad (14)$$

2. k -násobný pól p_i :

$$F(s) = \frac{A_1}{s-p_1} + \frac{A_2}{(s-p_1)^2} + \dots + \frac{A_k}{(s-p_1)^k} + \frac{A_{k+1}}{s-p_{k+1}} + \frac{A_{k+2}}{s-p_{k+2}} + \dots + \frac{A_n}{s-p_n} \quad (15)$$

kde

$$A_k = [(s-p_1)^k F(s)]_{s=p_1} \quad (16)$$

$$A_{k-j} = \frac{1}{j!} \frac{d^{(j)}}{ds^{(j)}} [(s-p_1)^k F(s)]_{s=p_1}, j = 1, 2, \dots, k-1 \quad (17)$$

a $A_l, l = k+1, \dots, n$ se vypočtou jako v případě nenásobných kořenů [6].

1.3 Vnější popis lineárních spojitých dynamických systémů

Jednotlivé vlastnosti a charakteristiky vnějších popisů lineárních spojitých dynamických systémů (LSDS) budeme chápat jen ve smyslu vstupně-výstupních relací [3].

1.3.1 Přenosová funkce

Přenosová funkce (přenos) je definována jako podíl Laplaceových obrazů výstupní a vstupní veličiny systému při nulových počátečních podmínkách. Můžeme zapsat vztahem [3]

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b(s)}{a(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (18)$$

kde budeme předpokládat, že platí $m \leq n$, resp. $\deg b(s) \leq \deg a(s)$.

1.3.2 Vlastnosti přenosu

S přenosem (18) dále souvisejí pojmy [3]:

1. Kořeny polynomu jmenovatele přenosu $a(s)$ nazýváme také **póly přenosu**.
2. **Nuly přenosu** získáme řešením rovnice $G(s) = 0$.
3. Stupeň polynomu jmenovatele přenosu, tedy $n = \deg a(s)$, se nazývá **řád přenosu systému**.
4. Rozdíl mezi stupni jmenovatele a čitatelem přenosu, tedy $\deg a(s) - \deg b(s)$ (tedy $n - m$), se nazývá **relativní řád systému**.

Poloha nul a pólů rozhoduje o důležitých vlastnostech systému. Pokud má systém alespoň jednu nulu v uzavřené pravé části komplexní roviny, jedná se o systém s **neminimální fází**. V případě, že všechny nuly leží v levé části komplexní roviny, hovoříme o systému s **minimální fází**. Pokud je v čitateli přenosu pouze konstanta, je systém minimálně fázový.

Poloha pólů rozhoduje o stabilitě či nestabilitě systému a také o kmitavosti systému. Pokud má systém všechny póly reálné, jedná se o systém **aperiodický**. Na druhou stranu pokud systém obsahuje i póly komplexně sdružené, jedná se o systém **periodický** [2; 5].

1.3.3 Přejchodová funkce a charakteristika

Přejchodová funkce je odezva systému na jednotkový skok (Heavisideova funkce) při nulových počátečních podmínkách. Přejchodová charakteristika je potom grafické znázornění této funkce. Přejchodovou funkci označujeme $h(t)$ a její vztah je [3; 2; 6]

$$h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{G(s)}{s} \right\} = L^{-1} \{H(s)\} \quad (19)$$

1.3.4 Impulsní funkce a charakteristika

Impulsní funkce je odezva systému na jednotkový impuls (Dicarovu funkci) při nulových počátečních podmínkách. Grafem je impulsní charakteristika. Impulsní funkci označujeme $i(t)$ a její vztah je [3]

$$i(t) = L^{-1}\{G(s)\} \quad (20)$$

1.3.5 Frekvenční přenos

Frekvenční přenos se zapíše vztahem

$$G(j\omega) = G(s)|_{s=j\omega} = \frac{Y(j\omega)}{U(j\omega)} = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} \quad (21)$$

kde $Y(j\omega)$ je Fourierův obraz výstupního signálu, $U(j\omega)$ je Fourierův obraz vstupního signálu, j je imaginární jednotka, ω je úhlová frekvence, $A(\omega)$ je amplituda (zesílení), $\varphi(\omega)$ je fázový posun [6].

Frekvenční přenos můžeme také napsat ve složkovém tvaru komplexního čísla [3; 6]

$$G(j\omega) = \operatorname{Re}G(j\omega) + j\operatorname{Im}G(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) \quad (22)$$

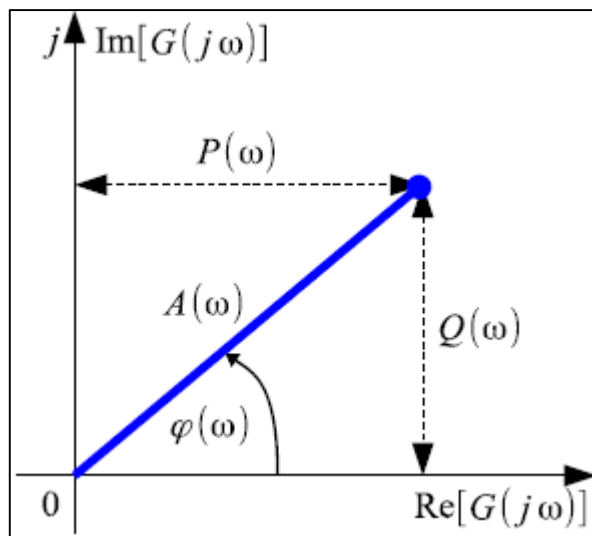
Amplituda $A(\omega)$ je dána vztahem

$$A(\omega) = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)} \quad (23)$$

Fázový posun $\varphi(\omega)$ je dán vztahem

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg}\left(\frac{Q(\omega)}{P(\omega)}\right) \quad (24)$$

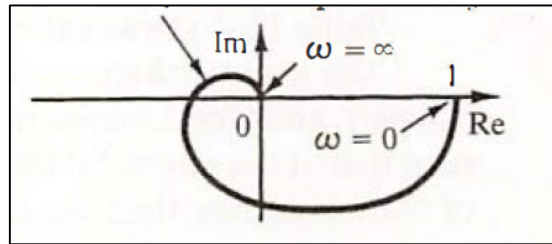
1.3.6 Frekvenční charakteristiky



Obr. 1. Bod frekvenčního přenosu v komplexní rovině [3].

1.3.6.1 Nyquistova křivka

S měnícím se ω se mění i $P(\omega)$ a $Q(\omega)$ ve (22) resp. $A(\omega)$ a $\varphi(\omega)$ ve (21) a koncový bod na obrázku bude opisovat křivku v komplexní rovině, kterou nazýváme **frekvenční charakteristiku** (přesněji amplitudově-fázová frekvenční charakteristika, která je jinými slovy nazývána **Nyquistova křivka**) [3].



Obr. 2. Frekvenční charakteristika systému 3. řádu [7].

1.3.6.2 Bodeho křivky

Amplitudová frekvenční charakteristika $A(\omega)$ a fázová frekvenční charakteristika $\varphi(\omega)$ se kvůli širokému rozsahu frekvencí zobrazuje v logaritmickém měřítku a amplituda se udává v decibelech [dB].

$$A[\text{dB}] = 20 \log A = 20 \log \frac{y_0}{u_0} \quad (25)$$

Grafické znázornění těchto charakteristik se nazývá **Bodeho křivky** [2].

1.3.7 Stabilita a její kritéria

Stabilita dynamického systému je schopnost vrátit se zpět po vychýlení do původního stavu. Vychýlení je vždy způsobeno nenulovými počátečními podmínkami. LSDS je stabilní, jestliže jmenovatel jeho přenosu má kořeny pouze v levé části komplexní roviny.

Nutná podmínka stability LSDS nám říká, že k tomu aby kořeny polynomu $a(s) = a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0$ ležely pouze v levé části komplexní roviny, je nutné, aby $a_i > 0, i = 0, 1, \dots, n$ [5].

1.3.7.1 Routh-Schurovo kritérium

Redukujeme koeficienty zleva tak, že každý druhý koeficient podepíšeme pod jeho levého souseda a příslušným odečtením tohoto řádku vynulujeme nejvyšší koeficient. Opakujeme až do posledních tří koeficientů podle schématu:

$$\begin{array}{cccccccc}
 a_n & a_{n-1} & a_{n-2} & a_{n-3} & \dots & a_2 & a_1 & a_0 \\
 a_{n-1} & & a_{n-3} & & & a_1 & & \\
 \hline
 0 & a_{n-1} & a_{n-2} & a_{n-3} & \dots & a_2 & a_1 & a_0 \\
 & a_{n-2} & & & & & a_0 & \\
 \hline
 & 0 & a_{n-2} & a_{n-3} & \dots & & a_1 & a_0 \\
 & & & & & & & \\
 & & & & & & & \\
 & & & & & & & \\
 \hline
 & & & & & & a_2 & a_1 & a_0
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \\
 \left. \vphantom{\begin{array}{c} a_n \\ a_{n-1} \end{array}} \right\} - \left(\frac{a_n}{a_{n-1}} \right) \\
 \\
 \left. \vphantom{\begin{array}{c} a_{n-1} \\ a_{n-2} \end{array}} \right\} - \left(\frac{a_{n-1}}{a_{n-2}} \right) \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \\
 \end{array}$$

Polynom je stabilní právě tehdy, pokud poslední tři koeficienty jsou kladné [5].

1.3.7.2 Hurwitzovo kritérium

Toto kritérium vychází z tzv. Hurwitzovy matice, ve které je potřeba spočítat všechny hlavní subdeterminanty. Matice má tvar:

$$H_n = \begin{pmatrix}
 a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \dots & 0 & \dots & 0 \\
 a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots & 0 & \dots & 0 \\
 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & \dots & 0 & \dots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & \dots & \dots & a_3 & \dots & a_1
 \end{pmatrix}$$

Polynom je stabilní právě tehdy, pokud všechny hlavní subdeterminanty jsou větší než nula [5].

1.3.7.3 Michajlovovo-Leonhardovo kritérium

K polynomu $a(s)$ sestrojíme křivku (Michaljevova křivka), která je polynomiální ekvivalentem frekvenčního přenosu, tedy: $a(j\omega) = a(s)/_{s=j\omega} = a_n(j\omega)^n + \dots + a_1j\omega + a_0$

Polynom je stabilní právě tehdy, pokud $a(j\omega)$ projde v kladném směru (tj. proti směru hodin) tolika kvadranty, kolikátého je stupně [5].

1.3.7.4 Nyquistovo kritérium

Podle Nyquistova kritéria lze zjistit z přenosu otevřené smyčky stabilitu uzavřeného obvodu [5]. Pokud je otevřený regulační obvod stabilní, pak uzavřený regulační obvod bude stabilní právě tehdy, jestliže amplitudově-fázová frekvenční charakteristika (Nyquistova křivka) otevřeného obvodu bude obíhat bod $[-1; j0]$ zprava [6].

1.4 Popis systémů ve stavovém prostoru

Stavový model pro lineární spojitý stacionární dynamický systém má tvar:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (26)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (27)$$

kde A ($n \times n$) je matice systému, B ($n \times m$) je matice buzení, C ($l \times n$) je matice výstupní, D ($l \times m$) je matice převodu, $u(t)$ je vektor vstupních veličin, $y(t)$ je vektor výstupních veličin, $x(t)$ je vektor stavových proměnných [2; 6].

1.4.1 Převod stavového popisu na přenos

Pomocí L-T upravíme vztahy (26), (27) a za uvažování nulových počátečních podmínek dostaneme vztah

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D = \frac{1}{\det(sI - A)} C \operatorname{adj}(sI - A)B + D \quad (28)$$

kde I je jednotková matice [3].

1.4.2 Převod přenosu na stavový popis

Existuje-li jeden takový převod, pak existuje nekonečně mnoho takovýchto převodů. Zde se popisují pouze SISO systémy. Při aplikování metody se obvykle vychází z diferenciálních rovnic [6].

1.4.2.1 Metoda postupné integrace

Metodu si uvedeme na příkladu [2].

Vyjdeme z diferenciální rovnice

$$y''(t) + 4y'(t) + 3y(t) = u'(t) + 2u(t) \quad (29)$$

$$\text{def.: } x_1'(t) = 3y(t) - 2u(t) \Rightarrow x_1 = \int [3y(t) - 2u(t)] dt$$

Po integraci rovnice dostaneme

$$y'(t) + 4y(t) + x_1(t) = u(t) \quad (30)$$

$$\text{def.: } x_2'(t) = 4y(t) + x_1(t) - u(t) \Rightarrow x_2 = \int [4y(t) + x_1(t) - u(t)] dt$$

A po další integraci

$$y(t) = -x_2(t) \quad (31)$$

Odvodíme stavové rovnice

$$x_1'(t) = 3y(t) - 2u(t) \Rightarrow x_1'(t) = -3x_2(t) - 2u(t) \quad (32)$$

$$\begin{aligned} x_2'(t) &= 4y(t) + x_1(t) - u(t) \Rightarrow x_2'(t) \\ &= -4x_2(t) + x_1(t) - u(t) \end{aligned} \quad (33)$$

Výsledkem je

$$\begin{pmatrix} x_1'(t) \\ x_2'(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -3 \\ 1 & -4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -2 \\ -1 \end{pmatrix} u(t) \quad (34)$$

$$y(t) = \begin{pmatrix} 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix} + (0)u(t) \quad (35)$$

1.4.2.2 Metoda přímé integrace

Metodu si uvedeme na 2 příkladech [6].

1. První typ – ($m < n$, $m = 0$) tj. striktně ryzí systém bez derivace na pravé straně DR.

Vyjdeme z diferenciální rovnice

$$y''(t) + 3y'(t) + 2y(t) = 5u(t) \quad (36)$$

Zavedeme stavové proměnné (bude jich n) jako derivace výstupní veličiny.

$$x_1(t) = y(t)$$

$$x_2(t) = y'(t) = x_1'(t)$$

$$x_2'(t) = y''(t) = 5u(t) - 3y'(t) - 2y(t) = 5u(t) - 3x_2(t) - 2x_1(t)$$

Matice jsou pak následující

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -2 & -3 \end{pmatrix}, \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 5 \end{pmatrix}, \mathbf{C} = (1 \quad 0), \mathbf{D} = 0$$

2. Druhý typ - ($m < n, m > 0$) tj. striktně ryzí systém s derivací na pravé straně DR.

Vyjdeme z diferenciální rovnice

$$y''(t) + 3y'(t) + 2y(t) = 5u'(t) + 4u(t) \quad (37)$$

Provedeme dekompozici původní DR na dvě rovnice vždy s nulovou derivací na jedné straně a zavedeme pomocnou proměnnou $z(t)$.

$$z''(t) + 3z'(t) + 2z(t) = u(t) \quad (38)$$

$$y(t) = 5z'(t) + 4z(t) \quad (39)$$

Zavedeme stavové proměnné jako derivace pomocné veličiny $z(t)$.

$$x_1(t) = z(t)$$

$$x_2(t) = z'(t) = x_1'(t)$$

$$x_2'(t) = z''(t) = u(t) - 3z'(t) - 2z(t) = u(t) - 3x_2(t) - 2x_1(t)$$

Odtud můžeme určit matice \mathbf{A} a \mathbf{B}

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -2 & -3 \end{pmatrix}, \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Matice \mathbf{C} a \mathbf{D} získáme z předchozích rovnic

$$y(t) = 5z'(t) + 4z(t) = 5x_2(t) + 4x_1(t) \quad (40)$$

$$\mathbf{C} = (4 \quad 5), \mathbf{D} = 0$$

1.4.3 Řešení stavových rovnic

1.4.3.1 Homogenní stavová rovnice

Uvažujme, že vektor budicího signálu $u(t) = 0$. Stavové rovnice tedy přejdou do tvaru

$$x'(t) = \mathbf{A}x(t) \quad (41)$$

$$y(t) = \mathbf{C}x(t) \quad (42)$$

Řešení soustavy rovnic spočívá v řešení stavové rovnice (41) a následným dosazením do rovnice (42). Pomocí L-T lze odvodit výsledné řešení stavové rovnice

$$x(t) = e^{At}x(0) = \Phi(t)x(0) \quad (43)$$

kde $\Phi(t)$ je fundamentální matice systému a $x(0)$ je vektor počátečních podmínek [2]. Pro standardní fundamentální matici platí vztah

$$\Phi(t) = L^{-1}\{[sI - A]^{-1}\} \quad (44)$$

1.4.3.2 Nehomogenní stavová rovnice

U nehomogenní stavové rovnice je vektor budicího signálu $u(t) \neq 0$, takže rovnice mají stejný tvar jako (26) a (27).

Řešení soustavy rovnic spočívá v řešení stavové rovnice (26). Výsledným řešením je vztah

$$x(t) = \Phi(t)x(0) + \int_0^t \Phi(t - \tau)Bu(\tau)d\tau \quad (45)$$

1.4.4 Vlastnosti systémů

Pro studium vztahu mezi vstupem a stavem slouží pojmy **řiditelnost** a **dosažitelnost** analýzou rovnice (26) a pro studium vztahu mezi výstupem a stavem pojmy **pozorovatelnost** a **rekonstruovatelnost** analýzou rovnic (41) a (42) [2].

1.4.4.1 Řiditelnost a dosažitelnost

Řiditelnost a dosažitelnost jsou vlastnosti matic A a B .

LSDS je říditelný, pokud existuje $u(t)$ a časový interval $\langle 0; t_1 \rangle$: $u(t)$ převede libovolný $x(0) \neq 0$ do stavu $x(t_1) = 0$.

LSDS je dosažitelný, pokud existuje $u(t)$ a časový interval $\langle 0; t_1 \rangle$: $u(t)$ převede libovolný $x(0) = 0$ do stavu $x(t_1) \neq 0$.

Pro LSDS platí: říditelnost = dosažitelnost. Systém tak nemůže být zároveň říditelný, ale nedosažitelný. Neplatí tomu tak u diskretních systémů [2].

Sestavíme **matici říditelnosti**

$$P_C = (B \ AB \ \dots \ A^{n-1}B) \quad (46)$$

Systém je říditelný (dosažitelný), jestliže P_C má plnou hodnost, tedy u jednorozměrných systémů $\det P_C \neq 0$ [6].

1.4.4.2 Pozorovatelnost a rekonstruovatelnost

Pozorovatelnost a rekonstruovatelnost jsou vlastnosti matic A a C .

LSDS je pozorovatelný, lze-li měřením $y(t)$ na konečném časovém intervalu $\langle 0; t_1 \rangle$ určit $x(0)$ z jejích budoucích hodnot.

LSDS je rekonstruovatelný, lze-li měřením $y(t)$ na konečném časovém intervalu $\langle 0; t_1 \rangle$ určit $x(t_1)$ z jejích minulých hodnot [6].

Pro LSDS platí: pozorovatelnost = rekonstruovatelnost [2].

Sestavíme **matici pozorovatelnosti**

$$P_O = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ C^{n-1}A \end{pmatrix} \quad (47)$$

Systém je pozorovatelný (rekonstruovatelný), jestliže P_O má plnou hodnotu, tedy u jedno-rozměrných systémů $\det P_O \neq 0$ [6].

1.5 Diofantické rovnice

Lineární diofantická rovnice je ve tvaru

$$ax + by = c \quad (48)$$

a je definována v množině, která se nazývá okruhem. V rovnici (48) představují a, b, c známé a x, y hledané, neznámé prvky z daného okruhu [2].

Musí platit, že největší společný dělitel (NSD) a a b dělí c [6].

1.5.1 Metoda neurčitých koeficientů

Metodu předvedeme na příkladu [6]. Zadaná rovnice je ve tvaru

$$(3t + 1)x(t) + (4t^2 - 5t + 3)y(t) = t + 1 \quad (49)$$

Nejdříve vhodně zvolíme stupně polynomů $x(t)$ a $y(t)$. Lze volit:

- a) Pokud $\deg a + \deg b > \deg c$

$$\deg x = \deg b - 1$$

$$\deg y = \deg a - 1$$
- b) Pokud $\deg a + \deg b \leq \deg c$

$$\deg x = \deg c - \deg a$$

$$\deg y = \deg a - 1$$

Zde je $\deg a = 1$, $\deg b = 2$, $\deg c = 1$, proto zvolíme

$$x(t) = x_1 t + x_0 \quad (50)$$

$$y(t) = y_0 \quad (51)$$

Dosazením a rozepsáním získáme soustavu 3 rovnic o 3 neznámých.

$$3x_1 + 4y_0 = 0 \quad (52)$$

$$3x_0 + x_1 - 5y_0 = 1 \quad (53)$$

$$x_0 + 3y_0 = 1 \quad (54)$$

Rovnice mají jednoznačné řešení $x_1 = -\frac{4}{23}$, $x_0 = \frac{14}{23}$, $y_0 = \frac{3}{23}$.

Řešení diofantické rovnice je tedy

$$x(t) = \frac{2}{23}(-2t + 7) \quad (55)$$

$$y(t) = \frac{3}{23} \quad (56)$$

1.5.2 Zobecněný (rozšířený) Euklidův algoritmus

Metodu předvedeme na příkladu [2]. Zadaná rovnice je ve tvaru

$$149x + 61y = 1 \quad (57)$$

Řešení:

$$\begin{aligned} \left(\begin{array}{cc|c} 1 & 0 & 149 \\ 0 & 1 & 61 \end{array} \right) &\xrightarrow{(-2) \times 2.\text{ř. } k \text{ 1.ř.}} \left(\begin{array}{cc|c} 1 & -2 & 27 \\ 0 & 1 & 61 \end{array} \right) \\ &\xrightarrow{(-2) \times 1.\text{ř. } ke \text{ 2.ř.}} \left(\begin{array}{cc|c} 1 & -2 & 27 \\ -2 & 5 & 7 \end{array} \right) \\ &\xrightarrow{(-3) \times 2.\text{ř. } k \text{ 1.ř.}} \left(\begin{array}{cc|c} 7 & -17 & 6 \\ -2 & 5 & 7 \end{array} \right) \\ &\xrightarrow{(-1) \times 1.\text{ř. } ke \text{ 2.ř.}} \left(\begin{array}{cc|c} 7 & -17 & 6 \\ -9 & 22 & 1 \end{array} \right) \\ &\xrightarrow{(-6) \times 2.\text{ř. } k \text{ 1.ř.}} \left(\begin{array}{cc|c} 61 & -149 & 0 \\ -9 & 22 & 1 \end{array} \right) \end{aligned} \quad (58)$$

$$\Rightarrow \text{NSD}(149, 61) = 1$$

Partikulární řešení diofantické rovnice je $149(-9) + 61(22) = 1$.

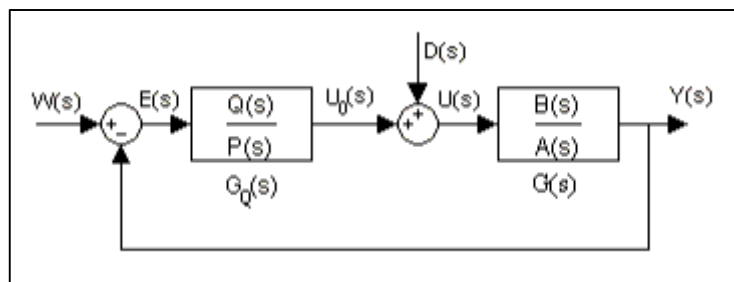
Obecné řešení je

$$x = -9 + 61t \quad (59)$$

$$y = 22 - 149t \quad (60)$$

1.6 Polynomiální metoda návrhu regulátoru

1.6.1 1DOF systém řízení



Obr. 3. 1DOF systém řízení [6].

$$G(s) = \frac{b(s)}{a(s)} - \text{řízená soustava}$$

$$G_Q(s) = \frac{q(s)}{p(s)} - \text{řízená soustava}$$

$$w(s) = \frac{g_w(s)}{f_w(s)} - \text{řízená soustava}$$

$$d(s) = \frac{g_d(s)}{f_d(s)} - \text{řízená soustava}$$

1DOF – systém s jedním stupněm volnosti [2].

1.6.1.1 Požadavky na kvalitu řízení

1. Stabilita regulačního obvodu.

Stabilita zpětnovazebního regulačního obvodu bude zajištěna, pokud bude stabilní charakteristický polynom $ap + bq$. Toho docílíme tak, že jej zvolíme

$$a(s)p(s) + b(s)q(s) = c(s) \quad (61)$$

kde c je stabilní polynom dostatečně vysokého stupně [2].

2. Asymptotické sledování žádané hodnoty a kompenzace poruchy.

Je splněno, pokud platí $p(s) = \bar{p}(s)f(s)$, kde $f(s)$ je nejmenší společný násobek $f_w(s)$ a $f_d(s)$ [6].

1.6.1.2 Volba stupňů polynomů

Volba stupňů polynomů vzhledem k fyzikální realizovatelnosti regulátoru [3; 6].

$$\deg q(s) = \deg a(s) + \deg(f) - 1 \quad (62)$$

$$\deg \tilde{p}(s) \geq \deg a(s) - 1 \quad (63)$$

$$\deg d(s) \geq 2 \deg a(s) + \deg(f) - 1 \quad (64)$$

1.6.1.3 Výpočet parametrů regulátoru

Parametry regulátoru získáme z diofantické rovnice pomocí metody neurčitých koeficientů a dosadíme do výsledné rovnice regulátoru [6]:

$$G_Q(s) = \frac{q(s)}{p(s)} = \frac{q(s)}{f(s)\tilde{p}(s)} \quad (65)$$

2 ELEKTRONICKÁ STUDIJNÍ OPORA PŘEDMĚTU SYSTEMS THEORY

V této kapitole jsou popsány technologie, které jsou použity pro tvorbu studijních opor předmětu Systems Theory. Elektronické studijní pomůcky jsou dvojího typu:

- MS PowerPoint prezentace
- Webové stránky – technologie HTML

Webová stránka je dostupná na adrese www.systems-theory-utb.webnode.cz. Na webové stránce se nachází i vytvořená PowerPoint Prezentace. Pro vytvoření stránek je použit webhosting služby Webnode, kde je upravena jedna z jejich dostupných šablon.

2.1 PowerPoint prezentace

PowerPoint je celosvětově známý nástroj na tvorbu tzv. prezentací od společnosti Microsoft. Patří do balíčku programů MS Office. Je velice jednoduchý a intuitivní. Oproti klasickým textovým souborům, obrázkům nebo tabulkách je prezentace určena k promítání na plátno pro účely tiskových konferencí, firemních prezentací či jako výukové médium při přednáškách ve škole.

Prezentace je specifický formát dokumentu, který se skládá z jednotlivých snímků. Snímky obsahují jen část samotné prezentace. Postupným zobrazováním snímků dostává divák či čtenář víc informací. Informace se mohou na jednotlivých snímkách zobrazovat postupně, aniž by divák spatřil celý snímek okamžitě.

To je hlavní rozdíl oproti PDF, kde se zobrazí stránky najednou a divák tak vidí celý obsah. Další specifičnost je v tom, že prezentace je promítána na plátno, tudíž je třeba počítat s dostatečně velkým písmem, aby byly texty dobře vidět. Z tohoto důvodu se na jeden snímek vejde menší množství textu, než je tomu u klasického dokumentu. Proto snímky často obsahují jen stručné informace, které jsou doplňovány názornými obrázky, tabulkami, grafy a dalšími grafickými prostředky pro vizualizaci informace [9].

2.2 WWW stránky

Zkratka WWW pochází z anglického „World Wide Web“ – doslova přeloženo jako celosvětová síť. Slouží k propojení dvou a více počítačů pro vzájemnou komunikaci. Pro tvorbu webových stránek se používá jazyk HTML [10].

2.2.1 Jazyk HTML

HTML jazyk je kód, který slouží k zobrazování dat předem zadaným způsobem. Jde o tzv. „hypertextový značkovací jazyk“. V průběhu let vývoje Internetu se vyvíjel i samotný jazyk HTML. Jazyk vznikl jako aplikace jazyka SGML na počátku 90. let 20. století.

Dnešní standart je HTML 5, kdy se z obyčejného značkovacího jazyka HTML stalo plnohodnotné API pro vývoj webových aplikací. Vylepšuje elementy starších verzí tohoto jazyka. Zdrojový text je v textovém formátu ASCII a nese příponu - .html [11].

Příkazy v HTML se nazývají značky (dříve se používalo označení „tag“), jsou uzavřeny ve špičatých závorkách < > včetně všech svých parametrů, které značku ovlivňují. Vše ostatní mimo tyto značky prohlížeč zobrazí jako text.

Jazyk používá tzv. párové a nepárové značky. Párové značky mají vliv pouze na určitou část dokumentu, která se nachází mezi těmito značkami, například u textu jde měnit barva, zarovnání, velikost a podobně. Na druhé straně nepárová značka má vliv pouze sama na sebe nebo definuje nějaký prvek v dokumentu, například obrázek a odkaz [10].

Ukázka párové značky:

```
<značka>
```

Kód HTML, na nějž má mít tag vliv

```
</značka>
```

Ukázka nepárové značky:

```
<značka>
```

2.2.1.1 Struktura zdrojového textu

HTML je velice tolerantní k chybám kódu. Pokud se vyskytne chyba ve značce, syntaxi nebo v čemkoliv jiném, webový prohlížeč přesto zobrazí požadovanou stránku. Přehlíží totiž všechno, co nezná. Podle toho rychle poznáte, kde je chyba a rychle ji opravíte na rozdíl od programovacího jazyka, kde kompilátor upozorní na chybu ještě před spuštěním kódu.

Každý zdrojový text má pevně stanovenou strukturu, podle které se musíme řídit. Nejprve je nutné uvést správný DOCTYPE, poté následuje párová značka <HTML> a končí její ukončovací značkou </HTML>. Mezi touto párovou značkou se zapisují dvě hlavní části dokumentu – hlavička a tělo. Pro hlavičku používáme příznačnou značku <HEAD>, kterou

ukončuje `</HEAD>` a pro tělo `<BODY>` `</BODY>`, kde se nachází samotný obsah stránky. Hlavička většinou nemá žádný vliv na zobrazenou stránku. Nese pouze informace o stránce a její název, který je zobrazený v internetovém prohlížeči [10].

2.2.1.2 Poznámky ve zdrojovém textu

Pro přehlednost v kódu se používají poznámky (komentáře), které autorovi i ostatním usnadňují práci se zdrojovým kódem. Komentáře nám říkají, co která část kódu provede či zobrazí a nijak se neprojeví ve výsledné interpretaci kódu prohlížečem. Aby prohlížeč dokázal rozlišit poznámku, tak použijeme následující značku `<!--text poznámky -->`.

2.2.1.3 Formátování textu

Formátování textu hraje důležitou roli při tvorbě stránky. Značkami a jejich atributy ovlivňujeme například kurzívu, barvu a velikost výsledného textu podobně jak je tomu u dokumentu psaného ve Wordu.

1. Normální text

Normální text je text bez jakéhokoliv formátování vnořený do zdrojového kódu mezi párové značky těla `<BODY>` `</BODY>`. Je nutné dodat, že klávesa ENTER odsune text na další řádek, ale v konečném důsledku ji prohlížeč interpretuje jako obyčejnou mezeru mezi slovy. Proto je zavedená speciální nepárová značka `
`. Jejím úkolem je bezprostřední odřádkování textu na stránce bez ohledu na velikost okna prohlížeče [11].

2. Odstavce a jejich zarovnání

Ve MS Word jsme zvyklí tvořit odstavce prostým odřádkováním. V HTML jazyce je tento postup neefektivní. Nahromadění značek `
` by způsobilo celkové zneřehlednění zdrojového textu. Aby byl text čitelnější, použijeme párovou značku `<DIV>` `</DIV>`. Veškerý text uvnitř těchto značek je chápán jako odstavec.

Pro zarovnání textu v odstavci použijeme parametr `ALIGN` a jeho syntaxe je `<DIV ALIGN="zarovnání">`. Zarovnání doleva - `LEFT`, zarovnání doprava - `RIGHT`, zarovnání na střed - `CENTER`.

Příklad:

<DIV ALIGN="LEFT">

Toto je text zarovnaný doleva.

</DIV>

Podobný význam jako značka <DIV> má i značka <P>. Ta ale mezi odstavce vkládá ještě jeden prázdný řádek [10].

3. Citace: speciální zarovnání odstavce

Jde o tvorbu odstavce za pomoci odsazení textu párovou značkou <BLOCKQUOTE>. Případné uvozovky musíme doplnit sami.

Příklad:

<BLOCKQUOTE>

„Citovaný text.“

</BLOCKQUOTE>

4. Nadpisy

Nadpisy vkládáme mezi značky <H1> a </H1>. Existuje několik úrovní nadpisů až po <H6>. Každá značka nadpisu má definovanou svoji velikost písma.

5. Velikost a font písma

Velikost a font písma se definuje párovou značkou a má následující parametry:

- *SIZE*="velikost" – velikost se pohybuje od 1 až do 7.
- *FACE*="písmo" – název fontu písma, například *Times New Roman*.
- *COLOR*="barva" – barva písma, která se zapíše slovně (red, blue, yellow) nebo číslo barvy hexadecimálně.

Příklad:

Toto je červený text napsaný fontem Arial velikostí 2.

6. Efekty a zvýrazňování písma

Každé písmo v dokumentu lze zvýraznit pomocí tří hlavních prvků. Jedná se o párové značky:

- `` - tučné písmo
- `<I>` - kurziva (nakloněné písmo)
- `<U>` - podtržené písmo

Lze použít i několik najednou, například:

`<U>`*Toto písmo je jak tučné, tak i podtržené.*`</U>`

Existují i další párové značky, například `<STRIKE>` (přeškrtnutí písma), `<SUB>` (dolní index) a `<SUP>` (horní index) [10].

2.2.1.4 Barvy v dokumentu

Barva je důležitou součástí vizuální stránky celého dokumentu. Můžeme měnit barvu pozadí textu, barvu písma i barvu samotné stránky a jednotlivých prvků na ní.

Barva celého dokumentu se mění pomocí atributu `BGCOLOR` a atributu `TEXT` ve značce `<BODY>`. U hexadecimálního zadávání barvy nesmíme zapomenout na tzv. „hashtag“.

Tab. 1. Přehled základních barev vyjádřené slovně a v hexadecimální soustavě [10].

Barva	Anglický ekvivalent	V hexadecimální soustavě
Tyrkysová	Aqua	#00FFFF
Černá	Black	#000000
Modrá	Blue	#0000FF
Fialová	Fuchsia	#FF00FF
Šedá	Gray	#808080
Zelená	Lime	#00FF00
Červená	Red	#FF0000
Bílá	White	#FFFFFF
Žlutá	Yellow	#FFFF00

2.2.1.5 Vkládání obrázků

Jazyk HTML podporuje tři základní formáty – JPG, GIF a PNG. Obrázky vkládáme pomocí nepárové značky `` a do jejího atributu vložíme cestu adresáře, v kterém se soubor požadovaného obrázku nachází. Syntaxe tak zní:

```
<IMG SRC="cesta k souboru">
```

Obrázek můžeme navíc stejně jako u textu zarovnávat na střed, doleva, doprava apod. [10].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 KOMPLEXNÍ PŘÍKLAD PŘEDMĚTU SYSTEMS THEORY

Komplexní příklad, na kterém je ukázáno vše probírané v předmětu Systems Theory. Materiál k němu byl poskytnut vedoucím bakalářské práce Ing. Libor Pekař, Ph.D.

3.1 Vstupně-výstupní analýza a syntéza jednorozměrného spojitého lineárního systému

Jednorozměrný lineární spojitý dynamický systém, z kterého budu vycházet, je popsán diferenciální rovnicí:

$$1y''(t) + 7y'(t) + 3y(t) = 7u'(t) + 3u(t)$$

3.1.1 Přenosová funkce systému

Zadání: Napište přenosovou funkci tohoto systému.

Laplaceova transformace:

$$\begin{aligned}1s^2Y(s) + 7sY(s) + 3Y(s) &= 7sU(s) + 3U(s) \\ Y(s)(1s^2 + 7s + 3) &= U(s)(7s + 3)\end{aligned}$$

Výsledný přenos při nulových počátečních podmínkách:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{7s + 3}{s^2 + 7s + 3}$$

3.1.2 Nuly, póly, kmitavost, fázovost a statické zesílení systému

Zadání: Vypočítejte nuly a póly systému a rozhodněte o periodicitě (kmitavosti) a fázovosti (minimálně, neminimálně fázový systém). U stabilního systému určete jeho statické zesílení.

Při výpočtu nul a pólů se vychází z vypočteného přenosu, kde nuly jsou kořeny čitatele a póly jsou kořeny jmenovatele.

Nuly:

$$7s + 3 = 0$$

$$n_1 = -\frac{3}{7}$$

$$n_2 = \infty$$

Póly:

$$1s^2 + 7s + 3 = 0$$

$$D = b^2 - 4ac = 49 - 12 = 37$$

$$p_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a} = \frac{-7 \pm \sqrt{37}}{2} = -\frac{7}{2} \pm \frac{\sqrt{37}}{2}$$

Z výše uvedených výpočtů vyplývá, že systém je aperiodický - nekmitavý (má jen reálné póly) a minimálně fázový (všechny nuly leží v levé části komplexní roviny). Lze také říci, že zadaný systém je stabilní, protože oba jeho póly mají zápornou reálnou část.

3.1.3 Impulsní funkce systému

Zadání: Analyticky vypočítejte impulsní funkci a vykreslete ji jako impulsní charakteristiku. Impulsní charakteristiku jde také získat pomocí příkazu – *impulse()* v Matlabu. Výsledky porovnejte společně v jednom grafu.

Impulsní funkce má na vstupu Diracův impulz. Jeho obraz $U(s)$ je 1. Obraz impulsní funkce získáme:

$$G(s) = \frac{7s + 3}{s^2 + 7s + 3} = \frac{A}{\left(s + \frac{7 + \sqrt{37}}{2}\right)} + \frac{B}{\left(s + \frac{7 - \sqrt{37}}{2}\right)}$$

$$\frac{7s + 3}{1s^2 + 7s + 3} = \frac{A}{\left(s + \frac{7 + \sqrt{37}}{2}\right)} + \frac{B}{\left(s + \frac{7 - \sqrt{37}}{2}\right)}$$

Substituce:

$$C = \frac{7 + \sqrt{37}}{2}$$

$$D = \frac{7 - \sqrt{37}}{2}$$

$$7s + 3 = As + AD + Bs + BC$$

$$s^0: 3 = AD + BC$$

$$s^1: 10 = A + AD + B + BC \Rightarrow 10 = A(1 + D) + B(1 + C)$$

$$B = \frac{10 - A(1 + D)}{1 + C}$$

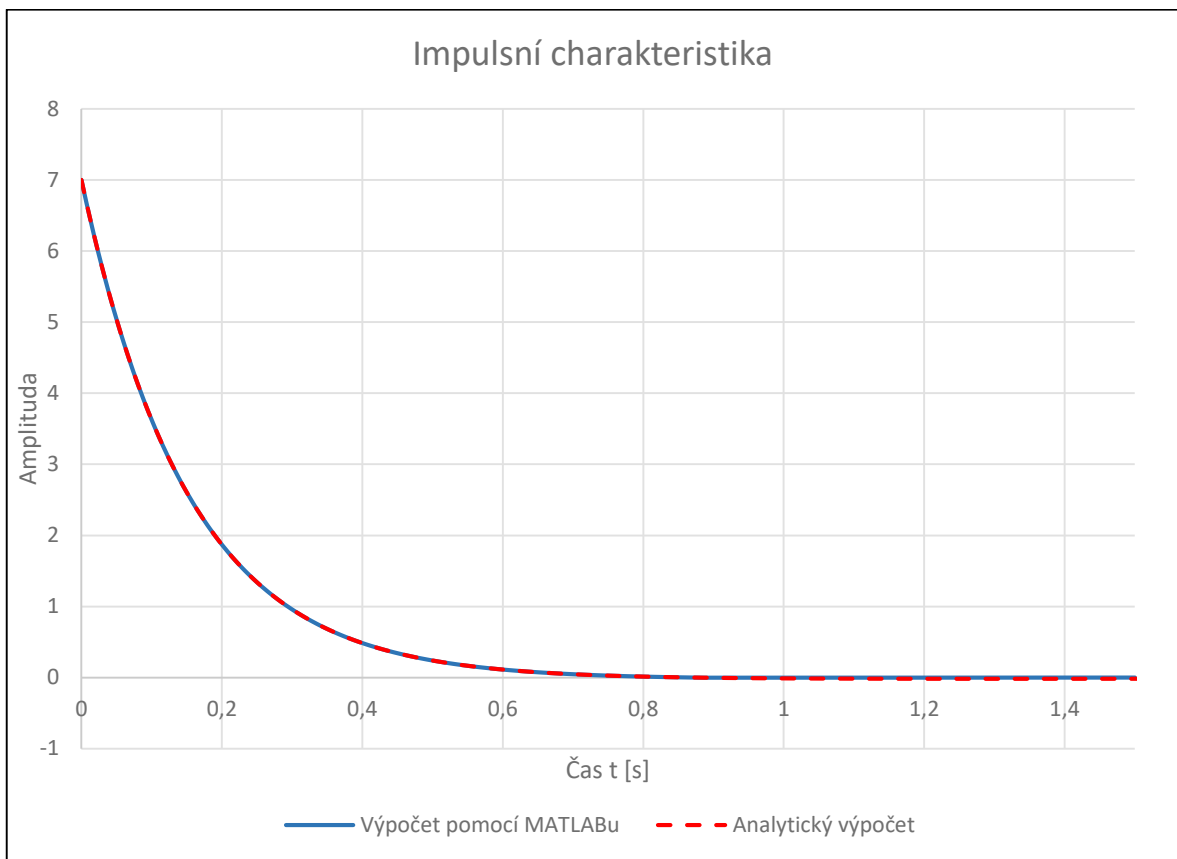
$$\begin{aligned}
3 &= AD + \left(\frac{10 - A(1 + D)}{1 + C} \right) C \\
3 &= AD + \frac{10C - AC - ADC}{1 + C} \\
3 &= AD + \left(\frac{10C}{1 + C} + \frac{-AC - ADC}{1 + C} \right) \\
3 &= AD + \frac{10C}{1 + C} + \frac{-A(C + DC)}{1 + C} \\
3 - \frac{10C}{1 + C} &= A \left(D + \frac{-C - DC}{1 + C} \right) \\
A &= \frac{3 - \frac{10C}{1 + C}}{D + \frac{(-C - DC)}{1 + C}} \\
B &= \frac{10 - \frac{3 - \frac{10C}{1 + C}}{D + \frac{(-C - DC)}{1 + C}} (1 + D)}{1 + C}
\end{aligned}$$

$$i(t) = L^{-1}\{G(s)\} = L^{-1}\left\{ \frac{A}{(s + C)} + \frac{B}{(s + D)} \right\}$$

Dosadí se substituce C, D a vypočítané koeficienty A, B do výsledné rovnice:

$$i(t) = Ae^{Ct} + Be^{Dt}$$

Pomocí funkce *impluse()* se v Matlabu vykreslila impulzní charakteristika:



Obr. 4. Vykreslení impulsní funkce pomocí Matlabu a srovnání s analytickým výpočtem.

Z grafu lze vidět, že výpočty jsou správné, oba dva grafy jsou naprosto totožné.

3.1.4 Přechodová funkce systému

Zadání: Analyticky vypočítejte přechodovou funkci a vykreslete ji jako přechodovou charakteristiku. Přechodovou charakteristiku získejte také pomocí příkazu *step* v Matlabu a výsledky společně v jednom grafu porovnejte.

Přechodová funkce má na vstupu jednotkový skok. Jeho obraz je $U(s)=1/s$. Přechodová funkce se získá L-T:

Póly:

$$p_1 = -\frac{7}{2} + \frac{\sqrt{37}}{2}$$

$$p_2 = -\frac{7}{2} - \frac{\sqrt{37}}{2}$$

$$h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{G(s)}{s} \right\} = L^{-1} \left\{ \frac{7s + 3}{s^3 + 7s^2 + 3s} \right\} = L^{-1} \left\{ 7 \frac{\left(s + \frac{3}{7}\right)}{s(s - p_1)(s - p_2)} \right\} =$$

$$= 7 * L^{-1} \left\{ \frac{\left(s + \frac{3}{7}\right)}{s(s - p_1)(s - p_2)} \right\}$$

$$\frac{\left(s + \frac{3}{7}\right)}{s(s - p_1)(s - p_2)} = \frac{As + B}{s(s - p_1)} + \frac{C}{(s - p_2)}$$

$$\left(s + \frac{3}{7}\right) = (As + B)(s - p_2) + Cs(s - p_1) = s^2(A + C) + s(B - Ap_2 - Cp_1) + (-Bp_2)$$

$$A + C = 0$$

$$B - Ap_2 - Cp_1 = 1$$

$$-Bp_2 = \frac{1}{5}$$

Po vyřešení soustavy rovnic dostaneme koeficienty:

$$A = \frac{1 + \frac{3}{7p_2}}{-p_2 + p_1}$$

$$B = -\frac{3}{7p_2}$$

$$C = -A$$

Nyní se koeficienty dosadí do původní rovnice a provede se zpětná L-T:

$$h(t) = 7 L^{-1} \left\{ \frac{\left(s + \frac{3}{7}\right)}{s(s - p_1)(s - p_2)} \right\} = 7 L^{-1} \left\{ \frac{As + B}{s(s - p_1)} + \frac{C}{(s - p_2)} \right\}$$

$$h(t) = 7 L^{-1} \left\{ \frac{A}{(s - p_1)} + \frac{B}{s(s - p_1)} + \frac{C}{(s - p_2)} \right\}$$

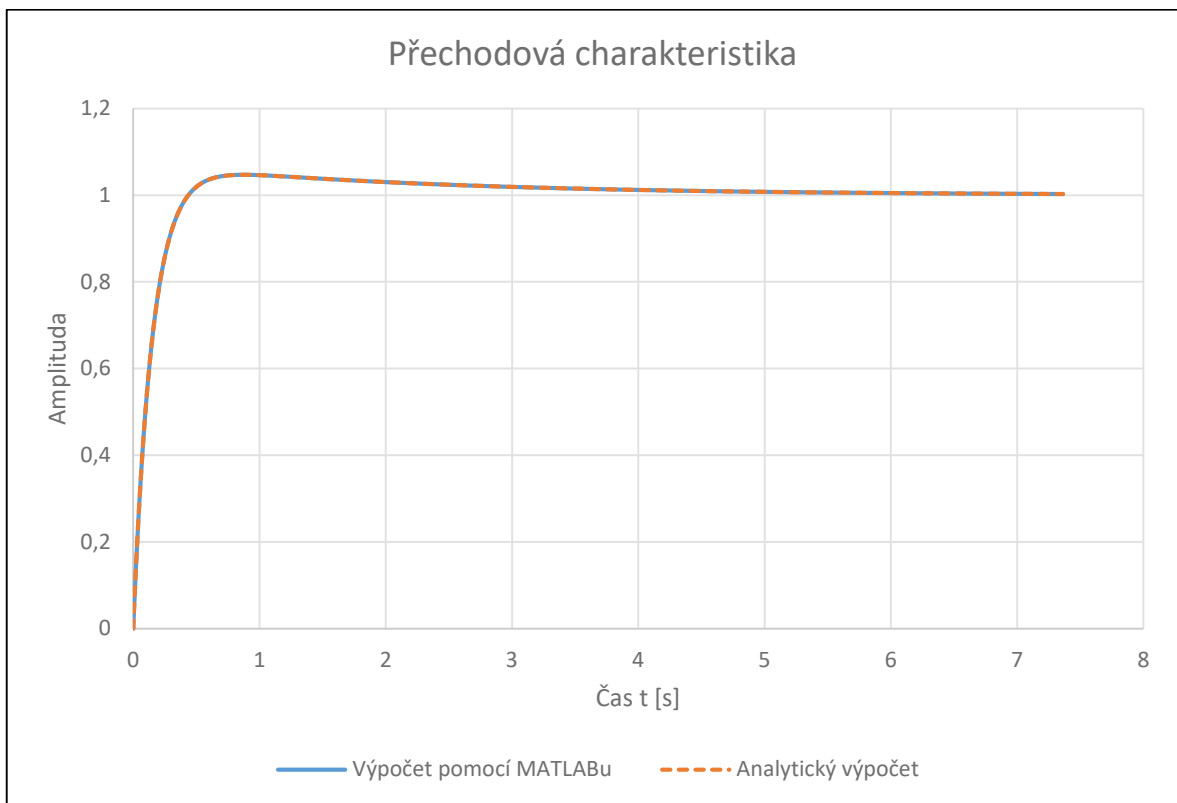
$$h(t) = 7 \left(Ae^{p_1 t} + \frac{B}{-p_1} (1 - e^{p_1 t}) + Ce^{p_2 t} \right)$$

$$h(t) = 7 \left(\frac{1 + \frac{3}{7(-\frac{7}{2} - \frac{\sqrt{37}}{2})}}{-(-\frac{7}{2} - \frac{\sqrt{37}}{2}) + -\frac{7}{2} + \frac{\sqrt{37}}{2}} e^{(-\frac{7}{2} + \frac{\sqrt{37}}{2})t} + \frac{-\frac{3}{7(-\frac{7}{2} - \frac{\sqrt{37}}{2})}}{-(-\frac{7}{2} + \frac{\sqrt{37}}{2})} \left(1 - e^{(-\frac{7}{2} + \frac{\sqrt{37}}{2})t} \right) - \frac{1 + \frac{3}{7(-\frac{7}{2} - \frac{\sqrt{37}}{2})}}{-(-\frac{7}{2} - \frac{\sqrt{37}}{2}) + (-\frac{7}{2} + \frac{\sqrt{37}}{2})} e^{(-\frac{7}{2} - \frac{\sqrt{37}}{2})t} \right)$$

Pomocí funkce *step* se vykreslí v Matlabu přechodová funkce a použije se následující skript:

```
p1=-7/2+sqrt(37)/2;
p2=-7/2-sqrt(37)/2;
b=-(3/(7*p2));
a=(1+3/(7*p2))/(-p2+p1);
c=-a;
x=0:0.1:100;|
y=7*(a*exp(p1*x)-b/p1*(1-exp(p1*x)+c*exp(p2*x)));
step(tf([7 3],[1 7 3]))
hold on
plot(x,y,'Color','red','linestyle',':','lineWidth',2)
legend('matlab result','analytic result')
```

Obr. 5. Screenshot skriptu z prostředí Matlabu pro vykreslení požadovaných grafů.



Obr. 6. Vykreslení přechodové funkce pomocí Matlabu a srovnání s analytickým výpočtem.

3.1.5 Frekvenční přenos systému

Zadání: Určete frekvenční přenos daného dynamického systému a upravte jej na složkový i exponenciální tvar komplexního čísla.

Frekvenční přenos se získá tak, že místo s se dosadí $j\omega$:

$$G(s) = \frac{7s + 3}{s^2 + 7s + 3}$$

$$G(j\omega) = \frac{7j\omega + 3}{(3 - \omega^2) + 7j\omega} \frac{(3 - \omega^2) - 7j\omega}{(3 - \omega^2) - 7j\omega} = \frac{46\omega^2 + 9}{(3 - \omega^2)^2 + 49\omega^2} + j \frac{-7\omega^3}{(3 - \omega^2)^2 + 49\omega^2}$$

Získá se složkový tvar komplexního čísla $P(\omega) + jQ(\omega)$. Z něhož se dokáže vypočítat amplituda i fázi podle vzorců:

$$A(\omega) = \sqrt{P(\omega)^2 + Q(\omega)^2} = \sqrt{\left(\frac{46\omega^2 + 9}{(3 - \omega^2)^2 + 49\omega^2}\right)^2 + \left(\frac{-7\omega^3}{(3 - \omega^2)^2 + 49\omega^2}\right)^2}$$

$$A(\omega) = \frac{\sqrt{(46\omega^2 + 9)^2 + (-7\omega^3)^2}}{(3 - \omega^2)^2 + 49\omega^2}$$

$$\varphi(\omega) = \arctan \frac{Q(\omega)}{P(\omega)} = \arctan \left(\frac{\frac{-7\omega^3}{(3-\omega^2)^2 + 49\omega^2}}{\frac{46\omega^2 + 9}{(3-\omega^2)^2 + 49\omega^2}} \right) = \arctan \left(\frac{-7\omega^3}{46\omega^2 + 9} \right)$$

$$G(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} = \frac{\sqrt{(46\omega^2 + 9)^2 + (-7\omega^3)^2}}{(3-\omega^2)^2 + 49\omega^2} * e^{j*\arctan\left(\frac{-7\omega^3}{46\omega^2+9}\right)}$$

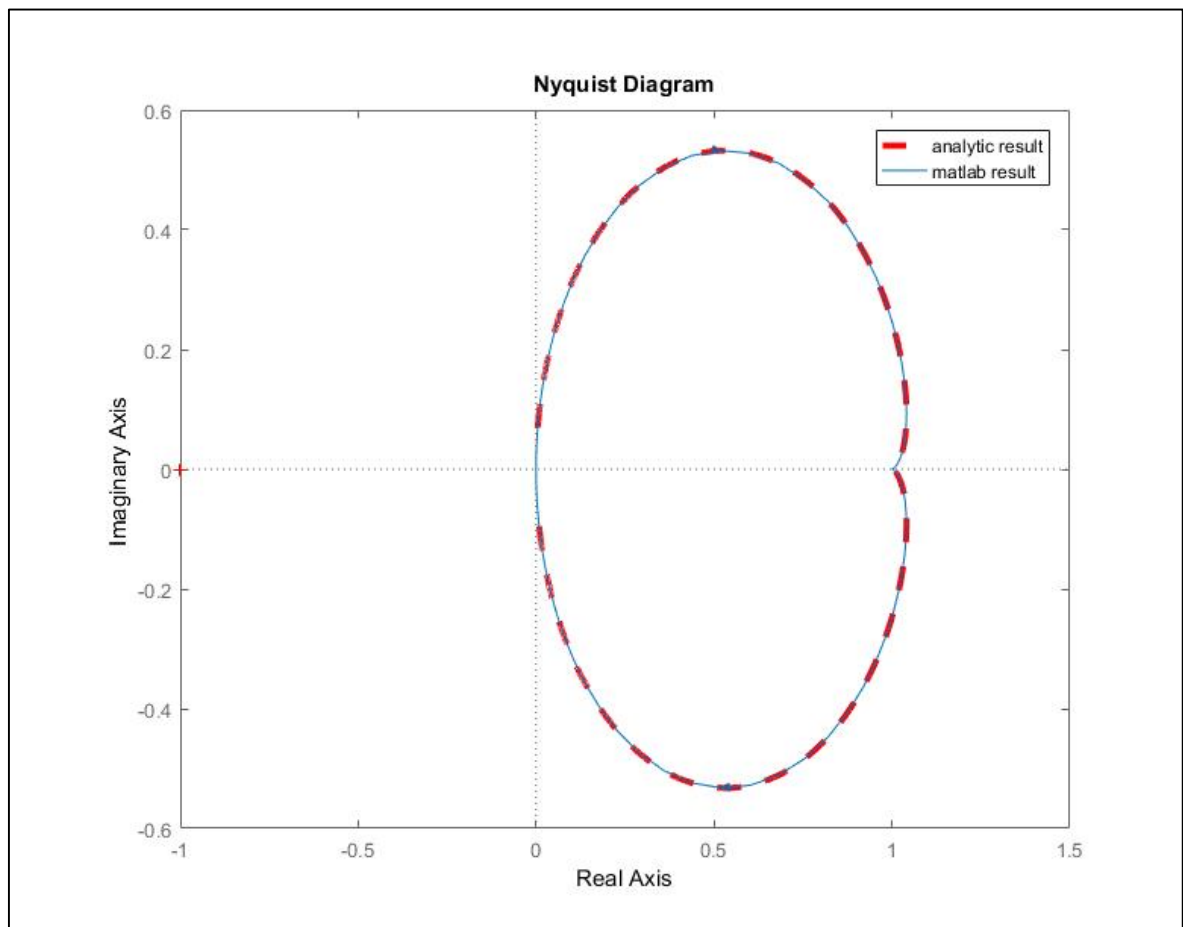
3.1.6 Amplitudově-fázová frekvenční charakteristika

Zadání: Do složkového tvaru frekvenčního přenosu dosadíte vhodně alespoň 10 různých hodnot úhlové frekvence (např. volte frekvence ekvidistantně v logaritmickém měřítku). Výsledky zobrazte do tabulky a vykreslete je jako amplitudově-fázovou frekvenční charakteristiku v komplexní rovině (Nyquistovu křivku) se zvýrazněním vypočtených pořadnic. Stejnou charakteristiku vykreslete také s využitím příkazu *Nyquist* v Matlabu a výsledky porovnejte společně v jednom grafu.

Pomocí funkce *Nyquist* se vykreslí Nyquistovu křivku v Matlabu a pomocí skriptu se porovnejí křivky v jednom grafu:

```
x = -100:0.01:100;
p=(46*x.^2+9)./((3-x.^2).^2+49*x.^2);
q=(-7*x.^3)./((3-x.^2).^2+49*x.^2);
plot(p,q,'Color','red','linestyle','--','lineWidth',3)
hold on
nyquist(tf([7 3],[1 7 3]))
legend('analytic result','matlab result')
```

Obr. 7. Screenshot skriptu z prostředí Matlabu pro vykreslení požadovaných grafů.



Obr. 8. Nyquistova křivka vykreslená pomocí Matlabu.

Tab. 2. Hodnoty úhlové frekvence zvolené pro vykreslení Nyquistovy křivky.

ω	$P(\omega)$	$Q(\omega)$
-100	0,00458	0,0697
-10	0,322105	0,489203
-1	1,037736	0,132075
-0,5	1,0347	0,044164
-0,25	1,015703	0,009355
-0,125	1,004821	0,001414
-0,0625	1,001277	0,000186
0	1	0
0,0625	1,001277	-0,00019
0,125	1,004821	-0,00141
0,25	1,015703	-0,00936
0,5	1,0347	-0,04416
1	1,037736	-0,13208
10	0,322105	-0,4892
100	0,00458	-0,0697

Aby se mohla vykreslit Nyquistova křivka, musí se pro jednotlivé úhlové frekvence vypočítat reálnou část i imaginární část zvlášť ze složkového tvaru frekvenčního přenosu. Vše je uvedeno v tabulce. Oba grafy jsou totožné, výpočty jsou tedy správné.

3.1.7 Bodeho křivka

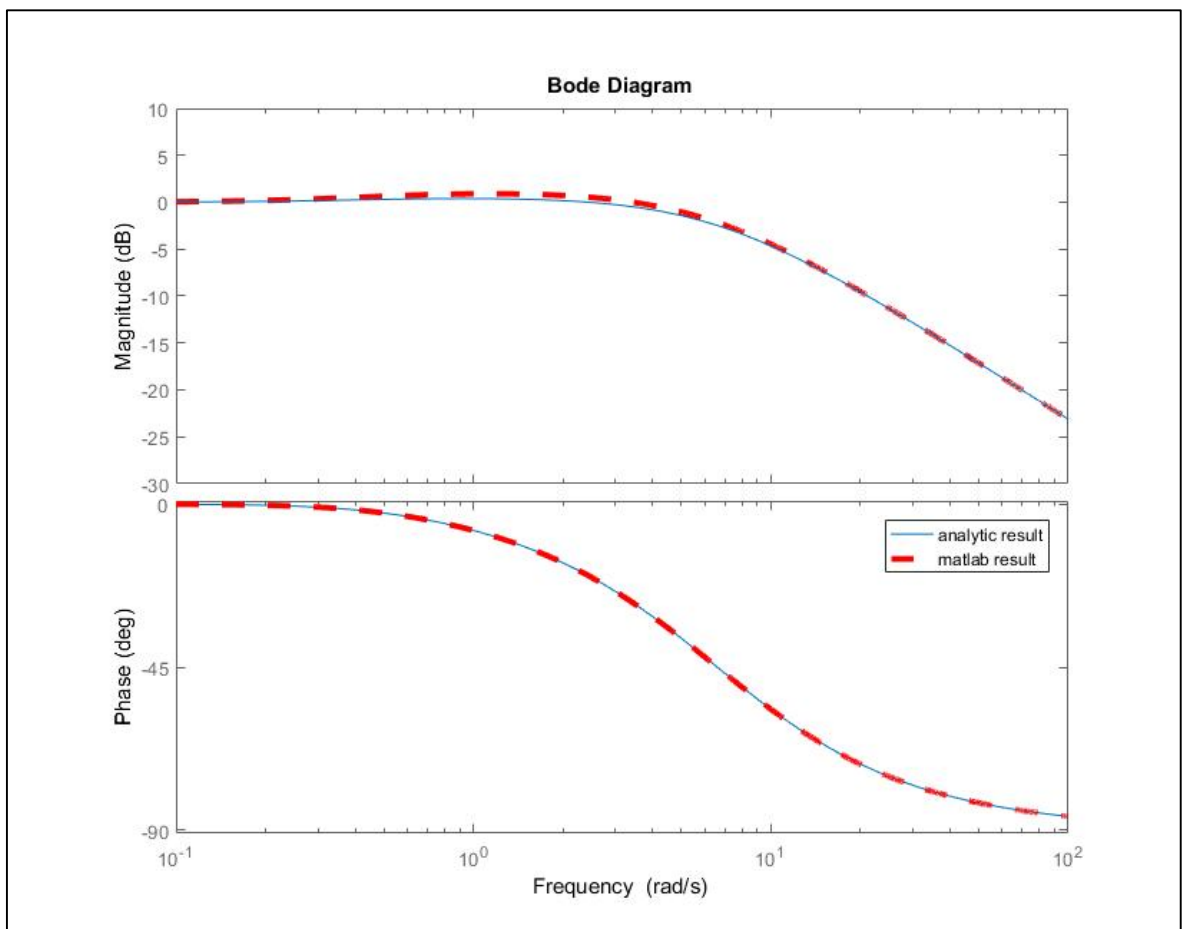
Zadání: Do exponenciálního tvaru frekvenčního přenosu dosad'te alespoň 10 různých hodnot úhlové frekvence z předchozího úkolu. Výsledky zobrazte do tabulky. Na základě tohoto výpočtu vykreslete frekvenční charakteristiky v logaritmických souřadnicích (Bodeho

křivky) se zvýrazněním vypočtených pořadnic. Stejně charakteristiky vykreslete také s využitím příkazu *bode* v Matlabu a výsledky porovnejte společně v jednom grafu.

Pomocí funkce *bode* se vykreslí Bodeho křivky v Matlabu a zobrazí se pomocí skriptu:

```
x1 = 0:0.01:100;  
y1=20*log10(sqrt((46*x1.^2+9).^2+(-7*x1.^3).^2)./(3-x1.^2).^2+46*x1.^2));  
plot(x1,y1,'Color','red','linestyle','--','lineWidth',3)  
hold on  
bode(tf([7 3],[1 7 3]))  
x2 = 0:0.01:100;  
y2 = atand((-7*x2.^3)./(46*x2.^2+9));  
plot(x2,y2,'Color','red','linestyle','--','lineWidth',3)  
legend('analytic result','matlab result')
```

Obr. 9. Screenshot skriptu z prostředí Matlabu pro vykreslení Bodeho křivky.



Obr. 10. Bodeho křivka vykreslená pomocí Matlabu.

Tab. 3. Hodnoty úhlové frekvence zvolené pro vykreslení Bodeho křivky.

ω	$A(\omega)$	$\phi(\omega)$
0	1	0
0,05	1,001648	-9,6E-05
0,1	1,006373	-0,00074
0,2	1,022501	-0,00517
0,5	1,076389	-0,04266
1	1,108873	-0,12659
1,5	1,104662	-0,20699
3	1,029563	-0,4202
5	0,888744	-0,64667
10	0,598266	-0,98852
100	0,069871	-1,50518

Aby se mohly vykreslit Bodeho křivky, musí se zvlášť vypočítat amplituda (respektive její útlum) frekvenční charakteristika a také fáze. Vše opět uvedeno v tabulce výše. Oba grafy jsou totožné, výpočty jsou tedy správné.

3.1.8 Regulátor systému

Zadání: Je uvažováno, že jedinou vstupní veličinou regulačního obvodu je žádaná hodnota ve tvaru skoku o hodnotě 1. Navrhněte regulátor pomocí polynomiální syntézy pro 1DOF strukturu řízení pro tři různé volby pólů v charakteristickém polynomu příslušného uzavřeného regulačního obvodu a simulačně ověřte funkčnost regulátorů.

Přenos:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{7s + 3}{s^2 + 7s + 3}$$

$$a(s) = s^2 + 7s + 3$$

$$b(s) = 7s + 3$$

$$w(s) = \frac{1}{s}$$

$$f_w = s$$

$$f_d = 1$$

Určí se stupně polynomů ze známých rovnic 1DOF návrhu systému:

$$\deg q = \deg a + \deg f - 1 = 2 + 1 - 1 = 2$$

$$\deg p \geq \deg a - 1 = 2 - 1 = 1$$

$$\deg c = 2 \deg a + \deg f - 1 = 4 + 1 - 1 = 4$$

$$q(s) = q_2 s^2 + q_1 s + q_0$$

$$p(s) = p_1 s + p_0$$

Dosadí se do rovnice:

$$a(s)p(s) + b(s)q(s) = c(s)$$

$$a(s)f(s)p(s) + b(s)q(s) = c(s)$$

Dostane se diofantická rovnice:

$$(s^2 + 7s + 3)s(p_1 s + p_0) + (7s + 3)(q_2 s^2 + q_1 s + q_0) = c(s)$$

$$s^4(p_1) + s^3(7p_1 + p_0 + 7q_2) + s^2(3p_1 + 7p_0 + 7q_1 + 3q_2) + s(3p_0 + 7q_0 + 3q_1) + (3q_0) = c(s)$$

Regulátor bude mít rovnici:

$$G_Q(s) = \frac{q_2 s^2 + q_1 s + q_0}{p_1 s^2 + p_0 s}$$

Zadaný systém je stabilní a aperiodický.

3.1.8.1 Póly jako vícenásobný reálný pól rovný dominantnímu pólu řízené soustavy

Vzhledem k tomu, že dominantní pól soustavy je $p_1 = \frac{-7+\sqrt{37}}{2}$ (poněvadž zde pracujeme s polynomem p , změním značení pólu řízené soustavy na $m_1 = \frac{-7+\sqrt{37}}{2}$), tak charakteristický polynom bude vypadat následovně:

$$c(s) = (s - m_1)^4 = s^4 - 4m_1 s^3 + 6m_1^2 s^2 - 4m_1^3 s + m_1^4$$

Dosadí se do diofantické rovnice:

$$s^4(p_1) + s^3(7p_1 + p_0 + 7q_2) + s^2(3p_1 + 7p_0 + 7q_1 + 3q_2) + s(3p_0 + 7q_0 + 3q_1) + (3q_0) = s^4 - 4m_1 s^3 + 6m_1^2 s^2 - 4m_1^3 s + m_1^4$$

$$s^4 : p_1 = 1$$

$$s^3 : 7p_1 + p_0 + 7q_2 = -4m_1$$

$$s^2 : 3p_1 + 7p_0 + 7q_1 + 3q_2 = 6m_1^2$$

$$s : 3p_0 + 7q_0 + 3q_1 = -4m_1^3$$

$$s^0 : 3q_0 = m_1^4$$

$$q_0 = 0,0147$$

$$q_1 = -0,3344$$

$$q_2 = -0,7992$$

$$p_0 = 0,4289$$

$$p_1 = 1$$

Rovnice regulátoru:

$$G_Q(s) = \frac{-0,7992s^2 - 0,3344s + 0,0147}{s^2 + 0,4289s}$$

3.1.8.2 Zpětnovazební póly jako vícenásobný reálný pól rovný dvojnásobku dominantního pólu řízené soustavy.

$$c(s) = (s - 2m_1)^4 = s^4 - 8m_1s^3 + 24m_1^2s^2 - 32m_1^3s + 16m_1^4$$

Dosadí se do diofantické rovnice:

$$s^4(p_1) + s^3(7p_1 + p_0 + 7q_2) + s^2(3p_1 + 7p_0 + 7q_1 + 3q_2) + s(3p_0 + 7q_0 + 3q_1) + (3q_0) = s^4 - 8m_1s^3 + 24m_1^2s^2 - 32m_1^3s + 16m_1^4$$

$$s^4 : p_1 = 1$$

$$s^3 : 7p_1 + p_0 + 7q_2 = -8m_1$$

$$s^2 : 3p_1 + 7p_0 + 7q_1 + 3q_2 = 24m_1^2$$

$$s : 3p_0 + 7q_0 + 3q_1 = -32m_1^3$$

$$s^0 : 3q_0 = 16m_1^4$$

$$q_0 = 0,2359$$

$$q_1 = 0,7742$$

$$q_2 = -0,4336$$

$$p_0 = -0,2958$$

$$p_1 = 1$$

Rovnice regulátoru:

$$G_Q(s) = \frac{-0,4336s^2 + 0,7742s + 0,2359}{s^2 - 0,2958s}$$

3.1.8.3 Zpětnovazební póly jako vícenásobnou komplexně sdruženou dvojici pólů, kde reálná část je číselně rovna jednomu z pólů řízené soustavy a imaginární část je rovna druhému z pólů řízené soustavy.

Proměnné m_1, m_2 reprezentují póly řízeného systému.

$$\begin{aligned} c(s) &= (s - m_1 - jm_2)^2(s - m_1 + jm_2)^2 \\ &= s^4 + s^3(-4m_1) + s^2(6m_1^2 + 2m_2^2) + s(-4m_1^3 - 4m_1m_2^2) \\ &\quad + (m_1^4 + 2m_1^2m_2^2 + m_2^4) \end{aligned}$$

Dosadí se do diofantické rovnice:

$$\begin{aligned} s^4(p_1) + s^3(7p_1 + p_0 + 7q_2) + s^2(3p_1 + 7p_0 + 7q_1 + 3q_2) + s^1(3p_0 + 7q_0 + 3q_1) \\ + (3q_0) \\ = s^4 + s^3(-4m_1) + s^2(6m_1^2 + 2m_2^2) + s(-4m_1^3 - 4m_1m_2^2) \\ + (m_1^4 + 2m_1^2m_2^2 + m_2^4) \end{aligned}$$

$$s^4: p_1 = 1$$

$$s^3: 7p_1 + p_0 + 7q_2 = -4m_1$$

$$s^2: 3p_1 + 7p_0 + 7q_1 + 3q_2 = 6m_1^2 + 2m_2^2$$

$$s^1: 3p_0 + 7q_0 + 3q_1 = -4m_1^3 - 4m_1m_2^2$$

$$s^0: 3q_0 = m_1^4 + 2m_1^2m_2^2 + m_2^4$$

$$p_0 = 32,54864$$

$$p_1 = 1$$

$$q_0 = 3,6736$$

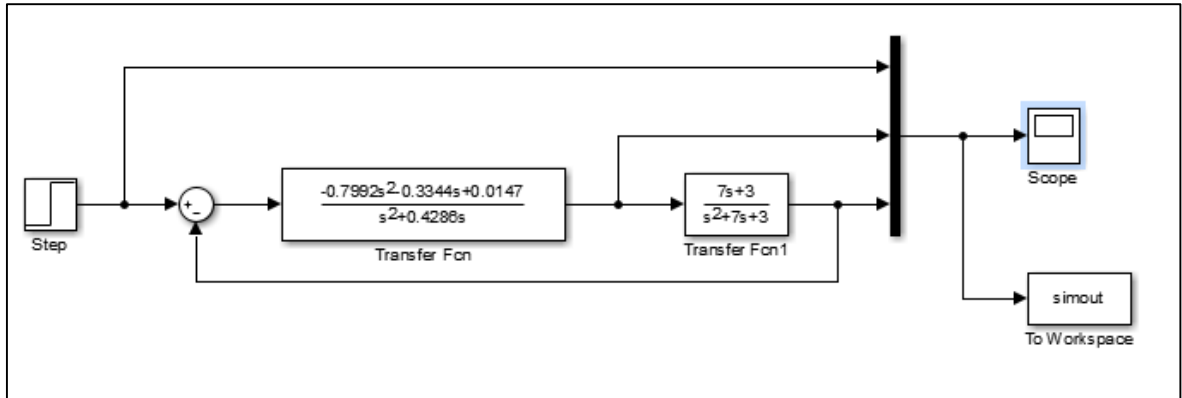
$$q_1 = -49,99021$$

$$q_2 = -39,2617$$

Rovnice regulátoru:

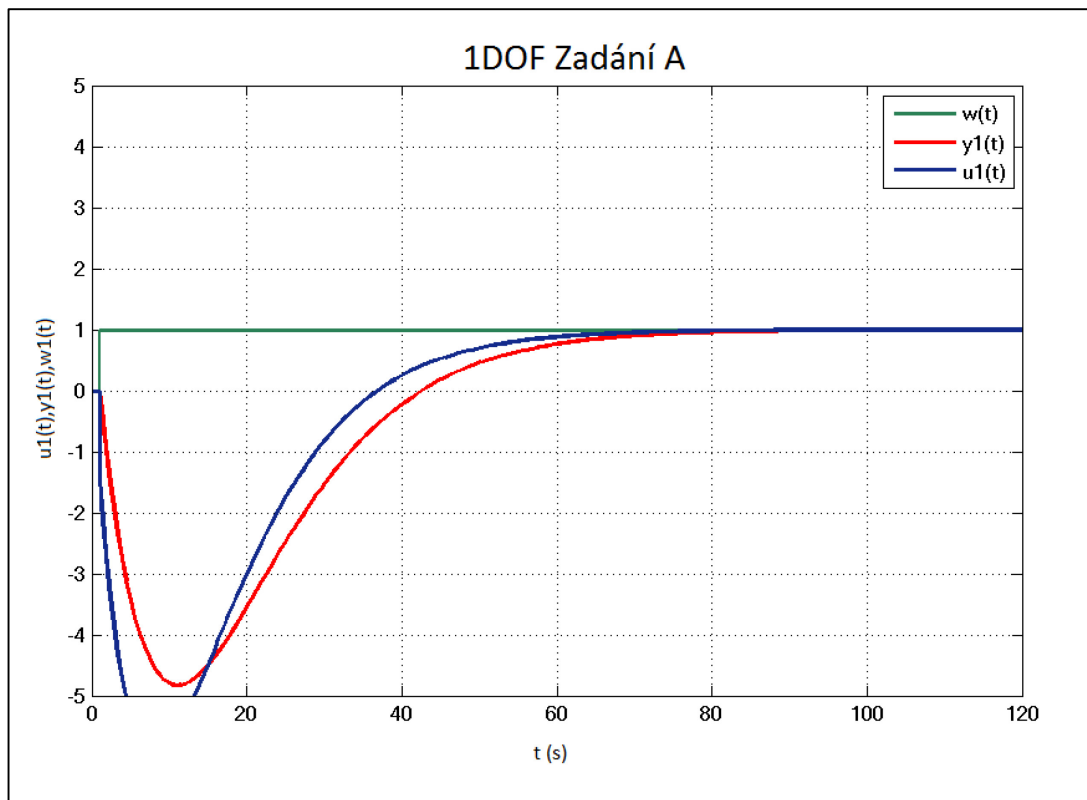
$$G_Q(s) = \frac{-39,2617s^2 - 49,99021s + 3,6736}{s^2 + 32,54864s}$$

Nyní se všechny 3 systémy nasimulují v programu Matlab/Simulink. Všechna zapojení jsou stejná, až na hodnoty u přenosu regulátoru.

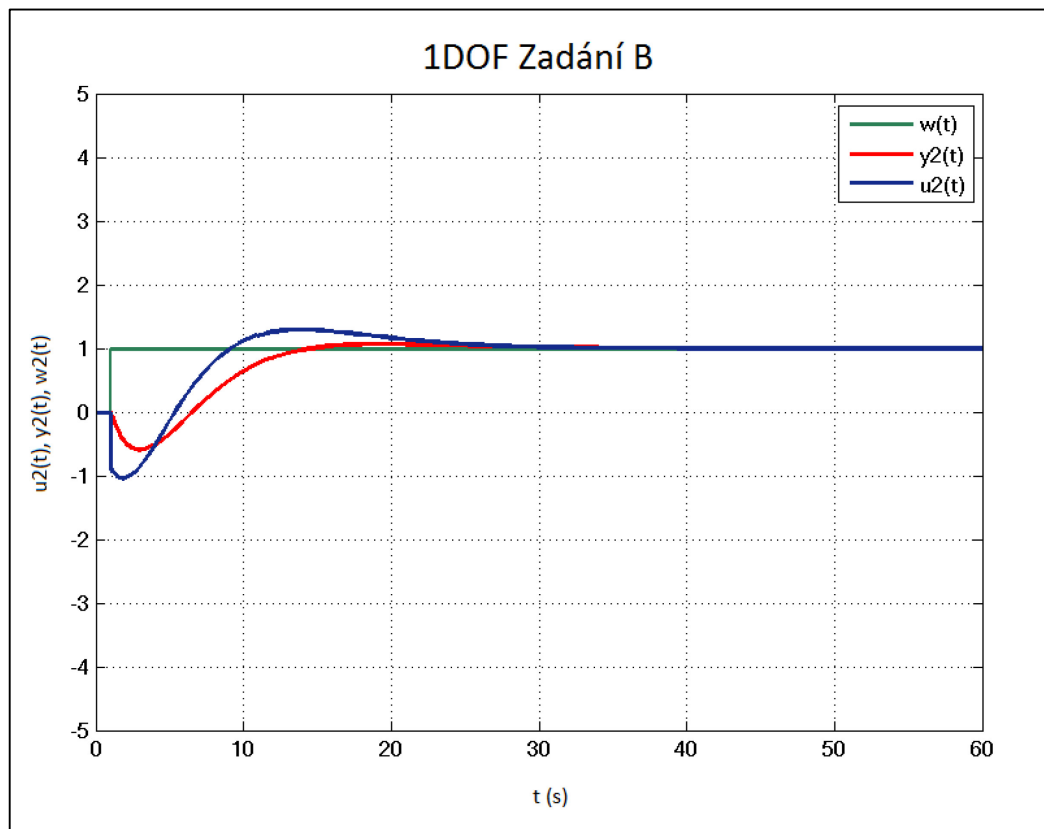


Obr. 11. Schéma zapojení regulátoru ve struktuře 1DOF.

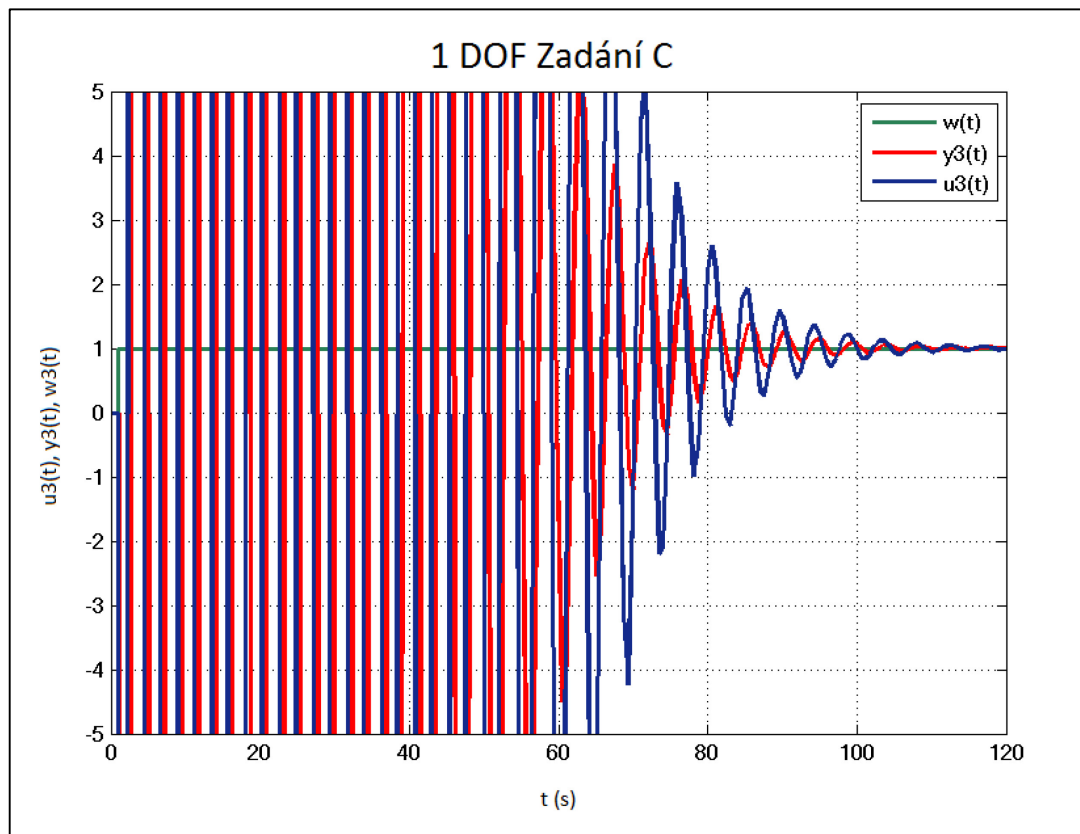
Data jsou exportována do Excelu a do grafů jsou vykresleny žádané hodnoty, akční veličiny a výstupní veličiny.



Obr. 12. Vykreslení žádané hodnoty, akční a výstupní veličiny.

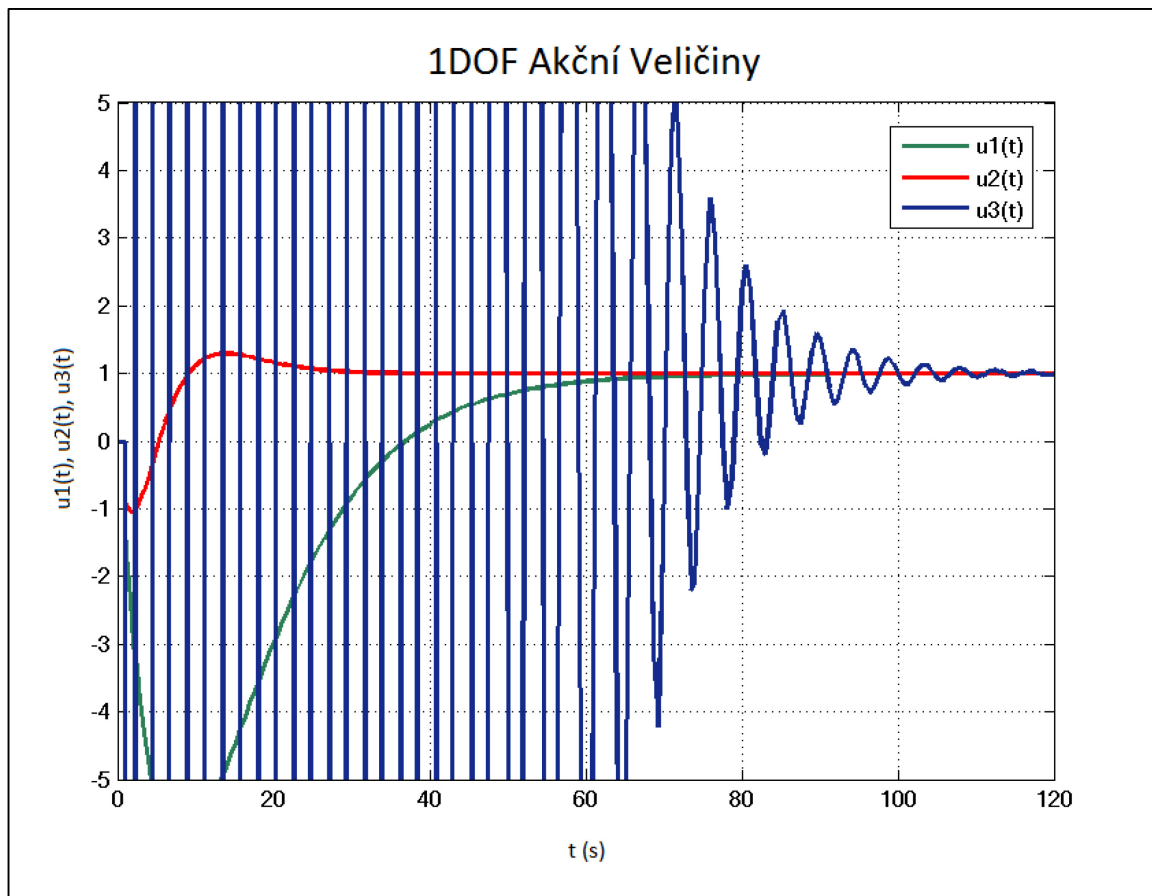


Obr. 13. Vykreslení žádané hodnoty, akční a výstupní veličiny.

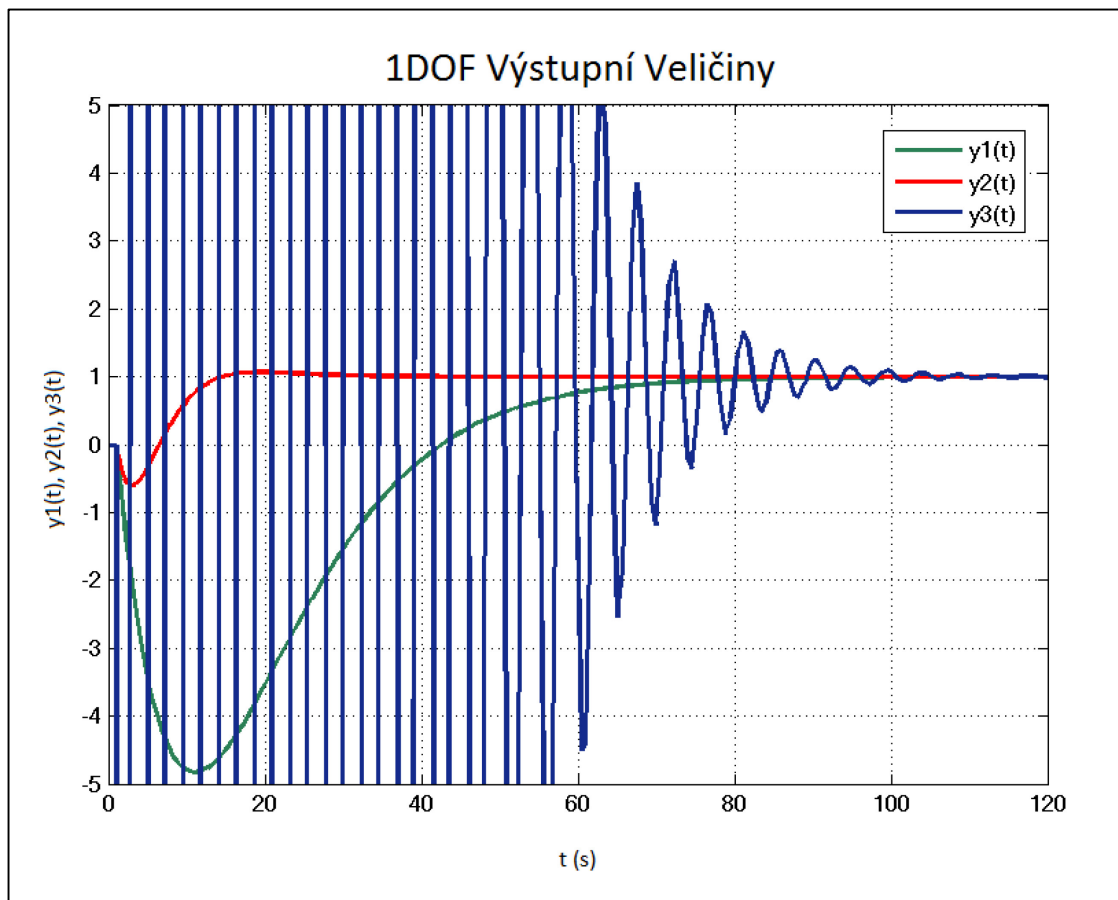


Obr. 14. Vykreslení žádané hodnoty, akční a výstupní veličiny.

Nakonec se všechny 3 akční veličiny porovnají v jednom grafu a následně i všechny 3 výstupní veličiny.



Obr. 15. Porovnání akčních veličin.



Obr. 16. Porovnání výstupních veličin.

Z grafu porovnání výstupních veličin je zřejmé, že všechny regulátory plní svou funkci, tj. dříve či později dosáhnou žádané hodnoty.

První regulátor trpí silným „podkmitem“ do záporných hodnot, což jej v podstatě dělá nepoužitelným. Navíc trvá více než 90 sekund než dosáhne požadované hodnoty.

Druhý regulátor vypadá ze všech nejlépe, požadované hodnoty dosáhne cca za 30 sekund, ale bohužel prvotní „podkmit“ jde do záporných hodnot, což může být nežádoucí.

Třetí regulátor je očividně nepraktický, neboť díky tomu, že póly systému mají imaginární část, je systém periodický. V tomto případě jsou kmity tak intenzivní, že je regulátor v podstatě nepoužitelný. Navíc trvá až dvě minuty, než se kmitání ustálí na požadované hodnotě.

Nejlépe tedy dopadla metoda dvojnásobku dominantního pólu řízeného systému.

3.2 Analýza jednorozměrného spojitého lineárního systému ve stavovém prostoru

3.2.1 Stavový popis systému

Zadání: Určete dvěma různými způsoby stavový popis zadaného systému.

Zadaná diferenciální rovnice:

$$y''(t) + 7y'(t) + 3y(t) = 7u'(t) + 3u(t)$$

$$\frac{1}{3}y''(t) + \frac{7}{3}y'(t) + y(t) = \frac{7}{3}u'(t) + u(t)$$

3.2.1.1 Příímá metoda

Provede se dekompozice původní diferenciální rovnice na dvě rovnice, vždy s nulovou derivací na jedné straně a zavede se pomocná proměnná $z(t)$:

$$z''(t) + 7z'(t) + 3z(t) = u(t)$$

$$7z'(t) + 3z(t) = y(t)$$

Zavede se stavová proměnná tentokrát jako derivace pomocné veličiny $z(t)$:

$$x_1(t) = z(t)$$

$$x_2(t) = z'(t) = x_1'(t)$$

$$x_2'(t) = z''(t) = u(t) - 7x_2(t) - 3x_1(t)$$

$$y(t) = 7x_2(t) + 3x_1(t)$$

$$\begin{bmatrix} x_1'(t) \\ x_2'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -3 & -7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 3 & 7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$$

3.2.1.2 Metoda postupné integrace

Přepíše se diferenciální rovnice tak, aby na pravé straně byly nulové derivace:

$$y''(t) + 7y'(t) - 7u'(t) = -3y(t) + 3u(t)$$

Zavede se první stavová rovnice pomocí pravé strany předešlé rovnice:

$$x_1'(t) = -3y(t) + 3u(t)$$

Dosadí a integruje se:

$$y''(t) + 7y'(t) - 7u'(t) = x_1'(t)$$

$$y'(t) + 7y(t) - 7u(t) = x_1(t)$$

$$y'(t) = x_1(t) - 7y(t) + 7u(t)$$

Zavede se:

$$x_2'(t) = x_1(t) - 7y(t) + 7u(t)$$

$$y'(t) = x_2'(t)$$

$$y(t) = x_2(t)$$

$$x_1'(t) = -3x_2(t) + 3u(t)$$

$$x_2'(t) = x_1(t) - 7x_2(t) + 7u(t)$$

$$\begin{bmatrix} x_1'(t) \\ x_2'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -3 \\ 1 & -7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3 \\ 7 \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$$

Stavové popisy vyšly pomocí každé metody trochu jinak, v dalším bodě se ověří, zda jsou správně.

3.2.2 Převod z vnitřního popisu na vnější

Zadání: Pro oba stavové popisy proveďte zpětný převod z vnitřního popisu na vnější popis, tedy ověřte získané parametry stavového popisu.

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D = C \operatorname{adj}(sI - A) \frac{1}{\det(sI - A)} B + D$$

1)

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -3 & -7 \end{pmatrix} B = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} C = (3 \quad 7) D = 0$$

$$(sI - A)^{-1} = \begin{pmatrix} s & -1 \\ 3 & s+7 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} s+7 & 1 \\ -3 & s \end{pmatrix} \frac{1}{s^2 + 7s + 3} = \begin{pmatrix} \frac{s+7}{s^2 + 7s + 3} & \frac{1}{s^2 + 7s + 3} \\ \frac{-3}{s^2 + 7s + 3} & \frac{s}{s^2 + 7s + 3} \end{pmatrix}$$

$$C(sI - A)^{-1} = (3 \quad 7) \begin{pmatrix} \frac{s+7}{s^2 + 7s + 3} & \frac{1}{s^2 + 7s + 3} \\ \frac{-3}{s^2 + 7s + 3} & \frac{s}{s^2 + 7s + 3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{3s}{s^2 + 7s + 3} & \frac{7s + 3}{s^2 + 7s + 3} \end{pmatrix}$$

$$G(s) = C(sI - A)^{-1} B = \begin{pmatrix} \frac{3s}{s^2 + 7s + 7} & \frac{7s + 3}{s^2 + 7s + 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{7s + 3}{s^2 + 7s + 3}$$

Přenos se přepíše do diferenciální rovnice:

$$y''(t) + 7y'(t) + 3y(t) = 7u'(t) + 3u(t)$$

2)

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -3 \\ 1 & -7 \end{pmatrix} B = \begin{pmatrix} 3 \\ 7 \end{pmatrix} C = (0 \quad 1) D = 0$$

$$(sI - A)^{-1} = \begin{pmatrix} s & 3 \\ -1 & s + 7 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} s + 7 & -3 \\ 1 & s \end{pmatrix} \frac{1}{s^2 + 7s + 3} = \begin{pmatrix} \frac{s + 7}{s^2 + 7s + 3} & \frac{3}{s^2 + 7s + 3} \\ \frac{-1}{s^2 + 7s + 3} & \frac{s}{s^2 + 7s + 3} \end{pmatrix}$$

$$C(sI - A)^{-1} = (0 \quad 1) \begin{pmatrix} \frac{s + 7}{s^2 + 7s + 3} & \frac{3}{s^2 + 7s + 3} \\ \frac{1}{s^2 + 7s + 3} & \frac{s}{s^2 + 7s + 3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{s^2 + 7s + 3} & \frac{s}{s^2 + 7s + 3} \end{pmatrix}$$

$$G(s) = C(sI - A)^{-1} B = \begin{pmatrix} \frac{1}{s^2 + 7s + 3} & \frac{s}{s^2 + 7s + 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3 \\ 7 \end{pmatrix} = \frac{7s + 3}{s^2 + 7s + 3}$$

Přenos se přepíše do diferenciální rovnice:

$$y''(t) + 7y'(t) + 3y(t) = 7u'(t) + 3u(t)$$

Vnější popisy obou stavových popisů vyšly stejně, výpočty jsou tedy správné.

3.2.3 Řiditelnost a pozorovatelnost systému

Zadání: Ověřte říditelnost a pozorovatelnost systému.

Pro zjištění říditelnosti a pozorovatelnosti se použijí koeficienty stavové rovnice z přechodného příkladu.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -3 & -7 \end{pmatrix} B = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} C = (3 \quad 7) D = 0$$

3.2.3.1 Řiditelnost systému

$$P_C = (B \quad AB) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -7 \end{pmatrix}$$

$$|P_C| = -1 \neq 0$$

Determinant matice P_C není roven 0, lze tedy říci, že systém je říditelný a dosažitelný.

3.2.3.2 Pozorovatelnost systému

$$P_O = \begin{pmatrix} C \\ CA \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 & 1 \\ -21 & -46 \end{pmatrix}$$

$$|P_O| = -117 \neq 0$$

Determinant matice P_O není roven 0, lze tedy říci, že systém je pozorovatelný a rekonstruovatelný.

3.2.4 Fundamentální matice systému

Zadání: Vypočítejte standardní fundamentální matici systému.

Standardní fundamentální rovnice systému se vypočítá ze vztahu:

$$\phi(t) = L^{-1} \{ (sI - A)^{-1} \}$$

Použije se k ní matice A , která se vypočítala pomocí přímé metody:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -3 & -7 \end{pmatrix}$$

$$(sI - A)^{-1} = \begin{pmatrix} s & -1 \\ 3 & s+7 \end{pmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} s+7 & 1 \\ -3 & s \end{pmatrix} \frac{1}{s^2 + 7s + 3} = \begin{pmatrix} \frac{s+7}{s^2 + 7s + 3} & \frac{1}{s^2 + 7s + 3} \\ \frac{-3}{s^2 + 7s + 3} & \frac{s}{s^2 + 7s + 3} \end{pmatrix}$$

$$\phi(t) = L^{-1} \left\{ \begin{pmatrix} \frac{s+7}{s^2 + 7s + 3} & \frac{1}{s^2 + 7s + 3} \\ \frac{-3}{s^2 + 7s + 3} & \frac{s}{s^2 + 7s + 3} \end{pmatrix} \right\} = L^{-1} \left\{ \begin{pmatrix} \frac{s+7}{\left(s + \frac{7}{2}\right)^2 - \frac{37}{4}} & \frac{1}{\left(s + \frac{7}{2}\right)^2 - \frac{37}{4}} \\ \frac{-3}{\left(s + \frac{7}{2}\right)^2 - \frac{37}{4}} & \frac{s}{\left(s + \frac{7}{2}\right)^2 - \frac{37}{4}} \end{pmatrix} \right\}$$

$$\phi(t) = L^{-1} \left\{ \begin{array}{l} \left(\begin{array}{cc} \frac{s + \frac{7}{2}}{\left(s + \frac{7}{2}\right)^2 - \frac{37}{4}} + \frac{7}{\sqrt{37}} \frac{\frac{\sqrt{37}}{2}}{\left(s + \frac{7}{2}\right)^2 - \frac{37}{4}} & \frac{2}{\sqrt{37}} \frac{\frac{\sqrt{37}}{2}}{\left(s + \frac{7}{2}\right)^2 - \frac{37}{4}} \\ -\frac{6}{\sqrt{37}} \frac{\frac{\sqrt{37}}{2}}{\left(s + \frac{7}{2}\right)^2 - \frac{37}{4}} & \frac{s + \frac{7}{2}}{\left(s + \frac{7}{2}\right)^2 - \frac{37}{4}} - \frac{7}{\sqrt{37}} \frac{\frac{\sqrt{37}}{3}}{\left(s + \frac{7}{2}\right)^2 - \frac{37}{4}} \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{cc} e^{\frac{2}{3}t} \cos\left(\frac{\sqrt{37}}{2}t\right) + \frac{7}{\sqrt{37}} \left(e^{-\frac{7}{2}t} \sin\left(-\frac{\sqrt{37}}{2}t\right) \right) & \frac{2}{\sqrt{37}} e^{\frac{7}{2}t} \sin\left(-\frac{\sqrt{37}}{2}t\right) \\ -\frac{6}{\sqrt{37}} e^{-\frac{7}{2}t} \sin\left(-\frac{\sqrt{37}}{2}t\right) & e^{\frac{7}{2}t} \cos\left(\frac{\sqrt{37}}{2}t\right) - \frac{7}{\sqrt{7}} \left(e^{-\frac{7}{2}t} \sin\left(-\frac{\sqrt{37}}{2}t\right) \right) \end{array} \right) \end{array} \right\}$$

3.2.5 Stavová rovnice pro nulové počáteční podmínky

Zadání: Vyřešte stavovou rovnici pro nulové počáteční podmínky a $u(t) = 1(t)$. Odtud určete výstup ze systému. Výsledek srovnajte s výsledkem přechodové funkce.

Je použit vzorec:

$$x(t) = \phi(t)x(0) + \int_0^t \phi(t-\tau)Bu(\tau)d\tau$$

Má se řešit stavová rovnice pro nulové počáteční podmínky, tedy $x(0) = 0$ a $u(t) = 1$, kde

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$x(t) = \int_0^t \phi(t-\tau)Bd\tau = \int_0^t \begin{pmatrix} i & j \\ k & l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} d\tau$$

, kde

$$i = e^{-\frac{7}{2}t} \cos\left(\frac{\sqrt{37}}{2}t\right) + \frac{7}{\sqrt{37}} \left(e^{-\frac{7}{2}t} \sin\left(-\frac{\sqrt{37}}{2}t\right) \right)$$

$$j = \frac{2}{\sqrt{37}} e^{-\frac{7}{2}t} \sin\left(-\frac{\sqrt{37}}{2}t\right)$$

$$k = -\frac{6}{\sqrt{37}} e^{-\frac{7}{2}t} \sin\left(-\frac{\sqrt{37}}{2}t\right)$$

$$l = e^{-\frac{7}{2}t} \cos\left(\frac{\sqrt{37}}{2}t\right) - \frac{7}{\sqrt{7}} \left(e^{-\frac{7}{2}t} \sin\left(-\frac{\sqrt{37}}{2}t\right) \right)$$

$$x(t) = \int_0^t \begin{pmatrix} j \\ l \end{pmatrix} d\tau$$

, kde

$$j = \frac{2}{\sqrt{37}} e^{-\frac{7}{2}(t-\tau)} \sin\left(-\frac{\sqrt{37}}{2}(t-\tau)\right)$$

$$l = e^{-\frac{7}{2}(t-\tau)} \cos\left(\frac{\sqrt{37}}{2}(t-\tau)\right) - \frac{7}{\sqrt{7}} \left(e^{-\frac{7}{2}(t-\tau)} \sin\left(-\frac{\sqrt{37}}{2}(t-\tau)\right) \right)$$

Zavede se substituce $\tau = (t - \tau)$ a následně se integruje podle vzorců:

$$\int_0^t e^{a\tau} \sin(\omega\tau) d\tau = \left[\frac{e^{a\tau}}{a^2 + \omega^2} (a \sin(\omega\tau) - \omega \cos(\omega\tau)) \right]_0^t = \frac{e^{at}}{a^2 + \omega^2} (a \sin(\omega t) - \omega \cos(\omega t)) + \frac{\omega}{a^2 + \omega^2}$$

$$\int_0^t e^{a\tau} \cos(\omega\tau) d\tau = \left[\frac{e^{a\tau}}{a^2 + \omega^2} (a \cos(\omega\tau) + \omega \sin(\omega\tau)) \right]_0^t = \frac{e^{at}}{a^2 + \omega^2} (a \cos(\omega t) + \omega \sin(\omega t)) - \frac{a}{a^2 + \omega^2}$$

$$x(t) = \begin{pmatrix} \frac{2}{\sqrt{37}} \left[-e^{-\frac{7}{2}t} \sin\left(-\frac{\sqrt{37}}{2}t\right) - \frac{\sqrt{37}e^{-\frac{7}{2}t}}{2} \cos\left(\frac{\sqrt{37}}{2}t\right) + \frac{\sqrt{37}}{2} \right] \\ -e^{-\frac{7}{2}t} \cos\left(\frac{\sqrt{37}}{2}t\right) + \frac{\sqrt{2}e^{-\frac{7}{2}t}}{2} \sin\left(\frac{\sqrt{37}}{2}t\right) - 1 - \\ \frac{2}{\sqrt{37}} \left[-e^{-\frac{7}{2}t} \sin\left(\frac{\sqrt{37}}{2}t\right) - \frac{\sqrt{37}e^{-\frac{7}{2}t}}{2} \cos\left(\frac{\sqrt{37}}{2}t\right) + \frac{\sqrt{37}}{2} \right] \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
y(t) = Cx(t) &= 3 \left\{ \frac{2}{\sqrt{37}} \left[-e^{-\frac{7}{2}t} \sin\left(\frac{\sqrt{37}}{2}t\right) - \frac{\sqrt{37}e^{-\frac{7}{2}t}}{2} \cos\left(\frac{\sqrt{37}}{2}t\right) + \frac{\sqrt{37}}{2} \right] + \right. \\
&\quad \left. \begin{aligned} & -e^{-\frac{7}{2}t} \cos\left(\frac{\sqrt{37}}{2}t\right) + \frac{\sqrt{37}e^{-\frac{7}{2}t}}{2} \sin\left(-\frac{\sqrt{37}}{2}t\right) - 1 - \\ & \left. \frac{2}{\sqrt{37}} \left[-e^{-\frac{7}{2}t} \sin\left(\frac{\sqrt{37}}{2}t\right) - \frac{\sqrt{37}e^{-\frac{7}{2}t}}{2} \cos\left(\frac{\sqrt{37}}{2}t\right) + \frac{\sqrt{37}}{2} \right] \right\} = \\
h(t) &= 7 \left(\frac{1 + \frac{3}{7(-\frac{7}{2} - \frac{\sqrt{37}}{2})}}{-(-\frac{7}{2} - \frac{\sqrt{37}}{2}) + -\frac{7}{2} + \frac{\sqrt{37}}{2}} e^{(-\frac{7}{2} + \frac{\sqrt{37}}{2})t} + \frac{-\frac{3}{7(-\frac{7}{2} - \frac{\sqrt{37}}{2})}}{-(-\frac{7}{2} + \frac{\sqrt{37}}{2})} \left(1 - e^{(-\frac{7}{2} + \frac{\sqrt{37}}{2})t}\right) \right. \\
&\quad \left. - \frac{1 + \frac{3}{7(-\frac{7}{2} - \frac{\sqrt{37}}{2})}}{-(-\frac{7}{2} - \frac{\sqrt{37}}{2}) + (-\frac{7}{2} + \frac{\sqrt{37}}{2})} e^{(-\frac{7}{2} - \frac{\sqrt{37}}{2})t} \right)
\end{aligned}
\end{aligned}$$

Z výsledku vyplývá, že přechodová funkce vypočtena pomocí standardní fundamentální matice je totožná jako přechodová funkce vypočítaná v přechozích příkladech.

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce je vytvoření opory předmětu Systems Theory, což je anglická obdoba předmětu Teorie Systémů, který se vyučuje v pátém semestru bakalářského studijního programu oboru informačních a řídicích technologií na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně. Opora zahrnuje teoretický aparát a řešené příklady daného předmětu v českém jazyce a jejich anglický překlad, který je uveřejněný na internetu formou webových stránek. Tyto opory v anglickém jazyce slouží jako studijní materiály zahraničním studentům na naší škole.

Teoretická část začíná stručným popsání HTML jazyka (značky, struktura dokumentu, barvy, vkládání obrázků apod.), který je nedílnou součástí při vytváření webových stránek. V další části je shrnuta náplň předmětu. Teoretický aparát je zde popsán stručnou a jasnou formou a rozčleněn do jednotlivých tematických celků. Teoretická část je ukončena slovníkem anglické terminologie, který je v příloze P I. Jedná se o slovník česko-anglický obsahující zhruba 75 odborných výrazů, které se objevují v teoretickém aparátu.

V praktické části je řešen komplexní příklad, který se dělí na menší příklady, které na sebe vzájemně navazují a doplňují se. To studentům umožní větší pochopení probírané látky a porozumění dané problematice. K řešení příkladů je využit i simulační software Matlab/Simulink. Další krok praktické části je vytvoření elektronických opor v anglickém jazyce. Studentům je prezentován teoretický aparát formou snímkové prezentace v PowerPointu a i jako veřejně přístupné webové stránky. V obou dvou formách jsou prezentovány i příklady objevující se v teoretické části.

Doufám, že mnou vytvořené studijní opory dobře poslouží studentům předmětu Systems Theory a dá jim potřebné znalosti k úspěšnému složení zkoušky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] 5.1 TEORIE OBECNÝCH A TECHNICKÝCH SYSTÉMŮ [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: http://www.kip.zcu.cz/kursy/svt/svt_www/5_soubory/5_1.html
- [2] PROKOP, Roman, Radek MATUŠŮ a Zdenka PROKOPOVÁ. Teorie automatického řízení: lineární spojité dynamické systémy. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2006, 102 s. ISBN 8073183692.
- [3] DOSTÁL, Petr a František GAZDOŠ. Řízení technologických procesů. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta aplikované informatiky. Ústav řízení procesů, 2006, 98 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-7318-465-6.
- [4] FRANKLIN, Gene F., Abbas EMAMI-NAEINI a J. David POWELL. Feedback control of dynamic systems. 5th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2005, xvii, 910 s. ISBN 0-13-149930-0.
- [5] PROKOP, Roman. Základy automatizace pro bakalářské studium. Zlín: FT VUT, 1998, 52 s. ISBN 8021412518.
- [6] PEKAŘ, Libor. Syllabus seminářů předmětu Teorie systémů. In: Výuka na FAI [online]. ver2010b [cit. 2017-11-16]. Dostupné po přihlášení z: http://vyuka.fai.utb.cz/file.php?file=%2F175%2Fteorie_systemu%2FSyllabus_predmetu_Teorie
- [7] OGATA, Katsuhiko. System dynamics. 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall, c2004, ix, 768 s. ISBN 0-13-142462-9.
- [8] NOVÁK, M.; LANGEROVÁ, P. Dictionary of mathematical terminology (Czech - English / English Czech) - Slovník matematické terminologie (Česko - anglický / anglicko - český). Edice - Slovník. Edice - Slovník. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2015. 140 s. ISBN: 978-80-244-4743- 8.
- [9] BUDAI, David, Petr BROŽA a Jan POLZER. Bible Microsoft Office 2010: [přůvodce pro každého]. Brno: Extra Publishing, c2010, v, 334 s. ISBN 978-80-7413-118-9. Dostupné také z: http://toc.nkp.cz/NKC/201101/contents/nkc20102156344_1.pdf
- [10] BROŽA, Petr. Tvorba www stránek pro úplné začátečníky. 5., aktualiz. vyd. Brno: Computer Press, 2004, x, 149 s. Bestseller. ISBN 8025101649.

- [11] BROWN, Tiffany B., Kerry BUTTERS a Sandeep PANDA. HTML5 okamžitě: [ovládněte HTML5 za víkend]. Brno: Computer Press, 2014, 256 s. ISBN 978-80-251-4296-7.
- [12] HORT a FILOVÁ. *Matematický slovník* [online]. 1998 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wmath/dictionary/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**Seznam symbolů**

S	System
P	Prvky systému
R	Relace mezi prvky systému
t	Operátor času
A	Matice systému
B	Matice buzení
C	Matice výstupní
D	Matice převodu
I	Jednotková matice
$F(s)$	Obraz Laplaceovy transformace
$A(j\omega)$	Amplituda frekvenčního přenosu
$G(j\omega)$	Frekvenční přenos
$G(s)$	Přenosová funkce
s	Operátor komplexní proměnné
τ	Časová konstanta
$h(t)$	Přechodová funkce
$i(t)$	Impulsní funkce
j	Imaginární jednotka
L	Operátor přímé Laplaceovy transformace
L^{-1}	Operátor zpětné Laplaceovy transformace
n_i	Nuly přenosu
p_i	Póly přenosu
P_C	Matice říditelnosti

P_o	Matice pozorovatelnosti
ω	Úhlová frekvence
$\varphi(\omega)$	Fázová frekvenční charakteristika
$U(s)$	Laplaceův obraz vstupní veličiny
$Y(s)$	Laplaceův obraz výstupní veličiny
$\Phi(t)$	Fundamentální matice systému
$q(s), p(s)$	Čítatel a jmenovatel přenosu zpětnovazební části regulátoru
$b(s), a(s)$	Čítatel a jmenovatel přenosu řízeného systému
$g_w(s), f_w(s)$	Čítatel a jmenovatel přenosu žádané veličiny

Seznam zkratk

HTML	HyperText Markup Language (odkazovací značkovací jazyk)
MS	Microsoft
WWW	World Wide Web (celosvětová síť)
API	Application Programming Interface (rozhraní pro programování aplikací)
L-T	Laplaceova transformace
LSDS	Lineární spojité dynamické systémy
SISO	Single-input /single output (jednorozměrový)
MIMO	Multi-input /multi output (mnoharozměrný)
DR	Diferenciální rovnice
NSD	Největší společný dělitel
Re	Reálná část
Im	Imaginární část
deg	Stupeň polynomu
1DOF	Systém s jedním stupněm volnosti

- PDF Portable Document Format (přenosný formát dokumentů)
- JPG Formát ztrátové komprese obrázků
- GIF Graphics Interchange Format (grafický formát určený pro rastrovou grafiku)
- PNG Portable Network Graphics (grafický formát určený pro rastrovou grafiku)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Bod frekvenčního přenosu v komplexní rovině [3].....	15
Obr. 2. Frekvenční charakteristika systému 3. řádu [7].....	16
Obr. 3. 1DOF systém řízení [6].	24
Obr. 4. Vykreslení impulsní funkce pomocí Matlabu a srovnání s analytickým výpočtem.	36
Obr. 5. Screenshot skriptu z prostředí Matlabu pro vykreslení požadovaných grafů.	38
Obr. 6. Vykreslení přechodové funkce pomocí Matlabu a srovnání s analytickým výpočtem.	39
Obr. 7. Screenshot skriptu z prostředí Matlabu pro vykreslení požadovaných grafů.	40
Obr. 8. Nyquistova křivka vykreslená pomocí Matlabu.	41
Obr. 9. Screenshot skriptu z prostředí Matlabu pro vykreslení Bodeho křivky.	43
Obr. 10. Bodeho křivka vykreslená pomocí Matlabu.	43
Obr. 11. Schéma zapojení regulátoru ve struktuře 1DOF.....	48
Obr. 12. Vykreslení žádané hodnoty, akční a výstupní veličiny.	48
Obr. 13. Vykreslení žádané hodnoty, akční a výstupní veličiny.	49
Obr. 14. Vykreslení žádané hodnoty, akční a výstupní veličiny.	49
Obr. 15. Porovnání akčních veličin.	50
Obr. 16. Porovnání výstupních veličin.	51

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Přehled základních barev vyjádřené slovně a v hexadecimální soustavě [10].....	30
Tab. 2. Hodnoty úhlové frekvence zvolené pro vykreslení Nyquistovy křivky.	42
Tab. 3. Hodnoty úhlové frekvence zvolené pro vykreslení Bodeho křivky.	44

SEZNAM PŘÍLOH

P I Slovník anglické terminologie předmětu Systems Theory

PŘÍLOHA P I: SLOVNÍK ANGLICKÉ TERMINOLOGIE PŘEDMĚTU SYSTEMS THEORY

Česko-anglický slovník vybraných pojmů předmětu Systems Theory [2; 8; 12].

Český výraz	Anglický výraz
adjungovaná matice	adjoint matrix
algebraický tvar komplexního čísla	algebraic form of a complex number
amplituda	amplitude
analytické řešení	analytical solution
aperiodický	aperiodic
Bodeho křivky	Bode plots
budící signál	excitation signal
číslo komplexně sdružené	complex conjugate
čítatel	numerator
derivace	derivative
determinant	determinant
diferenciální rovnice	differential equation
diofantická rovnice	Diophantine equation
Diracův impuls	Dirac impuls
dopravní úloha	transport problem
dosažitelnost	reachability
Euklidův algoritmus	Euclidean algorithm
fázový posun	phase shift
Fourierova transformace	Fourier transform
fundamentální matice	fundamental matrix
frekvenční charakteristika	frequency response

Český výraz	Anglický výraz
frekvenční přenos	frequency transfer function
Heavisidův rozvoj	Heaviside cover-up method
hodnota matice	eigenvalue of a matrix
homogenní	homogeneous
Hurwitzovo kritérium stability	Routh-Hurwitz stability criterion
charakteristická rovnice	characteristic equation
imaginární jednotka	imaginary unit
imaginární složka komplexní funkce	imaginary part of a complex function
impuls	impulse
impulsní funkce	Dirac delta function (impulse function)
impulsní charakteristika	impulse response
integrace	integration
inverzní	inverse
jednorozměrný systém	Single-Input Single-Output (SISO) system
jednotková matice	identity matrix (unit matrix)
jednotkový skok	unit step
jmenovatel	denominator
koeficient	coefficient
komplexně sdružené kořeny	complex conjugate roots
komplexní rovina	complex plane
komplexní číslo	complex number
kořen (polynomu)	root
kritérium	criterion
kvadrant	quadrant
Laplaceova (integrální) transformace	Laplace transformation

Český výraz	Anglický výraz
matice	matrix
metoda neurčitých koeficientů	method of undetermined coefficients
metoda postupné integrace	method of successive integration
metoda přímé integrace	direct integration method
Michaljevovo kritérium stability	Mikhailov stability criterion
minimálně-fázový	minimum-phase
nehomogenní	inhomogeneous
největší společný dělitel (NSD)	greatest common divisor (GCD)
Nyquistova křivka	Nyquist plot
parametrický tvar	parametric form
parciální zlomek	partial fraction
partikulární	particular
periodický	periodic
počáteční podmínka	initial condition
polynom	polynomial
pozorovatelnost	observability
pól (kořen jmenovatele přenosu)	pole
proporcionální	proportional
přechodová funkce	step function
přechodová charakteristika	step response
překmit	overshoot
přenosová funkce (přenos)	transfer function
racionální lomená funkce	rational function
regulační obvod, řídicí smyčka	control loop
regulátor	controller

Český výraz	Anglický výraz
rekonstruovatelnost	reconstructability
věta o residuích	residue
Routh-Schurovo kritérium stability	Routh's stability criterion
řád (systému)	order
řiditelnost	controllability
soustava rovnic	system of equations
stabilita	stability
stacionární	stationary
stavový popis	state-space representation
stavový prostor	state-space
striktně ryzí	strictly proper
systém s jedním stupněm volnosti (1DOF)	One-Degree-Of-Freedom system
úhlová frekvence	angular frequency
zesílení	gain
zpětná Laplaceova transformace	inverse Laplace transform(ation)
zpětná vazba	feedback
žádaná veličina	reference signal