

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

KATALOG TYPIZOVANÝCH LOGARITMICKÝCH FREKVENČNÍCH CHARAKTERISTIK

TITLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PAVEL VELECKÝ

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

ING. OLGA DAVIDOVÁ, PH.D.

BRNO 2008

Ústav automatizace a informatiky
Akademický rok: 2007/08

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Velecký Pavel

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Katalog typizovaných logaritmických frekvenčních charakteristik

v anglickém jazyce:

Catalog of standard logarithmic frequency characteristics

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jednou z variant, jak navrhnout parametry spojitého regulátoru, je použít metodu typizované logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky. Jedná se o frekvenční metodu založenou na volbě tvaru typizované logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky otevřeného regulačního obvodu. Pro usnadnění práce při použití této metody bude vhodné vytvořit katalog typizovaných charakteristik.

Cíle bakalářské práce:

- Popsat metodu typizované logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky
- Pro vybrané regulované soustavy navrhnout různé typy regulátorů na základě požadované amplitudové, resp. fázové bezpečnosti
- Vytvořit katalog typizovaných logaritmických amplitudových frekvenčních charakteristik otevřeného regulačního obvodu v závislosti na typu regulované soustavy a regulátoru

Strana 4

Seznam odborné literatury:

BALÁTĚ, J. Automatické řízení. Praha : Nakladatelství BEN–technická literatura, 2003. 664s. ISBN 80-7300-020-2.

MAKAROV, I.M. & MENSKIJ, B.M. Linejnyje avtomatičeskije systemy. Moskva : Vydavatelství Mašinostrojenije, 1977. 464 stran.

ŠVARC, I. Teorie automatického řízení II. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 1993. 232s. ISBN 80-214-0550-3.

ŠVEC, J. & ŠIŠKA, I. & VAVŘÍN, P. Teorie řízení I – Lineární systém. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1982. 208s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Olga Davidová, Ph.D.

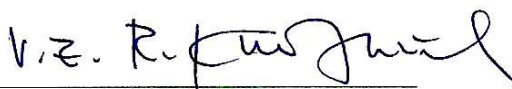
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2007/08.

V Brně, dne **11. 12. 2007**

L.S.



doc. RNDr. Ing. Miloš Šeda, Ph.D.
Ředitel ústavu



doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Pavel Velecký
Bytem: Uherský Brod, Tovární 1308
Narozen/a (datum a místo): 30. 5. 1967, Uherské Hradiště

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství
se sídlem Technická 2896/2, 616 69 Brno
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
doc.RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.....
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
- diplomová práce
- bakalářská práce
- jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

.....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Katalog typizovaných logaritmických frekvenčních
charakteristik

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Olga Davidová, Ph.D.

Ústav: Ústav automatizace a informatiky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v *:

- tištěné formě – počet exemplářů2.....
- elektronické formě – počet exemplářů2.....

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:23.5.2008.....

.....
Nabyvatel

.....
Autor

ABSTRAKT

Jednou z variant, jak navrhnout parametry spojitého regulátoru, je použít metodu typizované logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky. Jedná se o frekvenční metodu, založenou na volbě tvaru typizované logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky otevřeného regulačního obvodu. Pro usnadnění práce při použití této metody jsem vytvořil katalog typizovaných frekvenčních charakteristik.

ABSTRACT

One of the options how to suggest the parameters of the continuous action controller is to use a method of standardized logarithmic amplitude frequency characteristic. It is a frequency method based on the choice of the form of standardized logarithmic amplitude frequency characteristic of open control circuit. I have created a catalogue of standardized logarithmic frequency characteristics in order to facilitate the work while using this method.

KLÍČOVÁ SLOVA

Logaritmická amplitudová frekvenční charakteristika, metoda typizované logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky, spojitý regulátor, korekční člen, katalog typizovaných logaritmických frekvenčních charakteristik.

KEYWORDS

Logarithmic amplitude frequency characteristic, method of standardized logarithmic amplitude frequency characteristic, continuous action controller, correction member, catalogue of standardized logarithmic frequency characteristics.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou vyjádřil svůj dík vedoucí mé bakalářské práce, paní Ing. Olze Davidové, Ph.D., za její cenné rady, připomínky a ochotu při vedení a rodině za pomoc, zázemí a podporu při studiu.

OBSAH

Zadání závěrečné práce	3
Licenční smlouva	5
Abstrakt	7
Poděkování.....	9
1 Úvod	13
2 Frekvenční popis systému.....	15
2.1 Frekvenční přenos.....	15
2.2 Frekvenční charakteristika.....	16
3 Frekvenční charakteristika v logaritmických souřadnicích.....	19
3.1 Popis logaritmické frekvenční charakteristiky.....	19
3.2 Příklady praktického sestrojování logaritmických frekvenčních charakteristik.....	19
3.3 Frekvenční charakteristika spojitého regulátoru.....	22
4 Metoda typizované logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky.....	27
4.1 Popis metody typizované logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky.....	27
4.2 Amplitudová a fázová bezpečnost regulačních obvodů	30
5 Katalog typizovaných logaritmických frekvenčních charakteristik.....	37
5.1 Příklady použití katalogu typizovaných logaritmických frekvenčních charakteristik.....	49
6 Závěr.....	51
Seznam použité literatury.....	53

1 ÚVOD

Rok od roku se fenoménem dnešní doby stává snaha o zvyšování produkce výroby snad ve všech odvětvích našeho hospodářství. Hledají se proto cesty, jak toho dosáhnout. K významným nástrojům lze s jistotou zařadit *automatizaci*. Činnost člověka nahrazují přístroje a zařízení.

Základem automatizace je *řízení*. Je to konkrétní působení na řízený objekt k dosažení předem daných cílů. Automatické řízení lze rozdělovat podle několika kritérií. Jedním z nich je dělení podle působení řídicího systému na řízený systém. Z tohoto hlediska je automatické řízení *logické, spojité, diskrétní a fuzzy*.

Spojité řízení, jehož se bude úzce dotýkat i má bakalářská práce, se vyznačuje nepřetržitou vazbou mezi vstupy systému a výstupy. Všechny jeho veličiny jsou spojitě proměnné v čase. Důležitou kapitolou spojitého řízení jsou *statické a dynamické vlastnosti* regulačních členů. Zkoumáme je podle toho, zda jsou v ustáleném stavu, nebo při změnách vstupních a výstupních veličin. V regulaci nás samozřejmě více zajímají průběhy přechodných dějů, tedy dynamické vlastnosti, které charakterizuje *vnitřní a vnější popis systému*.

Vnější popis systému vyjadřuje dynamické vlastnosti relací mezi vstupem a výstupem systému. Systém zkoumáme pouze pomocí reakce výstupu na vstupní podněty. Považujeme ho zde za tabu, nezajímají nás žádné děje, které uvnitř probíhají.

Způsoby vnějšího popisu, závislost mezi vstupem a výstupem systému, jsou:

- Diferenciální rovnice systému
- Přenos systému
- Impulsní funkce a charakteristika
- Přechodová funkce a charakteristika
- Frekvenční přenos
- Frekvenční charakteristika v komplexní rovině
- Frekvenční charakteristika v logaritmických souřadnicích

Vzhledem k zadanému tématu mé bakalářské práce, budu se v dalším pojednání zabývat posledními třemi způsoby popisu, tedy frekvenčním přenosem, krátce se zmíním o frekvenčních charakteristikách v komplexní rovině a podrobněji rozeberu frekvenční charakteristiky v logaritmických souřadnicích, kde popíšu metodu typizované logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky. Pak pro vybrané regulované soustavy navrhnu různé typy regulátorů na základě požadované amplitudové a fázové bezpečnosti.

Hlavním cílem práce je vytvoření katalogu typizovaných logaritmických amplitudových frekvenčních charakteristik otevřeného regulačního obvodu v závislosti na typu regulované soustavy a regulátoru.

Na závěr se pokusím získané poznatky této práce ucelit a provést vyhodnocení.

2 FREKVENČNÍ POPIS SYSTÉMU

Jak už jsem v úvodu uvedl, jedním ze způsobů vnějšího popisu je frekvenční přenos a frekvenční charakteristiky. Ty mohou být v lineárních souřadnicích, v komplexní rovině a v logaritmických souřadnicích. Nyní popíšu frekvenční přenos a frekvenční charakteristiky v lineárních souřadnicích a v komplexní rovině, frekvenční charakteristiky v logaritmických souřadnicích rozeberu podrobně v samostatné kapitole.

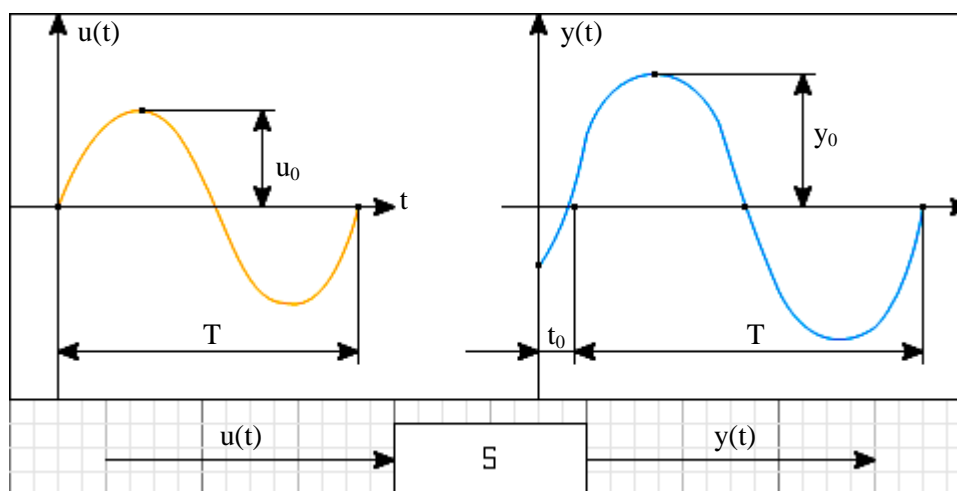
2.1 Frekvenční přenos

Frekvenční přenos lze získat tím, že na vstup systému přivedeme harmonický signál. Typickým harmonickým signálem je sinusový průběh: [1]

$$u(t) = u_0 \cdot \sin \omega t \quad (1)$$

u_0amplituda vstupního signálu

ωúhlová frekvence vstupního signálu



Obr. 1 Frekvenční přenos systému

Na výstupu systému dostaneme po odeznění přechodového jevu opět sinusový signál, ale s jinou amplitudou, stejnou úhlovou frekvencí a proti vstupu je signál fázově posunutý. [1]

$$y(t) = y_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

Popis veličin lze vyjádřit rovněž v komplexním tvaru: [1]

$$u(t) = u_0 \cdot e^{j\omega t} \quad (3)$$

$$y(t) = y_0 \cdot e^{j(\omega t + \varphi)} \quad (4)$$

což jsou v komplexní rovině vektory, které se otáčejí úhlovou rychlostí ω . Poměr těchto vektorů definuje *frekvenční přenos*. [1]

$$G(j\omega) = \frac{y(t)}{u(t)} = \frac{y_0 \cdot e^{j(\omega t + \varphi)}}{u_0 \cdot e^{j\omega t}} = \frac{y_0}{u_0} \cdot e^{j\varphi} \quad (5)$$

$\frac{y_0}{u_0}$ poměr amplitud – je nazýván modulem

φfázové posunutí – je nazýváno argumentem

Frekvenční přenos systému získáme z přenosu v Laplaceově transformaci formální záměnou proměnných $s \rightarrow j\omega$, takže z přenosu dostáváme frekvenční přenos. [1]

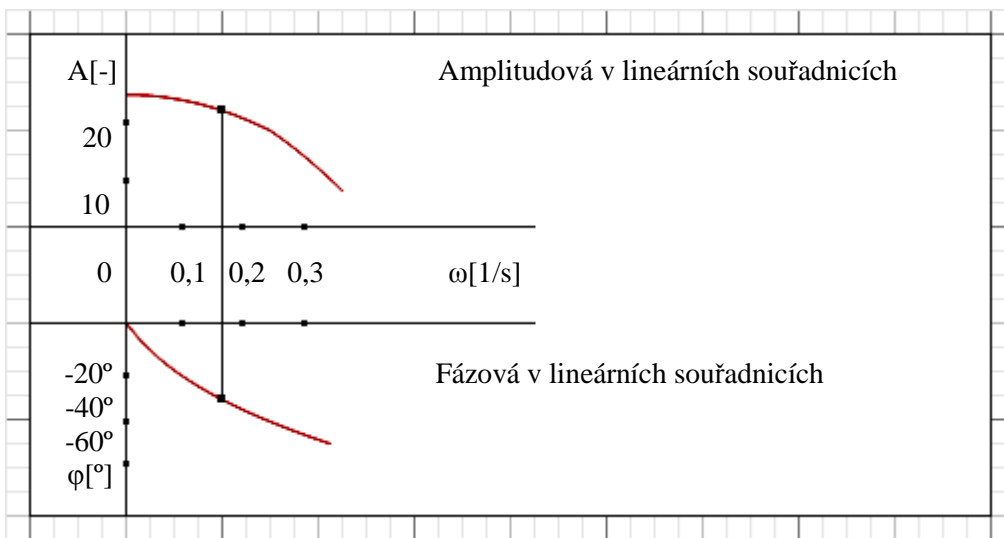
$$G(j\omega) = G(s) |_{s=j\omega} = \frac{b_m(j\omega)^m + \dots + b_1(j\omega) + b_0}{a_n(j\omega)^n + \dots + a_1(j\omega) + a_0} \quad (6)$$

2.2 Frekvenční charakteristika

V podstatě rozeznáváme tři druhy frekvenčních charakteristik. V lineárních souřadnicích, v komplexní rovině a v logaritmických souřadnicích. Pokusím se krátce vysvětlit rozdíly mezi nimi a způsoby jejich konstrukcí.

Frekvenční charakteristika v lineárních souřadnicích

Jedná se o zobrazení frekvenčního přenosu v lineárních souřadnicích. Můžeme ji rozdělit na amplitudovou a fázovou. Problémem u těchto charakteristik jsou právě jejich lineární souřadnice. Mají úzké frekvenční pásmo a i při jejich rozšíření je nejdůležitější část charakteristiky se změnou amplitudy nahuštěna do úzkého rozsahu frekvencí, což je málo čitelné. Další nevýhodou je konstrukční pracnost. Proto nejsou příliš vhodné a málo se používají. [1][4]

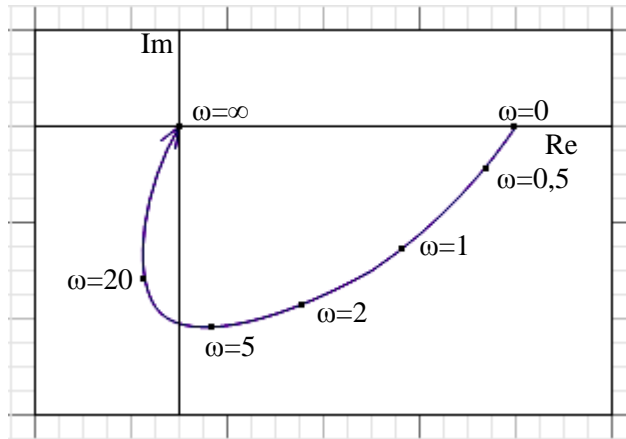


Obr.2 Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika v lineárních souřadnicích.

Frekvenční charakteristika v komplexní rovině.

Jako podstatně výhodnější a názornější je zobrazení frekvenční charakteristiky v komplexní rovině.

Jde o grafické zobrazení frekvenčního přenosu $G(j\omega)$ v komplexní rovině. Proměnným parametrem je úhlová frekvence ω , která náleží intervalu $\langle 0; \infty \rangle$. Na základě této definice lze frekvenční charakteristiku sestavit.



Obr. 3 Frekvenční charakteristika v komplexní rovině

Při praktickém sestavování frekvenční charakteristiky lze využít dvou principů konstrukce:

- převedení frekvenčního přenosu na složkový tvar komplexního čísla

$$G(j\omega) = \text{Re}[G(j\omega)] + j\text{Im}[G(j\omega)] \quad (7)$$

Sestavujeme tabulku a k voleným hodnotám ω spočítáme hodnoty Re a Im a dle této tabulky pak frekvenční charakteristiku zkonstruujeme. [4]

- převedení frekvenčního přenosu na exponenciální tvar komplexního čísla

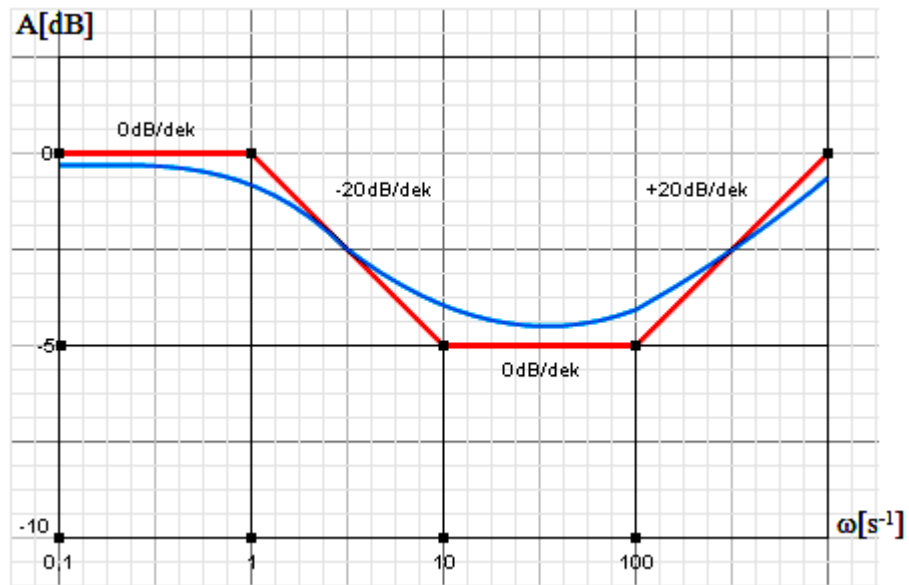
$$G(j\omega) = A(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)} \quad (8)$$

Pro volené hodnoty ω se určuje v případě rovnice (7) reálná a imaginární složka a v případě rovnice (8) hodnoty A a φ . Na základě těchto hodnot se sestavuje frekvenční charakteristika v komplexní rovině.

Výhodou frekvenčních charakteristik v komplexní rovině je názornější zobrazení charakteristik, nevýhodou je pracná konstrukce, zejména počítání hodnot složek imaginární a reálné osy na základě volených frekvencí.

Frekvenční charakteristika v logaritmických souřadnicích.

Co do pracnosti konstrukce charakteristik i přehlednosti zobrazení charakteristiky se zdá ze všech uvedených nejvýhodnější. Pro ilustraci a názornost je tento typ charakteristiky zobrazen v obr. 4. Podrobný popis provedu v následující kapitole 3.



Obr. 4 Příklad amplitudové frekvenční charakteristiky v logaritmických souřadnicích.

3 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA V LOGARITMICKÝCH SOUŘADNICÍCH

V této kapitole nejprve provedu podrobný popis frekvenčních charakteristik v logaritmických souřadnicích, zaměřím se na praktické sestrojování logaritmických frekvenčních charakteristik a uvedu konkrétní příklady na vybraných přenosech systémů. V závěru kapitoly sestavím tabulky s frekvenčními charakteristikami pro základní druhy spojitých regulátorů.

3.1 Popis logaritmické frekvenční charakteristiky

V komplexní rovině lze frekvenční charakteristiku nazvat jako amplitudovo fázovou z toho důvodu, že každému z bodů charakteristiky můžeme přiřadit amplitudu A i fázi φ . Viz (8). $A = A(\omega)$, $\varphi = \varphi(\omega)$. To vše ovšem v lineárních souřadnicích, které jak jsem uvedl v předešlé kapitole, nejsou úplně vhodné. [1][4]

Jako nejvhodnější řešení při zjednodušení konstrukce frekvenčních charakteristik a pro jejich větší názornost se ukázalo převést vodorovnou osu frekvencí do logaritmického měřítka, čímž se dosáhlo větších rozmezí ω . Také zde jde charakteristiku rozdělit na logaritmickou amplitudovou a fázovou. [4]

Amplitudová frekvenční charakteristika v logaritmických souřadnicích má na svislé ose vynesenu amplitudu frekvenčního přenosu $G(j\omega)$, ale ne bezrozměrně jako v lineárních souřadnicích, nýbrž v jednotkách *decibel*. Jde o dvacetinásobek dekadického logaritmu zesílení. Amplituda A je podíl amplitud výstupního a vstupního sinusového signálu, tedy zesílení a $A [dB]$ je rovno:

$$A [dB] = 20 \log A [-] = 20 \log \frac{y_0}{u_0} \quad (9)$$

Na svislou osu píšeme $A [dB]$ již v lineárním měřítku. Logaritmičnost je dána podstatou decibelu.

Fázová frekvenční logaritmická charakteristika má na svislé ose fázi φ v lineárním měřítku ve stupních nebo radiánech. [4]

Význam zavedení logaritmických frekvenčních charakteristik spočívá ve zjednodušení výpočtů charakteristik složených systémů a v jejich jednoduchém sestrojování. Asymptoty charakteristik sestrojíme bez složitějšího počítání. Velkou výhodou byly v době bez kalkulaček a počítačové techniky. Dnes jejich význam lehce poklesl, mění se i metodika jejich konstrukce. [4]

Dále pro větší názornost uvedu několik příkladů praktického sestrojování logaritmických frekvenčních amplitudových i fázových charakteristik na vybraných přenosech systémů.

3.2 Příklady praktického sestrojování logaritmických frekvenčních charakteristik.

Příklad 1.

Sestrojte logaritmickou frekvenční charakteristiku pro systém s přenosem $G(s) = \frac{k}{Ts + 1}$

Zadaný přenos převedeme na frekvenční výměnou $s \rightarrow j\omega$. Rozšířením jmenovatele číslem komplexně sdruženým ho převedeme na složkový tvar a ten upravíme na tvar exponenciální.

$$G(j\omega) = \frac{k}{Tj\omega + 1} = \frac{k}{\sqrt{T^2\omega^2 + 1}} \cdot e^{-\arctg.\omega T} \quad (10)$$

Závislost amplitudy frekvenčního přenosu $A[dB]$ na frekvenci ω určíme průběh amplitudové charakteristiky.

$$A[dB] = 20 \log A = 20 \log k - 20 \log \sqrt{1 + T^2 \omega^2} \tag{11}$$

Tady se dostáváme k pojmu *lomová frekvence*, což je převrácená hodnota některé z časových konstant přenosu.

$$\omega_l = \frac{1}{T} \tag{12}$$

Určíme tedy průběh charakteristiky nejprve pro frekvence *menší* než lomovou frekvencí. Zde platí $\omega < 1/T \rightarrow T\omega < 1$, proto $T^2\omega^2 \ll 1$ a můžeme ho zanedbat ($\log 1 = 0$). Průběh amplitudové charakteristiky bude

$$A[dB] = 20 \log k \tag{13}$$

Je to neměnná hodnota pro všechny frekvence a tou je přímka rovnoběžná s osou ω .

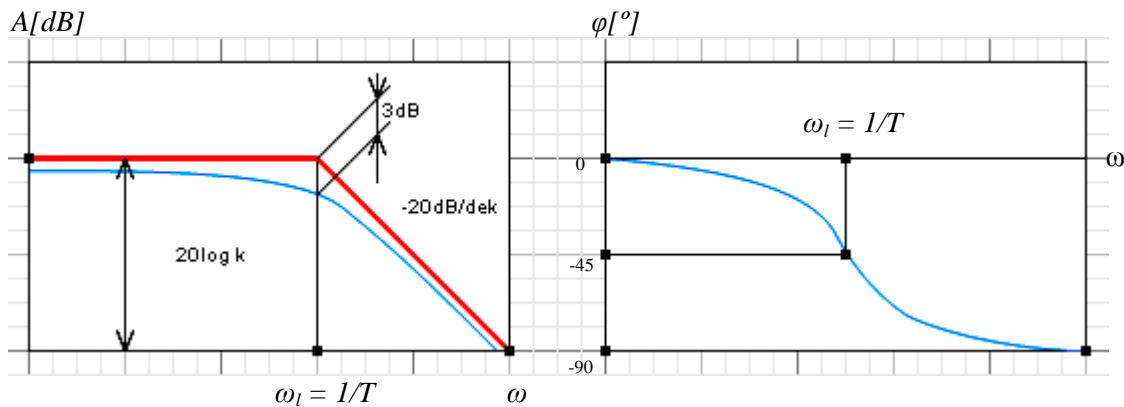
Pro frekvence *větší* než je lomová platí $\omega > 1/T \rightarrow T\omega \gg 1$. Zde můžeme zanedbat 1 proti členu $T^2\omega^2$. Průběh charakteristiky vyjádříme vztahem

$$A[dB] = 20 \log k - 20 \log T\omega \tag{14}$$

Při úvaze výpočtu $A[dB]$ pro frekvenci 1ω a 10ω platí:

$$\begin{aligned} 1\omega & \dots\dots\dots 20 \log k - 20 \log T\omega \\ 10\omega & \dots\dots\dots 20 \log k - 20 \log 10 T\omega = 20 \log k - 20(\log 10 + \log T\omega) = 20 \log k - 20 - 20 \log T\omega \end{aligned}$$

Hodnota A je pro $10x$ větší frekvenci o 20 dB menší. Na ose ω s logaritmickým měřítkem je úsek mezi kterýmkoliv ω a 10ω vždy stejně dlouhý. Logaritmická frekvenční amplitudová charakteristika je v tomto případě přímka se sklonem -20 dB na dekádu.



Obr. 5 Logaritmická frekvenční amplitudo-fázová charakteristika přenosu $G(s) = \frac{k}{Ts + 1}$

Amplitudová charakteristika daného přenosu je tedy vlevo od lomové frekvence rovnoběžka s vodorovnou osou, vpravo to je přímka o sklonu -20 dB/dek . Nejde ale o přímou charakteristiku, jedná se o asymptotický průběh. Skutečná charakteristika se k těmto asymptotám jen přibližuje. Je to zanedbáním nejprve výrazu $T^2\omega^2$ a pak jedničky. Největší odklony od průběhu skutečné charakteristiky jsou v lomových frekvencích. Lze je zjistit výpočtem a porovnáním s aproximovanou hodnotou $20 \log k$. V našem případě:

$$A[dB] = 20 \log k - 20 \log \sqrt{1 + 1} = 20 \log k - 3 \tag{15}$$

Rozdíl je -3 dB .

Fázovou frekvenční logaritmickou charakteristiku sestrojíme pomocí vztahu $\varphi = -\arctg T\omega$ vyhledáním funkce \arctg v příslušných tabulkách. [4]

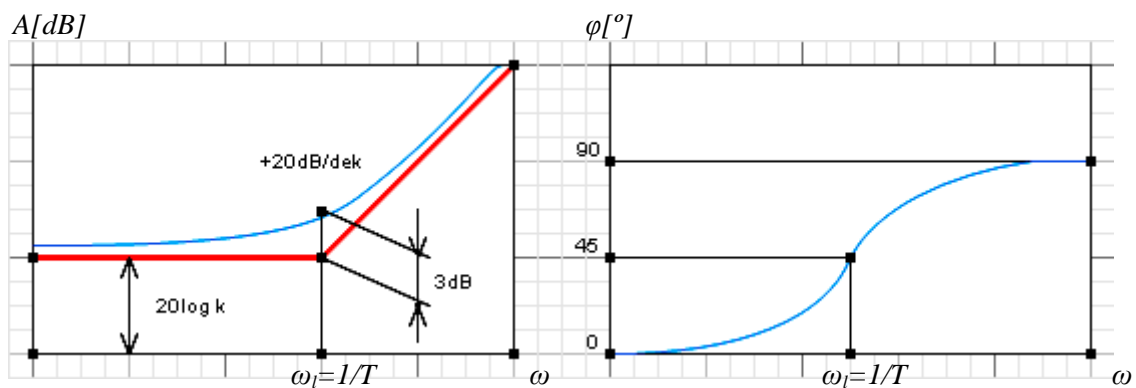
Příklad 2.

Sestrojte logaritmickou frekvenční charakteristiku pro systém s přenosem $G(s) = k.(Ts + 1)$. Jedná se o analogii k příkladu 1. Pro průběh amplitudy bude platit:

$$A[dB] = 20\log A = 20\log |k|. |Tj\omega + 1| = 20\log k. \sqrt{T^2 \omega^2 + 1} = 20\log k + 20\log \sqrt{T^2 \omega^2 + 1}$$

Změna je oproti přenosu $G(s) = \frac{k}{Ts + 1}$ ve sklonu přímky vpravo od lomové frekvence, který v našem případě bude $+20dB/dek$.

Fázovou logaritmickou charakteristiku sestrojíme podle vztahu $\varphi = \arctg T\omega$. Její průběh bude obsažen v kladných hodnotách φ . [4]



Obr. 6 Amplitudová a fázová logaritmická frekvenční charakteristika přenosu $G(s)=k.(Ts+1)$

Příklad 3.

Sestrojte logaritmickou frekvenční charakteristiku pro systém s přenosem

$$G(s) = 5. \frac{(4s + 1)}{(2s + 1)(s + 1)(0,5s + 1)}$$

- převedeme zadaný přenos na frekvenční přenos:

$$G(j\omega) = 5. \frac{(4j\omega + 1)}{(2j\omega + 1)(j\omega + 1)(0,5j\omega + 1)}$$

- vytvoříme exponenciální tvar frekvenčního přenosu:

$$G(j\omega) = 5. \frac{\sqrt{16\omega^2 + 1}}{\sqrt{4\omega^2 + 1}\sqrt{\omega^2 + 1}\sqrt{0,25\omega^2 + 1}}. e^{j(\arctg 4\omega - \arctg 2\omega - \arctg \omega - \arctg 0,5\omega)}$$

- sestavíme rovnici amplitudové logaritmické frekvenční charakteristiky:

$$A[dB] = 20\log 5 + 20\log \sqrt{16\omega^2 + 1} - 20\log \sqrt{4\omega^2 + 1} - 20\log \sqrt{\omega^2 + 1} - 20\log \sqrt{0,25\omega^2 + 1}$$

- sestavíme rovnici fázové logaritmické frekvenční charakteristiky:

$$\varphi = \arctg 4\omega - \arctg 2\omega - \arctg \omega - \arctg 0,5\omega$$

- určíme lomové frekvence – převratné hodnoty časových konstant:

$$\omega_1 = \frac{1}{4} = 0,25 \quad \omega_2 = \frac{1}{2} = 0,5 \quad \omega_3 = \frac{1}{1} = 1 \quad \omega_4 = \frac{1}{0,5} = 2$$

- uspořádáme lomové frekvence dle velikosti:

$$(0,25 < 0,5 < 1 < 2) = (\omega_1 < \omega_2 < \omega_3 < \omega_4)$$

g) konstrukce:

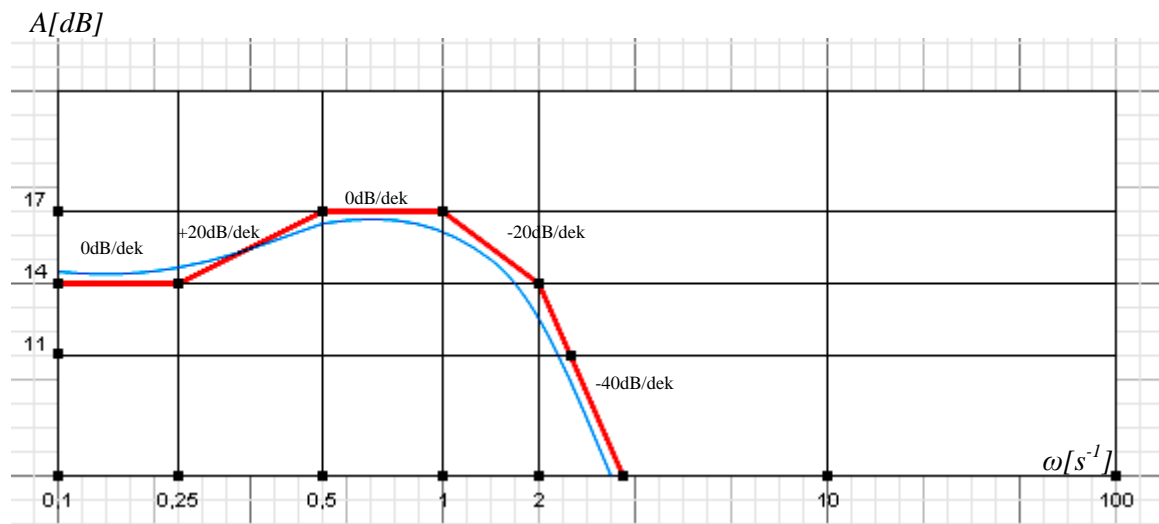
1. asymptota – pro $\omega < \omega_1$ platí – přímka rovnoběžná s ω , vzdálenost $20 \log 5 \approx 14$.
2. asymptota $(4j\omega + 1)$ – pro $\omega_1 < \omega < \omega_2$ platí – přímka sklon $+20\text{dB/dek}$.
3. asymptota $\left(\frac{1}{2j\omega + 1}\right)$ – pro $\omega_2 < \omega < \omega_3$ platí – přímka sklon -20dB/dek , o tento sklon se zmenší

sklon předcházející asymptoty, který byl $+20\text{dB/dek}$, takže výsledná asymptota je rovna 0dB/dek , tedy rovnoběžka s ω .

4. asymptota $\left(\frac{1}{j\omega + 1}\right)$ – pro $\omega_3 < \omega < \omega_4$ platí – přímka sklon -20dB/dek .

5. asymptota $\left(\frac{1}{0,5j\omega + 1}\right)$ – pro $\omega_4 < \omega$ platí – přímka sklon -20dB/dek , po přičtení

k předcházející asymptotě $-20\text{dB/dek} - 20\text{dB/dek} = -40\text{dB/dek}$, tedy přímka s výsledným sklonem -40dB/dek .

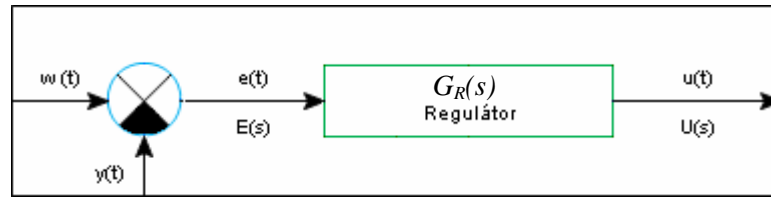


Obr. 7 Amplitudová logaritmická frekvenční char. přenosu $G(s) = 5 \cdot \frac{(4s + 1)}{(2s + 1)(s + 1)(0,5s + 1)}$

Fázovou logaritmickou frekvenční charakteristiku sestrojíme pro jednotlivé členy samostatně jako funkci \arctg a pak sečteme podle vztahu, který jsem uvedl pro průběh φ .

3.3 Frekvenční charakteristika spojitého regulátoru.

Regulátor je zařízení v regulačním obvodu, kterým se uskutečňuje proces automatické regulace.



Obr. 8 Zjednodušené blokové schéma regulátoru.

Prostřednictvím akční veličiny $u(t)$ působíme na regulovanou soustavu tak, aby se regulovaná veličina $y(t)$ udržovala na předepsané hodnotě a regulační odchylka $e(t)$ byla co nejmenší, nebo nulová.

$$e(t) = w(t) - y(t) \tag{16}$$

- $e(t)$regulační odchylka
- $w(t)$žádaná hodnota
- $y(t)$regulovaná veličina

Podle průběhu výstupní veličiny můžeme regulátory dělit na *spojité* a *nespojité*. U spojitých regulátorů jsou všechny veličiny spojité v čase, pracují se spojitými signály. V nespojitém regulátoru některý z členů pracuje nespojitě.

Dynamicke vlastnosti nám regulátory (ústřední členy) dělí do několika skupin. Regulátor může regulační odchylku zesilovat, integrovat a derivovat. Jedná se o tzv. ideální regulátory (bez zpožďujících členů). [4]

Ke každému z regulátorů můžeme tedy sestavit rovnici. Tuto rovnici lze upravit na přenos a ten na frekvenční přenos. Z něho sestojíme frekvenční charakteristiku a to jak v komplexní rovině, tak v logaritmických souřadnicích.

Pro názornost a přehlednost ke každému typu ideálního spojitého regulátoru uvedu v *tab.1.* typ a rovnici regulátoru, rovnici přenosu a frekvenční (kmitočtovou) charakteristiku v komplexní rovině i v logaritmických souřadnicích.

Tab. 1 Typy, rovnice a přenosy ideálních spojitých regulátorů

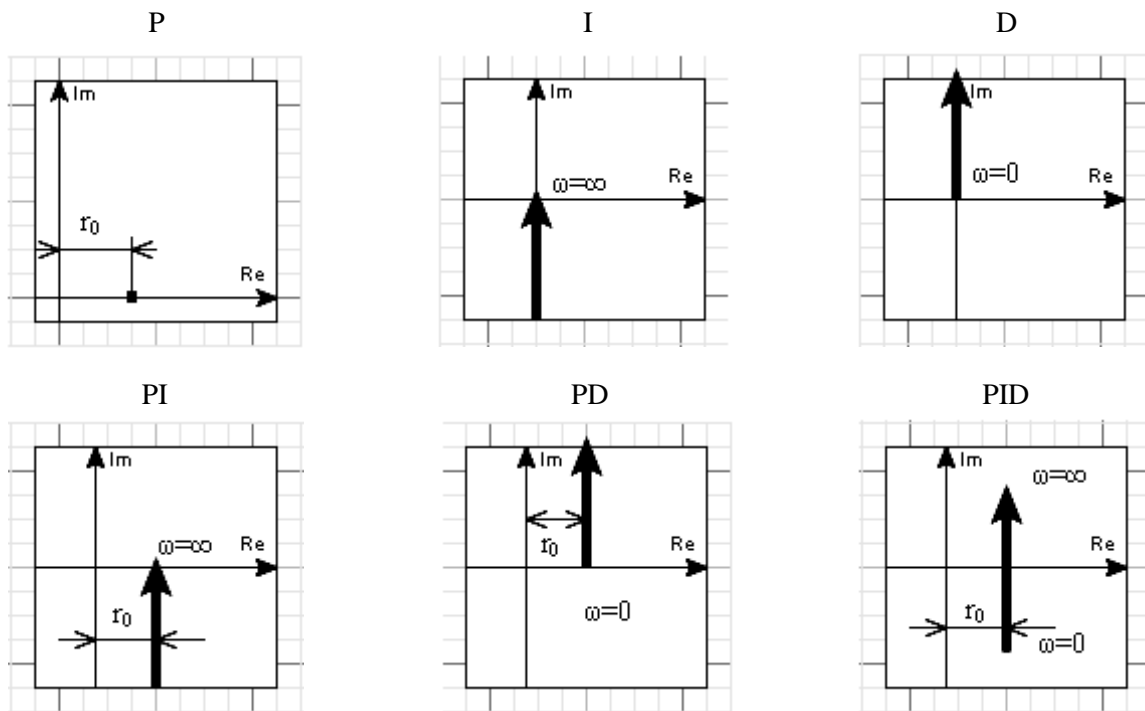
Typ	Diferenciální rovnice	Přenos
P	$u = r_0 \cdot e$	$G_R(s) = r_0$
I	$u = r_{-1} \cdot \int edt$	$G_R(s) = \frac{r_{-1}}{s}$
D	$u = r_1 \cdot e'$	$G_R(s) = r_1 \cdot s$
PI	$u = r_0 \cdot e + r_{-1} \cdot \int edt$	$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s}$
PD	$u = r_0 \cdot e + r_1 \cdot e'$	$G_R(s) = r_0 + r_1 \cdot s$
PID	$u = r_0 \cdot e + r_{-1} \cdot \int edt + r_1 \cdot e'$	$G_R(s) = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 \cdot s$

r_0 – proporcionalní konstanta

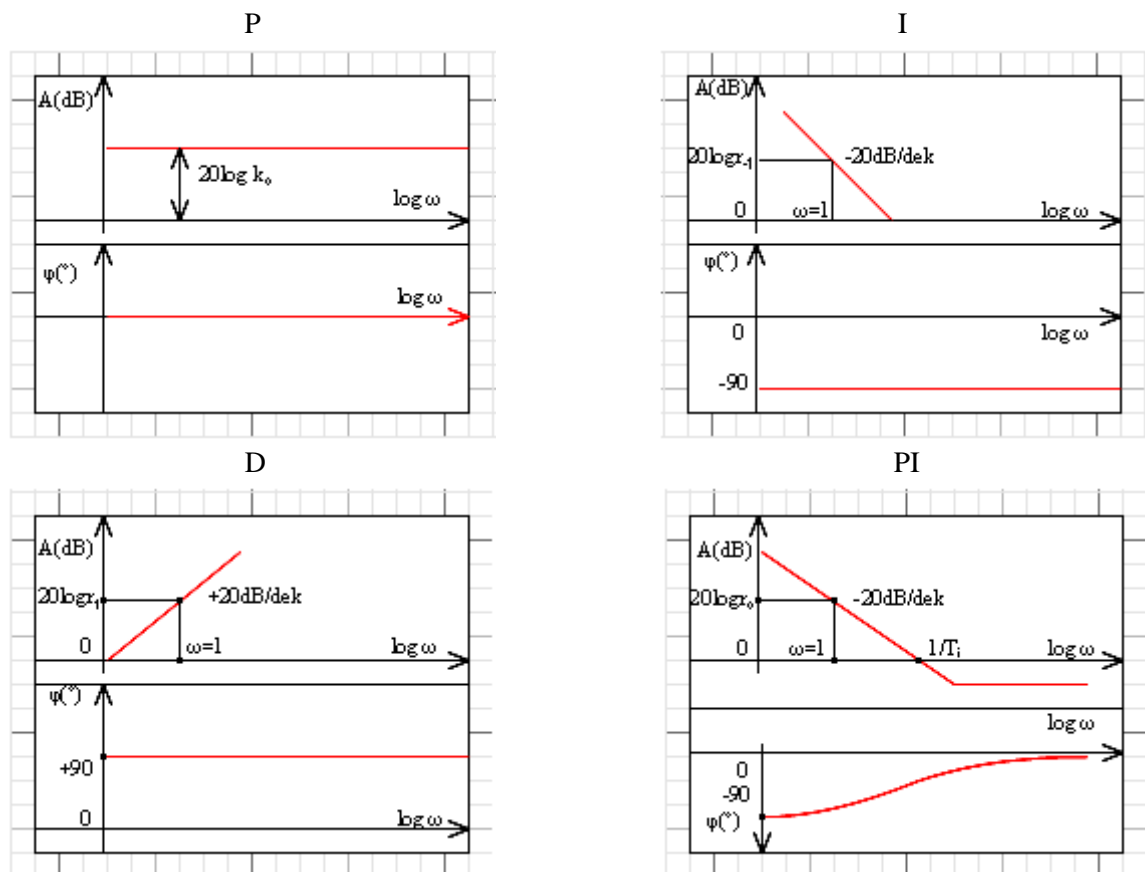
r_{-1} – integrační konstanta

r_1 – derivační konstanta

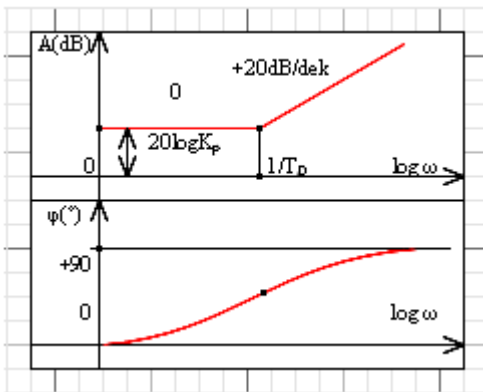
Frekvenční charakteristiky ideálních regulátorů v komplexní rovině: [1]



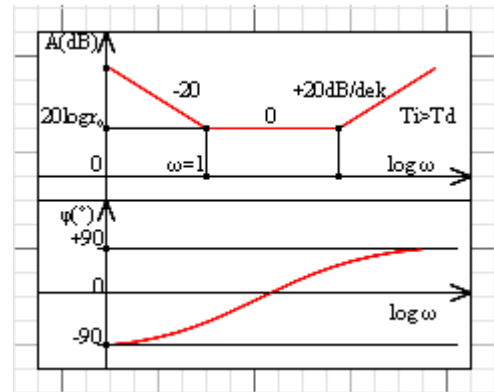
Frekvenční charakteristiky ideálních regulátorů v logaritmických souřadnicích (amplitudová, fázová):



PD

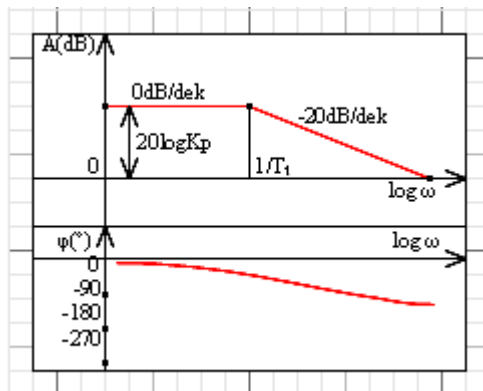


PID

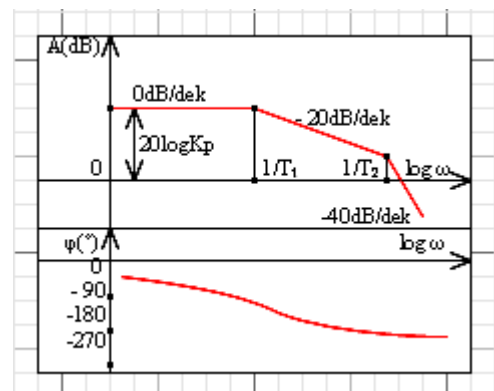


Pro větší názornost a celkové dokreslení celé problematiky frekvenčních charakteristik regulátorů uvedu i průběhy amplitudových a fázových logaritmických frekvenčních charakteristik regulátorů se zpožděním, tj. se setrvačnostmi 1. a 2. řádu. [5]

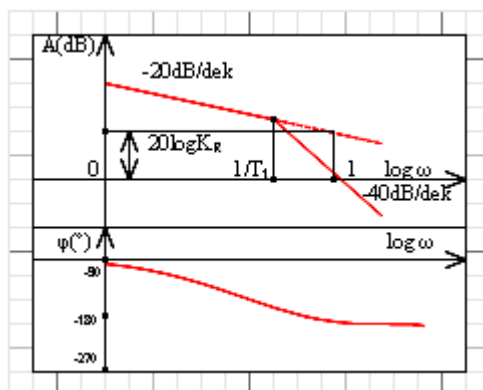
P – 1. řád



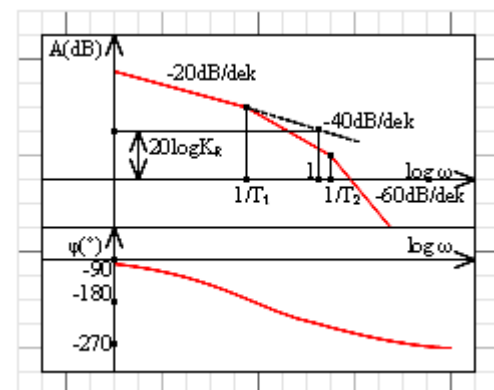
P – 2. řád



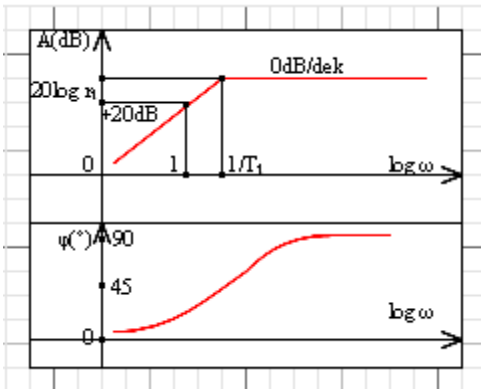
I – 1. řád



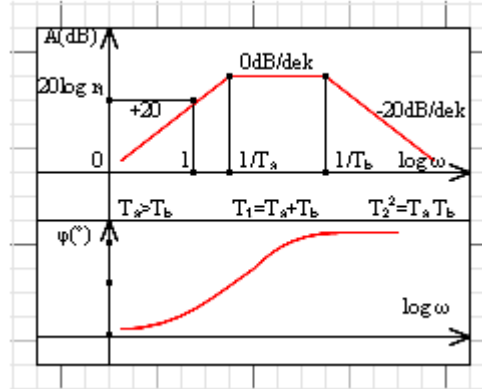
I – 2. řád



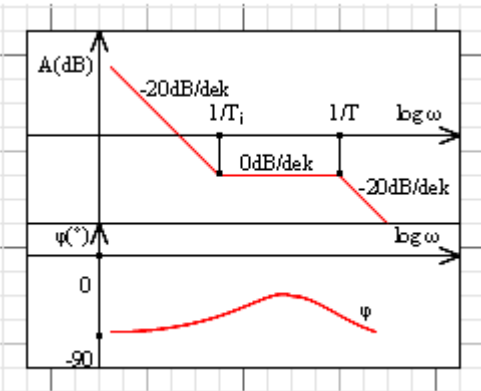
D – 1. řád



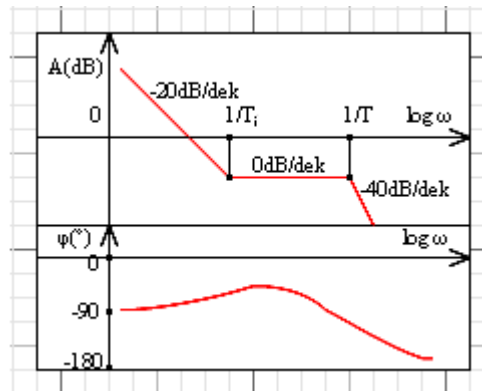
D – 2. řád



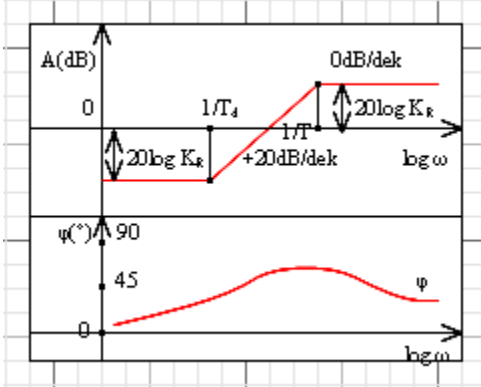
PI – 1. řád



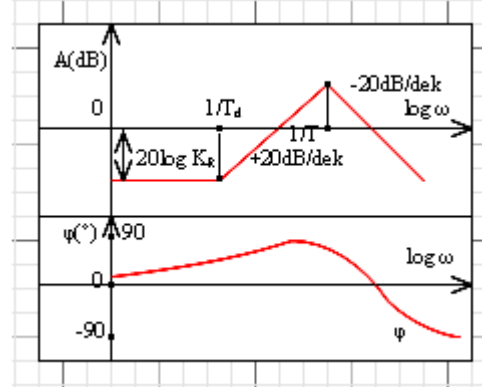
PI – 2. řád



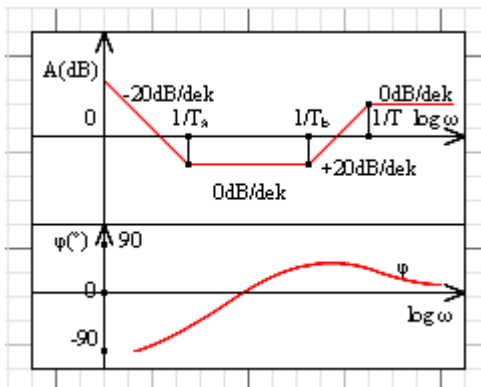
PD – 1. řád



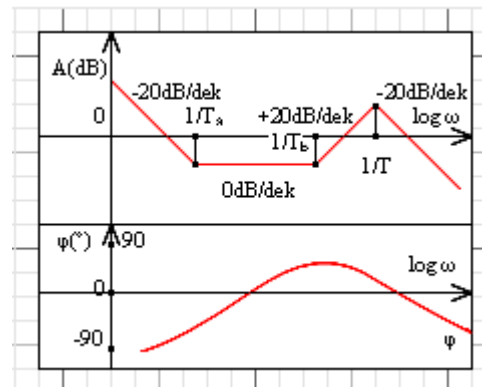
PD – 2. řád



PID – 1. řád



PID – 2. řád



4 METODA TYPIZOVANÉ LOGARITMICKÉ AMPLITUDOVÉ FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY

Pro návrh regulačního obvodu nejvíce využíváme metody, které jsou založeny na frekvenčních charakteristikách v logaritmických souřadnicích. Jednak lze pomocí nich získat ucelený názor na chování systému, jednak, jak už jsem uvedl, jejich sestrojování a zacházení s nimi je podstatně snazší než u frekvenčních charakteristik v komplexní rovině.

Jedna z metod návrhu regulačního obvodu (regulátoru k zadané soustavě) je použití metody typizované logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky (LAFCH), která je založena na znalosti tzv. typizované LAFCH otevřeného obvodu, kterou se nyní pokusím popsat a osvětlit.

4.1 Popis metody typizované logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky.

Podle daných pravidel, která uvedu později, se dá sestrojít typizovaná logaritmická amplitudová charakteristika otevřeného obvodu $G_o(j\omega)$ splňující požadavky na regulaci. Pro frekvenční přenos otevřeného regulačního obvodu platí:

$$G_o(j\omega) = G_R(j\omega) \cdot G_S(j\omega) \quad (17)$$

Odtud lze snadno odvodit

$$G_R(j\omega) = \frac{G_o(j\omega)}{G_S(j\omega)} \quad (18)$$

Pro logaritmické souřadnice pak platí:

$$|G_R(j\omega)| = |G_o(j\omega)| - |G_S(j\omega)| \quad (19)$$

$$\varphi_R = \varphi_o - \varphi_S \quad (20)$$

$G_R(j\omega)$frekvenční přenos navrhovaného regulátoru

$G_S(j\omega)$frekvenční přenos regulované soustavy i s případnými neproměnnými členy regulačního obvodu (snímače apod.)

$G_o(j\omega)$frekvenční přenos otevřeného regulačního obvodu

Z rovnic (19), (20) je zřejmé, že v logaritmických souřadnicích jde o grafické sčítání amplitudových a fázových frekvenčních charakteristik.

Základem řešení je tedy tak zvaná typizovaná amplitudová frekvenční charakteristika otevřeného obvodu, která se sestrojuje z $G_o(j\omega)$. Tuto charakteristiku můžeme rozdělit na tři části, na nízkofrekvenční, středofrekvenční a vysokofrekvenční oblast viz obr. 9. [3]

Nízkofrekvenční část je úsek v rozsahu úhlových frekvencí $\omega = 0$ až po ω_1 , kde $\omega_1 = 1/T_{max}$ je první zlom frekvenční charakteristiky. Sklon charakteristiky v této oblasti je 0, -20, -40 dB/dek a to podle počtu nulových pólů otevřeného obvodu, které udávají stupeň astatismu. Platí:

$$G_o(s) = \frac{k \cdot (\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1) \dots (\tau_m s + 1)}{s^q \cdot (T_1 s + 1)(T_2 s + 1) \dots (T_n s + 1)} \quad (21)$$

k zesílení

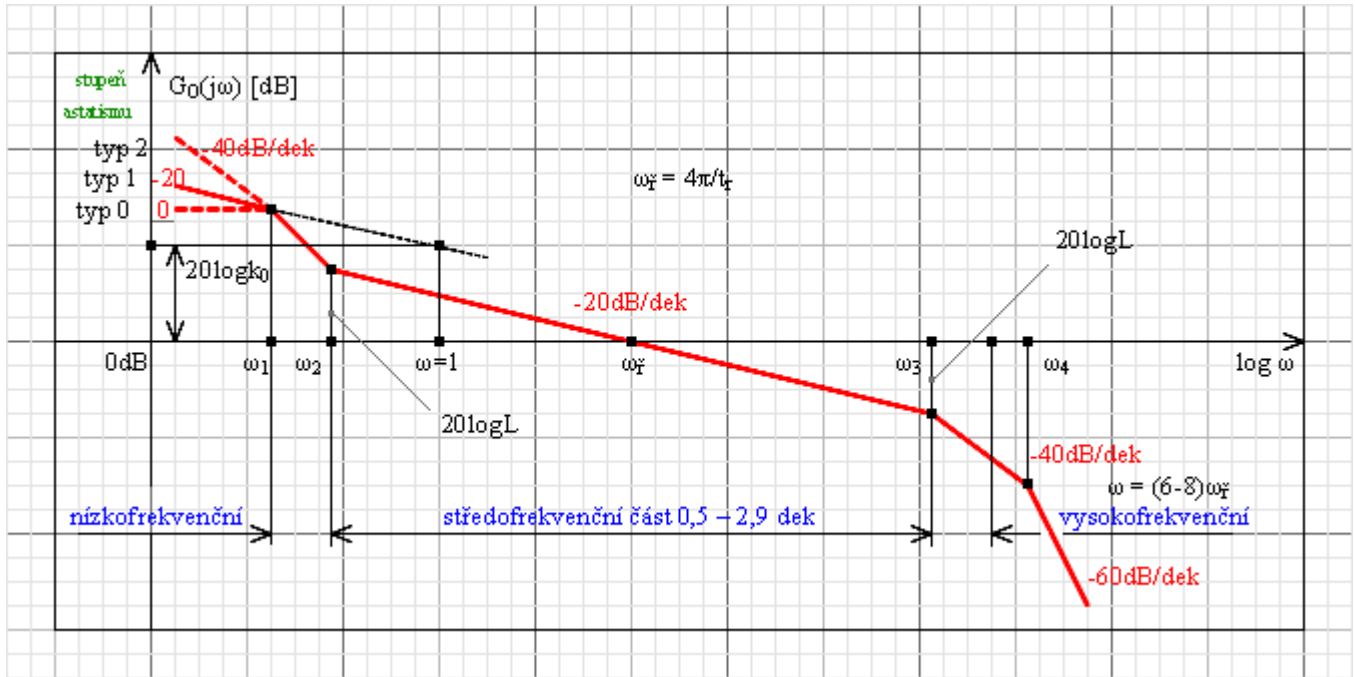
qřád astatismu přenosu – typ regulačního obvodu

Podle řádu astatismu se dělí regulační obvod na obvod typu 0, typu 1 a typu 2.

Typ 0 – proporcionální otevřený regulační obvod, nemá integrační složku, ($q = 0$)

Typ 1 – integrační otevřený regulační obvod, jednonásobný pól je roven 0, ($q = 1$)

Typ 2 – integrační otevřený regulační obvod, dvojnásobný pól je roven 0, ($q = 2$)



Obr. 9 Typizovaná logaritmická amplitudová frekvenční charakteristika

Asymptota nízkofrekvenční části charakteristiky musí procházet hodnotou $20 \log k_0$ při frekvenci $\omega = 1$, kde k_0 je zesílení otevřeného obvodu. Tím je určena přesnost regulace v ustáleném stavu. Nízkofrekvenční část charakteristiky tedy určuje typ regulačního obvodu a má vliv na přesnost regulačního obvodu v ustáleném stavu. [1][3][5]

Středofrekvenční část určuje kvalitu přechodného děje. Jde o úsek v okolí průsečíku amplitudové frekvenční charakteristiky otevřeného obvodu s osou 0dB při úhlové frekvenci ω_f . Šířka této části je omezena úhlovou frekvencí ω_2 a ω_3 . Požadovaný sklon charakteristiky je zde z důvodu správného průběhu přechodové charakteristiky uzavřeného regulačního obvodu v okolí frekvence $\omega_f = -20 \text{ dB/dek}$. Úhlovou frekvenci ω_f lze určit dle vztahu:

$$\omega_f = \frac{4\pi}{t_r} \tag{22}$$

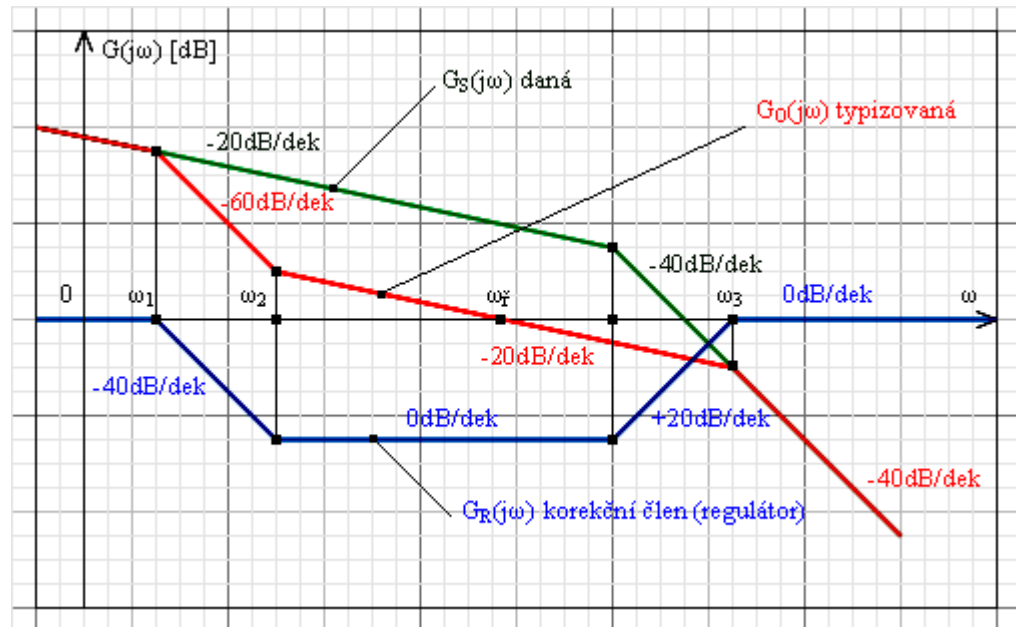
$t_r [s]$ požadovaná doba regulace

Šířka středofrekvenčního pásma se volí v rozsahu 0,5 – 2,9 dekády. Středofrekvenční část amplitudové frekvenční charakteristiky udává stabilitu a tvar přechodového děje regulačního pochodu. Nízkofrekvenční a středofrekvenční část charakteristiky se spojuje obvykle asymptotou se sklonem – 40 až – 60 dB/dek. Totéž platí pro středofrekvenční a vysokofrekvenční část. Čím je středofrekvenční část charakteristiky širší, tím více je regulační obvod tlumen a tím je větší jeho fázová bezpečnost. [1][3][5]

Vysokofrekvenční část začíná pro úhlové frekvence $\omega = (6-8) \omega_f$. Tato část charakteristiky nemá podstatný vliv na průběh přechodového jevu, a proto se často zanedbává. Její sklon je obvykle -40 až -60 dB/dek. [1][3][5]

Postup návrhu regulátoru pomocí této metody bude tedy následující:

- sestavíme přenos regulované soustavy $G_S(s)$
- do grafu zakreslíme jí odpovídající logaritmickou amplitudovou frekvenční charakteristiku
- sestrojíme typizovanou (požadovanou) amplitudovou frekvenční charakteristiku otevřeného regulačního obvodu $G_O(s)$ v logaritmických souřadnicích s požadavky respektujícími průběh její nízkofrekvenční a středofrekvenční části
- odečteme od typizované (požadované) logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky otevřeného regulačního obvodu s přenosem $G_O(s)$ logaritmickou amplitudovou frekvenční charakteristiku regulované soustavy s přenosem $G_S(s)$ a tím dostaneme logaritmickou amplitudovou frekvenční charakteristiku hledaného regulátoru s přenosem $G_R(s)$ viz obr. 10.



Obr. 10 Použití typizované amplitudové frekvenční charakteristiky v logaritmických souřadnicích pro návrh dynamických vlastností regulátoru v regulačním obvodu.

Použití metody typizované amplitudové logaritmické frekvenční charakteristiky otevřeného obvodu je běžnější při návrhu servomechanismů než klasických regulačních obvodů s rozdělením na regulátor a regulovanou soustavu. U obvodů soustava - regulátor je struktura obvodu v podstatě plně dána a volba typu regulátoru a návrh jeho parametrů je omezená.

U servomechanismů naopak můžeme pro dosažení shody skutečné charakteristiky otevřeného obvodu používat sériových nebo zpětnovazebních *korekčních členů* nebo jejich kombinace. Obr. 10 pro určení parametrů regulátoru si můžeme u servomechanismů představit pro návrh *sériového korekčního členu*. [3]

Frekvenční přenos otevřeného obvodu $G_O(j\omega)$ je amplitudovou charakteristikou plně určen. Frekvenční charakteristiku regulátoru (korekčního členu) dostaneme podle rovnic (19) a (20) a z nich určíme frekvenční přenos regulátoru $G_R(s)$.

4.2 Amplitudová a fázová bezpečnost regulačních obvodů

Změnou parametrů otevřeného regulačního obvodu můžeme ovlivňovat stabilitu uzavřených regulačních obvodů. Zvětšováním hodnoty zesílení snadno přejde stabilní regulační obvod do nestabilního stavu. Aby se takovému stavu zabránilo, je třeba navrhovat parametry regulace podle určitých pravidel. Těmi jsou amplitudová a fázová bezpečnost regulačních obvodů.

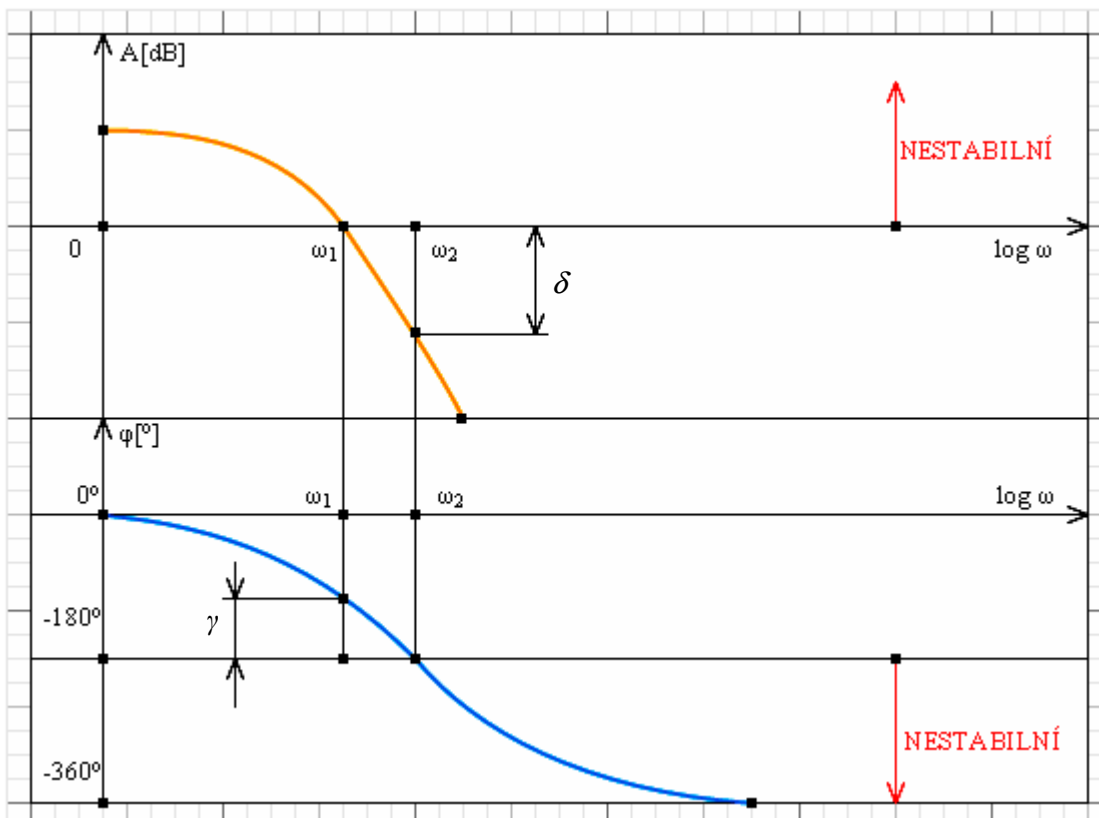
Amplitudová bezpečnost δ otevřeného regulačního obvodu říká, kolikrát je třeba zvětšit (resp. zmenšit) zesílení otevřeného regulačního obvodu, aby uzavřený regulační obvod dosáhl meze stability. [1]

Fázová bezpečnost γ frekvenční charakteristiky otevřeného regulačního obvodu je dána úhlem γ frekvenční charakteristiky otevřeného regulačního obvodu při frekvenci, při které se amplituda frekvenční charakteristiky rovná jedné. Říká nám, o jaký úhel by se mohlo zvětšit fázové zpoždění, aby při nezměněné amplitudě byl obvod opět na hranici stability. [1]

V logaritmických souřadnicích je amplitudová a fázová bezpečnost přehledně znázorněna v obr. 11.

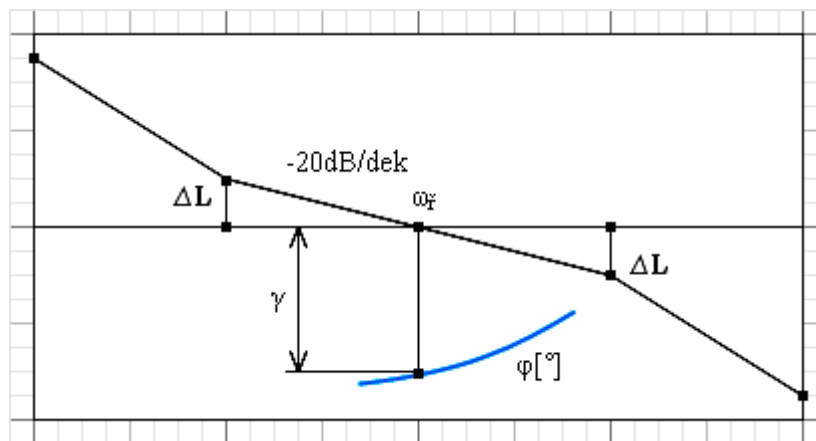
δamplitudová bezpečnost

γfázová bezpečnost



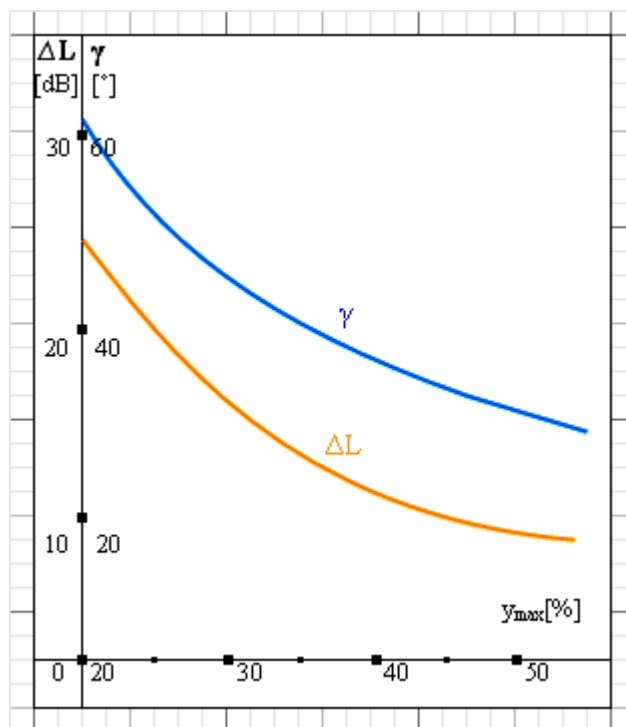
Obr. 11 Amplitudová a fázová bezpečnost regulačního obvodu v logaritmických souřadnicích

Pokud má v logaritmických souřadnicích asymptota amplitudové charakteristiky v okolí ω_f sklon asymptoty -20dB/dek , má fázová bezpečnost γ hodnotu, která závisí na převýšení ΔL koncových bodů asymptoty -20dB/dek proti ose 0dB/dek , jak je vyobrazeno v obr. 12. [3]



Obr. 12 Závislost fázové bezpečnosti na převýšení ΔL koncových bodů středofrekvenční části typizované LAFCH.

Přibližnou závislost překmitu regulované veličiny Δy_{max} [%] na fázové bezpečnosti γ , resp. na převýšení ΔL znázorňuje obr. 13.



Obr. 13 Závislost max. překmitu Δy_{max} na převýšení ΔL a fázové bezpečnosti γ .

Problematiku amplitudové a fázové bezpečnosti regulačních obvodů ukážu názorně na příkladu.

Příklad 4.

K zadanému obecnému přenosu soustavy $G_S(s) = \frac{k \cdot (\tau_1 s + 1)}{s \cdot (T_2 s + 1)}$ vytvořte volbou převýšení ΔL (viz.

obr. 9) přenosy regulátorů (korekčních členů) a porovnejte jejich amplitudové bezpečnosti.

Volba ΔL bude samozřejmě ovlivňovat šířku středofrekvenční části typizované LAFCH, čím větší ΔL , tím větší bude šířka této oblasti. Budeme postupně uvažovat tři případy volby hodnot ΔL : 1,5; 2,5; 5 mm. Přenos zadané soustavy zkonkretizujeme volbou hodnot časových konstant τ_1, T_2, T_3 a

zesílení k . $\tau_1 = 4$, $T_2 = 0,5$, $k = 5$. V našem případě to tedy bude $G_S(s) = \frac{5 \cdot (4s + 1)}{s \cdot (0,5s + 1)}$.

a) $\Delta L = 1,5$ mm

$\Delta L = 1,5$ mm = $20 \log 1,5 = 3,52$. γ z obr. 13 je rovna přibližně dvojnásobku ΔL , platí: $\gamma = 2 \Delta L$

Fázová bezpečnost: $\gamma = 2 \cdot 3,52 \approx 7^\circ$

Z katalogu typizovaných LAFCH vyhledáme tvar typizované LAFCH k zadanému přenosu a podle známých pravidel sestavíme její obecný přenos. V tomto případě to bude:

$$G_O(s) = \frac{k \cdot (\tau_2 s + 1)}{(T_1 s + 1)^2 (T_3 s + 1)}$$

Zvolíme časové konstanty, hodnoty zesílení, spočítáme lomové frekvence, určíme přenos typizované LAFCH:

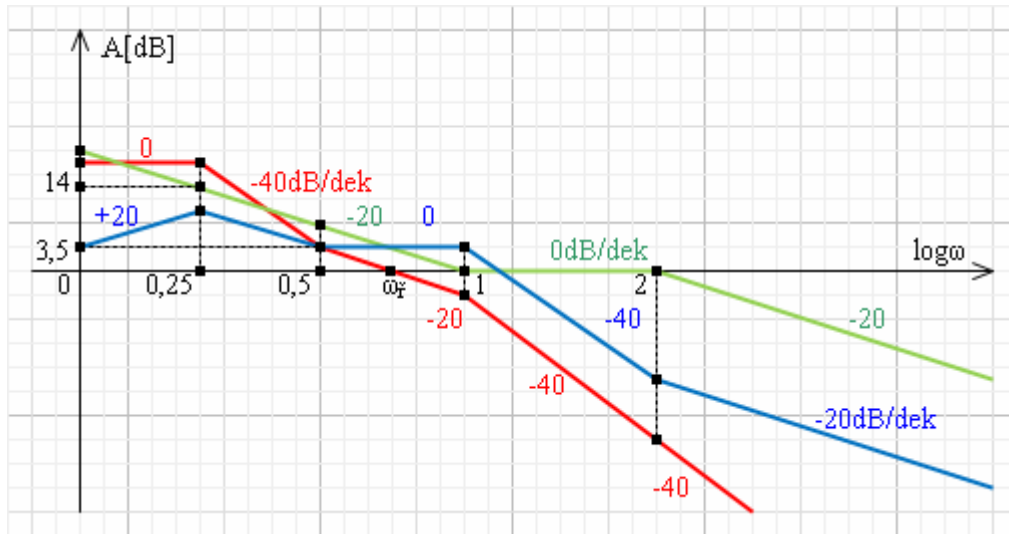
$$T_1 = 4; \tau_2 = 2; T_3 = 1; k = 5 \quad \omega_1 = 0,25; \omega_2 = 0,5; \omega_3 = 1; \omega_4 = 2$$

$$G_O(s) = \frac{5 \cdot (2s + 1)}{(4s + 1)^2 (s + 1)}$$

Z rovnice (26) určíme přenos regulátoru (korekčního členu), jelikož platí: $G_R(s) = \frac{G_O(s)}{G_S(s)}$

$$G_R(s) = \frac{\frac{5 \cdot (2s + 1)}{(4s + 1)^2 (s + 1)}}{\frac{5 \cdot (4s + 1)}{s \cdot (0,5s + 1)}} = \frac{s \cdot (2s + 1) \cdot (0,5s + 1)}{(4s + 1)^3 (s + 1)}$$

Graficky tento příklad vypadá následovně:



Obr. 14 Frekvenční charakteristiky k příkladu 4a.

b) $\Delta L = 2,5 \text{ mm}$

$\Delta L = 2,5 \text{ mm} = 20 \log 2,5 = 7,95$. γ z obr. 13 je rovna přibližně dvojnásobku ΔL , platí: $\gamma = 2 \Delta L$

Fázová bezpečnost: $\gamma = 2 \cdot 7,95 \approx 16^\circ$

Z katalogu typizovaných LAFCH vyhledáme tvar typizované LAFCH k zadanému přenosu a podle známých pravidel sestavíme její obecný přenos. V tomto případě to bude:

$$G_O(s) = \frac{k \cdot (\tau_2 s + 1)}{(T_1 s + 1)^2 (T_3 s + 1)}$$

Zvolíme časové konstanty, hodnoty zesílení, spočítáme lomové frekvence, určíme přenos typizované LAFCH:

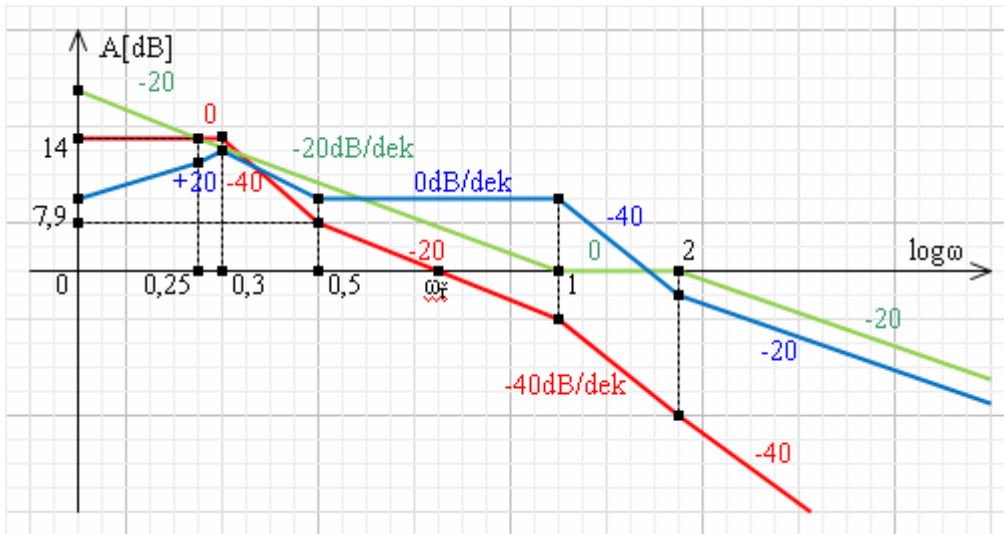
$$T_1 = 3; \tau_2 = 2; T_3 = 1; k = 3 \quad \omega_1 = 0,33; \omega_2 = 0,5; \omega_3 = 1$$

$$G_O(s) = \frac{3 \cdot (2s + 1)}{(3s + 1)^2 (s + 1)}$$

Z rovnice (26) určíme přenos regulátoru (korekčního členu), jelikož platí: $G_R(s) = \frac{G_O(s)}{G_S(s)}$

$$G_R(s) = \frac{3 \cdot (2s + 1)}{(3s + 1)^2 (s + 1)} = \frac{3s \cdot (2s + 1)(0,5s + 1)}{5 \cdot (4s + 1) \cdot s \cdot (0,5s + 1)}$$

Graficky tento příklad vypadá následovně:



Obr. 15 Frekvenční charakteristiky k příkladu 4b.

c) $\Delta L = 5 \text{ mm}$

$\Delta L = 5 \text{ mm} = 20 \log 5 = 13,97$. γ z obr. 13 je rovna přibližně dvojnásobku ΔL , platí: $\gamma = 2 \Delta L$

Fázová bezpečnost: $\gamma = 2 \cdot 13,97 \approx 28^\circ$

Z katalogu typizovaných LAFCH vyhledáme tvar typizované LAFCH k zadanému přenosu a podle známých pravidel sestavíme její obecný přenos. V tomto případě to bude:

$$G_O(s) = \frac{k \cdot (\tau_2 s + 1)}{(T_1 s + 1)^2 (T_3 s + 1)}$$

Zvolíme časové konstanty, hodnoty zesílení, spočítáme lomové frekvence, určíme přenos typizované LAFCH:

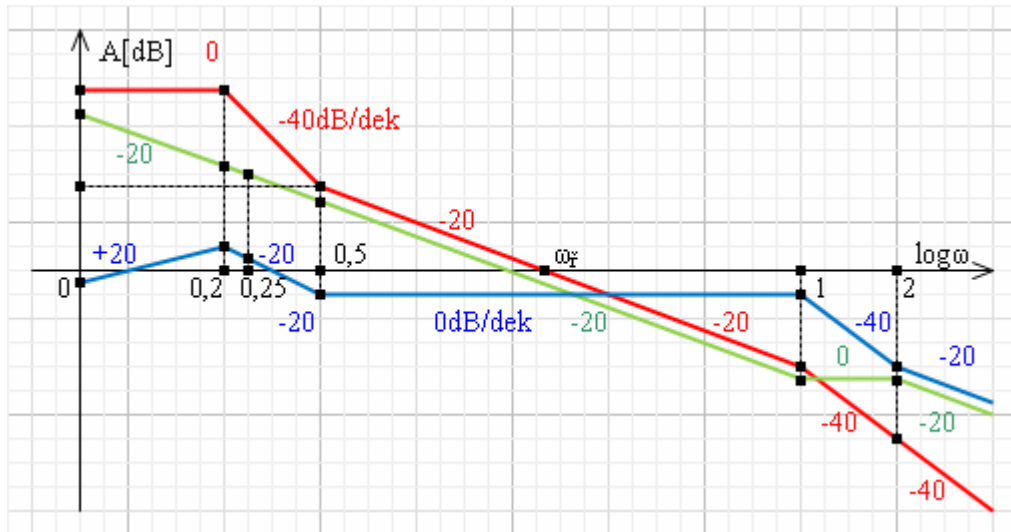
$$T_1 = 5; \tau_2 = 2; T_3 = 1; k = 2 \quad \omega_1 = 0,2; \omega_2 = 0,5; \omega_3 = 1$$

$$G_O(s) = \frac{2 \cdot (2s + 1)}{(5s + 1)^2 (s + 1)}$$

Z rovnice (26) určíme přenos regulátoru (korekčního členu), jelikož platí: $G_R(s) = \frac{G_O(s)}{G_S(s)}$

$$G_R(s) = \frac{\frac{2 \cdot (2s + 1)}{(5s + 1)^2 (s + 1)}}{\frac{5 \cdot (4s + 1)}{s \cdot (0,5s + 1)}} = \frac{2s \cdot (2s + 1) \cdot (0,5s + 1)}{5 \cdot (5s + 1)^2 \cdot (4s + 1) \cdot (s + 1)}$$

Graficky tento příklad vypadá následovně:



Obr. 16 Frekvenční charakteristiky k příkladu 4c.

Na obr. 14, 15, 16 je k zadanému přenosu soustavy postupně volena typizovaná logaritmicko – amplitudová frekvenční charakteristika s různou šířkou její středofrekvenční části. Grafy v těchto obrázcích nám ukazují, jak se v závislosti na šířce středofrekvenční oblasti typizované LAFCH a tedy i ΔL mění průběhy přenosů regulátorů (korekčních členů). Volbou ΔL a γ dle obr.13 se dá vysledovat chování průběhu frekvenční charakteristiky regulátoru v logaritmických souřadnicích a tím tedy i navrhnout jeho parametry v závislosti na bezpečnosti soustavy.

Vyřešené příklady nám potvrdily správnost tvrzení, jak jsem již uvedl, čím je šířka středofrekvenční části charakteristiky větší, tím větší je jeho fázová bezpečnost.

5 KATALOG TYPIZOVANÝCH LOGARITMICKÝCH FREKVENČNÍCH CHARAKTERISTIK

Doposud získané poznatky a veškerý prostudovaný materiál ohledně frekvenčních charakteristik, přenosů soustav a regulátorů a regulačních soustav různých druhů a typů, včetně bezpečnostních parametrů, mě postupně nasměřoval k cíli této bakalářské práce, tedy k vytvoření „Katalogu typizovaných logaritmických frekvenčních charakteristik,,.

Katalog publikuji postupně formou tabulek. V každé tabulce jsou dva přenosy soustav.

V prvním sloupci je uvedený zadaný přenos, seřazené lomové frekvence ω , stupeň zesílení soustavy k , který postupně střídám od menší, přes rovno, až po větší jedné a nakonec typ a řád přenosu regulované soustavy. Zesílení k z důvodu časové náročnosti práce jsem ke každému zadanému přenosu uvedl pouze v jedné variantě.

V druhém sloupci jsou graficky znázorněny typizované logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky odpovídající svým tvarem určeným přenosům.

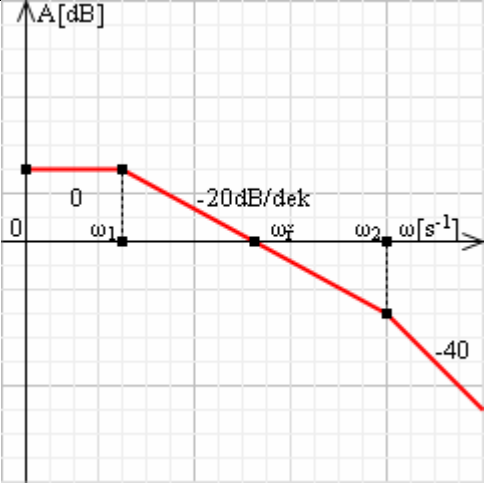
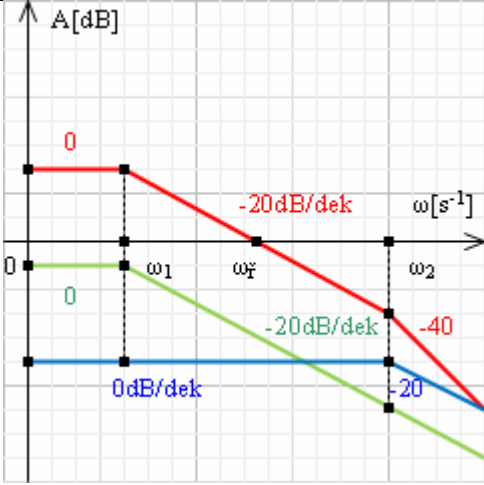
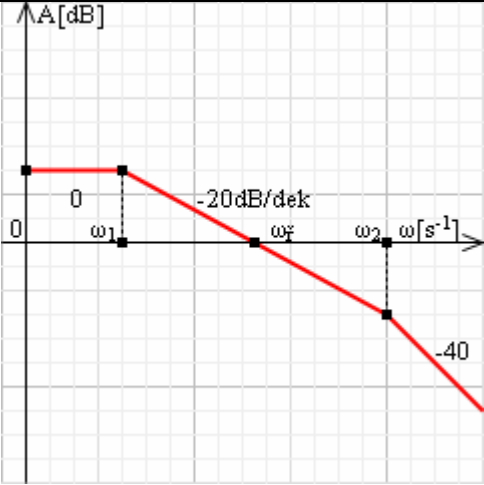
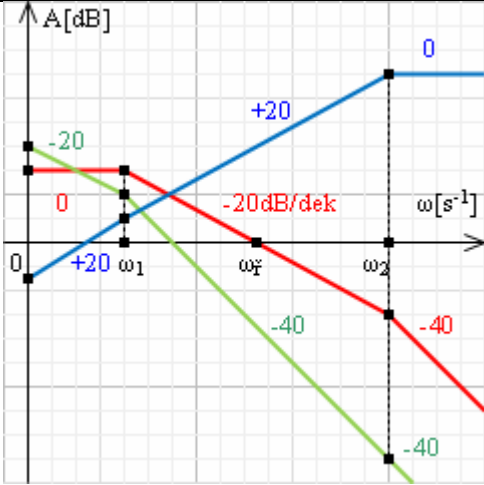
Sloupec č.3 je tzv. celé řešení, to znamená, že k zadanému přenosu a typizované logaritmické amplitudové frekvenční charakteristice je sestavený, podle známých vztahů, frekvenční přenos regulátoru (korekčního členu), to vše samozřejmě graficky.

Na samém konci tabulky, ve sloupci č.4, je pak uveden spočítaný přenos regulátoru (korekčního členu).

V předchozích kapitolách sice všude uvádím spíše pojem regulátor, ale v katalogu jde v podstatě o obecnou charakteristiku, kterou označuji jako korekční člen.

V pravém dolním rohu každé tabulky, pro větší přehlednost a orientaci, uvádím barevné rozlišení charakteristik. Červeně typizovaná logaritmická amplitudová frekvenční charakteristika $G_O(j\omega)$, zeleně zadaná soustava $G_S(j\omega)$ a modře regulátor $G_R(j\omega)$ (korekční člen). Tato barevná kombinace frekvenčních charakteristik je takto sjednocena v celé bakalářské práci.

Katalog typizovaných logaritmických frekvenčních charakteristik

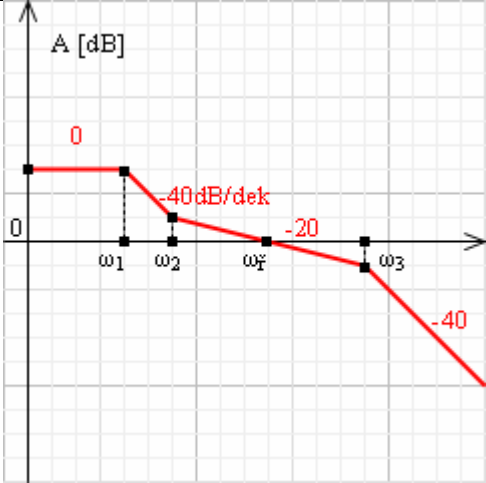
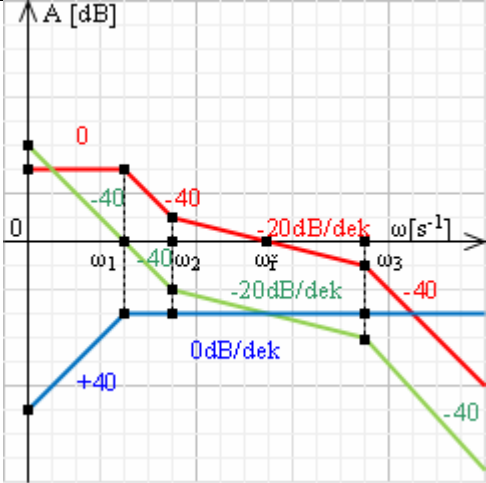
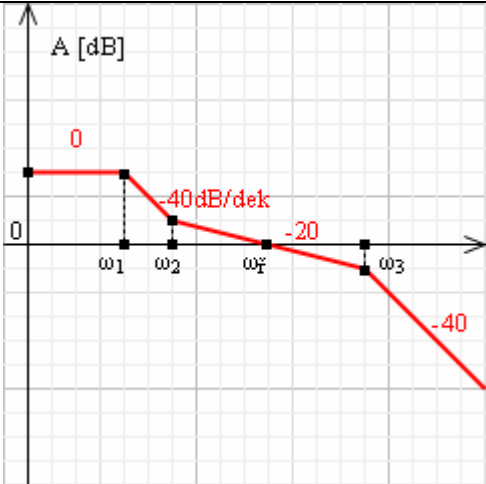
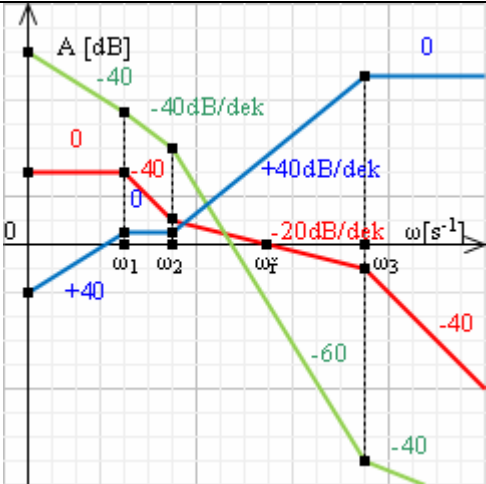
Přenos regulované soustavy $G_S(s)$	Tvar typizované logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky	Celé řešení	Přenos regulátoru (korekčního členu) $G_R(s)$
<p>1.</p> $G_S(s) = \frac{k}{(T_1 s + I)}$ <p>$k < I$</p> <p>Proporcionální, astatismus 0</p>			$G_R(s) = \frac{I}{(T_2 s + I)}$
<p>2.</p> $G_S(s) = \frac{k}{s \cdot (T_1 s + I)}$ <p>$k > I$</p> <p>Integrační, astatismus 1</p>			$G_R(s) = \frac{s}{(T_2 s + I)}$ <p>Typizovaná LAFCH $G_O(j\omega)$ Zadaná soustava $G_S(j\omega)$ Korekční člen $G_R(j\omega)$</p>

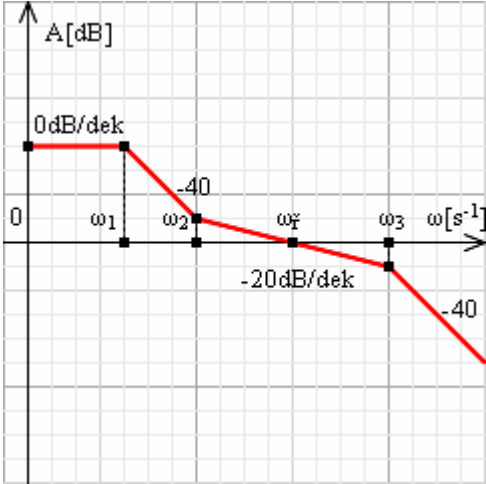
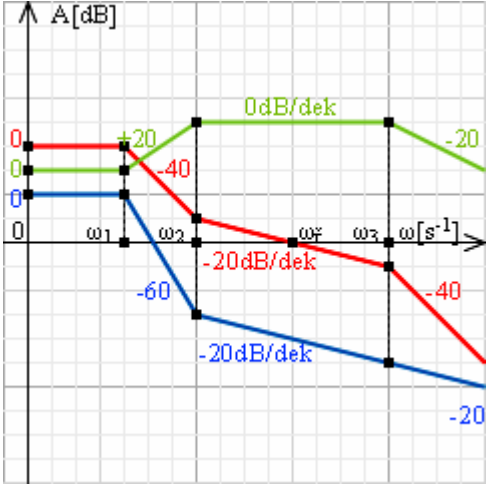
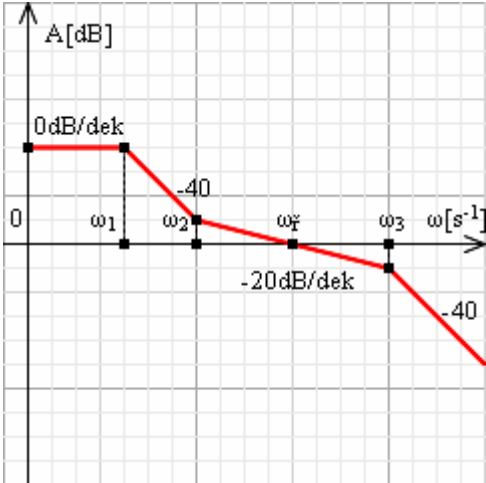
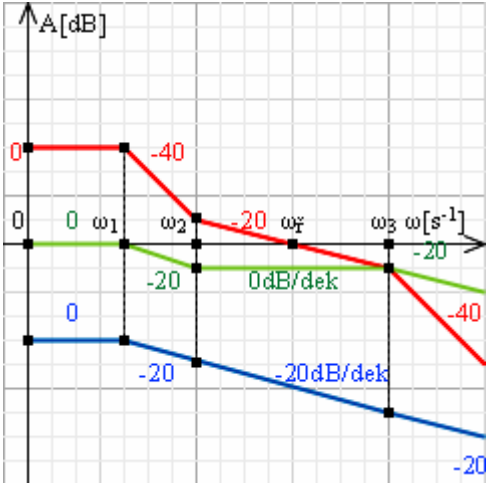
Katalog typizovaných logaritmických frekvenčních charakteristik

Přenos regulované soustavy $G_S(s)$	Tvar typizované logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky	Celé řešení	Přenos regulátoru (korekčního členu) $G_R(s)$
<p>3.</p> $G_S(s) = \frac{k \cdot (\tau_1 s + 1)}{(T_2 s + 1)}$ <p>$\omega_1 < \omega_2$</p> <p>$k > 1$</p> <p>Proporcionální, astatismus 0</p>			$G_R(s) = \frac{k}{(T_1 s + 1)^2}$
<p>4.</p> $G_S(s) = \frac{k \cdot (\tau_2 s + 1)}{(T_1 s + 1)}$ <p>$\omega_1 < \omega_2$</p> <p>$k = 1$</p> <p>Proporcionální, astatismus 0</p>			$G_R(s) = \frac{k}{(T_2 s + 1)^2}$ <p>Typizovaná LAFCH $G_O(j\omega)$ Zadaná soustava $G_S(j\omega)$ Korekční člen $G_R(j\omega)$</p>

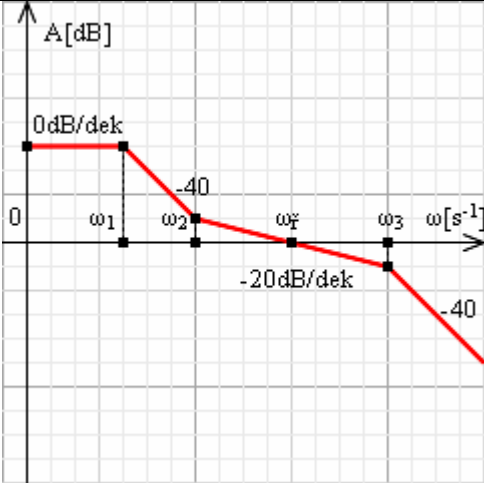
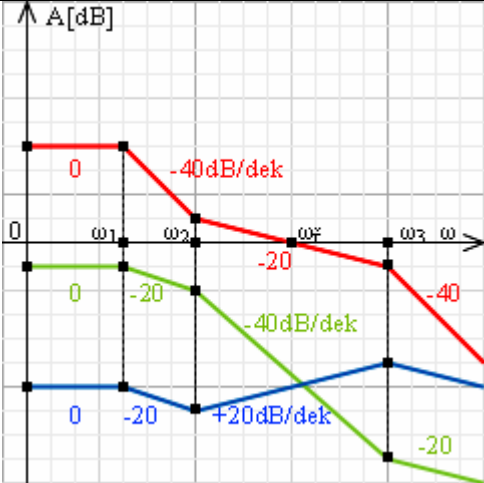
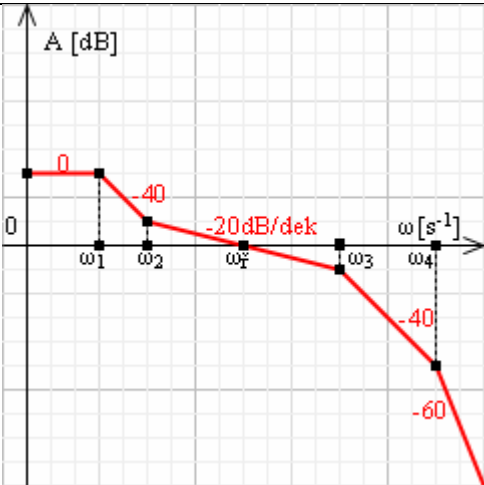
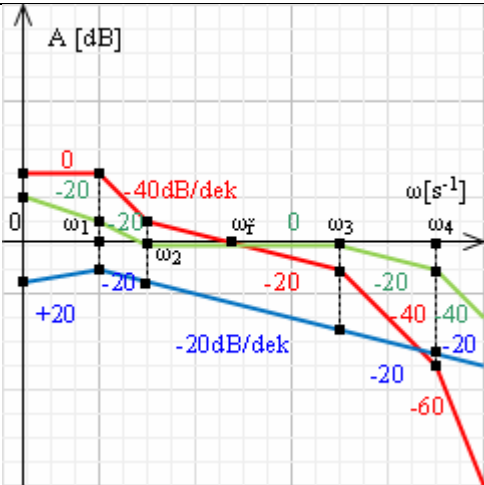
Katalog typizovaných logaritmických frekvenčních charakteristik

Přenos regulované soustavy $G_S(s)$	Tvar typizované logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky	Celé řešení	Přenos regulátoru (korekčního členu) $G_R(s)$
<p>5.</p> $G_S(s) = \frac{k \cdot (\tau_1 s + 1)}{s \cdot (T_2 s + 1)}$ <p>$\omega_1 < \omega_2$</p> <p>$k < 1$</p>			$G_R(s) = \frac{s \cdot (\tau_2 s + 1)^2}{(T_1 s + 1)^3 (T_3 s + 1)}$
<p>Integrační, astatismus 1</p>			$G_R(s) = \frac{s}{(T_1 s + 1)(T_3 s + 1)}$ <p>Typizovaná LAFCH $G_O(j\omega)$ Zadaná soustava $G_S(j\omega)$ Korekční člen $G_R(j\omega)$</p>
<p>Integrační, astatismus 1</p>			

Přenos regulované soustavy $G_S(s)$	Tvar typizované logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky	Celé řešení	Přenos regulátoru (korekčního členu) $G_R(s)$
<p>7.</p> $G_S(s) = \frac{k \cdot (\tau_1 s + 1)}{s^2 \cdot (T_2 s + 1)}$ <p>$\omega_1 < \omega_2$</p> <p>$k = 1$</p> <p>Integrační, astatismus 2</p>			$G_R(s) = \frac{s^2 \cdot (\tau_2 s + 1)^2}{(T_1 s + 1)^3 (T_3 s + 1)}$
<p>8.</p> $G_S(s) = \frac{k \cdot (\tau_2 s + 1)}{s^2 \cdot (T_1 s + 1)}$ <p>$\omega_1 < \omega_2$</p> <p>$k > 1$</p> <p>Integrační, astatismus 2</p>			$G_R(s) = \frac{s^2}{(T_1 s + 1)(T_3 s + 1)}$ <p>Typizovaná LAFCH $G_O(j\omega)$ Zadaná soustava $G_S(j\omega)$ Korekční člen $G_R(j\omega)$</p>

Přenos regulované soustavy $G_S(s)$	Tvar typizované logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky	Celé řešení	Přenos regulátoru (korekčního členu) $G_R(s)$
<p>9.</p> $G_S(s) = \frac{k \cdot (\tau_1 s + 1)}{(T_2 s + 1)(T_3 s + 1)}$ <p>$\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$</p> <p>$k > 1$</p> <p>Proporcionální, astatismus 0</p>			$G_R(s) = \frac{(\tau_2 s + 1)^2}{(T_1 s + 1)^3}$
<p>10.</p> $G_S(s) = \frac{k \cdot (\tau_2 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_3 s + 1)}$ <p>$\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$</p> <p>$k = 1$</p> <p>Proporcionální, astatismus 0</p>			$G_R(s) = \frac{1}{(T_1 s + 1)}$ <p>Typizovaná LAFCH $G_0(j\omega)$ Zadaná soustava $G_S(j\omega)$ Korekční člen $G_R(j\omega)$</p>

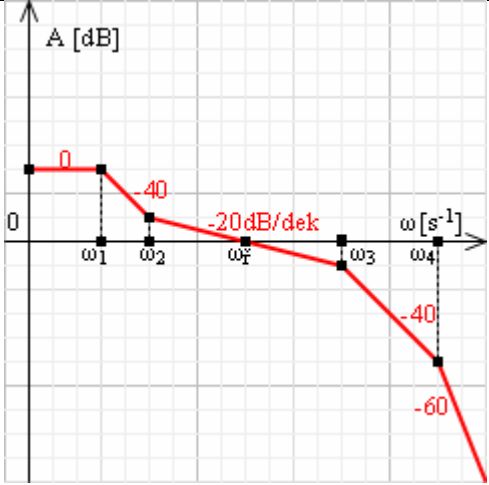
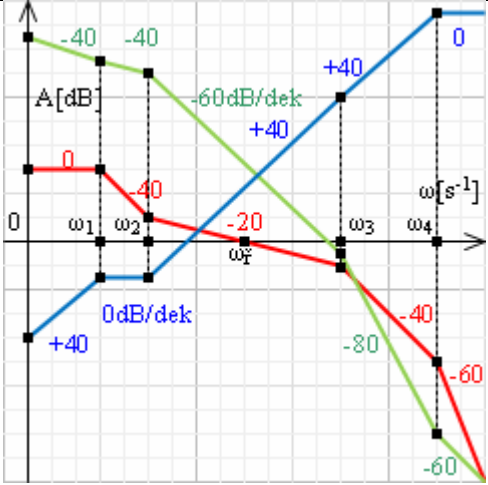
Katalog typizovaných logaritmických frekvenčních charakteristik

Přenos regulované soustavy $G_S(s)$	Tvar typizované logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky	Celé řešení	Přenos regulátoru (korekčního členu) $G_R(s)$
<p>11.</p> $G_S(s) = \frac{k \cdot (\tau_3 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$ <p>$\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$</p> <p>$k < 1$</p> <p>Proporcionální, astatismus 0</p>			$G_R(s) = \frac{(\tau_2 s + 1)^2}{(T_1 s + 1)(T_3 s + 1)^2}$
<p>12.</p> $G_S(s) = \frac{k \cdot (\tau_1 s + 1)}{s \cdot (T_2 s + 1)(T_3 s + 1)}$ <p>$\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$</p> <p>$k > 1$</p> <p>Integrační, astatismus 1</p>			$G_R(s) = \frac{s \cdot (\tau_2 s + 1)^2}{(T_1 s + 1)^3 (T_4 s + 1)}$ <p>Typizovaná LAFCH $G_O(j\omega)$ Zadaná soustava $G_S(j\omega)$ Korekční člen $G_R(j\omega)$</p>

Katalog typizovaných logaritmických frekvenčních charakteristik

Přenos regulované soustavy $G_S(s)$	Tvar typizované logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky	Celé řešení	Přenos regulátoru (korekčního členu) $G_R(s)$
<p>13.</p> $G_S(s) = \frac{k \cdot (\tau_2 s + 1)}{s \cdot (T_1 s + 1)(T_3 s + 1)}$ <p>$\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$</p> <p>$k = 1$</p> <p>Integrační, astatismus 1</p>			$G_R(s) = \frac{s}{(T_1 s + 1)(T_4 s + 1)}$
<p>14.</p> $G_S(s) = \frac{k \cdot (\tau_3 s + 1)}{s \cdot (T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$ <p>$\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$</p> <p>$k > 1$</p> <p>Integrační, astatismus 1</p>			$G_R(s) = \frac{s \cdot (\tau_2 s + 1)^2}{(T_1 s + 1)(T_3 s + 1)^2 (T_4 s + 1)}$ <p>Typizovaná LAFCH $G_O(j\omega)$ Zadaná soustava $G_S(j\omega)$ Korekční člen $G_R(j\omega)$</p>

Přenos regulované soustavy $G_S(s)$	Tvar typizované logaritické amplitudové frekvenční charakteristiky	Celé řešení	Přenos regulátoru (korekčního členu) $G_R(s)$
<p>15.</p> $G_S(s) = \frac{k \cdot (\tau_1 s + 1)}{s^2 (T_2 s + 1)(T_3 s + 1)}$ <p>$\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$</p> <p>$k > 1$</p> <p>Integrační, astatismus 2</p>			$G_R(s) = \frac{s^2 \cdot (\tau_2 s + 1)^2}{(T_1 s + 1)^3 (T_4 s + 1)}$
<p>16.</p> $G_S(s) = \frac{k \cdot (\tau_2 s + 1)}{s^2 \cdot (T_1 s + 1)(T_3 s + 1)}$ <p>$\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$</p> <p>$k > 1$</p> <p>Integrační, astatismus 2</p>			$G_R(s) = \frac{s^2}{(T_1 s + 1)(T_4 s + 1)}$ <p>Typizovaná LAFCHG_o(jω) Zadaná soustava G_S(jω) Korekční člen G_R(jω)</p>

Přenos regulované soustavy $G_S(s)$	Tvar typizované logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky	Celé řešení	Přenos regulátoru (korekčního členu) $G_R(s)$
<p>17.</p> $G_S(s) = \frac{k \cdot (\tau_3 s + 1)}{s^2 \cdot (T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$ <p>$\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$</p> <p>$k > 1$</p> <p>Integrační, astatismus 2</p>			$G_R(s) = \frac{s^2 \cdot (\tau_2 s + 1)^2}{(T_1 s + 1)(T_3 s + 1)^2 (T_4 s + 1)}$
			<p>Typizovaná LAFCH $G_O(j\omega)$ Zadaná soustava $G_S(j\omega)$ Korekční člen $G_R(j\omega)$</p>

5.1 Příklady použití katalogu typizovaných logaritmických frekvenčních charakteristik.

Použití katalogu typizovaných logaritmických frekvenčních charakteristik lze s výhodou použít při sestavování přenosů regulátorů (korekčních členů). Uvedu dva příklady, jeden pro soustavu proporcionální, druhý pro soustavu integrační.

Příklad 5.

K zadanému obecnému tvaru přenosu *proporcionální* soustavy $G_S(s) = \frac{k \cdot (\tau_1 s + 1)}{(T_2 s + 1)}$ vytvořte zadáním konkrétních časových konstant τ_1 a T_2 , pomocí katalogu typizovaných logaritmických frekvenčních charakteristik, přenos regulátoru (korekčního členu).

1. Zvolíme hodnoty časových konstant τ_1 a T_2 a zesílení k : $\tau_1 = 4$, $T_2 = 2$, $k = 1$. Zadaný přenos soustavy bude tedy ve tvaru $G_S(s) = \frac{(4s + 1)}{(2s + 1)}$.

2. Vypočteme lomové frekvence (převrácené hodnoty časových konstant) a seřadíme je podle velikosti:

$$\omega_1 = \frac{1}{4} = 0,25 \quad \omega_2 = \frac{1}{2} = 0,5 \quad \omega_1 < \omega_2$$

3. Nahlédnutím do katalogu okamžitě ke stejnému typu zadaného přenosu zjistíme tvar typizované logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky a určíme její přenos. V našem případě to bude:

$$G_O(s) = \frac{k}{(4s + 1)(2s + 1)}$$

Zesílení k zvolíme podle daných parametrů, pro náš příklad zvolme $k = 5$. Rovnice přenosu bude mít tvar:

$$G_O(s) = \frac{5}{(4s + 1)(2s + 1)}$$

4. Podle vztahu (18) určíme přenos regulátoru (korekčního členu) $G_R(s)$, jelikož platí:

$$G_R(s) = \frac{G_O(s)}{G_S(s)}$$

V našem případě to bude:

$$G_R(s) = \frac{5}{\frac{(4s + 1)(2s + 1)}{(4s + 1)(2s + 1)}} = \frac{5}{(4s + 1)^2}$$

5. Po úpravě je přenos regulátoru (korekčního členu) $G_R(s) = \frac{5}{(4s + 1)^2}$, což je zároveň i výsledek příkladu č. 5.

6. Vzhledem k tomu, že přenos regulátoru je již v katalogu spočítaný, stačí nám do této rovnice doplnit hodnoty časových konstant a dostaneme okamžitě výsledek přenosu regulátoru bez složitějšího počítání.

Příklad 6.

K zadanému obecnému tvaru přenosu *integrační* soustavy $G_S(s) = \frac{k \cdot (\tau_1 s + 1)}{s \cdot (T_2 s + 1)}$ vytvořte zadáním konkrétních časových konstant τ_1, T_2 a T_3 pomocí katalogu typizovaných logaritmických frekvenčních charakteristik přenos regulátoru (korekčního členu).

1. Zvolíme hodnoty časových konstant τ_1, T_2, T_3 a zesílení k : $\tau_1 = 4, T_2 = 2, T_3 = 1, k = 5$. Zadaný přenos soustavy bude dán rovnicí $G_S(s) = \frac{5 \cdot (4s + 1)}{s \cdot (2s + 1)}$.

2. Vypočteme lomové frekvence (převrácené hodnoty časových konstant) a seřadíme je podle velikosti:

$$\omega_1 = \frac{1}{4} = 0,25 \quad \omega_2 = \frac{1}{2} = 0,5 \quad \omega_3 = \frac{1}{1} = 1 \quad \omega_1 < \omega_2 < \omega_3$$

3. Nahlédnutím do katalogu okamžitě ke stejnému typu zadaného přenosu zjistíme tvar typizované logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky a určíme její přenos. V našem případě to bude:

$$G_O(s) = \frac{k \cdot (\tau_2 s + 1)}{s(T_1 s + 1)^2 (T_3 s + 1)}$$

Rovnice přenosu bude mít tvar:

$$G_O(s) = \frac{5 \cdot (2s + 1)}{(4s + 1)^2 (s + 1)}$$

4. Podle vztahu (18) určíme přenos regulátoru (korekčního členu) $G_R(s)$, jelikož platí:

$$G_R(s) = \frac{G_O(s)}{G_S(s)}$$

V našem případě to bude:

$$G_R(s) = \frac{5 \cdot (2s + 1)}{(4s + 1)^2 (s + 1)} \cdot \frac{s \cdot (2s + 1)}{5 \cdot (4s + 1)} = \frac{s \cdot (2s + 1)^2}{(4s + 1)^3 (s + 1)}$$

5. Po úpravě je přenos regulátoru (korekčního členu) $G_R(s) = \frac{s \cdot (2s + 1)^2}{(4s + 1)^3 (s + 1)}$, což je zároveň i výsledek příkladu č. 6.

6. Stejný výsledek obdržíme přímou implementací hodnot časových konstant do spočítaného přenosu regulátoru (korekčního členu) uvedeného v katalogu, čímž nám odpadne složité počítání bodů 2 – 4.

Z uvedených příkladů je zcela zřejmá výhoda při použití katalogu typizovaných logaritmických amplitudových frekvenčních charakteristik pro návrh regulátoru v regulačním obvodu.

6 ZÁVĚR

V úvodní části práce se věnuji popisu spojitého řízení, postupně pak frekvenčnímu přenosu, frekvenčním charakteristikám a to zejména v logaritmických souřadnicích. Její hlavní náplní jsou frekvenční charakteristiky spojitých regulátorů a metoda typizované logaritmické frekvenční charakteristiky. Tu jsem využil při návrhu parametrů spojitého regulátoru, samozřejmě zachováním amplitudové a fázové bezpečnosti regulačních obvodů.

Rozsah katalogu je 10 stran. Při vytváření katalogu jsem použil přes 40 různých kombinací přenosů v závislosti na různých typech zesílení, seřazení lomových frekvencí a druhů přenosů podle řádu astatismu různých typů soustav. Po seřazení nakonec vycházím ze 17 vybraných přenosů soustav. Celkem uvádím 3 druhy typizovaných logaritmických amplitudových frekvenčních charakteristik a 17 spočítaných přenosů regulátorů (korekčních členů). Dalo by se vytvořit možná desítky různých variant.

Pro zjednodušení konstrukce charakteristik a větší přehlednost v tomto dokumentu jsem ztotožnil polohy lomových frekvencí všech tří průběhů frekvenčních charakteristik, typizované, zadané soustavy a regulátoru (korekčního členu).

Otevřením tohoto katalogu nebude problém na základě zvolené typizované LAFCH a zadané soustavy udělat si přímo obraz o přenosu regulátoru a jeho skutečném průběhu, nebo naopak na zadaný regulátor přizpůsobit tvar typizované logaritmické amplitudové frekvenční charakteristiky a okamžitě zjistit i přenos soustavy. Prostudováním této práce si čtenář udělá ucelený náhled na problematiku frekvenčního přenosu a frekvenčních charakteristik otevřených regulačních obvodů.

Kladem práce je, jak už jsem uvedl v příkladech použití, že dosazením hodnot časových konstant do spočítaného přenosu regulátoru (korekčního členu), uvedeného v katalogu, velmi snadno získáme jeho přenos. Vyjíměčnost této bakalářské práce, zejména vytvoření katalogu, spočívá zřejmě v tom, že v žádné z prostudovaných dostupných publikací nebyl co do popisu a rozsahu při zpracování této metody doposud nikde sestavený a shromážděný materiál v takto uceleném celku.

Faktem je, že se mně nepodařilo vzhledem k časové náročnosti práce zahrnout všechny možné kombinace, zvláště složitějších přenosů soustav a typizovaných logaritmických amplitudových frekvenčních charakteristik. Katalog je v tomto okamžiku stále ještě ve stádiu zrodu, bylo by dobře, kdyby někdo z dalších studentů, pro snazší orientaci při použití této metody, na tuto práci navázal a pokračoval v ní.

Seznam použité literatury

- [1] BALÁTĚ, J. Automatické řízení. Praha : Nakladatelství BEN–technická literatura, 2003. 664s. ISBN 80-7300-020-2.
- [2] MAKAROV, I.M.; MENSKIJ, B.M. Linejnyje avtomatičeskije systemy. Moskva : Vydavatelství Mašinstrojenije, 1977. 464 stran.
- [3] ŠVARC, I. Teorie automatického řízení I. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 1993. 232s. ISBN 80-214-0550-3.
- [4] ŠVARC, I. Automatizace – automatické řízení. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2005. 262s. ISBN 80-214-2943-7.
- [5] ŠVEC, J.; ŠIŠKA, I.; VAVŘÍN, P. Teorie řízení I – Lineární systém. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1982. 208s.
- [6] HORÁČEK, P. Systémy a modely. Praha : ČVUT Praha, 1999. 234s. ISBN 80-01-01923-3.
- [7] JOHN, J. Systémy a řízení. Praha : ČVUT Praha, 1998. 109s. ISBN 80-01-01474-6.

