

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vývoj aplikace pro výuku regulační techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Václav ŠPETA**
Osobní číslo: **E13B0088P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Vývoj aplikace pro výuku regulační techniky**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Vytvořte uživatelsky přívětivou aplikaci v prostředí Matlab pro výuku předmětu Regulační technika.

1. Popište základní funkční bloky používané v regulační technice a elektrických pohonech z hlediska frekvenčních charakteristik a chování při přechodových dějích.
2. Vytvořte aplikaci pro zobrazení frekvenčních charakteristik pro uživatelem zvolenou soustavu a regulátor s možností nastavení všech parametrů.
3. Doplňte aplikaci o zobrazení časových průběhů veličin v uzavřené smyčce.
4. Použijte aplikaci k návrhu regulátoru proudu pro stejnosměrný cize buzený motor.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Kroneisl**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na tvorbu uživatelsky přívětivé aplikace v prostředí MATLAB pro výuku předmětu regulační techniky.

Klíčová slova

P-regulátor, PI-regulátor, regulační technika, regulace, aplikace, MATLAB, frekvenční charakteristiky, stabilita, uzavřená smyčka, ...

Abstract

The bachelor's thesis is focused on creating a user-friendly application in MATLAB for teaching the subject of control technology.

Key words

P-controller, PI-controller, control technology, regulation, application, MATLAB, frequency characteristics, stability, closed loop, ...

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 30.5.2016

Jméno příjmení

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalovi Kroneislovi, za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 POUŽITÉ TYPY SOUSTAV A REGULÁTORŮ	11
1.1 KONSTANTA.....	11
1.2 APERIODICKÝ ČLEN.....	14
1.3 INTEGRAČNÍ ČLEN.....	16
1.4 P-REGULÁTOR.....	19
1.5 PI-REGULÁTOR.....	19
2 STABILITA REGULOVANÉ SOUSTAVY	22
2.1 NYQUISTOVO KRITÉRIUM STABILITY.....	22
2.2 MOŽNÉ ODEZVY SOUSTAVY NA SKOK POŽADAVKU.....	23
2.2.1 <i>Příklady nestabilního systému</i>	23
2.2.2 <i>Příklady stabilního systému</i>	24
2.2.3 <i>Příklady systému na mezi stability</i>	25
3 LAPLACEOVA A FOURIEROVA TRANSFORMACE	26
3.1 LAPLACEOVA TRANSFORMACE.....	26
3.2 FOURIEROVA TRANSFORMACE.....	26
3.3 POUŽITÍ TRANSFORMACÍ.....	28
4 VYSVĚTLENÍ A UKÁZKY NĚKTERÝCH ČÁSTÍ KÓDŮ	29
4.1 ALGORITMUS PRO ZOBRAZENÍ REAKCE NA JEDNOTKOVÝ SKOK.....	29
4.1.1 <i>Přenosy F_w</i>	33
4.2 ALGORITMUS PRO VÝPOČET BEZPEČNOSTI VE FÁZI.....	35
5 POPIS APLIKACE	37
6 POUŽITÍ APLIKACE PRO REGULACI MOTORU	40
ZÁVĚR	42
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	43

Úvod

V předmětu regulační technika se studenti učí navrhnout stabilní regulační systém podle frekvenčních charakteristik. Což může být poněkud náročné a zdlouhavé, má-li student kreslit jednotlivé charakteristiky tak, aby to bylo přehledné a dalo se z toho něco vyčíst. Kvůli tomu byla vytvořena aplikace, kde se snadno vykreslí na obrazovku všechny charakteristiky a mohou se i velmi jednoduše měnit jejich parametry. Studenti si potom mohou vyzkoušet, jak se která charakteristika změní při změně parametrů regulačního systému. Aplikace také umí vypočítat frekvenci řezu a bezpečnost ve fázi pro zadané hodnoty. Dále zobrazuje reakci na jednotkový skok, kde lze vidět jak se systém zachová při skokové změně.

Předkládaná práce je zaměřena na popis této aplikace.

Seznam symbolů a zkratk

F	Přenos
F_o	Přenos otevřené smyčky
F_w	Přenos uzavřené smyčky
k	Zesílení
τ	Časová konstanta
U_n	Jmenovité napětí (V)
I_n	Jmenovitý proud (I)
N_n	Jmenovité otáčky ($ot./min$)
R_a	Odpor kotvy (Ω)
L_a	Indukčnost kotvy (mH)
P	Proporcionální
PI	Proporcionálně integrační
MATLAB	Matrix laboratory

1 Použité typy soustav a regulátorů

V aplikaci je na výběr mezi proporcionálním regulátorem a proporcionálně integračním regulátorem, který reguluje soustavu složenou ze dvou členů. Lze si vybrat mezi konstantou, aperiodickým nebo integračním členem. Pokud chceme simulovat regulaci pouze jednoho členu, lze v posledním bloku vybrat položku „nic“.

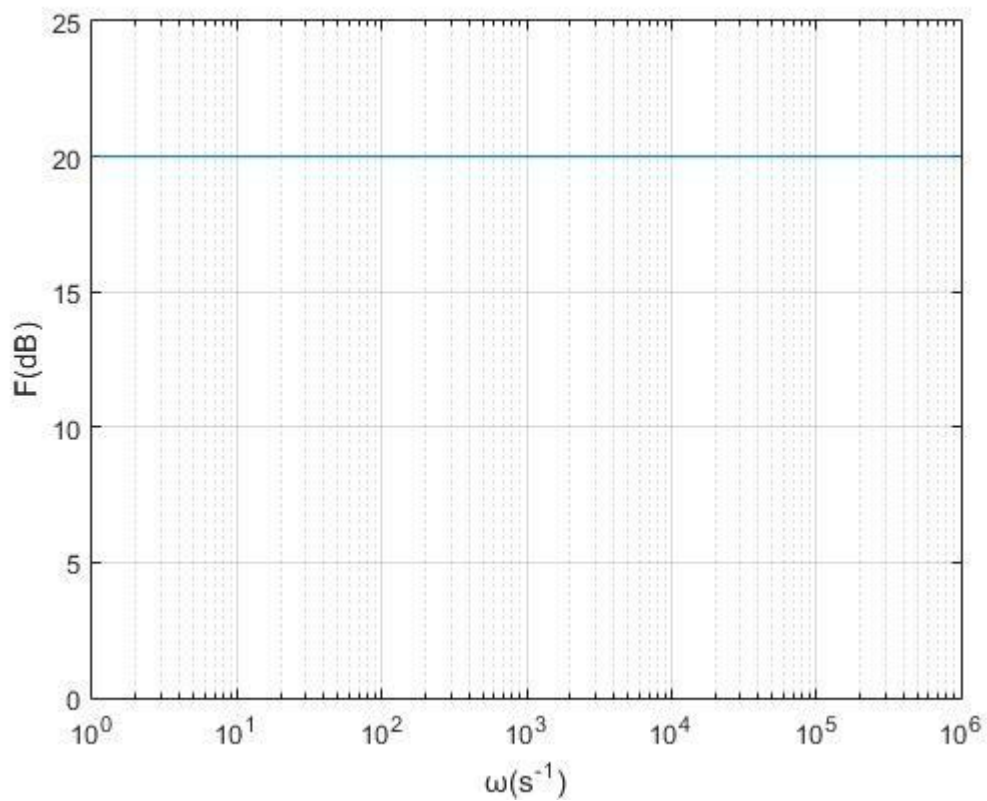
1.1 Konstanta

Konstanta nebo-li proporcionální člen je takový, který má výstupní signál přímo úměrný vstupnímu signálu a změny vstupu se přenášejí okamžitě na výstup, bez zpoždění.

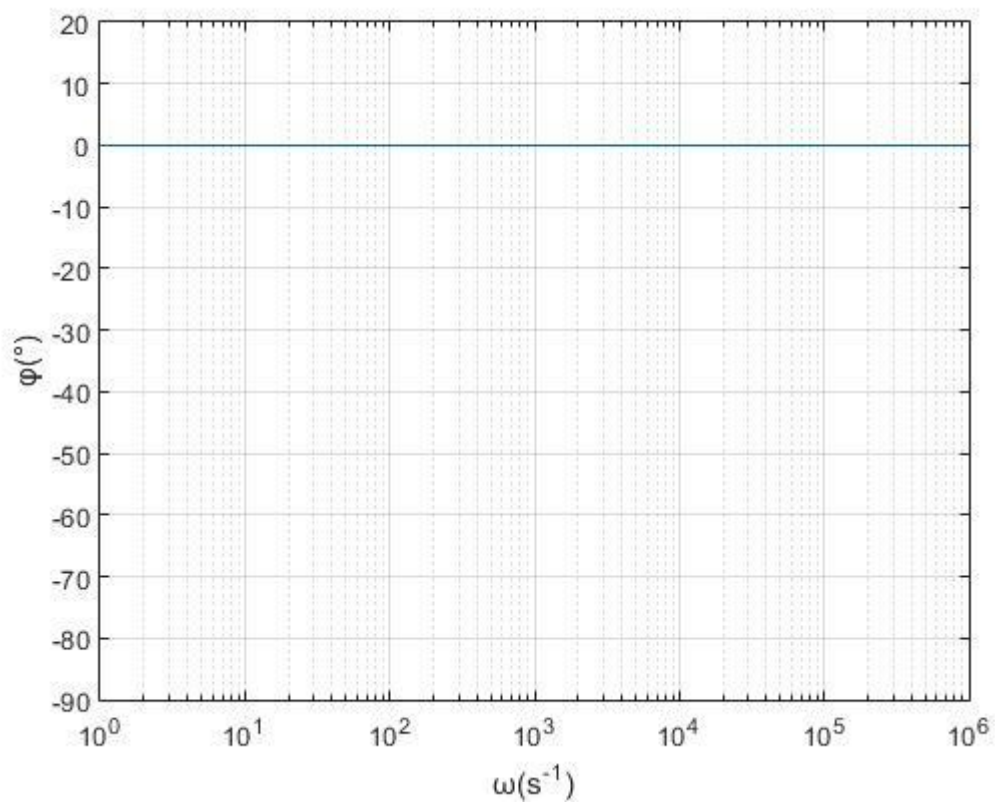
Frekvenční přenos:

$$F(j\omega) = k \quad (1.1)$$

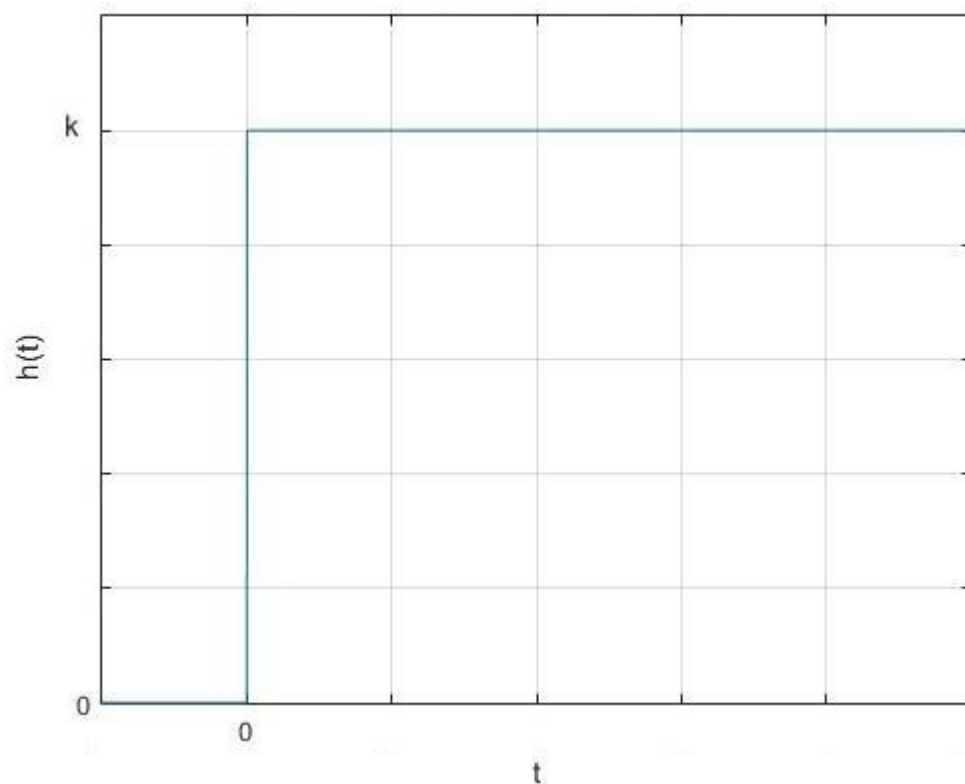
Výšku amplitudové frekvenční charakteristiky lze vypočítat jako $F = 20 \cdot \log(k)$.



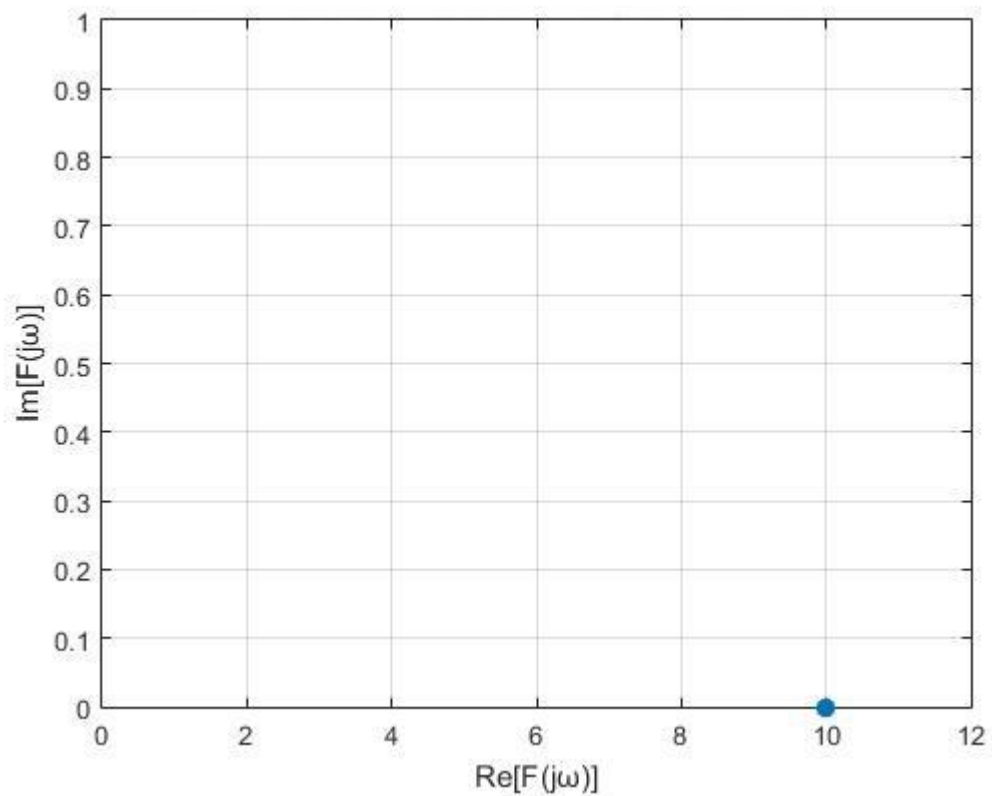
Obr. 1.1 Amplitudová frekvenční charakteristika konstanty



Obr. 1.2 Fázová frekvenční charakteristika konstanty



Obr. 1.3 Přejchodová charakteristika konstanty



Obr. 1.4 Frekvenční charakteristika v komplexní rovině konstanty

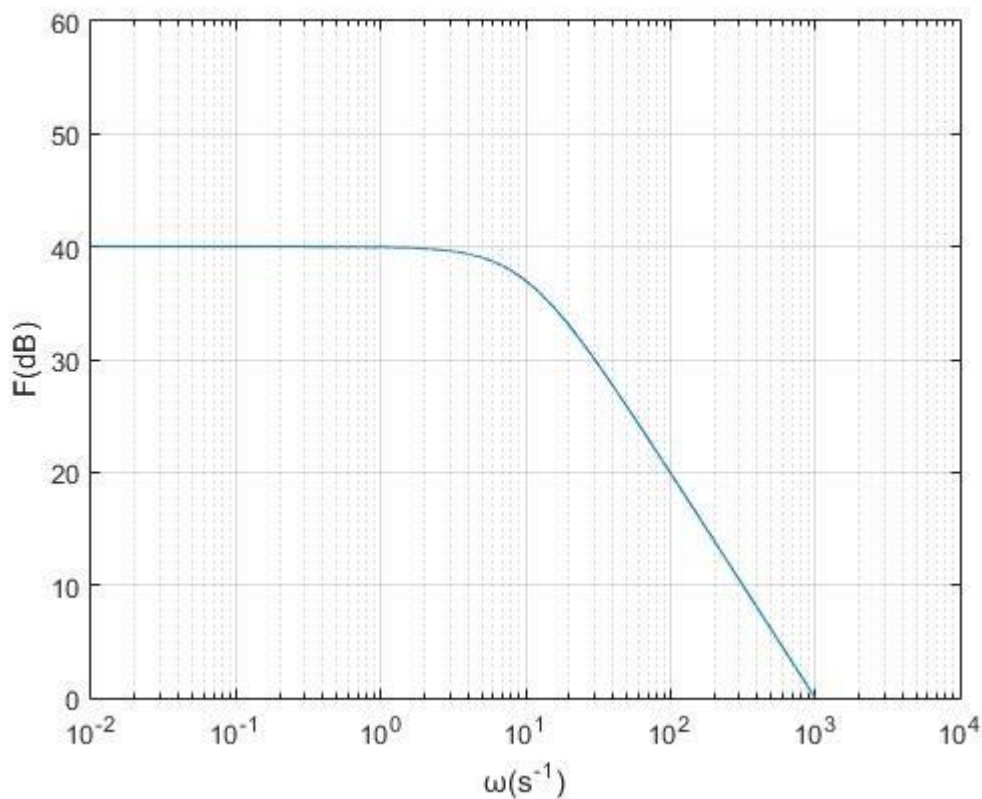
1.2 Aperiodický člen

Aperiodický člen patří do kategorie zpožďujících členů prvního řádu. Výstup neopisuje vstupní signál okamžitě, ale s určitým zpožděním. Například, když přivedeme na vstup sinusový signál, tak na výstupu bude fázově zpožděn [2].

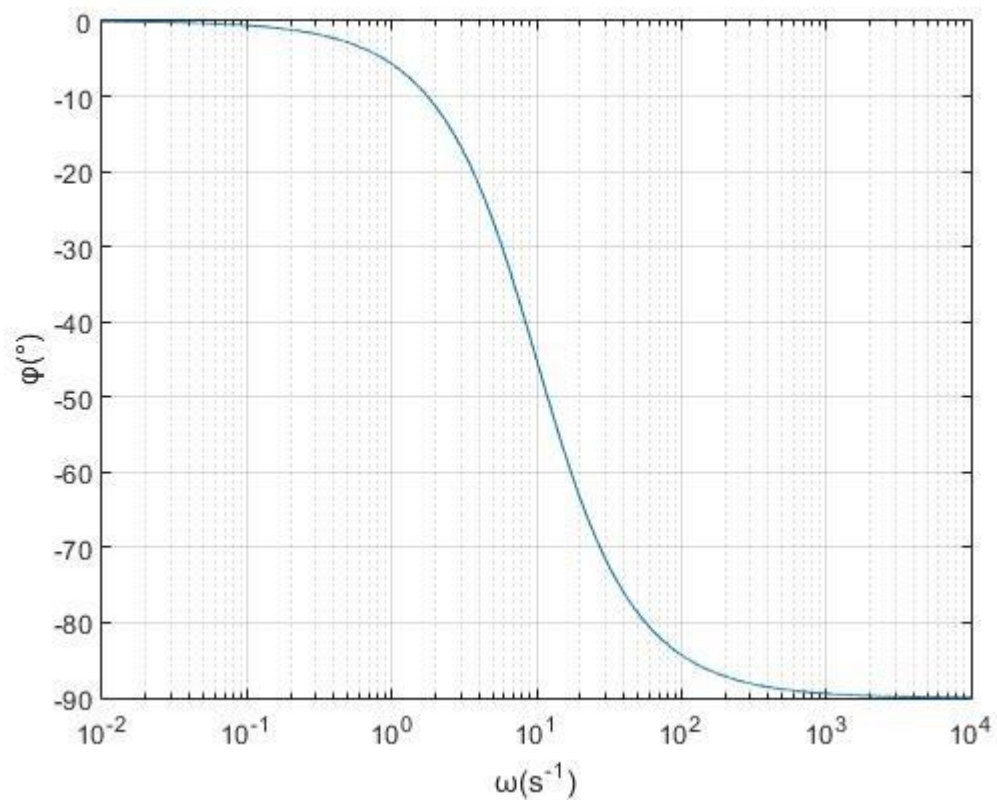
Amplitudová frekvenční charakteristika je nejprve vodorovná a v určitém bodě se zlomí a klesá se sklonem 20 dB na dekádu. Bod tohoto zlomu se vypočte jako $\frac{1}{\tau}$. Dále můžeme spočítat výšku vodorovné části charakteristiky v dB jako $20 \cdot \log(k)$

Frekvenční přenos:

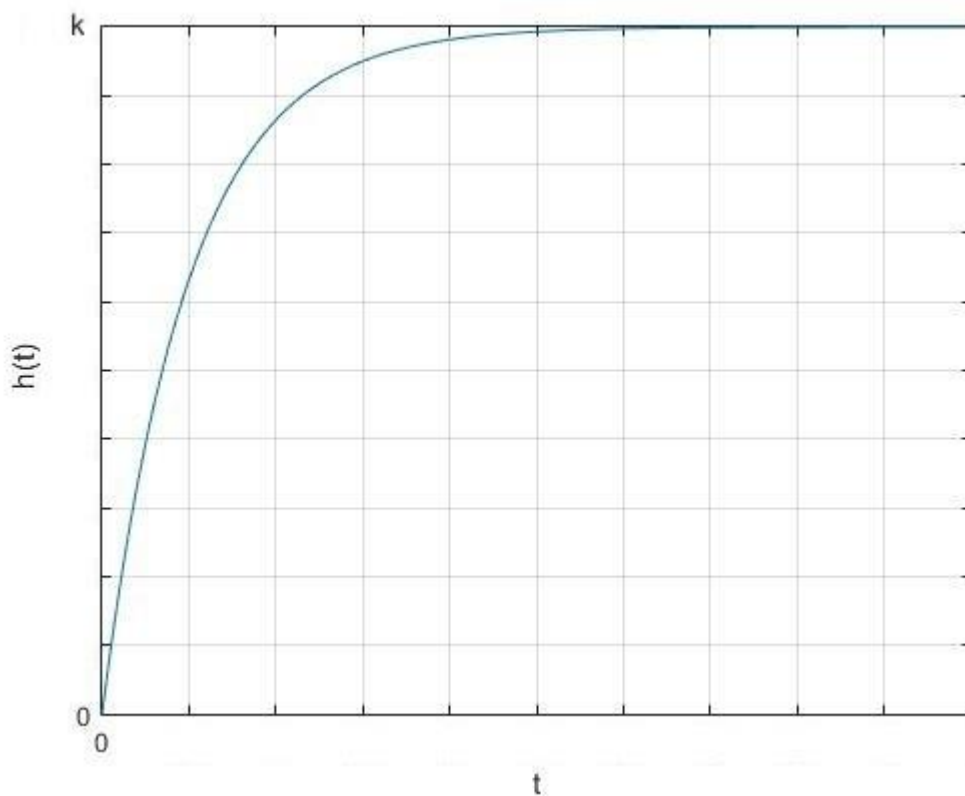
$$F(j\omega) = \frac{k}{1 + j\omega\tau} \quad (1.2)$$



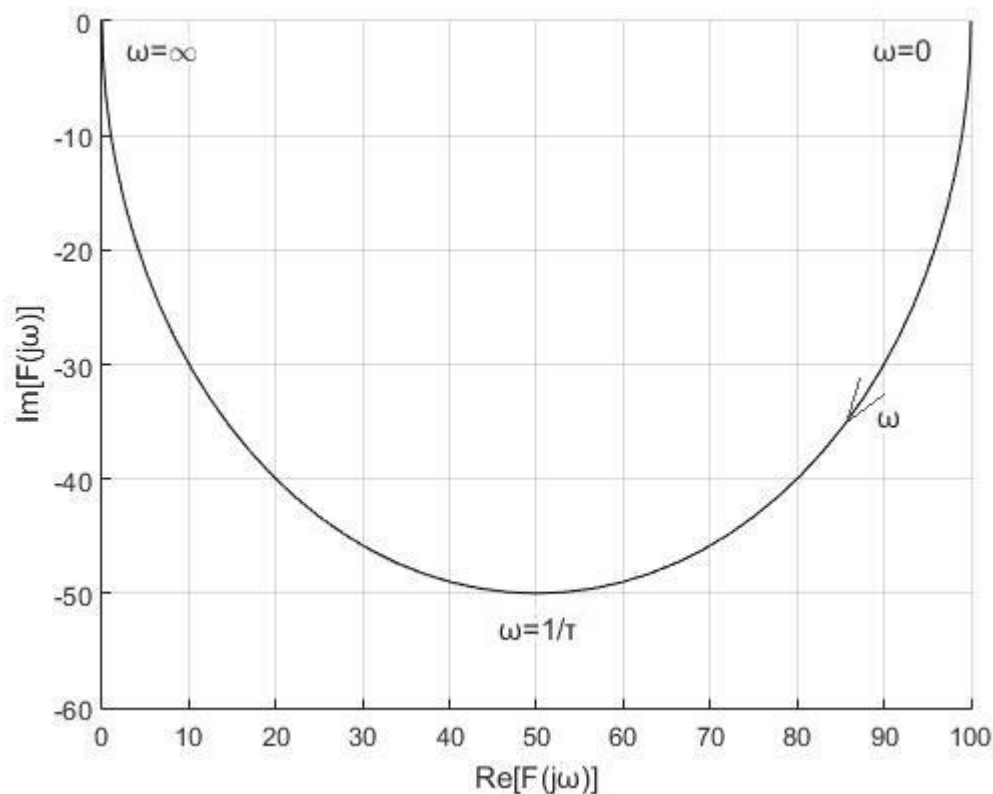
Obr. 1.5 Amplitudová frekvenční charakteristika aperiodického členu



Obr. 1.6 Fázová frekvenční charakteristika aperiodického členu



Obr. 1.7 Přejchodová charakteristika aperiodického členu



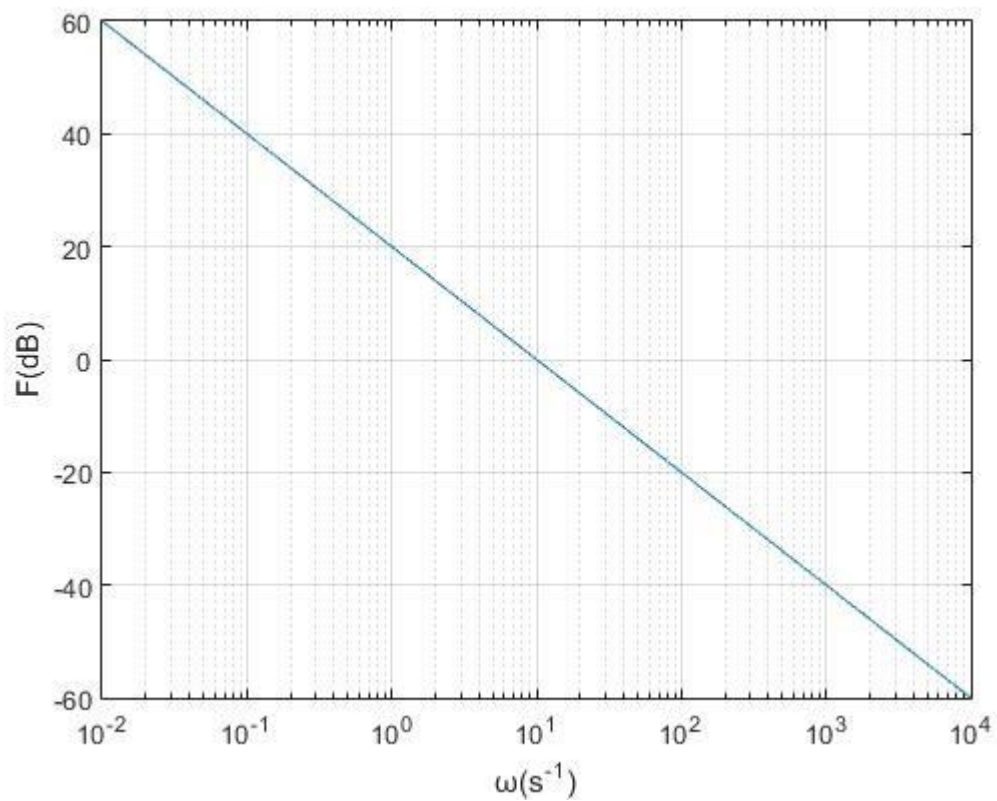
Obr. 1.8 Frekvenční charakteristika v komplexní rovině aperiodického členu

1.3 Integrovní člen

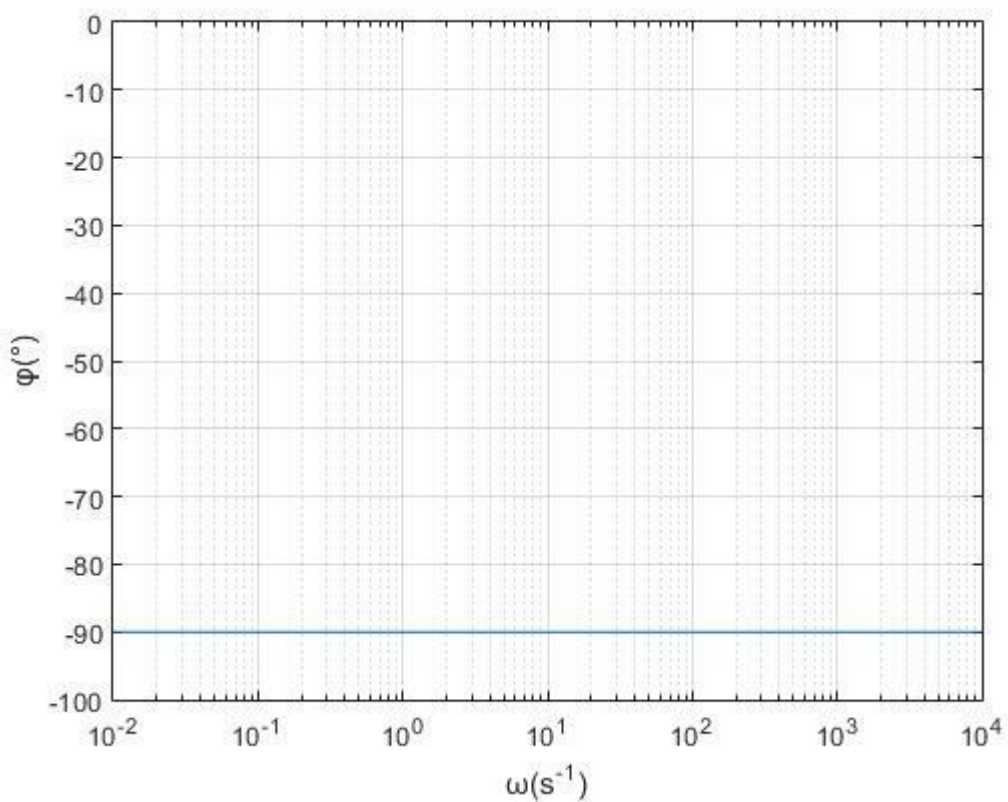
Amplitudová frekvenční charakteristika klesá se sklonem 20 dB na dekádu v celém svém rozsahu a protíná vodorovnou osu v bodě $\frac{1}{\tau}$.

Frekvenční přenos:

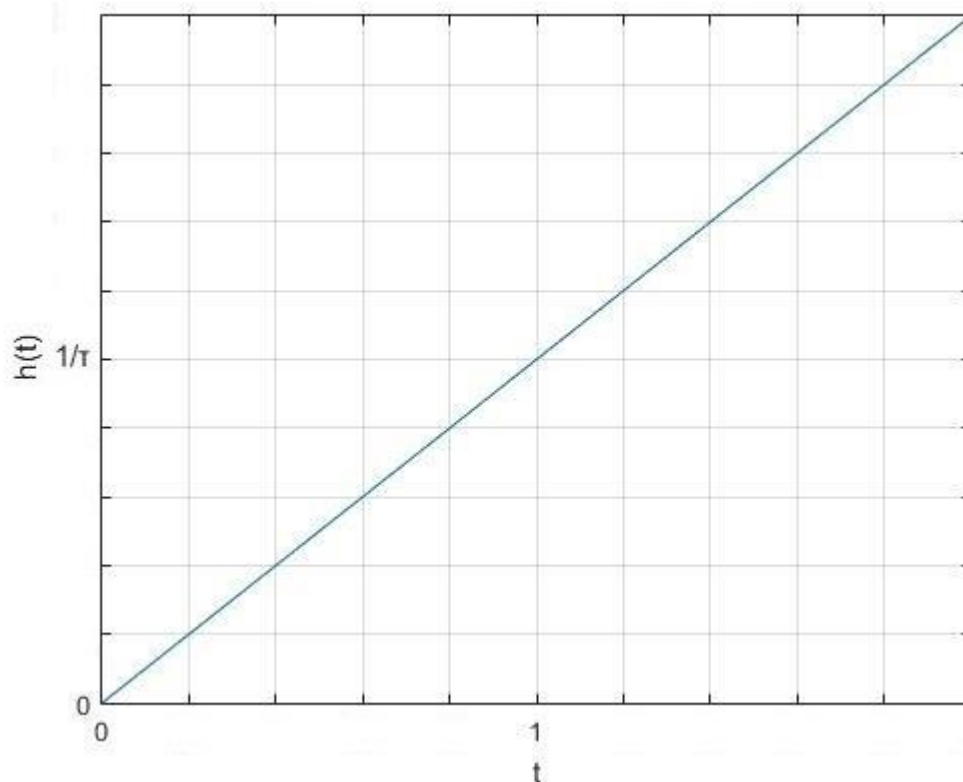
$$F(j\omega) = \frac{1}{j\omega\tau} \quad (1.3)$$



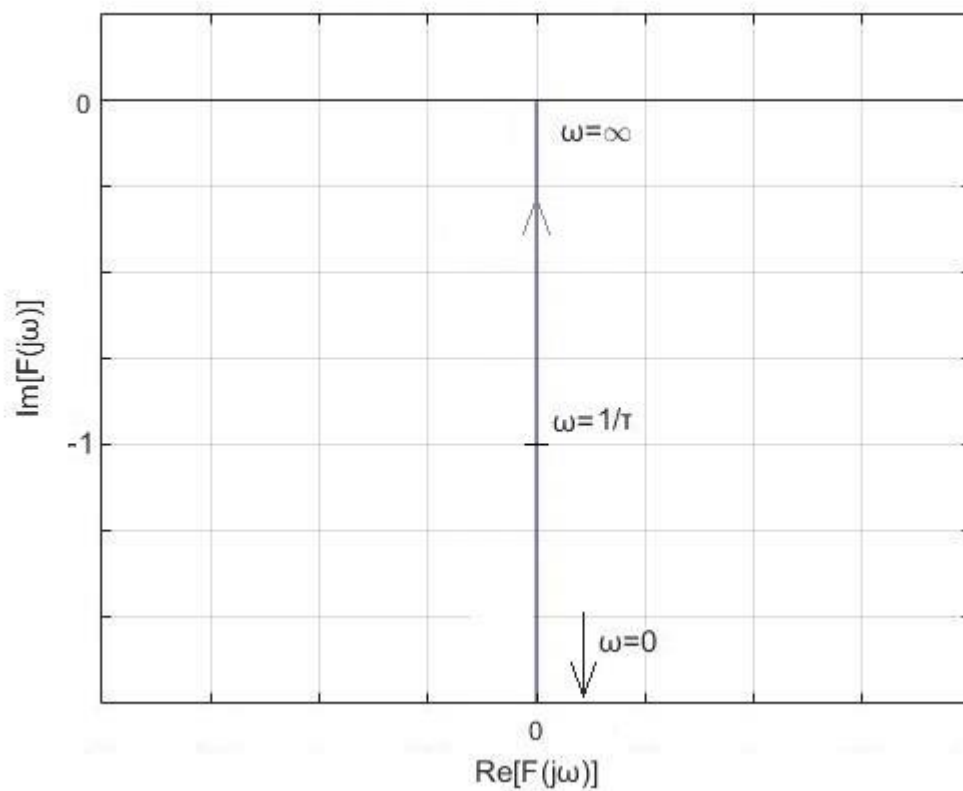
Obr. 1.9 Amplitudová frekvenční charakteristika integračního členu



Obr. 1.10 Fázová frekvenční charakteristika integračního členu



Obr. 1.11 Přechodová charakteristika integračního členu



Obr. 1.12 Frekvenční charakteristika v komplexní rovině integračního členu

1.4 P-regulátor

P-regulátor je nejjednodušší a nezákladnější typ regulátoru. Má pouze jeden parametr a to zesílení k . Čím větší zesílení k , tím silněji P-regulátor reguluje, avšak při velkých hodnotách zesílení k se soustava může rozkmitat a ztratit stabilitu. P-regulátor má tzv. trvalou regulační odchylku e , to znamená, že P-regulátor nedokáže regulovat úplně přesně do požadované hodnoty. Čím větší je zesílení k , tím menší je odchylka e .

Frekvenční přenos:

$$F(j\omega) = k \quad (1.4)$$

P-regulátor má stejné charakteristiky jako konstanta (obrázek *obr 1.1 – obr 1.4*).

1.5 PI-regulátor

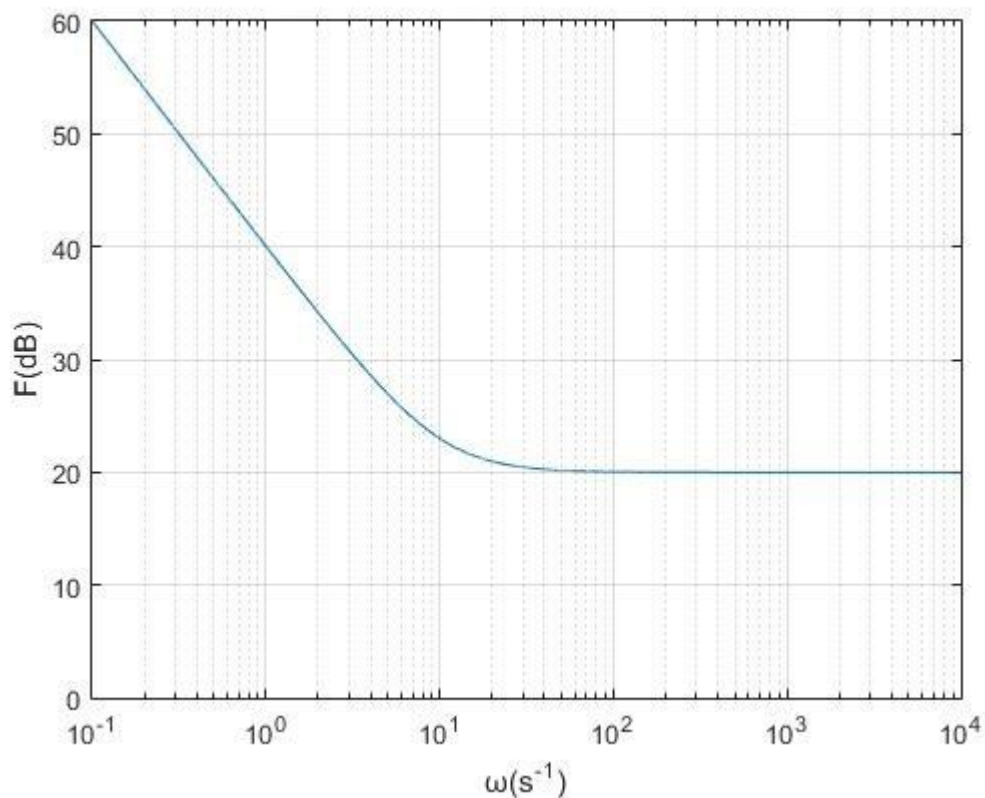
PI-regulátor se skládá z konstanty a integrace.

PI-regulátor díky nekonečnému zesílení stejnosměrné složky odstraňuje regulační odchylku e a tím zlepšuje přesnost regulace. Na počátku regulačního pochodu převládá vliv proporcionální složky, s narůstajícím časem převládá vliv integrační složky. Je to nejrozšířenější typ spojitého regulátoru v elektrických pohonech.

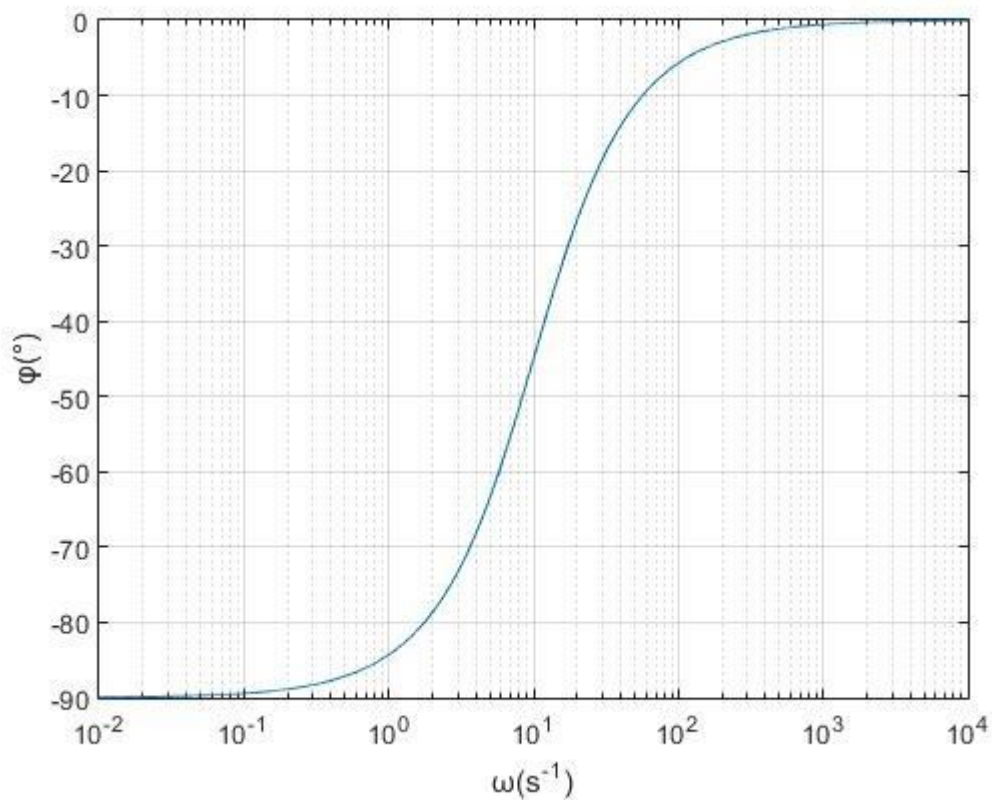
Amplitudová frekvenční charakteristika ze začátku klesá se sklonem 20 dB na dekádu až do zlomového bodu, který se dá vypočítat jako $\frac{1}{\tau}$ a od tohoto bodu se charakteristika ustálí na hodnotě $20 \cdot \log(k)$

Frekvenční přenos:

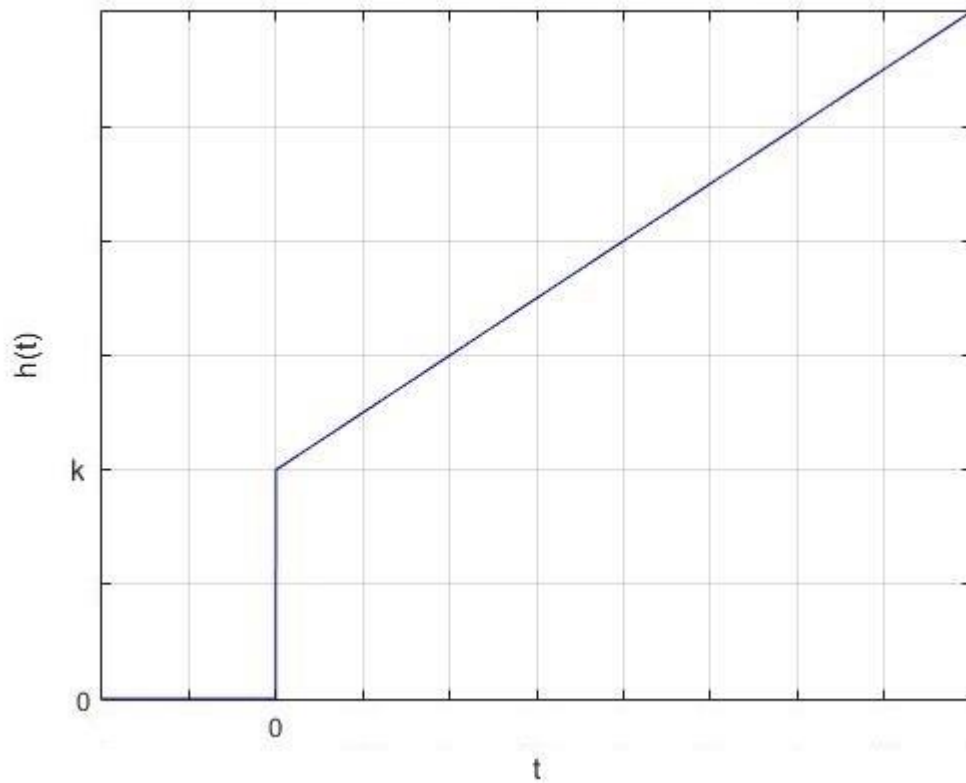
$$F(j\omega) = \frac{k \cdot (1 + j\omega\tau)}{j\omega\tau} \quad (1.5)$$



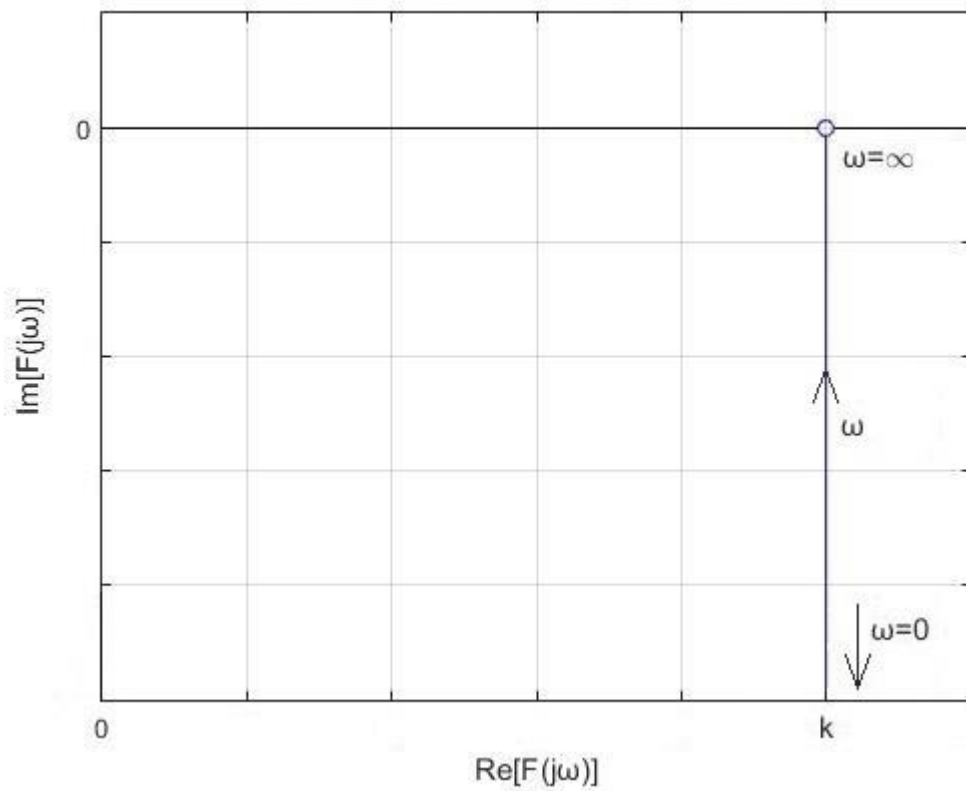
Obr. 1.13 Amplitudová frekvenční charakteristika PI-regulátoru



Obr. 1.14 Fázová frekvenční charakteristika PI-regulátoru



Obr. 1.15 Přechodová charakteristika PI-regulátoru



Obr. 1.16 Frekvenční charakteristika v komplexní rovině PI-regulátoru

2 Stabilita regulované soustavy

2.1 Nyquistovo kritérium stability

Nyquistovo kritérium stability je frekvenční kritérium, které rozhoduje o stabilitě systému na základě znalosti frekvenční charakteristiky otevřeného obvodu [1].

Frekvenční přenos uzavřené smyčky je

$$F_w(j\omega) = \frac{F_0(j\omega)}{1 + F_0(j\omega)} \quad (2.1)$$

Kde $F_0(j\omega)$ je přenos otevřené smyčky a $1 + F_0(j\omega) = 0$ je charakteristická rovnice. Jestliže existuje takové ω_1 , pro které platí

$$1 + F_0(j\omega_1) = 0 \quad (2.2)$$

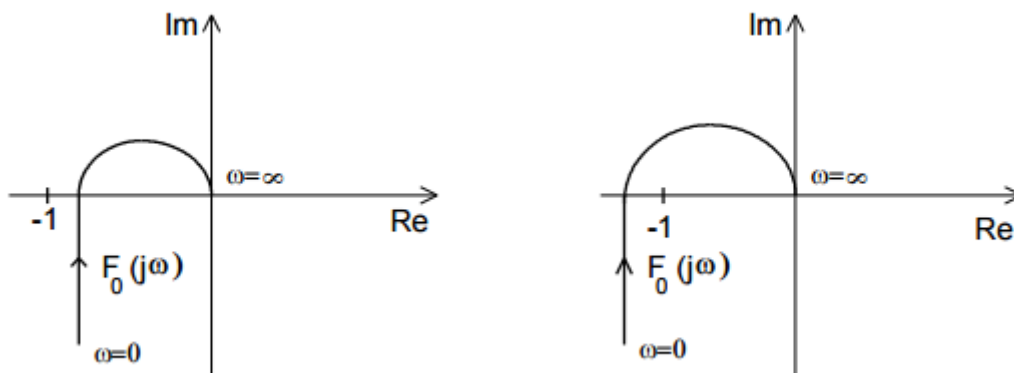
$$F_0(j\omega_1) = -1 \quad (2.3)$$

Pak

$$F_w(j\omega_1) \rightarrow \infty \quad (2.4)$$

Hranice mezi stabilitou a nestabilitou je dána bodem -1, za předpokladu, že frekvenční charakteristika otevřené smyčky $F_0(j\omega)$ jím prochází.

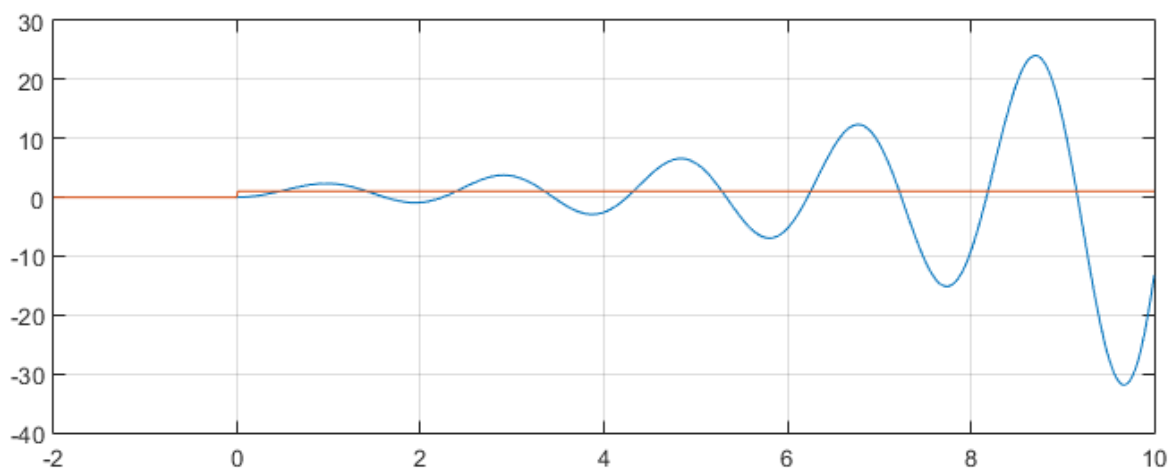
Stabilní soustava podle Nyquistova kritéria stability je právě tehdy, jestliže frekvenční charakteristika otevřené smyčky $F_0(j\omega)$ míjí kritický bod (-1; j0) vlevo při narůstající frekvenci. Pokud tímto bodem prochází, soustava je na mezi stability a pro ostatní možnosti je soustava nestabilní.



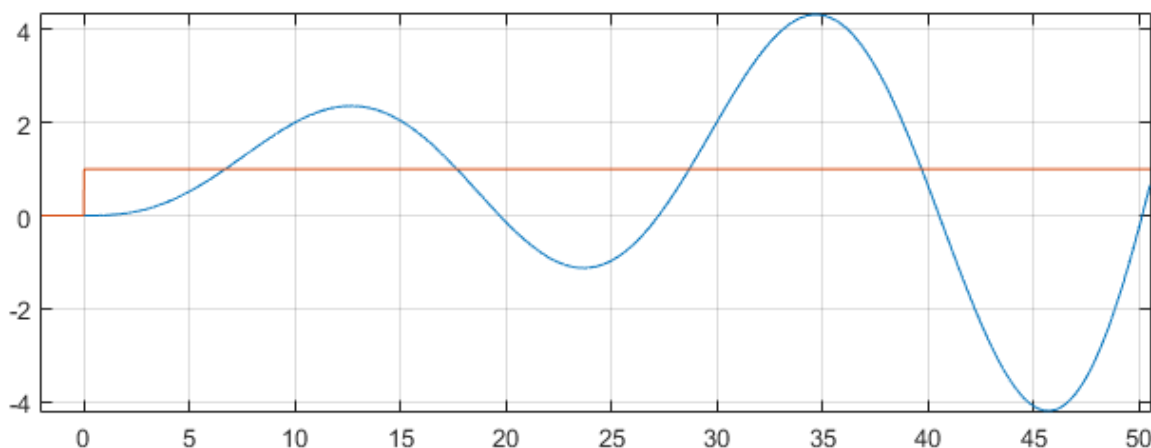
Obr. 2.1 Vlevo stabilní soustava, vpravo nestabilní soustava [3]

2.2 Možné odezvy soustavy na skok požadavku

2.2.1 Příklady nestabilního systému

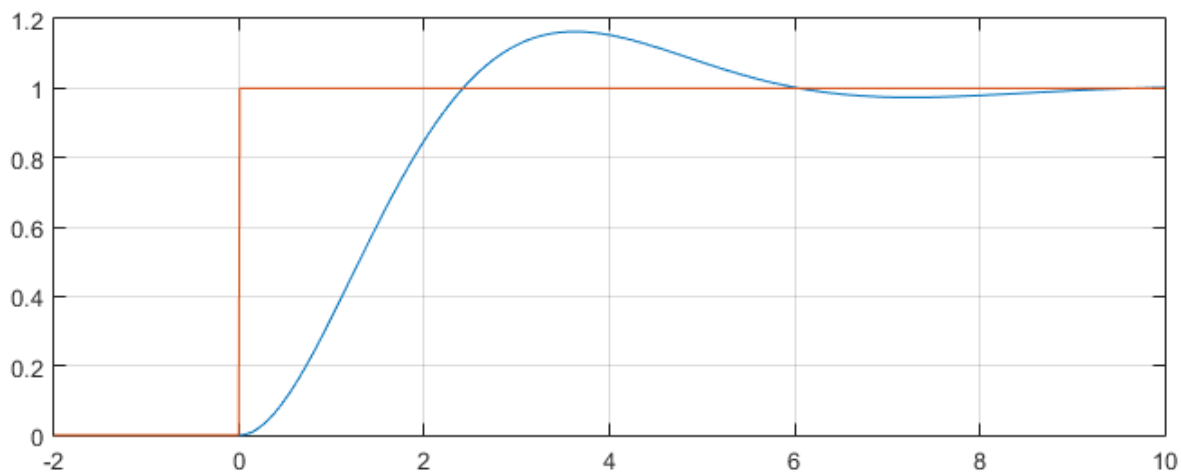


Obr. 2.2 Příklad nestabilního systému

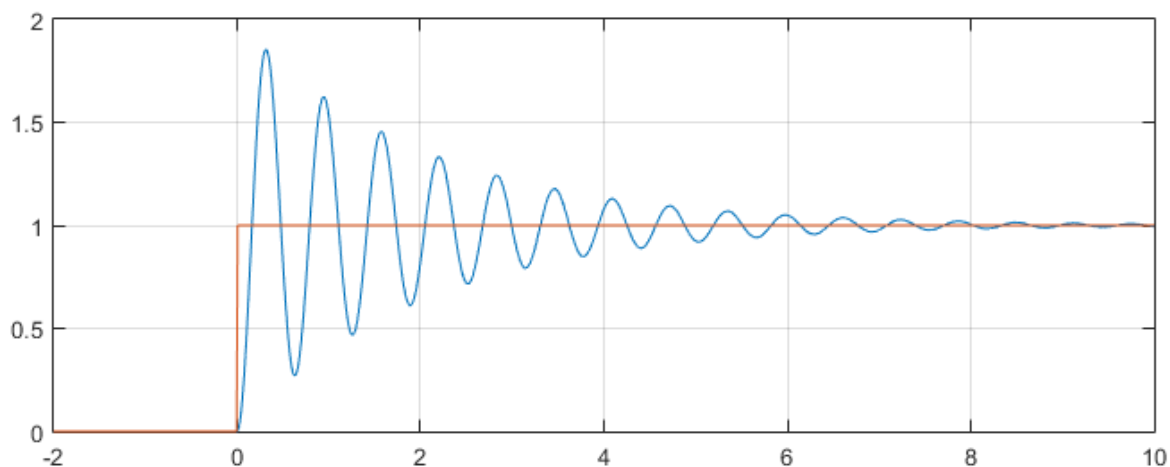


Obr. 2.3 Příklad nestabilního systému

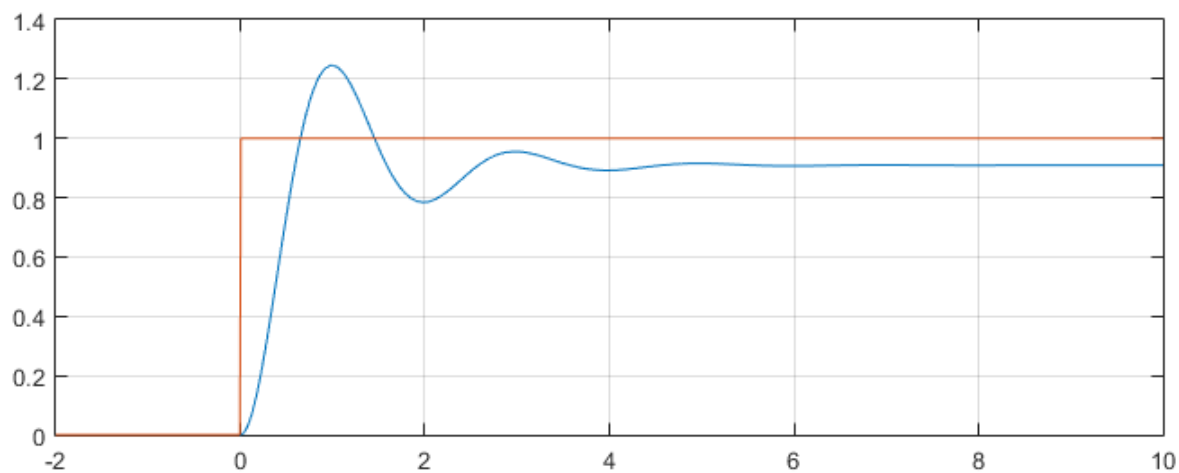
2.2.2 Příklady stabilního systému



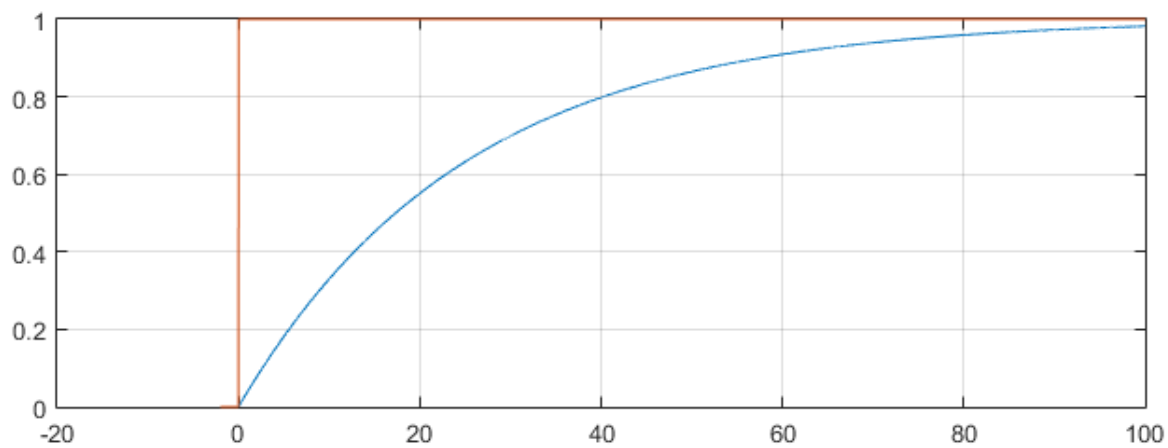
Obr. 2.4 Příklad stabilního kmitavého systému



Obr. 2.5 Příklad stabilního kmitavého systému

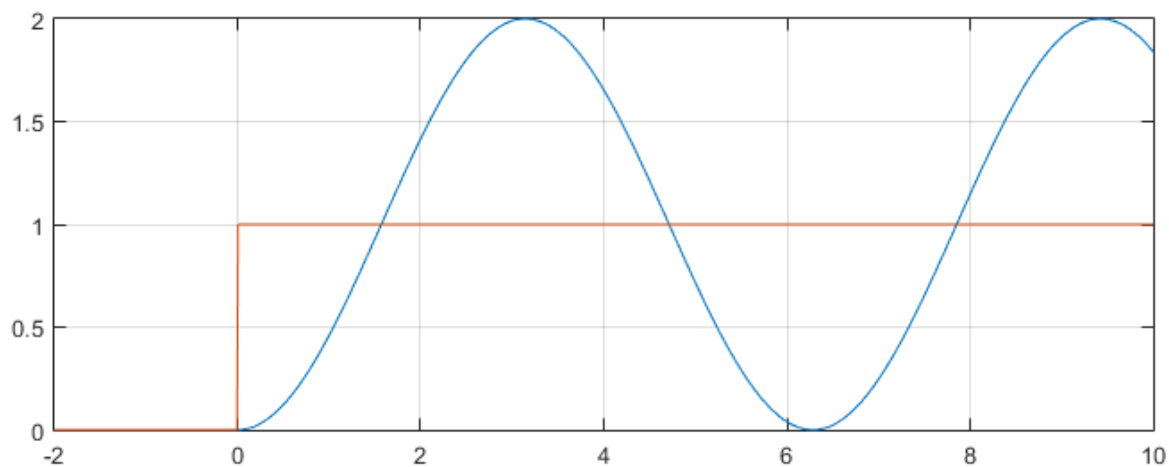


Obr. 2.6 Příklad stabilního kmitavého systému P-regulátor (s regulační odchylkou)



Obr. 2.7 Příklad stabilního nekmitavého systému

2.2.3 Příklady systému na mezi stability



Obr. 2.8 Příklad systému na mezi stability

3 Laplaceova a Fourierova transformace

3.1 Laplaceova transformace

Laplaceova transformace je integrální transformace definována vztahem

$$F(p) = L\{f(t)\} = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-pt} dt \quad (3.1)$$

Laplaceova transformace přiřazuje funkci $f(t)$ (originál) pro čas $t \geq 0$ funkci $F(p)$ (obraz). Aby obraz mohl existovat, musí být originál po částech spojitou funkcí a integrál musí konvergovat [1].

Zpětná Laplaceova transformace je definována vztahem

$$f(t) = L^{-1}\{F(p)\} = \frac{1}{2\pi j} \oint_c F(p) \cdot e^{pt} dp \quad (3.2)$$

Kde křivka c obepíná libovolnou uzavřenou oblast obsahující všechny singulární body funkce $F(p)$.

Existuje tzv. slovník Laplaceovy transformace, kde si při použití zpětné Laplaceovy transformace můžeme k danému obrazu $F(p)$, dohledat příslušnou funkci $f(t)$.

3.2 Fourierova transformace

Fourierova transformace je integrální transformace převádějící signál mezi časově a frekvenčně závislým vyjádřením pomocí harmonických signálů, což jsou obecně komplexní exponenciály.

Fourierova transformace je definována vztahem

$$F[x(t)] = X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (3.3)$$

Kde $X(j\omega)$ se nazývá obraz a $x(t)$ originál.

Inverzní Fourierova transformace je definována vztahem

$$x(t) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega \quad (3.4)$$

Aby Fourierova transformace mohla existovat, musí být funkce $x(t)$ po úsecích hladká a absolutně integrovatelná, tj. platí

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty \quad (3.5)$$

Je-li $x(t)$ pro $t < 0$ identicky nulová, jak jsme předpokládali při Laplaceově transformaci, pak její obraz je [2]

$$X(j\omega) = \int_0^{\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt = \left[\int_0^{\infty} x(t) \cdot e^{-pt} dt \right]_{p=j\omega} \quad (3.6)$$

A příslušný originál je

$$x(t) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot j} \int_{-\infty}^{\infty} X(j\omega) \cdot e^{j\omega t} dj\omega = \left[\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot j} \int_{-j\infty}^{j\infty} X(p) \cdot e^{pt} dp \right]_{p=j\omega} \quad (3.7)$$

Pokud jde o funkci absolutně integrovatelnou, platí pravidla odvozená pro Laplaceovu i Fourierovu transformaci

3.3 Použití transformací

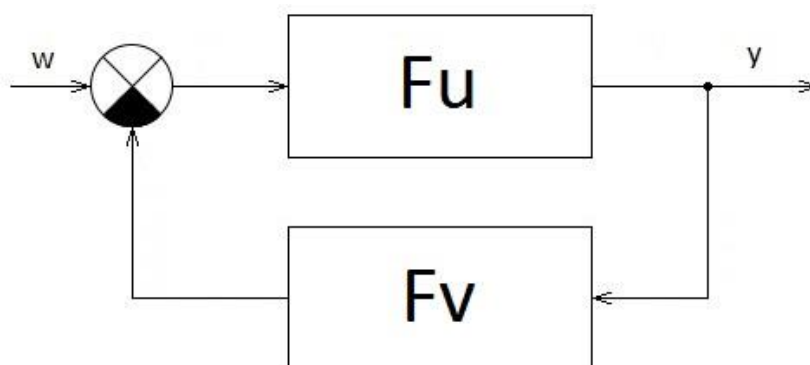
Přenos může být buď funkcí frekvence (tj. $F(j\omega)$) nebo funkcí Laplaceova operátoru (tj. $F(p)$).

Pokud chceme odezvu na signál rozložitelný na Fourierovu řadu (např. periodický signál), použijeme první vyjádření. Druhé vyjádření použijeme, pokud vstupní signál splňuje podmínky pro Laplaceovu transformaci, což je třeba jednotkový skok. Mezi oběma přenosy lze přecházet použitím substituce $j\omega$ za p a naopak u systémů s minimální fází, což námi použité bloky splňují.

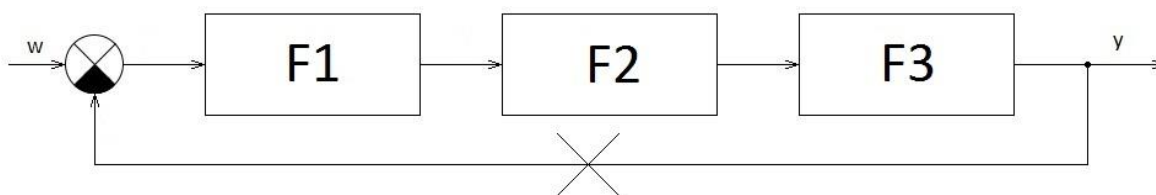
4 Vysvětlení a ukázky některých částí kódů

4.1 Algoritmus pro zobrazení reakce na jednotkový skok

Nejprve bylo zapotřebí zjistit přenos uzavřené regulační smyčky F_w (obrázek Obr. 4.1) za pomoci známého přenosu otevřené regulační smyčky F_o (obrázek Obr. 4.2), který je roven součinu přenosů všech použitých bloků.



Obr. 4.1 Uzavřená regulační smyčka



Obr. 4.2. Otevřená regulační smyčka

Podle obrázku obr. 4.1 můžeme odvodit přenos uzavřené smyčky F_w

$$y = w \cdot F_u - F_u \cdot F_v \cdot y \quad (4.1)$$

$$y + F_u \cdot F_v \cdot y = w \cdot F_u \quad (4.2)$$

$$y \cdot (1 + F_u \cdot F_v) = w \cdot F_u \quad (4.3)$$

$$y = \frac{w \cdot F_u}{1 + F_u \cdot F_v} \quad (4.4)$$

$$F_w = \frac{y}{w} = \frac{F_u}{1 + F_u \cdot F_v} \quad (4.5)$$

Pokud $F_v = 1$ a $F_u = F_0$, pak platí

$$F_w = \frac{F_0}{1 + F_0} \quad (4.6)$$

Nyní se spočte přenos otevřené smyčky F_o jako součin přenosů všech bloků, např. PI regulátoru a dvou aperiodických členů

$$F_o = F_{PI-reg} \cdot F_{aper1} \cdot F_{aper2} \quad (4.7)$$

$$F_o = \frac{k_1 \cdot (1 + p \cdot \tau_1)}{p \cdot \tau_1} \cdot \frac{k_2}{1 + p \cdot \tau_2} \cdot \frac{k_3}{1 + p \cdot \tau_3} \quad (4.8)$$

$$F_o = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (1 + p \cdot \tau_1)}{p \cdot \tau_1 \cdot (1 + p \cdot \tau_2) \cdot (1 + p \cdot \tau_3)} \quad (4.9)$$

Teď se dosadí F_o do vzorce na přenos F_w a zjednoduší

$$F_w = \frac{\frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (1 + p \cdot \tau_1)}{p \cdot \tau_1 \cdot (1 + p \cdot \tau_2) \cdot (1 + p \cdot \tau_3)}}{1 + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (1 + p \cdot \tau_1)}{p \cdot \tau_1 \cdot (1 + p \cdot \tau_2) \cdot (1 + p \cdot \tau_3)}} \quad (4.10)$$

$$F_w = \frac{\frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (1 + p \cdot \tau_1)}{p \cdot \tau_1 \cdot (1 + p \cdot \tau_2) \cdot (1 + p \cdot \tau_3)}}{\frac{p \cdot \tau_1 \cdot (1 + p \cdot \tau_2) \cdot (1 + p \cdot \tau_3) + k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (1 + p \cdot \tau_1)}{p \cdot \tau_1 \cdot (1 + p \cdot \tau_2) \cdot (1 + p \cdot \tau_3)}} \quad (4.11)$$

$$F_w = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (1 + p \cdot \tau_1)}{p \cdot \tau_1 \cdot (1 + p \cdot \tau_2) \cdot (1 + p \cdot \tau_3) + k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (1 + p \cdot \tau_1)} \quad (4.12)$$

$$F_w = \frac{p \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \tau_1 + k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{p^3 \cdot \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 + p^2 \cdot (\tau_1 \cdot \tau_3 + \tau_1 \cdot \tau_2) + p(\tau_1 + k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \tau_1) + k_1 \cdot k_2 \cdot k_3} \quad (4.13)$$

Pro přehlednost si koeficienty polynomů označíme písmeny

$$a_1 = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \tau_1 \quad (4.14)$$

$$a_0 = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \quad (4.15)$$

$$b_3 = \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \quad (4.16)$$

$$b_2 = \tau_1 \cdot \tau_3 + \tau_1 \cdot \tau_2 \quad (4.17)$$

$$b_1 = \tau_1 + k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \tau_1 \quad (4.18)$$

$$b_0 = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \quad (4.19)$$

A výsledný výraz vynásobíme jednotkovým skokem, který má v Laplaceově transformaci obraz $\frac{1}{p}$

$$Y = \frac{1}{p} \cdot F_w \quad (4.20)$$

$$Y = \frac{p \cdot a_1 + a_0}{p \cdot (p^3 \cdot b_3 + p^2 \cdot b_2 + p \cdot b_1 + b_0)} \quad (4.21)$$

$$Y = \frac{p \cdot a_1 + a_0}{p^4 \cdot b_3 + p^3 \cdot b_2 + p^2 \cdot b_1 + p \cdot b_0} \quad (4.22)$$

Nyní je potřeba v čitateli i jmenovateli zjistit kořeny polynomů a následně výraz rozložit na parciální zlomky. V MATLABu pro to existuje funkce `residue`, která udělá oba požadavky zároveň.

Zde je úryvek kódu z aplikace, kde lze vidět použití funkce `residue`

```

citatel=[a1 a0];
jmenovatel=[b3 b2 b1 b0 0];
[r,p,k]=residue(citatel,jmenovatel);

```

Teď je náš Laplaceův obraz výstupu Y ve tvaru

$$Y = \frac{r_1}{p - p_1} + \frac{r_2}{p - p_2} + \frac{r_3}{p - p_3} + \frac{r_4}{p - p_4} \quad (4.23)$$

A nyní lze použít inverzní Laplaceovu transformaci pro zjištění funkce reakce na jednotkový skok.

Obraz $\frac{A}{p+a}$ má funkci $A \cdot e^{-at}$

Takže výsledná funkce reakce na jednotkový skok vypadá následovně

$$r_1 \cdot e^{-p_1 t} + r_2 \cdot e^{-p_2 t} + r_3 \cdot e^{-p_3 t} + r_4 \cdot e^{-p_4 t} \quad (4.24)$$

Problém nastává pokud vyjdou 2 stejné kořeny, tedy dvojnásobný kořen. Pro tento případ je jiná inverzní Laplaceova transformace

Obraz $\frac{A}{(p+a)^2}$ má funkci $t \cdot A \cdot e^{-at}$

V kódu to potom vypadá následovně


```

if (p(1)==p(2))
funkce=(r(1)*exp(p(1).*t))+r(2)*exp(p(2).*t).*t+r(3)*exp(p(3).*t)+r(4)*
exp(p(4).*t);
else
funkce=r(1)*exp(p(1).*t)+r(2)*exp(p(2).*t)+r(3)*exp(p(3).*t)+r(4)*exp(p(4)
).*t);
end

```

4.1.1 Přenosy F_w

Výše zmíněný postup byl pro PI regulátor se dvěma aperiodickými bloky. V aplikaci lze vybrat nejen tuto kombinaci, takže bylo nutné odvodit přenos F_w i pro ostatní kombinace.

Přenos F_w pro kombinaci P-regulátor, konstanta a konstanta

$$F_w = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{1 + k_1 \cdot k_2 \cdot k_3} \quad (4.25)$$

Přenos F_w pro kombinaci P-regulátor, konstanta a integrační člen

$$F_w = \frac{k_1 \cdot k_2}{p \cdot \tau_3 + k_1 \cdot k_2} \quad (4.26)$$

Přenos F_w pro kombinaci P-regulátor, konstanta a aperiodický člen

$$F_w = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{p \cdot \tau_3 + (1 + k_1 \cdot k_2 \cdot k_3)} \quad (4.27)$$

Přenos F_w pro kombinaci P-regulátor, aperiodický člen a aperiodický člen

$$F_w = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{p^2 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 + p \cdot (\tau_2 + \tau_3) + (1 + k_1 \cdot k_2 \cdot k_3)} \quad (4.28)$$

Přenos F_w pro kombinaci P-regulátor, integrační člen a integrační člen

$$F_w = \frac{k_1}{p^2 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 + k_1} \quad (4.29)$$

Přenos F_w pro kombinaci P-regulátor, aperiodický člen a integrační člen

$$F_w = \frac{k_1 \cdot k_2}{p^2 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 + p \cdot \tau_3 + k_1 \cdot k_2} \quad (4.30)$$

Přenos F_w pro kombinaci PI-regulátor, konstanta a konstanta

$$F_w = \frac{p \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \tau_1 + k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{p \cdot (\tau_1 + k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \tau_1) + k_1 \cdot k_2 \cdot k_3} \quad (4.31)$$

Přenos F_w pro kombinaci PI-regulátor, konstanta a integrační člen

$$F_w = \frac{p \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \tau_1 + k_1 \cdot k_2}{p^2 \cdot \tau_1 \tau_3 + p \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \tau_1 + k_1 \cdot k_2} \quad (4.32)$$

Přenos F_w pro kombinaci PI-regulátor, konstanta a aperiodický člen

$$F_w = \frac{p \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \tau_1 + k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{p^2 \cdot \tau_1 \cdot \tau_3 + p \cdot (\tau_3 + k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \tau_1) + k_1 \cdot k_2 \cdot k_3} \quad (4.33)$$

Přenos F_w pro kombinaci PI-regulátor, aperiodický člen a aperiodický člen

$$F_w = \frac{p \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \tau_1 + k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{p^3 \cdot \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 + p^2 \cdot (\tau_1 \cdot \tau_3 + \tau_1 \cdot \tau_2) + p \cdot (\tau_1 + k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \tau_1) + k_1 \cdot k_2 \cdot k_3} \quad (4.34)$$

Přenos F_w pro kombinaci PI-regulátor, integrační člen a integrační člen

$$F_w = \frac{p \cdot k_1 \cdot \tau_1 + k_1}{p^3 \cdot \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 + p \cdot k_1 \cdot \tau_1 + k_1} \quad (4.35)$$

Přenos F_w pro kombinaci PI-regulátor, aperiodický člen a integrační člen

$$F_w = \frac{p \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \tau_1 + k_1 \cdot k_2}{p^3 \cdot \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 + p^2 \cdot \tau_1 \cdot \tau_3 + p \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \tau_1 + k_1 \cdot k_2} \quad (4.36)$$

4.2 Algoritmus pro výpočet bezpečnosti ve fázi

Během výpočtu bezpečnosti ve fázi φ_b může dojít k několika závěrům. Amplitudová frekvenční charakteristika nemusí protínat vodorovnou osu vůbec, čili jí nelze určit, což program vypíše na obrazovku a dále nic nepočítá. Takový případ může nastat třeba při kombinaci P-regulátoru se dvěma bloky konstant. Dále může nastat případ, kdy charakteristika prochází v určité části vodorovně přímo osou, čili jí protíná v nekonečně mnoho bodech. V takovém případě program opět vypíše na obrazovku, že bezpečnost ve fázi nelze určit a dále nic nepočítá. Poslední případ je, když charakteristika protíná vodorovnou osu v jednom bodě, v naší hledané frekvenci řezu. Program následně dopočte bezpečnost ve fázi a obě hodnoty vypíše na obrazovku.

Algoritmus pro výpočet bezpečnosti ve fázi se nazývá lineární interpolace.

Nejprve jsme potřebovali zjistit v jakém bodě protíná výsledná amplitudová frekvenční charakteristika vodorovnou osu, tedy frekvenci řezu ω_0 . To se zajistí cyklem, který prochází postupně všechny prvky přenosu $F(dB)$, dokud nenarazí na záporný přenos, pak se cyklus zastaví a pamatuje si prvek, kterým začíná být přenos záporný, což je právě ten bod, který nás zajímá, kde se mění kladný přenos na záporný, čili prochází vodorovnou osou.

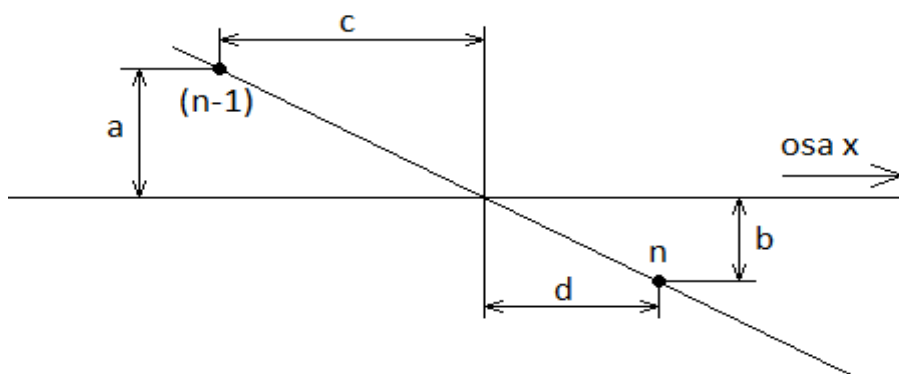
Nyní tedy známe hodnotu ω , při které je první hodnota přenosu $F(dB)$ záporná. Za využití i předchozí hodnoty přenosu, tedy posledního kladného, lze přesně dopočítat ω_0 . Protože graf není vykreslen z nekonečně mnoho bodů, ale pouze z daného množství bodů,

takže první záporná hodnota přenosu nemusí být přesně ω_0 , ale určitě se jí bude hodně blížit.

Jak lze vidět na obrázku *Obr. 4.2*, máme n -tý a $(n-1)$ -tý prvek, u kterých známe a a b . Zjistíme si poměr mezi a a b , který bude stejný jako mezi c a d .

$$pomer = \frac{a}{a-b} \quad (4.37)$$

A nyní stačí poměr vynásobit $(\omega_n - \omega_{(n-1)})$, což je vlastně vzdálenost $c+d$ a máme přesnou hodnotu ω_0 . Teď už stačí vypočítat hodnotu fáze výsledné fázové frekvenční charakteristiky v hodnotě ω_0 a odečíst jí od 180° a známe bezpečnost ve fázi.



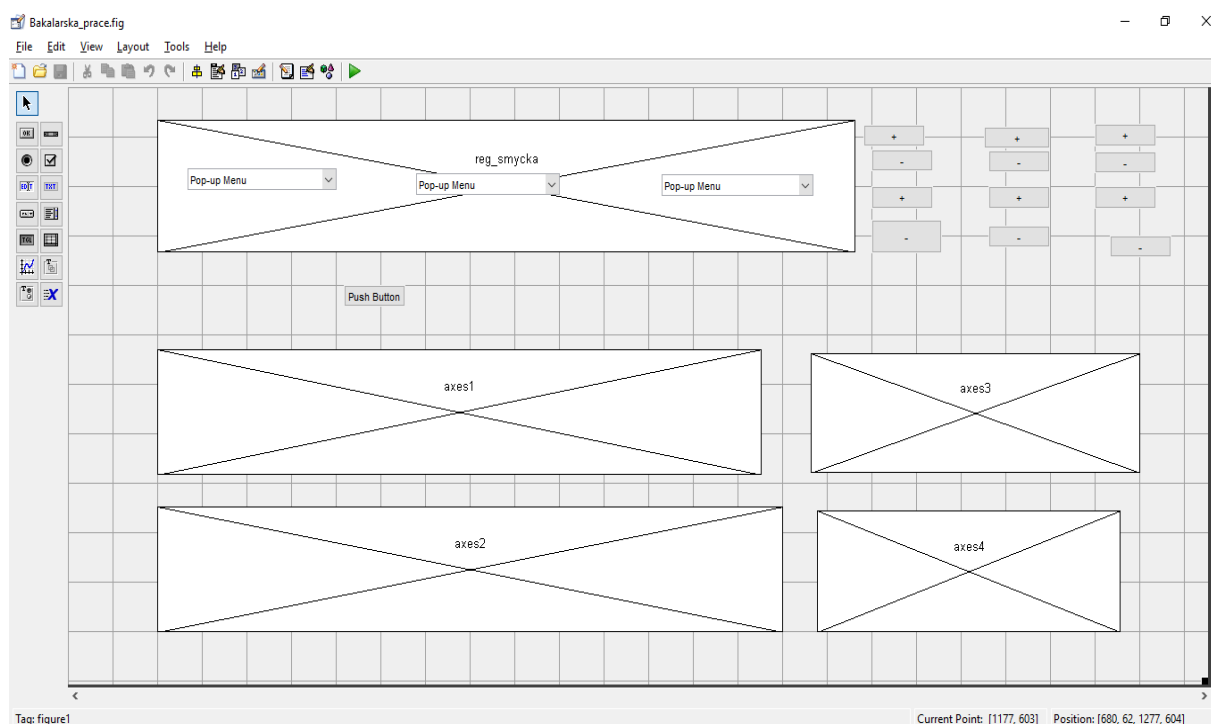
Obr. 4.3 Vysvětlení přesného dopočtu průtnutí

V kódu to vypadá následovně:

```
pom_while=1;
while((20*log10(abs(F1(pom_while)))+20*log10(abs(F2(pom_while)))+20*log10(
abs(F3(pom_while))))>0)
    pom_while=pom_while+1;
end
F_while1=(20*log10(abs(F1(pom_while-
1)))+20*log10(abs(F2(pom_while-1)))+20*log10(abs(F3(pom_while-1))));
F_while2=(20*log10(abs(F1(pom_while)))+20*log10(abs(F2(pom_while)))+20*lo
g10(abs(F3(pom_while))));
cast=F_while1/(F_while1-F_while2);
omega0_while=(omega(pom_while-1)+(cast*(omega(pom_while)-
omega(pom_while-1))));
fib_while=180+(180/pi*angle(F2(pom_while-
1))+180/pi*angle(F3(pom_while-1))+180/pi*angle(F1(pom_while-1)));
```

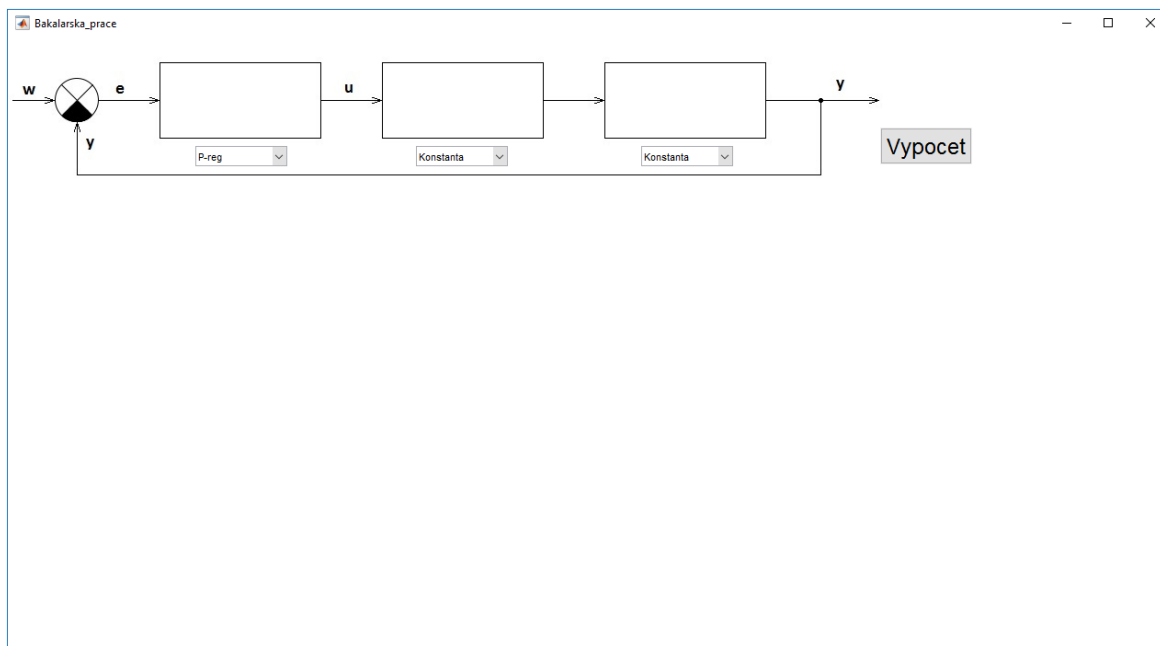
5 Popis aplikace

Grafické uživatelské rozhraní aplikace bylo vytvořeno pomocí nástroje GUIDE, který je implementován v MATLABu. Dají se zde do aplikace přidat různé funkce jako tlačítka, rozklikávací okna, editovací pole, osy, atd. Jejich parametry lze měnit přímo v GUIDE nebo pomocí kódu v programu.



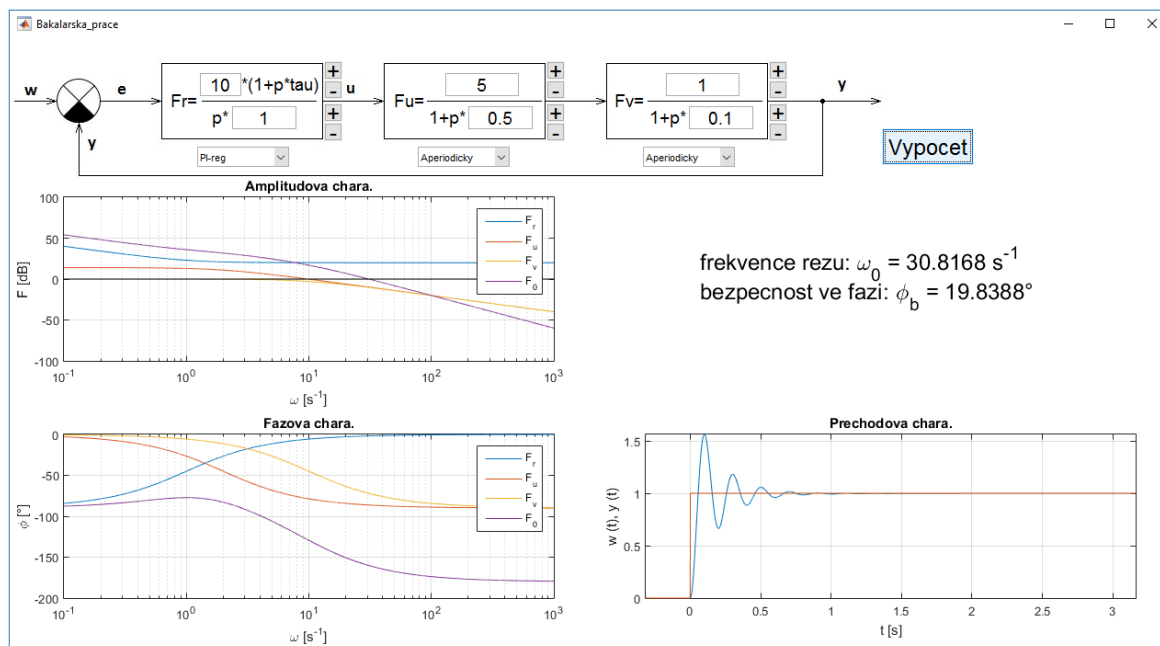
Obr. 5.1 GUIDE

Na obrázku *Obr. 5.2* lze vidět, jak vypadá aplikace při spuštění. Je zde základní regulační smyčka a za pomoci rozklikávacích oken si můžeme vybrat jaký regulační systém chceme zobrazit. U regulátoru je na výběr mezi P-regulátorem a PI-regulátorem a u následujících dvou bloků si můžeme vybrat mezi konstantou, aperiodickým nebo integračním členem.



Obr. 5.2 První spuštění aplikace

Pokud vybereme nějakou možnost z rozklikávacího okna, zobrazí se nám nad ním rovnice pro přenos, kde máme již předvolené hodnoty zesílení a časových konstant, které můžeme následně upravit. Po kliknutí na tlačítko výpočet se zobrazí charakteristiky, frekvence řezu a bezpečnost ve fázi, jak lze vidět na obrázku Obr. 5.3.



Obr. 5.3 Výstup programu

Frekvenční charakteristiky se vykreslují na levé části obrazovky. Je v nich vidět průběh každého zvoleného členu a výsledný průběh celého regulačního systému, ze kterého se určuje bezpečnost ve fázi. V pravé části obrazovky se nachází zmíněná bezpečnost ve fázi φ_b a frekvence řezu ω_0 a pod tím je přechodová charakteristika.

Vedle jednotlivých bloků se nacházejí tlačítka plus a minus, který navyšují či snižují hodnoty zesílení a časových konstant. Horní pár tlačítek mění hodnoty zesílení o 5 db a dolní pár tlačítek mění hodnoty časových konstant o čtvrt dekády. Pokud je vybrán integrační člen, který nemá parametr zesílení, je vedle bloku pouze jeden pár tlačítek na změnu časové konstanty. To samé platí u konstanty a P-regulátoru, který mají jeden pár tlačítek na změnu zesílení.

6 Použití aplikace pro regulaci motoru

Jedná se o stejnosměrný motor s permanentními magnety, takže se chová jako stroj s cizím buzením a konstantním budícím proudem.

Výrobce: JKO MEZ CZ s.r.o

Typ: P2XR506

Jmenovité štítkové hodnoty:

$U_n = 42 \text{ V}$

$I_n = 3,3 \text{ A}$

$N_n = 4000 \text{ ot./min}$

Změřené parametry:

Odpor kotvy: $R_a = 1,5 \ \Omega$

Indukčnost kotvy: $L_a = 1,9 \text{ mH}$

Motor je napájen z měniče (čtyřkvadrantový pulsní měnič, neboli H-můstek) o napájecím napětím 30 V, který je řízen PWM (pulse wide modulation) o frekvenci 20 kHz. Měnič na změnu požadovaného napětí od regulátoru nereaguje okamžitě, ale s jistým dopravním zpožděním (vlivem PWM). Toto dopravní zpoždění se podle požadovaného výstupního napětí mění v rozsahu 1 až 2-násobku T_{pwm} (periody PWM), čili v tomto případě 1/20000 až 2/20000 s.

Celé regulační schéma se skládá z regulátoru (PI-regulátor), měnič (1. aperiodický člen) a stejnosměrný motor (2. aperiodický člen).

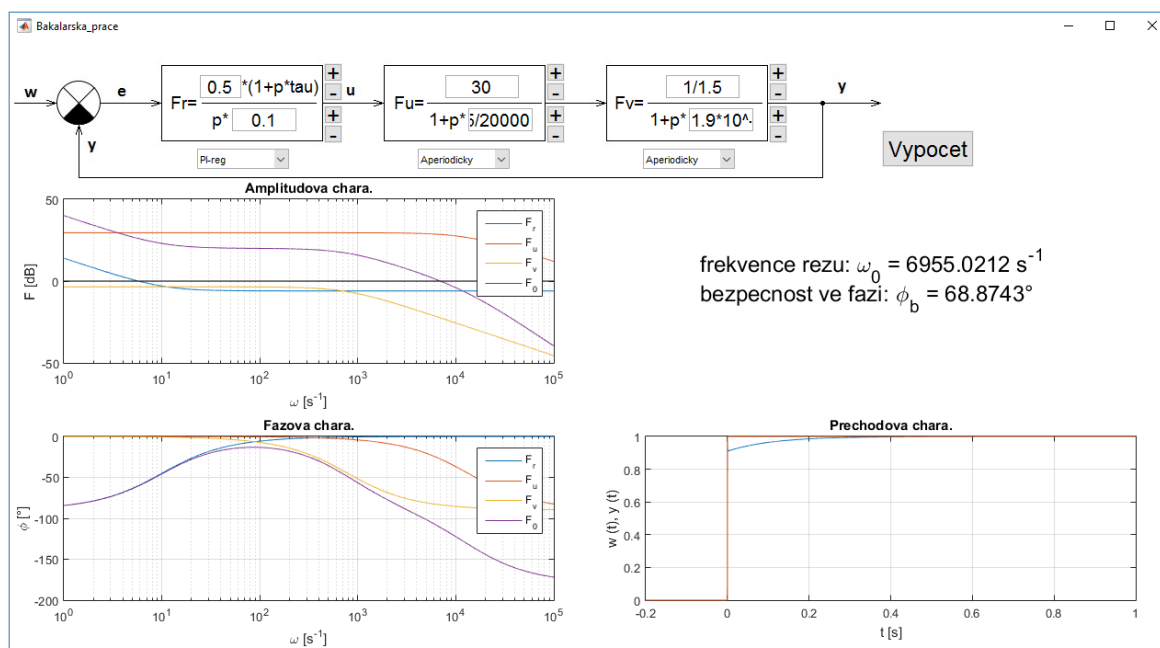
Zesílení k_2 prvního aperiodického členu je rovno napájecímu napětí měniče $k_2 = 30$ a časová konstanta τ_2 je rovna průměrnému dopravnímu zpoždění měniče $\tau_2 = \frac{1,5}{20000}$

Zesílení k_3 druhého aperiodického členu je rovno $\frac{1}{R_a}$, čili $k_3 = \frac{1}{1,5}$ a časová konstanta

τ_3 je rovna $\frac{L_a}{R_a}$, čili $\tau_3 = \frac{1,9 \cdot 10^{-3}}{1,5}$

Po dosažení zesílení a časových konstant do aperiodických bloků v aplikaci, stačí už jen nastavit takové hodnoty regulátoru, aby výsledná bezpečnost ve fázi φ_b byla v rozsahu od 60° do 72° , což značí stabilní systém.

Pro naší regulační soustavu vyhovovalo $k_1 = 0,5$ a $\tau_1 = 0,1$. Bezpečnost ve fázi je $\varphi_b = 68,9$



Obr. 6.1 Regulace ss. motoru

Závěr

Výsledná aplikace splňuje všechny požadavky, které byly na začátku stanoveny. Zobrazuje přesné frekvenční charakteristiky a ne jejich aproximace, dále zobrazuje přechodovou charakteristiku, umí určit frekvenci řezu a bezpečnost ve fázi.

V průběhu vývoje byla aplikace doplněna o několik funkčních vylepšení, jako přednastavení hodnot regulačního systému nebo tlačítka na zvýšení, snížení hodnoty o čtvrt dekády.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] TŮMA, František. *Automatické řízení 1*. 3., přeprac. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2007. 234 s.
- [2] KUBÍK, Stanislav, KOTEK, Zdeněk a ŠALAMON, Miroslav. *Teorie regulace I. Lineární regulace*. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1974. 272 s.
- [3] SKALICKÝ, Jiří. *Teorie řízení*. 2. [online]. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 2002. 88 s. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=66661
- [4] MathWorks. Product Documentation. [online]. © 1994-2016 The MathWorks, Inc. [Cit. 19.5.2016]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/matlab/index.html>