

KEV/RT

2. přednáška

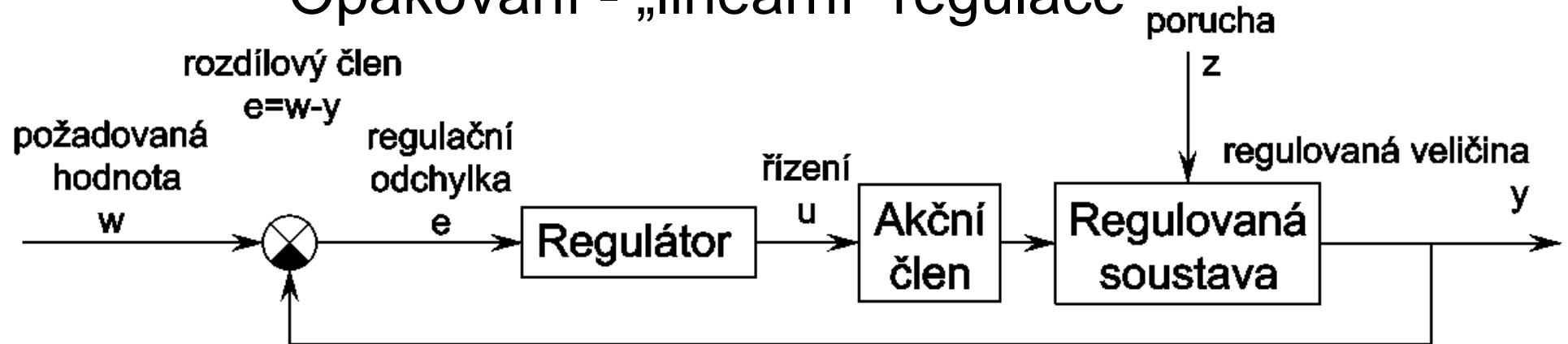
Martin Janda

mapa@kev.zcu.cz

EK 205

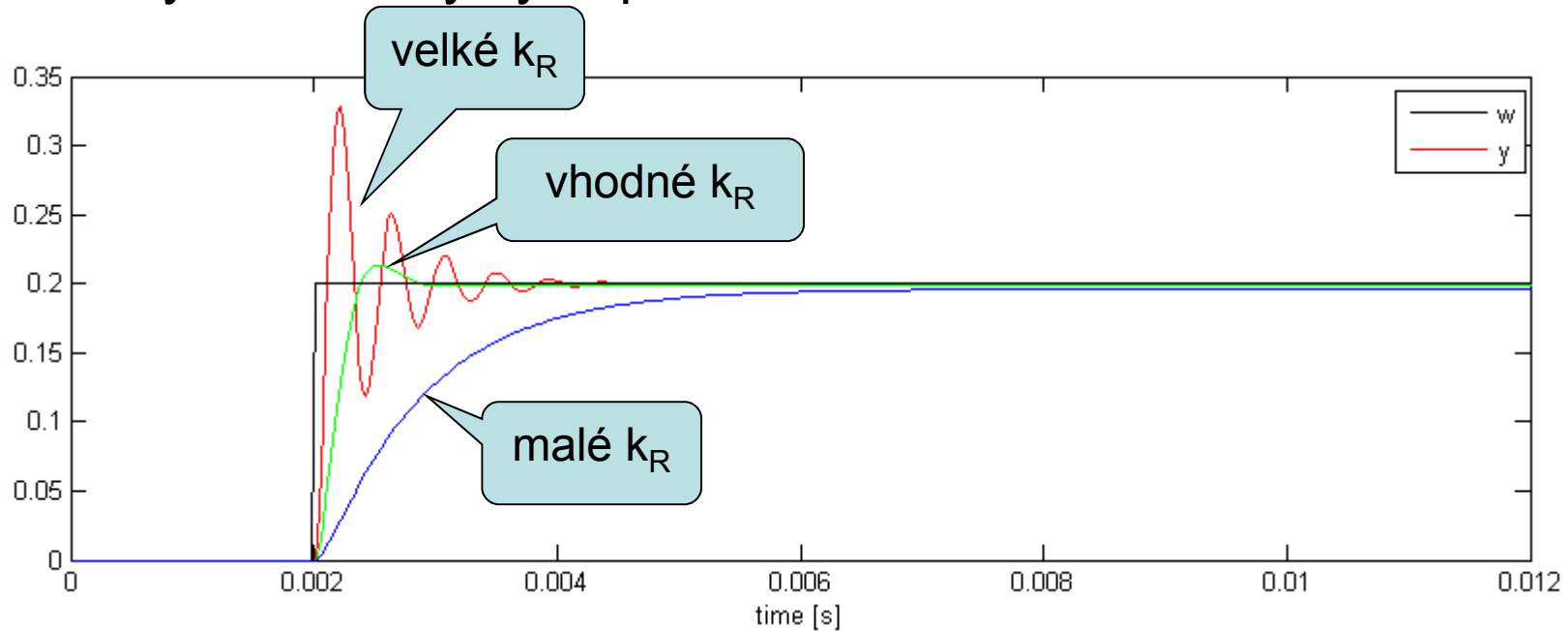
377 63 4435

Opakování - „lineární“ regulace



P (proporciální) regulátor = konstanta k_R

- malá odchylka $\rightarrow$ malý výstup



Základní myšlenka návrhu regulátoru

- chceme co nejrychlejší regulátor, ale nesmíme to přehnat, aby soustava nebyla příliš kmitavá (nebo dokonce nestabilní)
- použijeme kritérium stability, kterým budeme kontrolovat kmitavost
- Nyquistovo kritérium
 - jednoduché, poskytuje hodně informací
 - je třeba znát:
 - matematický popis regulované soustavy
 - frekvenční charakteristiky
 - pojmy uzavřená a rozpojená (otevřená) smyčka

Obrazový přenos

(též operátorový)

K čemu to je:

Vhodný matematický popis soustavy pro návrh regulátoru

Definice:

Poměr Laplaceových obrazů fcí na výstupu a vstupu do soustavy



Obrazový přenos soustavy:

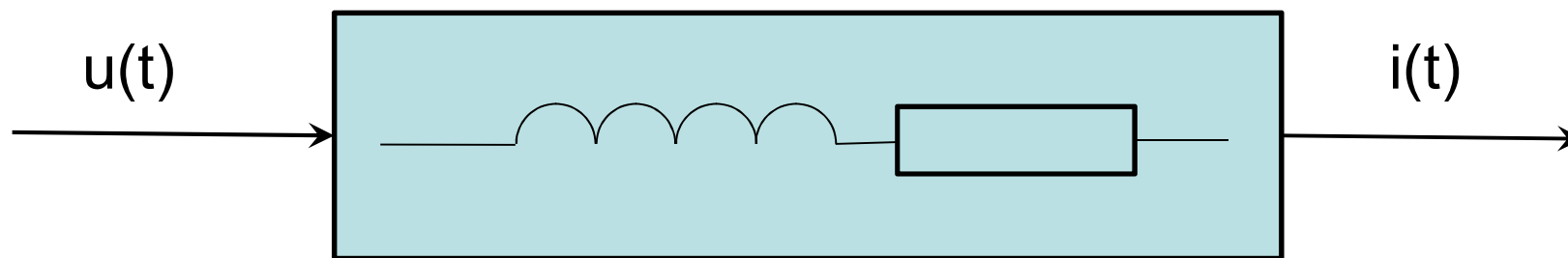
$$F(p) = \frac{L(f_2(t))}{L(f_1(t))} = \frac{F_2(p)}{F_1(p)}$$

pozn.: v literatuře často s místo p

Nutné minimum z Laplaceovy transformace

	originál	obraz
derivace	$\frac{df(t)}{dt}$	$p \cdot F(p) - f(0)$
integrál	$\int f(t) \cdot dt$	$\frac{1}{p} \cdot F(p)$
nekmitavé	$e^{a \cdot t}$	$\frac{1}{p - a}$
netlumené kmity	$\sin(\omega \cdot t)$	$\frac{\omega}{\omega^2 + p^2}$
$a < 0$ tlumené kmity	$e^{a \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t)$	$\frac{\omega}{\omega^2 + (p - a)^2}$

Obrazový přenos – příklad 1



$$F_{RL}(p) = \frac{I(p)}{U(p)} = ?$$

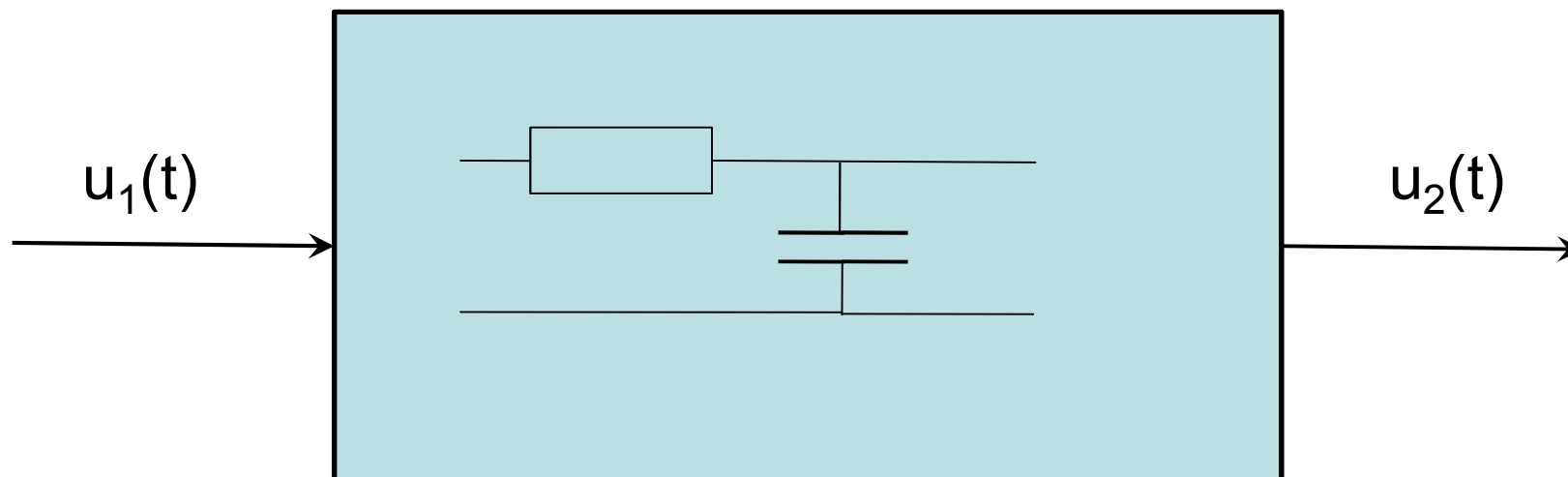
$$u(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

$$U(p) = R \cdot I(p) + L \cdot p \cdot I(p)$$

$$U(p) = I(p) \cdot (R + L \cdot p)$$

$$\frac{I(p)}{U(p)} = \frac{1}{R + L \cdot p} = \frac{1/R}{1 + L/R \cdot p} = \frac{k}{1 + \tau \cdot p}$$

Obrazový přenos – příklad 2



$$F_{RC}(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = ? \quad (i_2 = 0)$$

$$u_2(t) = u_1(t) - R \cdot i(t)$$

$$u_2(t) = u_1(t) - R \cdot C \frac{du_2(t)}{dt}$$

$$U_2(p) = U_1(p) - R \cdot C \cdot p \cdot U_2(p)$$

Obrazový přenos – příklad 2

$$U_2(p) = U_1(p) - R \cdot C \cdot p \cdot U_2(p)$$

$$U_2(p) + R \cdot C \cdot p \cdot U_2(p) = U_1(p)$$

$$U_2(p) \cdot (1 + R \cdot C \cdot p) = U_1(p)$$

$$\frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{1}{1 + R \cdot C \cdot p} = \frac{k}{1 + \tau \cdot p}$$

Obrazový přenos – výhody

- různé bloky z různých oborů mají typově stejné přenosy, teorie regulace je proto univerzální pro všechny obory
- většina soustav lze rozložit na několik typových bloků (V KEV/RT postačí znalost 4 typů bloků)
- na rozdíl od popisu např. dif. rovnicí obsahuje pouze parametry popisované soustavy (nejsou pomíchány se vstupními/výstupními signály)

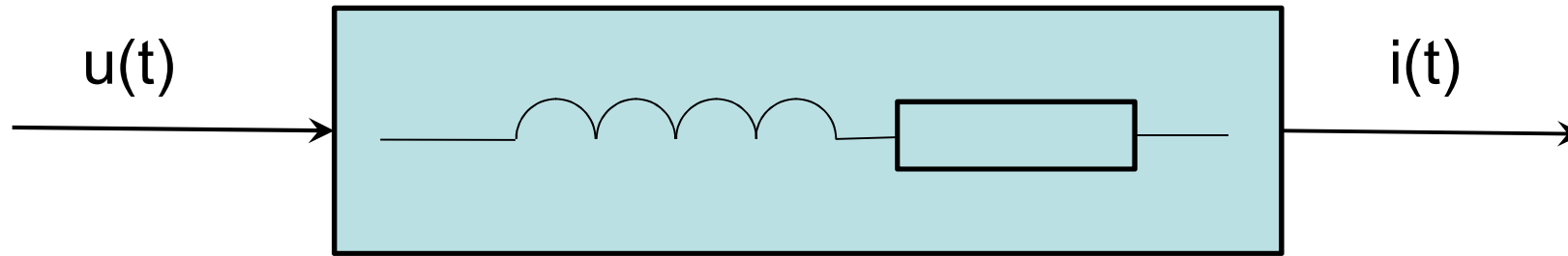
Frekvenční přenos

- analogický s obrazovým, pouze místo Laplaceovy transformace použita Fourierova
- pro odvození lze použít symbolicko-komplexní metodu (matematici mohou mít výhrady)



$$F(j\omega) = \frac{F_2(j\omega)}{F_1(j\omega)}$$

Frekvenční přenos – příklad



$$F_{RL}(j\omega) = \frac{\bar{I}}{\bar{U}}$$

$$\bar{U} = R \cdot \bar{I} + j \cdot \omega \cdot L \cdot \bar{I}$$

$$\bar{U} = \bar{I} \cdot (R + j \cdot \omega \cdot L)$$

$$\frac{\bar{I}}{\bar{U}} = \frac{1}{R + j \cdot \omega \cdot L} = \frac{1/R}{1 + j \cdot \omega \cdot L/R} = \frac{k}{1 + j \cdot \omega \cdot \tau}$$

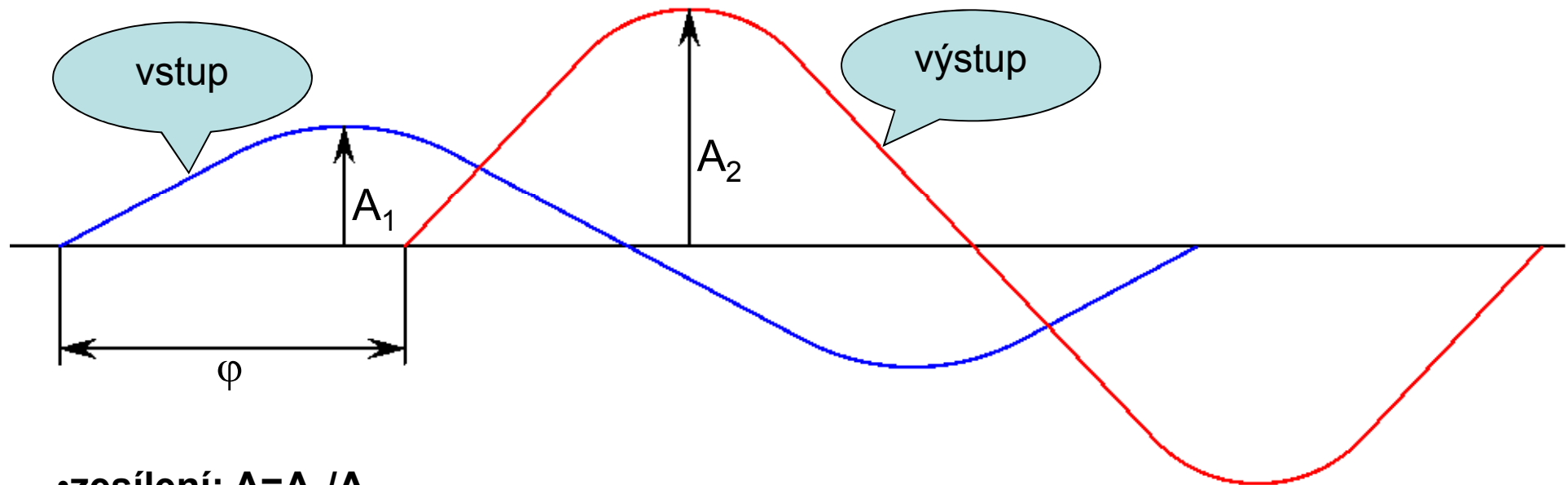
pro soustavy vyskytující se v rámci KEV/RT lze mezi obrazovým a frekvenčním přenosem přecházet použitím formální záměny

$$p \leftrightarrow j\omega$$

Frekvenční charakteristiky - použití

viz:

•KTE/TE1



•zesílení: $A=A_2/A_1$

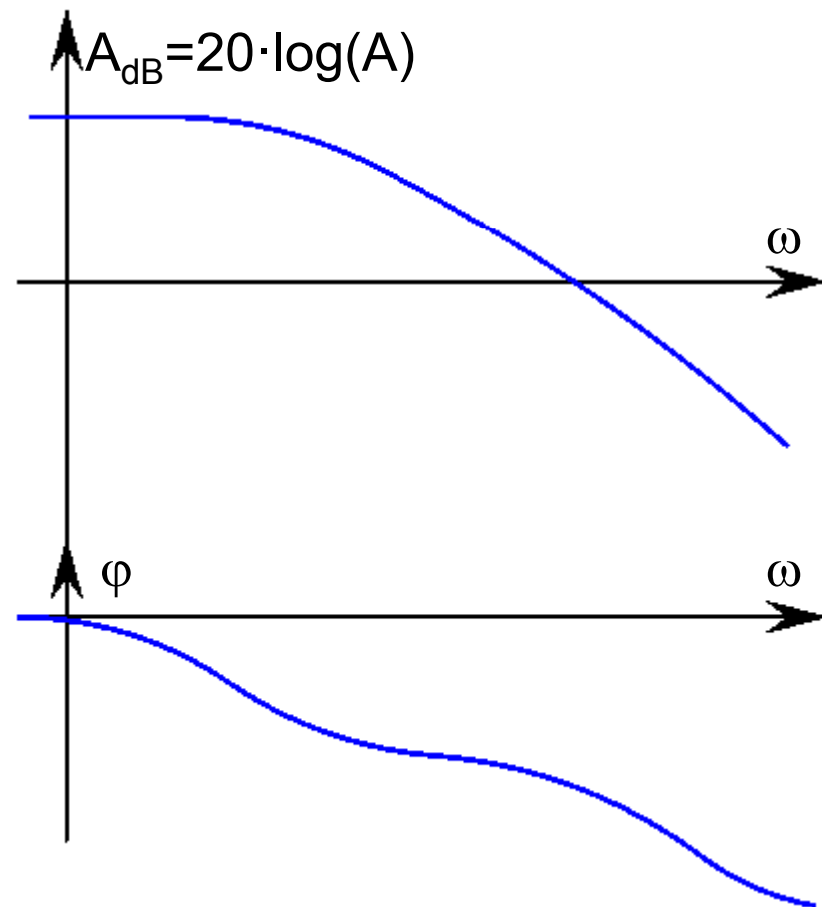
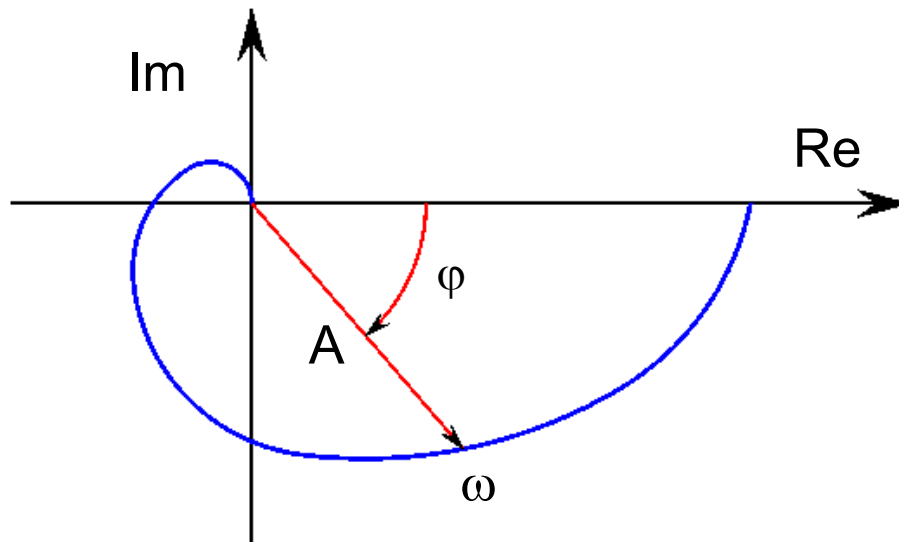
•fázový posun: je-li výstup zpožděn, $\varphi < 0$

•zesílení i fázový posun jsou obecně závislé na ω

•grafické znázornění $A(\omega)$, $\varphi(\omega)$ = frekvenční charky

Frekvenční charakteristiky

- grafické vyjádření frekvenčního přenosu
- frekvenční přenos = komplexní číslo $A \cdot e^{j\varphi}$ s parametrem ω
- potřeba pro návrh regulátoru i v běžném životě (sluchátka)
- v komplexní rovině
- logaritmické

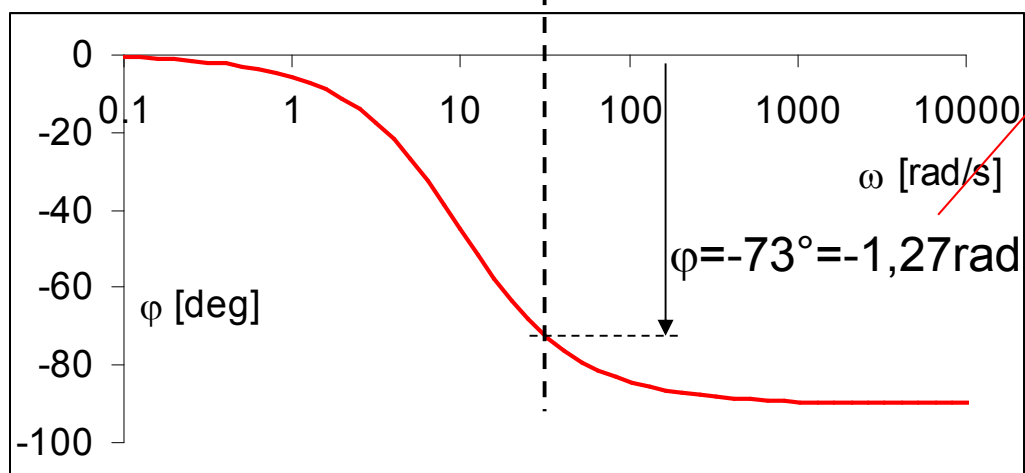
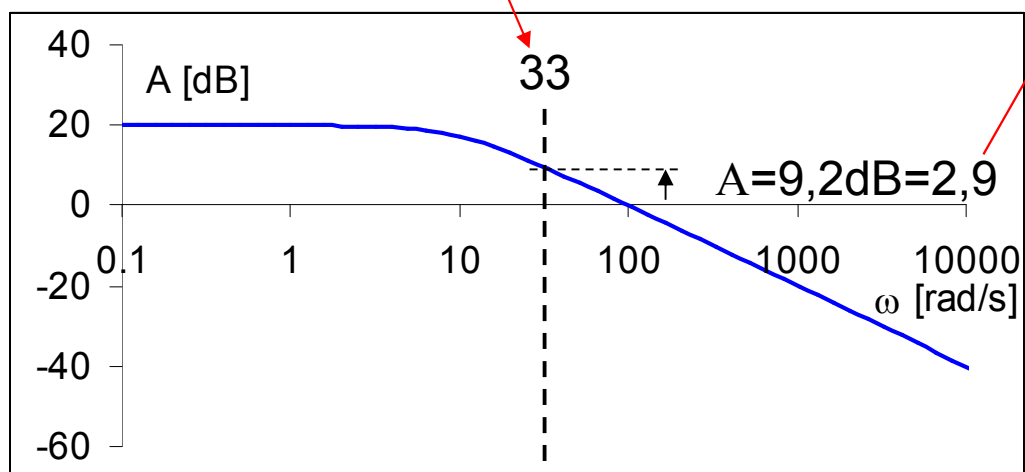


Frekvenční charky – příklad použití

$$vstup = 7 \cdot \sin(33 \cdot t + \frac{\pi}{6})$$

$F(\omega)$

$$výstup = 2,9 \cdot 7 \cdot \sin(33 \cdot t + \frac{\pi}{6} - 1,27)$$

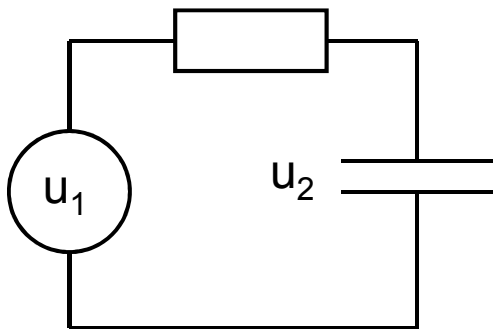


Frekvenční charky – souvislost s časovým průběhem

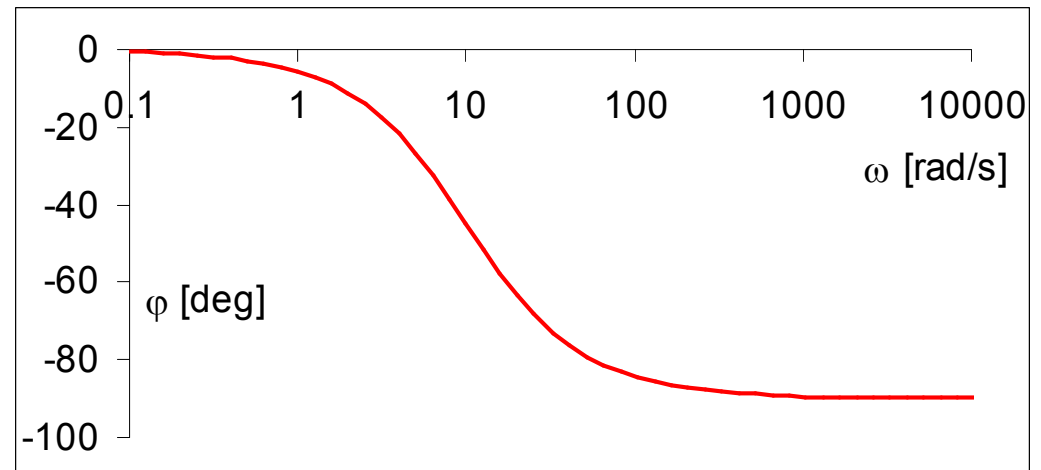
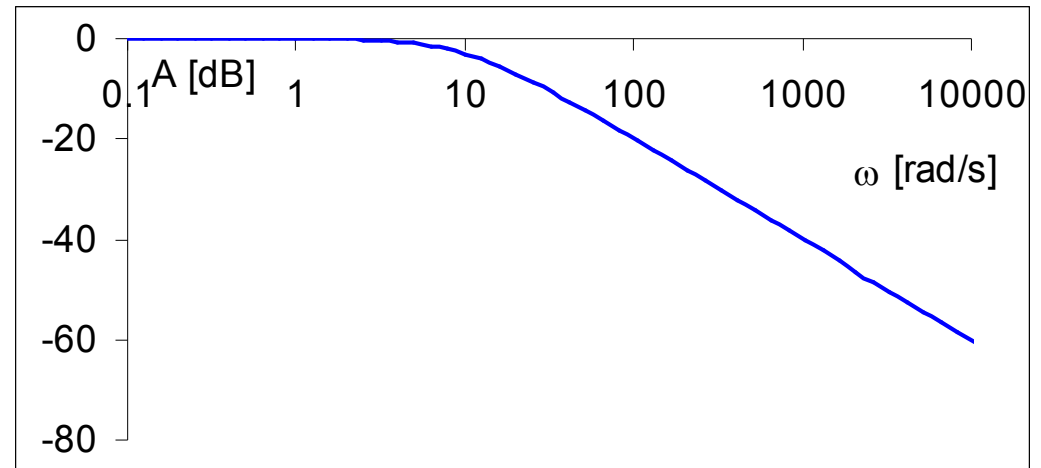
Př.: odezva na jednotkový skok bloku s přenosem

$$F = \frac{1}{1 + j\omega \cdot 0.1}$$

(blok 1. řádu, též zvaný aperiodický blok podle nekmitavé odezvy)



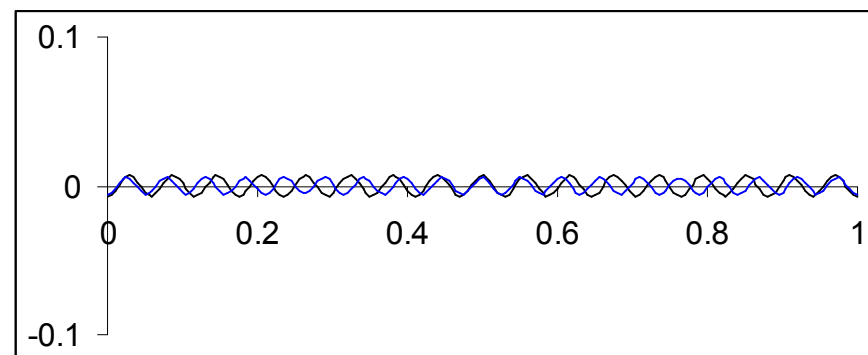
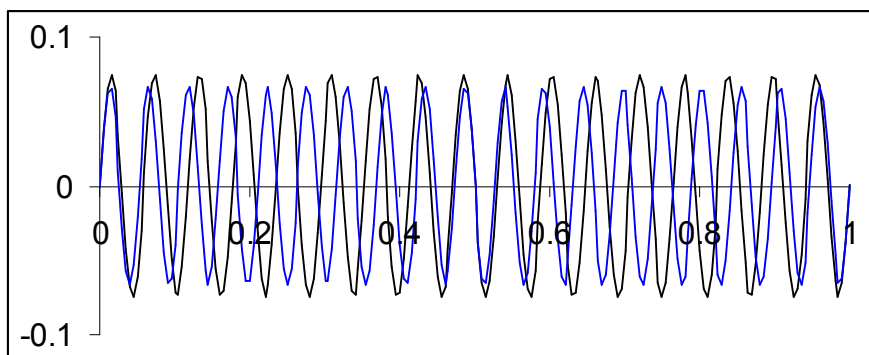
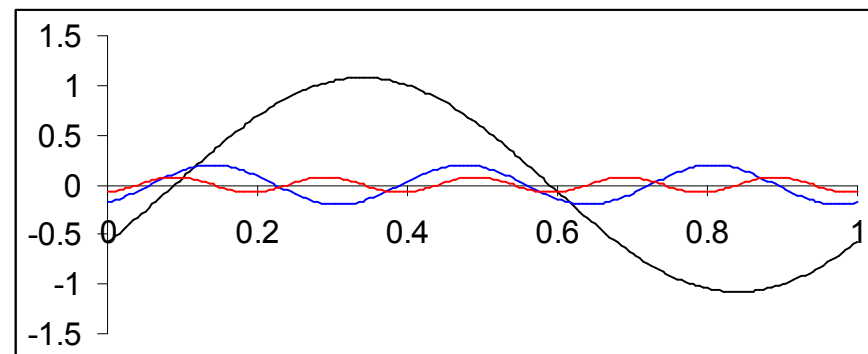
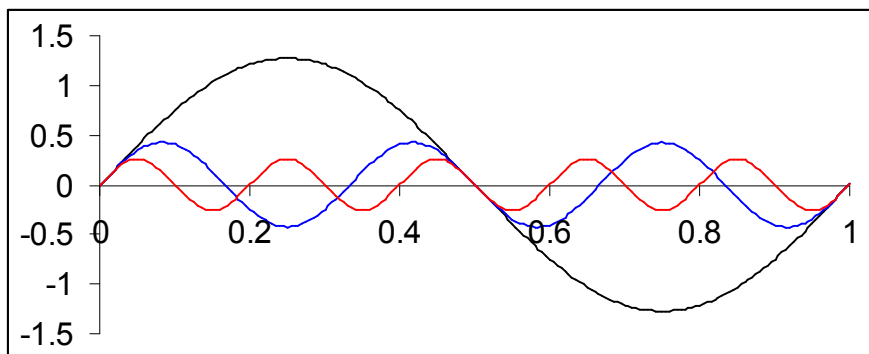
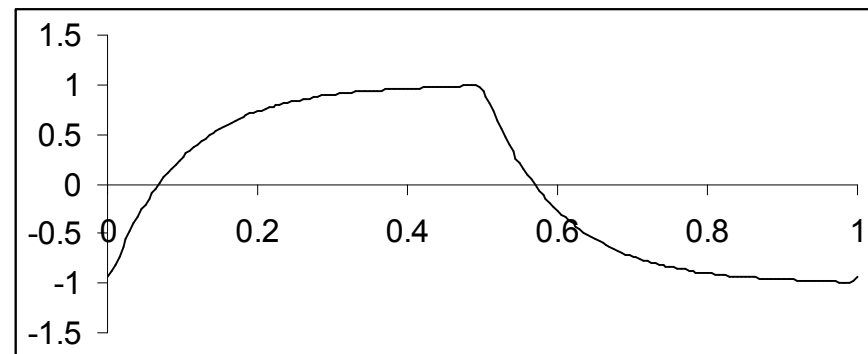
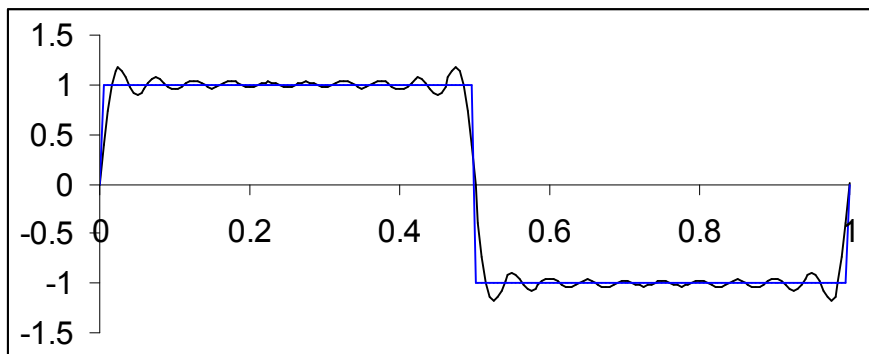
$$F = \frac{\bar{U}_2}{\bar{U}_1} = \frac{1}{1 + j\omega \cdot R \cdot C}$$



Frekvenční charky – souvislost s časovým průběhem

$$\longrightarrow \frac{1}{1 + j\omega 0.1} \longrightarrow$$

Harmon.: 17, 19
1, 3, 5
 $\Sigma(1..19), \Sigma(1..\infty)$

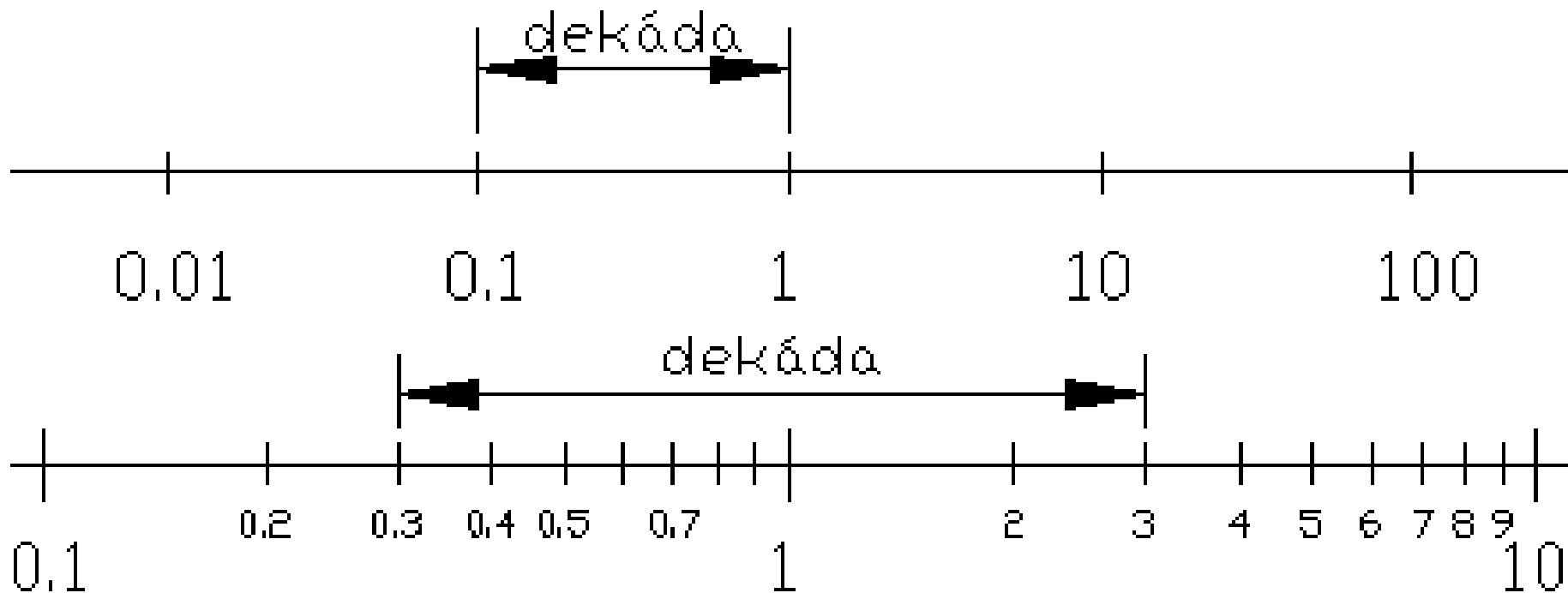


Logaritmická osa

- logaritmus = na kolikátou musím umocnit základ, abych dostal argument logaritmu
- př.: $\log_{10}(100) = 2$ ($10^2 = 100$)
- $\log_A(A) = 1$
- $\log(B^N) = N \cdot \log(B)$
- $\log(1000) = \log(10^3) = 3 \cdot \log(10) = 3$ (spočítat nuly)
- $\log(0,001) = \log(10^{-3}) = -3 \cdot \log(10) = -3$ (spočítat nuly)
- $\log(A \cdot B) = \log(A) + \log(B)$

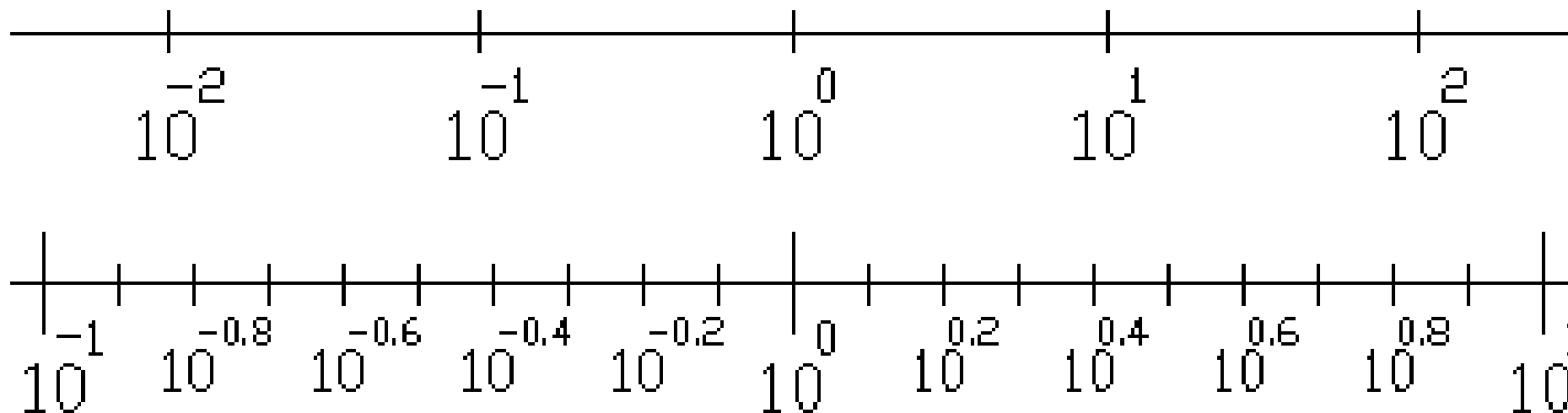
Logaritmická osa

- **K čemu to je?** Na jedné ose (V jednom grafu) lze přehledně zobrazit pohromadě malá a velká čísla.
- **Co je to dekáda?** Vzdálenost mezi číslem a jeho desetinásobkem, resp. desetinou. Tedy mezi 0,1 a 1 je stejná vzdálenost jako mezi 10^3 a 10^4 , stejná jako mezi 12,34 a 123,4, stejná jako mezi t a $t/10$.



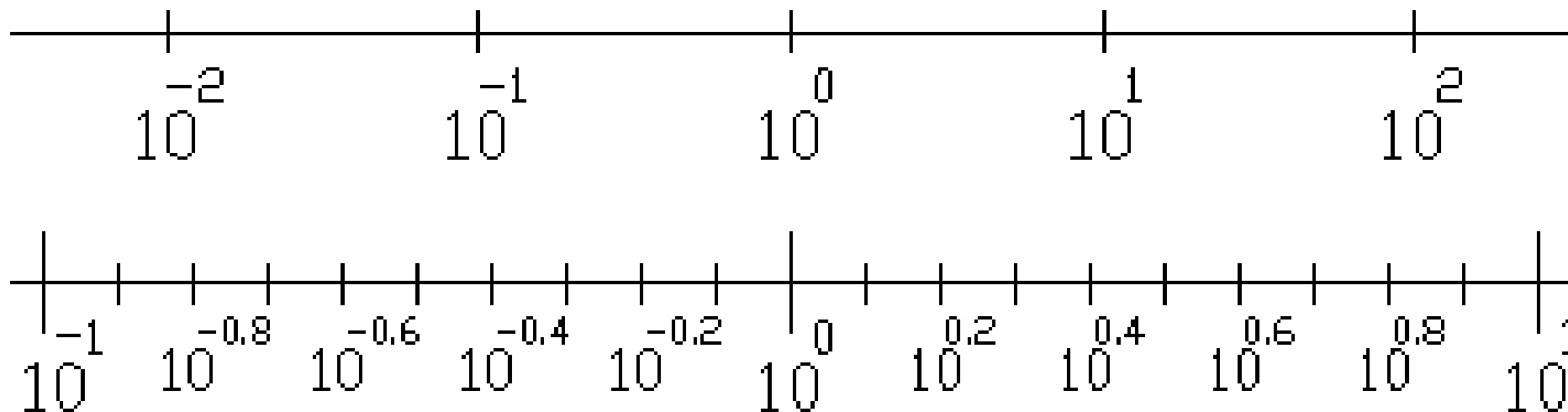
Logaritmická osa

- jsou-li popisky osy vyneseny jako mocniny čísla 10, **exponenty tvoří lineární stupnici**.
- v půlce mezi 1 a 10, tedy mezi 10^0 a 10^1 není 5, ale $10^{0,5} = \sqrt{10} \approx 3$



Logaritmická osa

- vynesení čísla 13 při zvoleném měřítku 1 dekáda = 40mm
 $13 = 10^{\log(13)} = 10^{1,11}$, takže leží 1,11 dekády vpravo od 1,
resp. 0,11 dekády vpravo od 10, což odpovídá 44mm od 1
resp. 4,4 mm od 10



Logaritmická osa

- odečtení čísla ležícího 27 mm vlevo od 10^{-3} při měřítku 1 dekáda = 50mm

$$27\text{mm} = 27/50 \text{ dekád} = 0,54 \text{ dekád}$$

$$\text{číslo je } 10^{-3-0,54} = 10^{-3,54} = 2,884\text{e-4} \text{ („-“ protože vlevo)}$$

- kolik je dekád mezi 0,456 a 9,87

$$0,456 = 10^{-0,341}$$

$$9,87 = 10^{0,994}$$

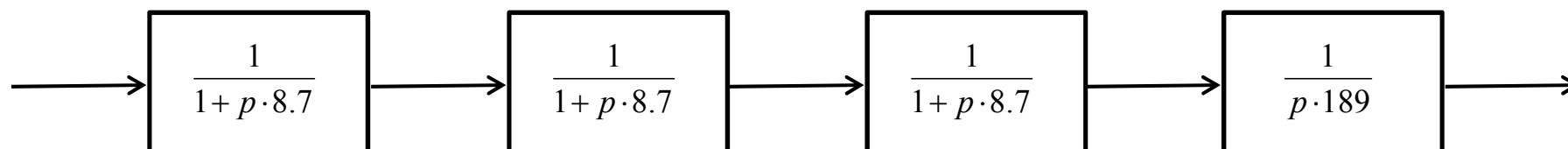
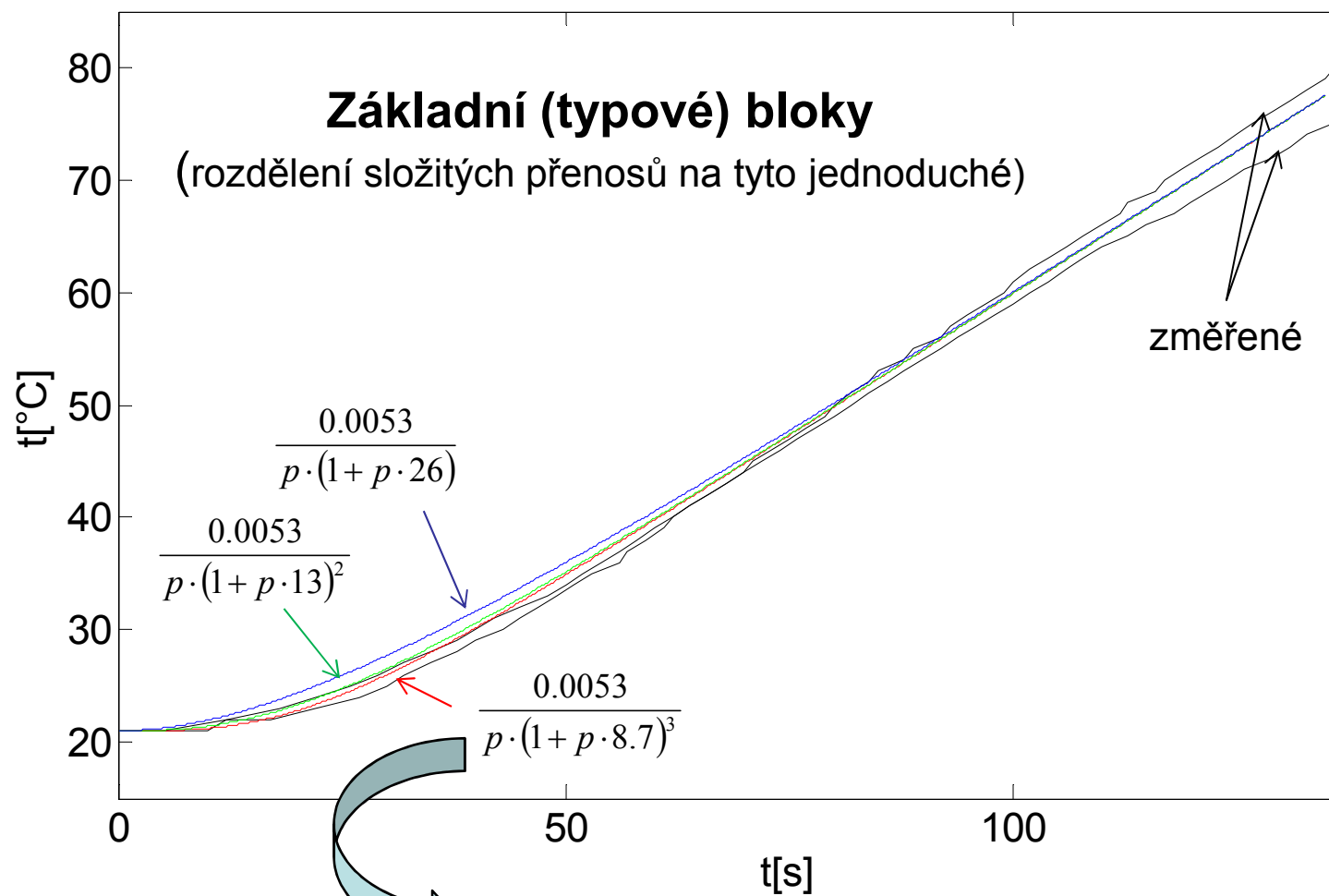
$$\text{je mezi nimi } 0,994 - (-0,341) = 1,335 \text{ dekád}$$

Zesílení v dB

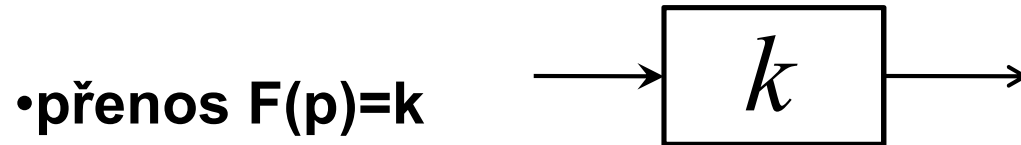
- zesilovač zesiluje a -krát
- nebo o A dB, kde $A=20\cdot\log(a)$
- **decibel**, proč 20x a ne 10x?
původně pro akustický výkon, u výkonů 10x
- zesílení 10x je stejné jako zesílení o 20dB
- zesílení 1000x je stejné jako zesílení o 60dB
- zesílení o -40dB je stejné jako zesílení 0,01x neboli zeslabení 100x

Základní (typové) bloky

- konstanta
 - integrační
 - aperiodický
 - PI-regulátor
 - (blok druhého řádu)
 - (PID-regulátor)
-
- přenos
 - rozbor chování
 - frekvenční charakteristiky



Základní (typové) bloky - konstanta



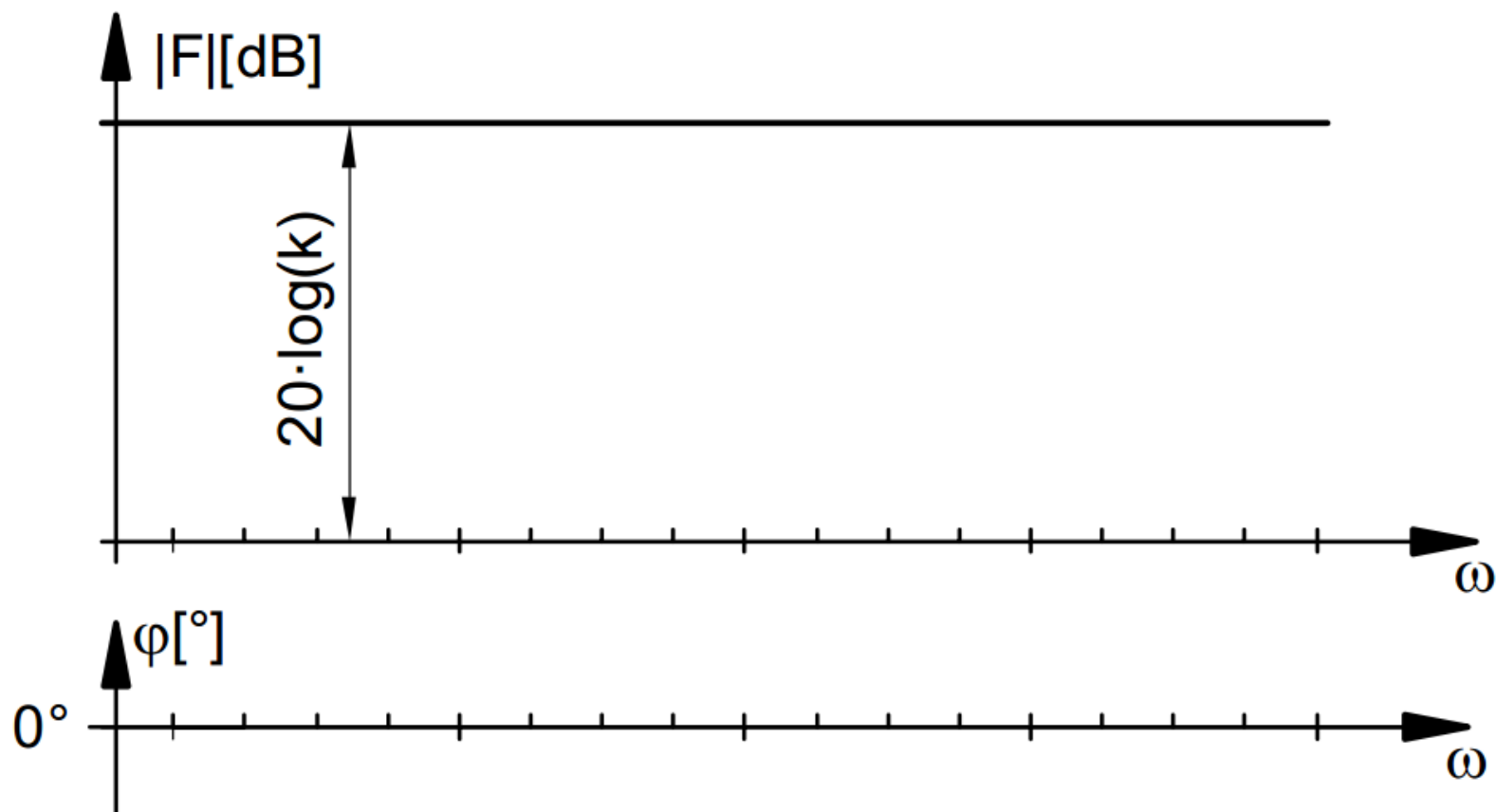
•příklady: ideální zesilovač, proporciální regulátor

•frekvenční charakteristiky:

harmonický signál (bez ohledu na frekvenci) po vynásobení konstantou nemění fázi, pouze amplitudu úměrně násobící konstantě

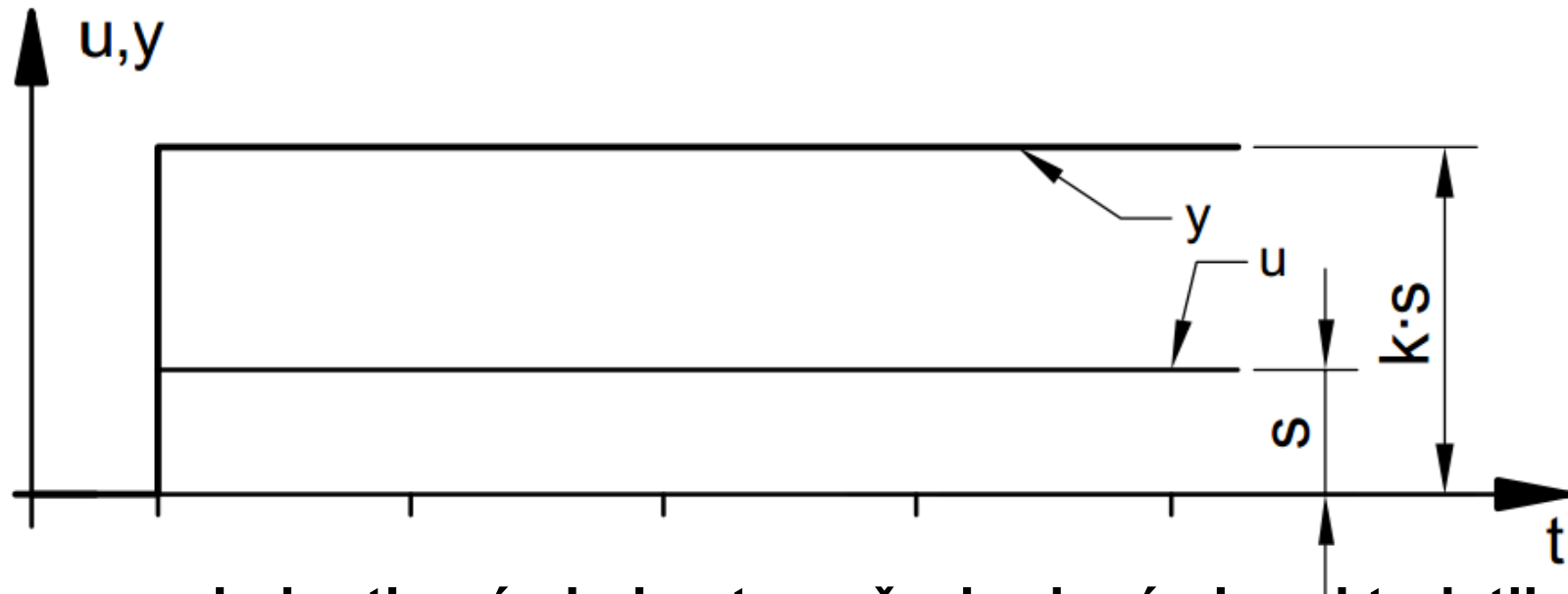
Základní (typové) bloky - konstanta

- frekvenční charakteristiky:



Základní (typové) bloky - konstanta

- odezva na skok:



- odezva na jednotkový skok = tzv. přechodová charakteristika, velmi užitečné pro rychlou hrubou identifikaci neznámého (kmitavost, zesílení)
- odezva na Diracův impuls = impulsní charakteristika

Základní (typové) bloky - integrace

- přenos $F(p) = \frac{1}{p \cdot \tau}$

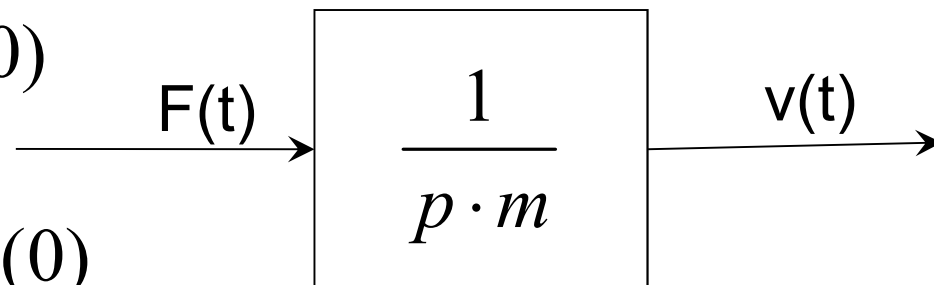
- τ ... časová konstanta, nastavuje rychlost integrace (čím menší, tím rychlejší)

- příklady: pohybová rovnice

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt}$$

$$v = \frac{1}{m} \cdot \int F(t) dt + v(0)$$

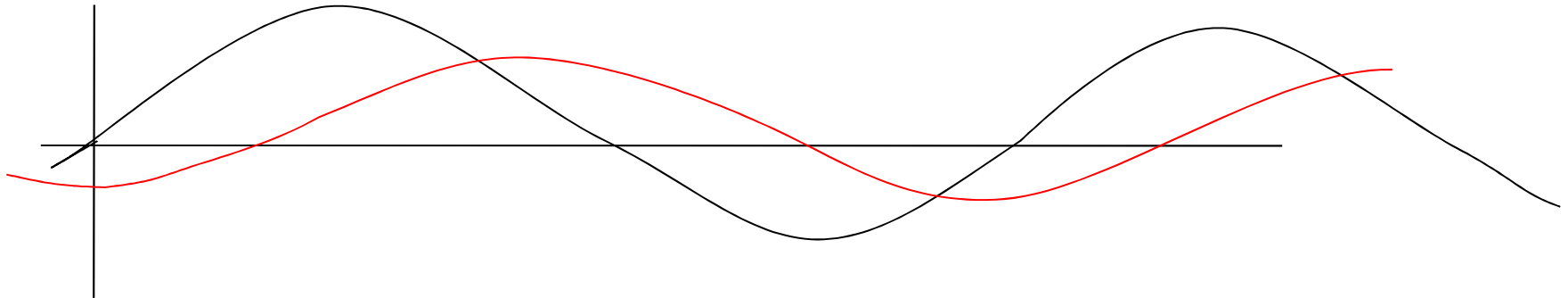
$$\omega = \frac{1}{J} \cdot \int M(t) dt + \omega(0)$$



Základní (typové) bloky - integrace

- frekvenční charakteristiky názorně:

$$\int \sin(\omega \cdot t) \cdot dt = \frac{1}{\omega} (-\cos(\omega \cdot t)) = \frac{1}{\omega} \left(\sin\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) \right)$$



- výstupní signál bez ohledu na frekvenci vždy zpožděn o $\pi/2$
- při zvětšení frekvence 10x (tj. o jednu dekádu) se 10x zmenší zesílení (tj. zmenší se o 20dB) → amplitudová charakteristika má sklon -20dB/dekádu

Základní (typové) bloky - integrace

•frekvenční charakteristiky spočtené:

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

$$A = |F(j \cdot \omega)| = \left| \frac{1}{j \cdot \omega \cdot \tau} \right| = \frac{1}{\omega \cdot \tau}$$

$$A_{dB} = 20 \log \left(\frac{1}{\omega \cdot \tau} \right) = -20 \log(\omega \cdot \tau) = -20 \log(\tau) - 20 \log(\omega)$$

$$A_{dB} = 0 \text{ pro } \omega = \frac{1}{\tau}$$

$$-20dB / dek$$

Základní (typové) bloky - integrace

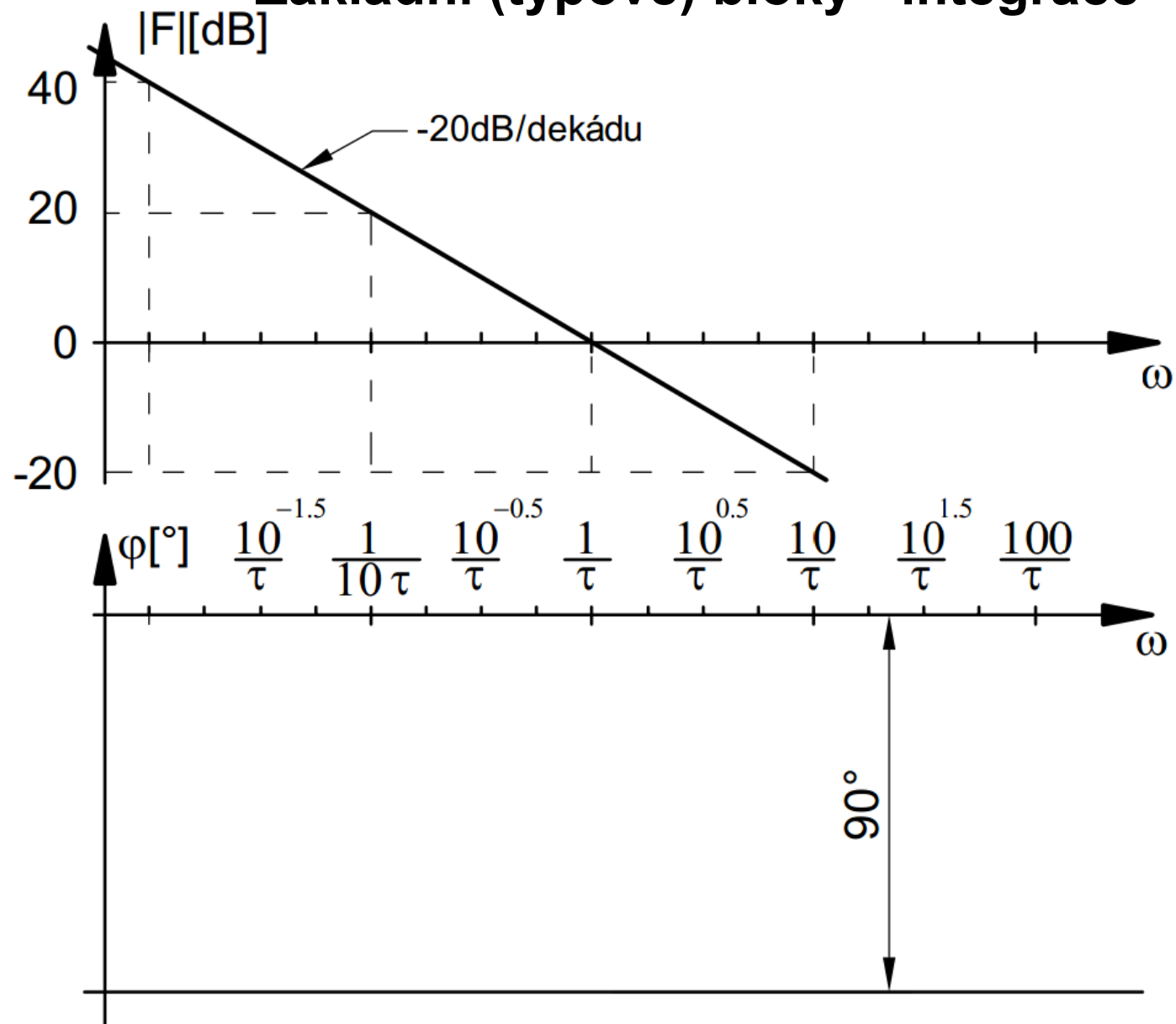
•frekvenční charakteristiky spočtené:

$$\varphi = \arctan \frac{\operatorname{Im}\{F(j \cdot \omega)\}}{\operatorname{Re}\{F(j \cdot \omega)\}}$$

$$\frac{1}{j \cdot \omega \cdot \tau} = \frac{-j}{\omega \cdot \tau} = 0 + j \frac{-1}{\omega \cdot \tau}$$

$$\varphi = \arctan \frac{\frac{-1}{\omega \cdot \tau}}{0} = \arctan(-\infty) = -\frac{\pi}{2}$$

Základní (typové) bloky - integrace



- nekonečné zesílení pro $\omega=0$?

Základní (typové) bloky - integrace

Odezva na jednotkový skok:

- vstup $u=1$ pro $t=0 \dots \infty$, počáteční stav výstupu $y(t=0) = Y_0$

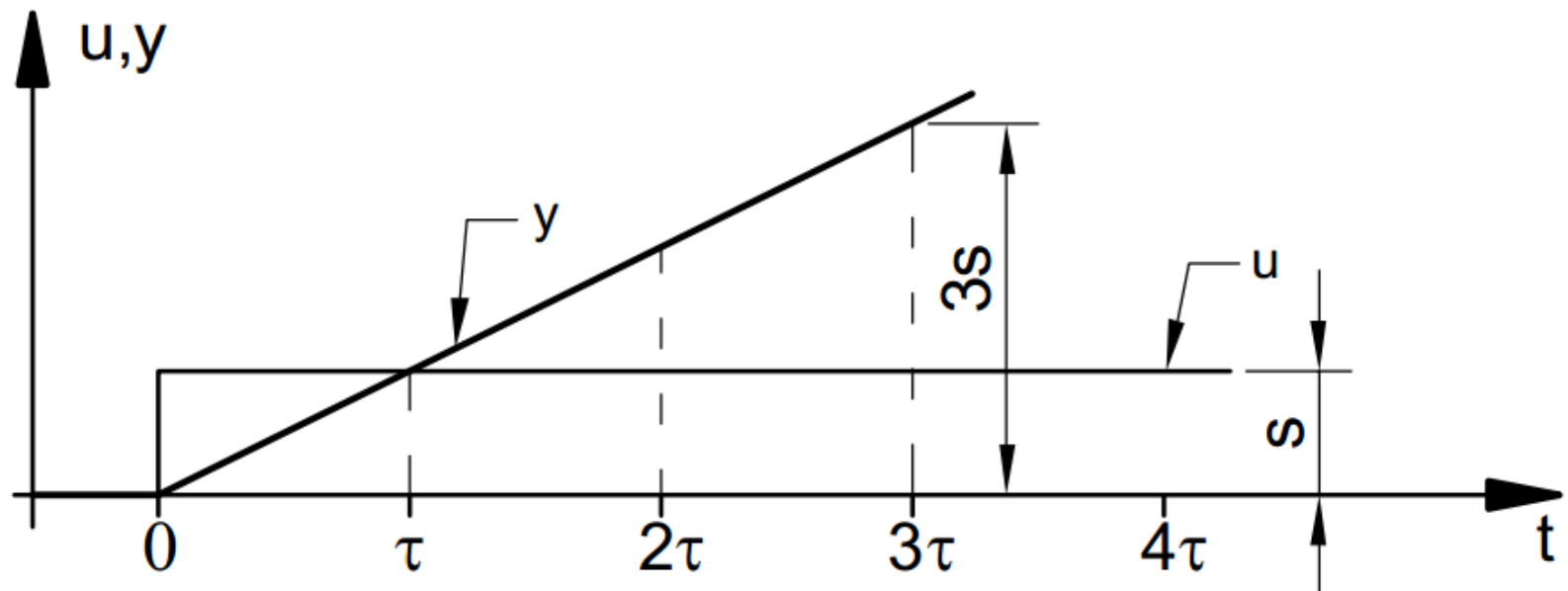
- výstup

$$y(t) = \frac{1}{\tau} \int u(t) dt + Y_0 = \int \frac{1}{\tau} dt + Y_0 = \frac{1}{\tau} t + Y_0$$

- přímka (plocha pod konstantou přibývá lineárně)

- pro $Y_0=0$ naintegruje za 1s hodnotu $1/\tau$

- pro $Y_0=0$ naintegruje za τ do 1



Základní (typové) bloky – aperiodický 1. řádu

• přenos
$$F(p) = \frac{k}{1 + p \cdot \tau}$$

- τ ... časová konstanta, nastavuje rychlost (čím menší, tím rychlejší)
- k ... statické zesílení (v ustáleném stavu, viz za chvíli časové průběhy)
- příklady: vinutí motoru (RL na začátku přednášky), teplota tělesa přineseného do prostředí s konstantní teplotou, modulátor PWM
- aperiodický = nemá periodu = nekmitá (viz za chvíli časový průběh)

Základní (typové) bloky – aperiodický 1. řádu

- Amplitudová logaritmická frekvenční charakteristika

$$A_{dB} = 20 \cdot \log \left| \frac{k}{1 + j\omega\tau} \right| = 20 \cdot \log \frac{|k|}{|1 + j\omega\tau|} = 20 \cdot \log \frac{k}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$$

- Asymptoty

1) $(\omega\tau)^2 \gg 1$ $\frac{k}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \approx \frac{k}{\omega\tau}$

$$A_{dB} = 20 \cdot \log \frac{k}{\omega\tau} = 20 \cdot \log \frac{k}{\tau} - 20 \cdot \log \omega$$

2) $(\omega\tau)^2 \ll 1$ $\frac{k}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \approx k$

$$A_{dB} = 20 \cdot \log k$$

Základní (typové) bloky – aperiodický 1. řádu

- Průsečík asymptot

$$20 \cdot \log \frac{k}{\omega_Z \tau} = 20 \cdot \log k$$

$$20 \cdot \log k - 20 \cdot \log \omega_Z \tau = 20 \cdot \log k$$

$$20 \cdot \log \omega_Z \tau = 0$$

$$\omega_Z \tau = 1$$

$$\omega_Z = \frac{1}{\tau}$$

Základní (typové) bloky – aperiodický 1. řádu

- Největší odchylka skutečné charky od asymptotické je v průsečíku asymptot

- Skutečná

$$20 \cdot \log \left(\frac{k}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \right)_{\omega = \frac{1}{\tau}} = 20 \cdot \log k - 20 \cdot \log \sqrt{2}$$

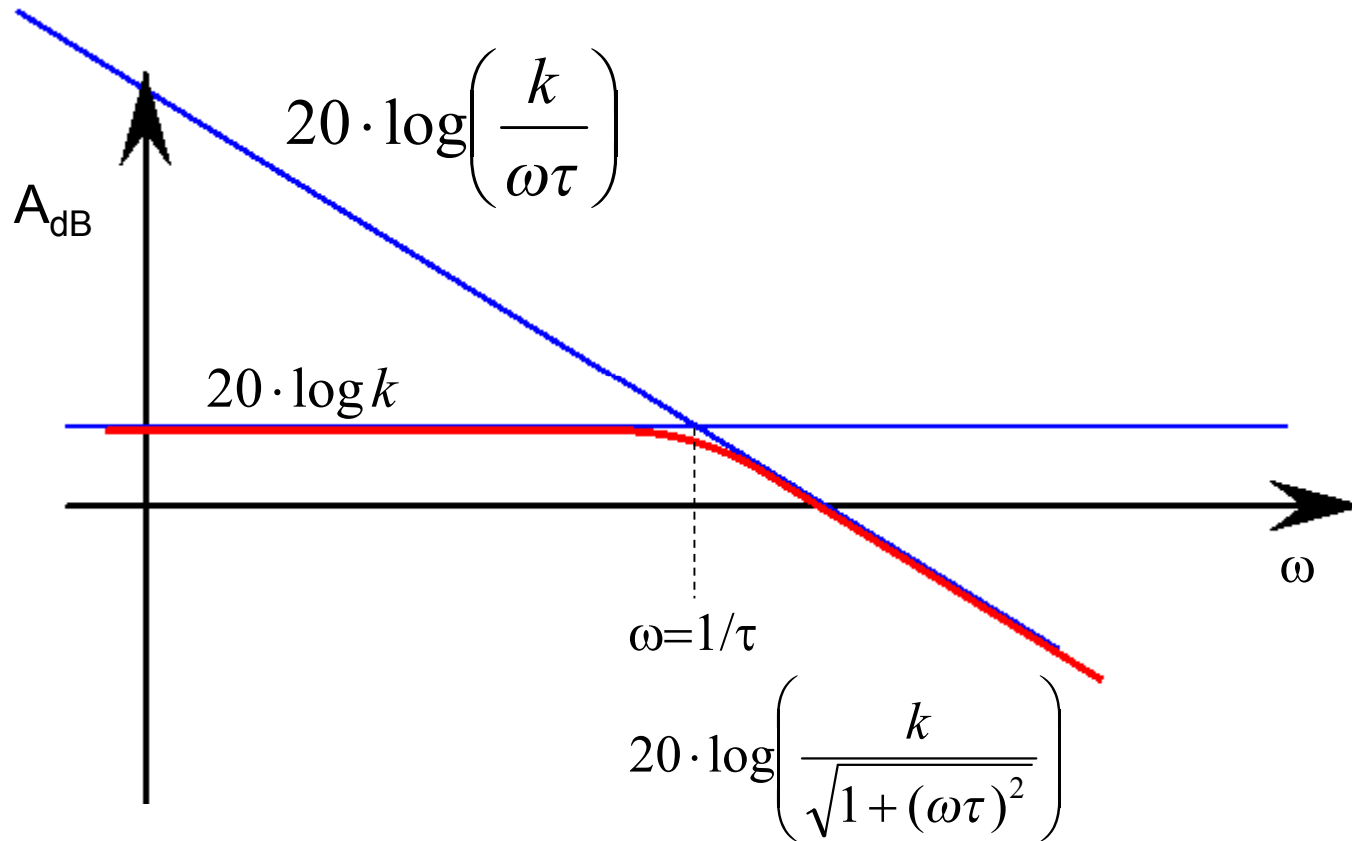
- Asymtotická

$$20 \cdot \log k$$

- Odchylka

$$-20 \cdot \log \sqrt{2} \cong -3dB$$

Základní (typové) bloky – aperiodický 1. řádu



Základní (typové) bloky – aperiodický 1. řádu

- Fázová logaritmická frekvenční charakteristika**

$$\frac{k}{1 + j\omega\tau} = \frac{k}{1 + j\omega\tau} \cdot \frac{1 - j\omega\tau}{1 - j\omega\tau} = \frac{k - jk\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}$$

$$\text{Re} = \frac{k}{1 + (\omega\tau)^2}$$

$$\text{Im} = \frac{-k\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}$$

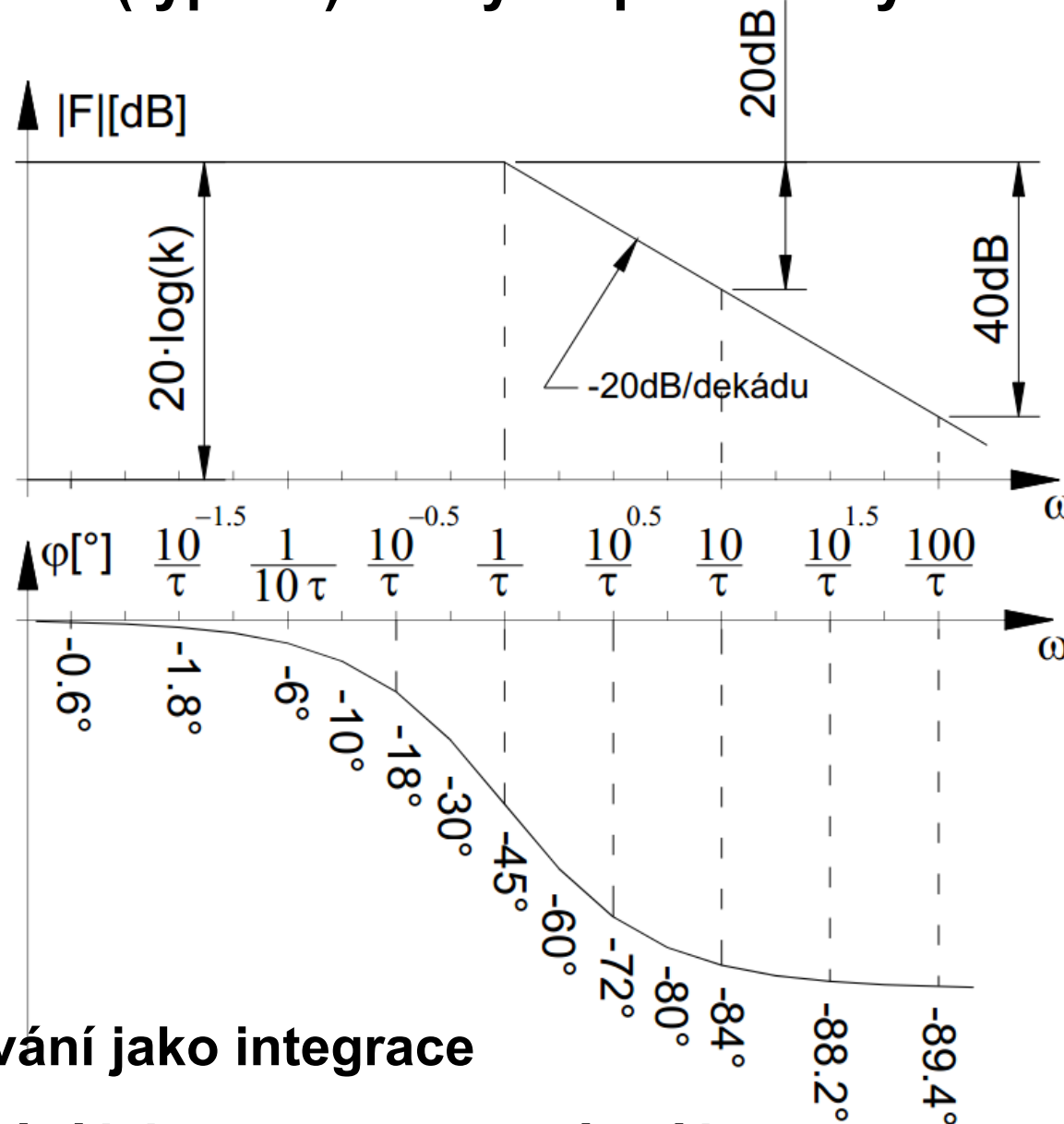
$$\varphi = \text{arctg}\left(\frac{\text{Im}}{\text{Re}}\right) = \text{arctg}\left(\frac{\frac{-k\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}}{\frac{k}{1 + (\omega\tau)^2}}\right) = \text{arctg}(-\omega\tau)$$

$$\omega \rightarrow 0 \quad \varphi = 0^\circ$$

$$\omega \rightarrow \frac{1}{\tau} \quad \varphi = -45^\circ$$

$$\omega \rightarrow \infty \quad \varphi = -90^\circ$$

Základní (typové) bloky – aperiodický 1. řádu



- velké ω – chování jako integrace
- malé ω – chování jako proporce, zesílení k

Základní (typové) bloky – aperiodický 1. řádu

Odezva na skok:

$$\frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{k}{1 + p\tau} \rightarrow Y(p) = U(p) \frac{k}{1 + p\tau}$$

$$u = \text{skok velikosti } S, \text{ obraz } U(p) = \frac{S}{p}$$

$$Y(p) = \frac{S}{p} \cdot \frac{k}{1 + p\tau} = \frac{A}{p} + \frac{B}{1 + p\tau}$$

$$S \cdot k = A(1 + p\tau) + Bp = A + p(A\tau + B)$$

$$A = S \cdot k$$

$$A\tau + B = 0 \Rightarrow B = -A\tau = -S \cdot k \cdot \tau$$

$$Y(p) = \frac{S \cdot k}{p} + \frac{-S \cdot k \cdot \tau}{1 + p\tau} = \frac{S \cdot k}{p} - S \cdot k \cdot \frac{1}{\frac{1}{\tau} + p}$$

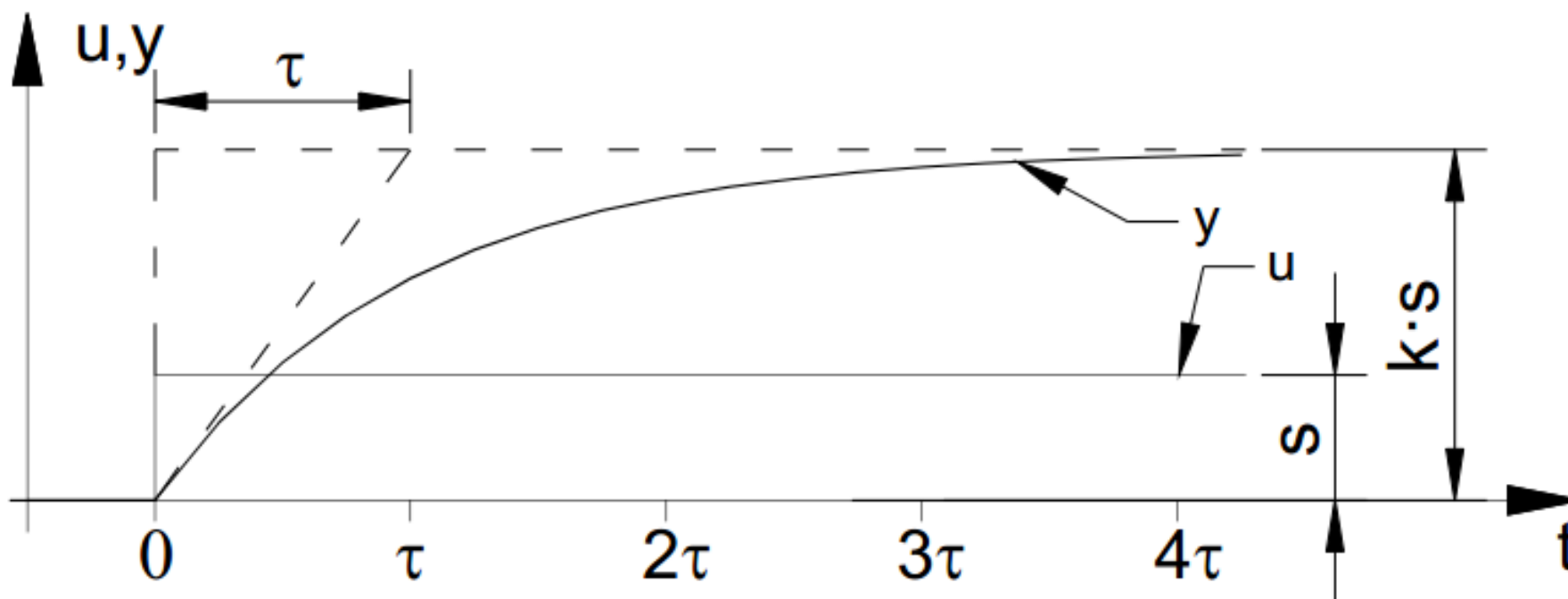
Základní (typové) bloky – aperiodický 1. řádu

Odezva na skok:

$$Y(p) = \frac{S \cdot k}{p} + \frac{-S \cdot k \cdot \tau}{1 + p\tau} = \frac{S \cdot k}{p} - S \cdot k \cdot \frac{1}{p - \left(-\frac{1}{\tau}\right)}$$

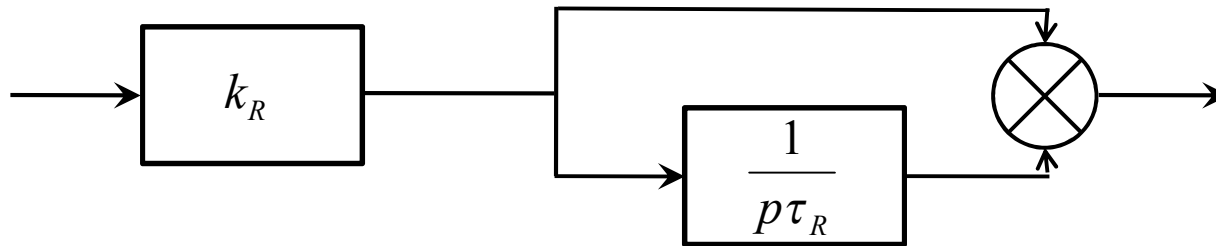
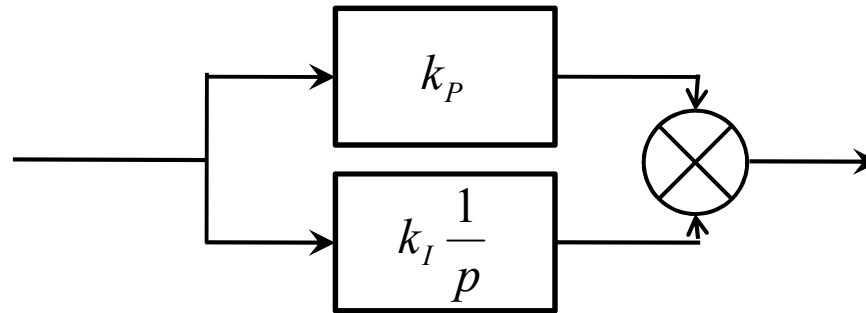
$$\text{nekmitavé } e^{a \cdot t} \quad \frac{1}{p - a}$$

$$y(t) = S \cdot k - S \cdot k \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = S \cdot k \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$



Základní (typové) bloky – PI regulátor

•přenos



$$F_{PI}(j\omega) = k_R \left(1 + \frac{1}{j\omega\tau_R} \right) = \frac{k_R(1 + j\omega\tau_R)}{j\omega\tau_R}$$

Základní (typové) bloky – PI regulátor

- Amplitudová logaritmická frekvenční charakteristika

$$A_{dB} = 20 \cdot \log \left| \frac{k_R (1 + j\omega\tau_R)}{j\omega\tau_R} \right| = 20 \cdot \log \frac{|k_R (1 + j\omega\tau_R)|}{|j\omega\tau_R|} = \frac{k_R \sqrt{1 + (\omega\tau_R)^2}}{\omega\tau_R}$$

- Asymptoty

$$1) \quad (\omega\tau_R)^2 \ll 1 \quad \frac{k_R \sqrt{1 + (\omega\tau_R)^2}}{\omega\tau_R} \approx \frac{k_R}{\omega\tau_R}$$

$$A_{dB} = 20 \cdot \log \frac{k_R}{\omega\tau_R} = 20 \cdot \log \frac{k_R}{\tau_R} - 20 \cdot \log \omega$$

$$2) \quad (\omega\tau_R)^2 \gg 1 \quad \frac{k_R \sqrt{1 + (\omega\tau_R)^2}}{\omega\tau_R} \approx k_R$$

$$A_{dB} = 20 \cdot \log k_R$$

Základní (typové) bloky – PI regulátor

- Průsečík asymptot

$$20 \cdot \log \frac{k_R}{\omega_Z \tau_R} = 20 \cdot \log k_R$$

$$20 \cdot \log k_R - 20 \cdot \log \omega_Z \tau_R = 20 \cdot \log k_R$$

$$20 \cdot \log \omega_Z \tau_R = 0$$

$$\omega_Z \tau_R = 1$$

$$\omega_Z = \frac{1}{\tau_R}$$

Základní (typové) bloky – PI regulátor

- Největší odchylka skutečné charky od asymptotické je v průsečíku asymptot

- Skutečná

$$20 \cdot \log \left(\frac{k_R \sqrt{1 + (\omega \tau_R)^2}}{\omega \tau_R} \right)_{\omega = \frac{1}{\tau_R}} = 20 \cdot \log k_R + 20 \cdot \log \sqrt{2}$$

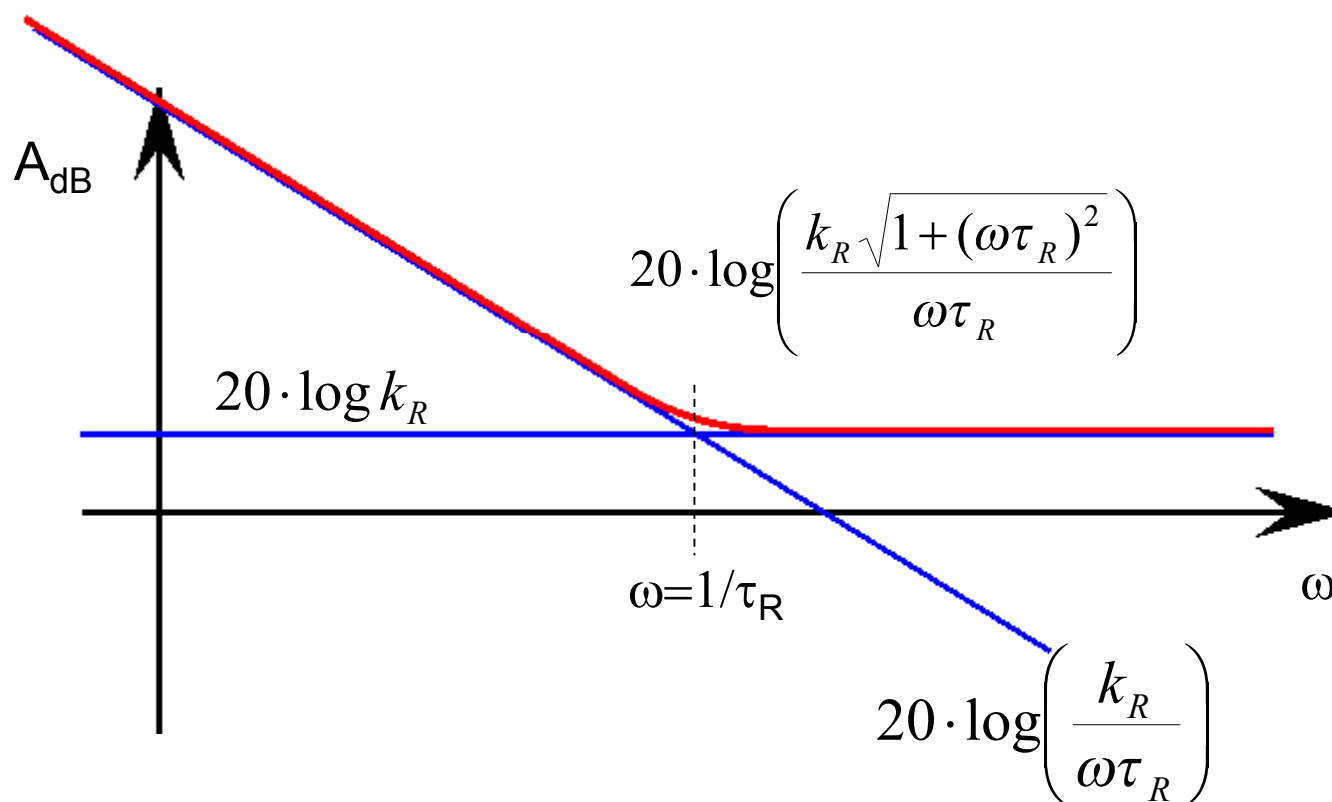
- Asymtotická

$$20 \cdot \log k_R$$

- Odchylka

$$20 \cdot \log \sqrt{2} \cong 3dB$$

Základní (typové) bloky – PI regulátor



Základní (typové) bloky – PI regulátor

•Fázová logaritmická frekvenční charakteristika

$$\frac{k_R(1 + j\omega\tau_R)}{j\omega\tau_R} = \frac{k_R(1 + j\omega\tau_R)}{j\omega\tau_R} \cdot \frac{0 - j\omega\tau_R}{0 - j\omega\tau_R} = k_R \frac{-j\omega\tau_R + (\omega\tau_R)^2}{(\omega\tau_R)^2}$$

$$\text{Re} = k_R \frac{(\omega\tau_R)^2}{(\omega\tau_R)^2} = k_R$$

$$\text{Im} = k_R \frac{-\omega\tau_R}{(\omega\tau_R)^2} = \frac{-k_R}{\omega\tau_R}$$

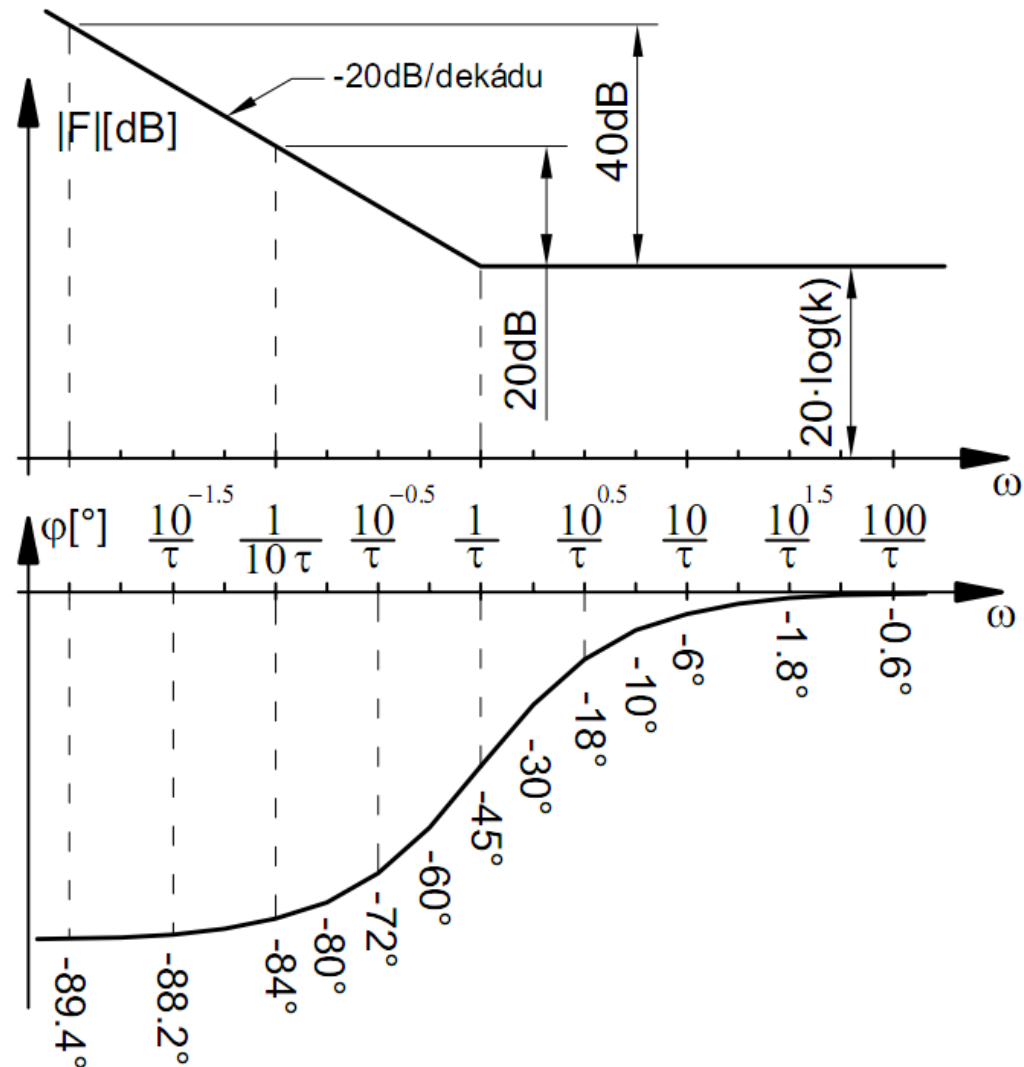
$$\varphi = \text{arctg}\left(\frac{\text{Im}}{\text{Re}}\right) = \text{arctg}\left(\frac{1}{-\omega\tau_R}\right) \quad \text{pozor na kvadrant!}$$

$$\omega \rightarrow 0 \quad \varphi = -90^\circ$$

$$\omega \rightarrow \frac{1}{\tau_R} \quad \varphi = -45^\circ$$

$$\omega \rightarrow \infty \quad \varphi = 0^\circ$$

Základní (typové) bloky – PI regulátor

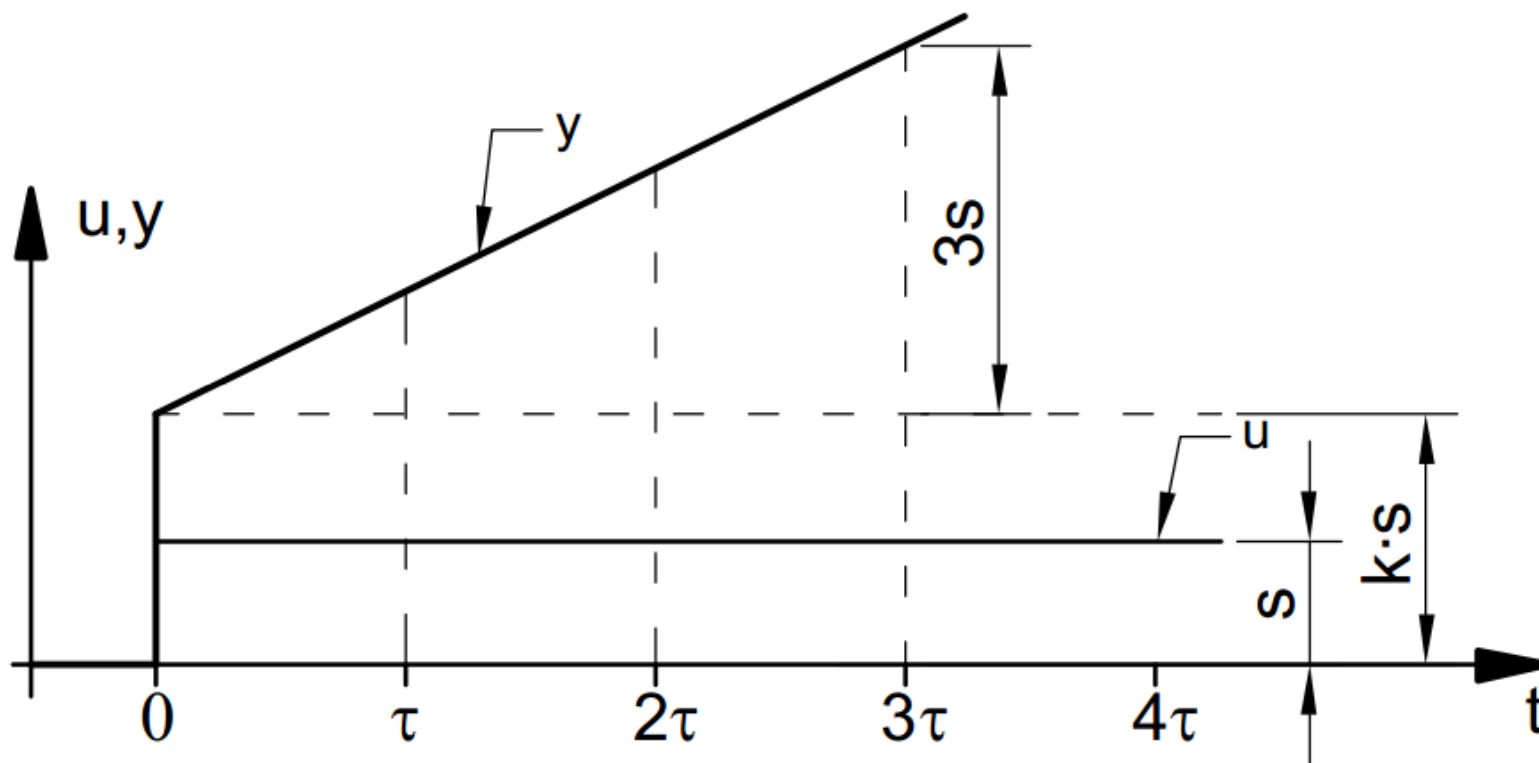


- malé ω – chování jako integrace, velké zesílení (∞ pro $\omega=0$?)
- velké ω – chování jako proporce, zesílení k_R

Základní (typové) bloky – PI regulátor

Odezva na jednotkový skok:

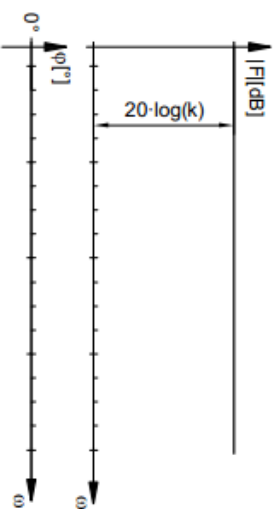
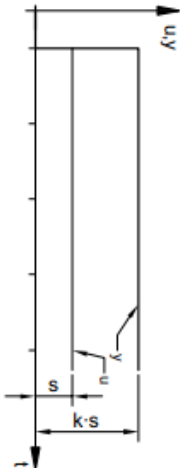
- konstanta + integrace



Základní (typové) bloky – „tahák“ na courseware/cvičení

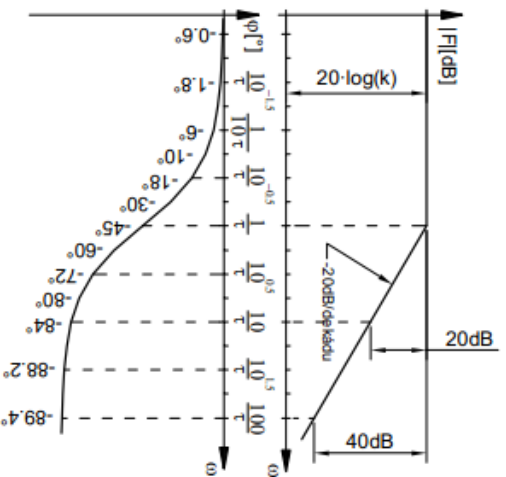
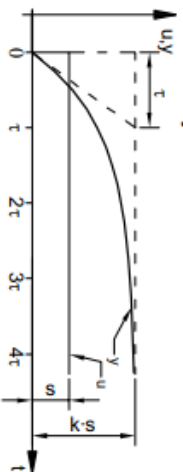
Konstanta

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



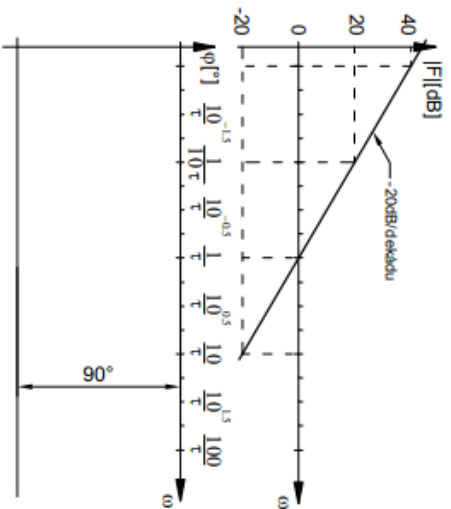
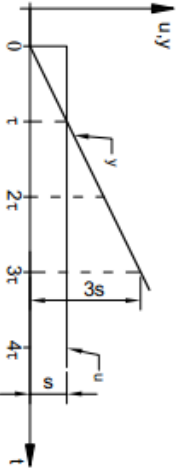
Aperiodický blok

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



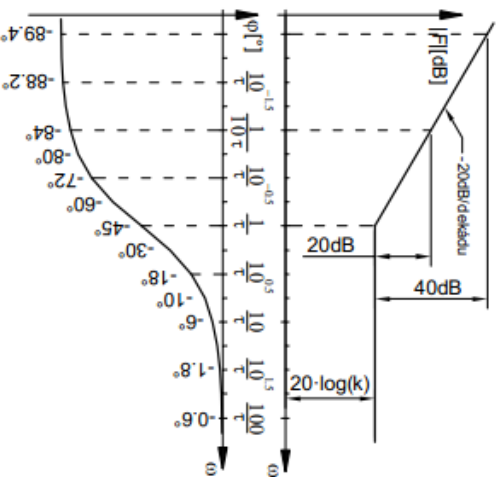
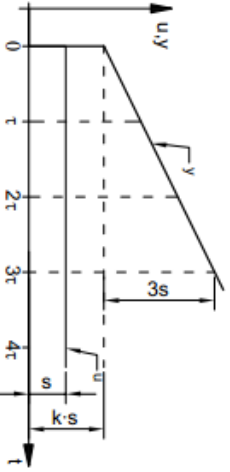
Integrační blok

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



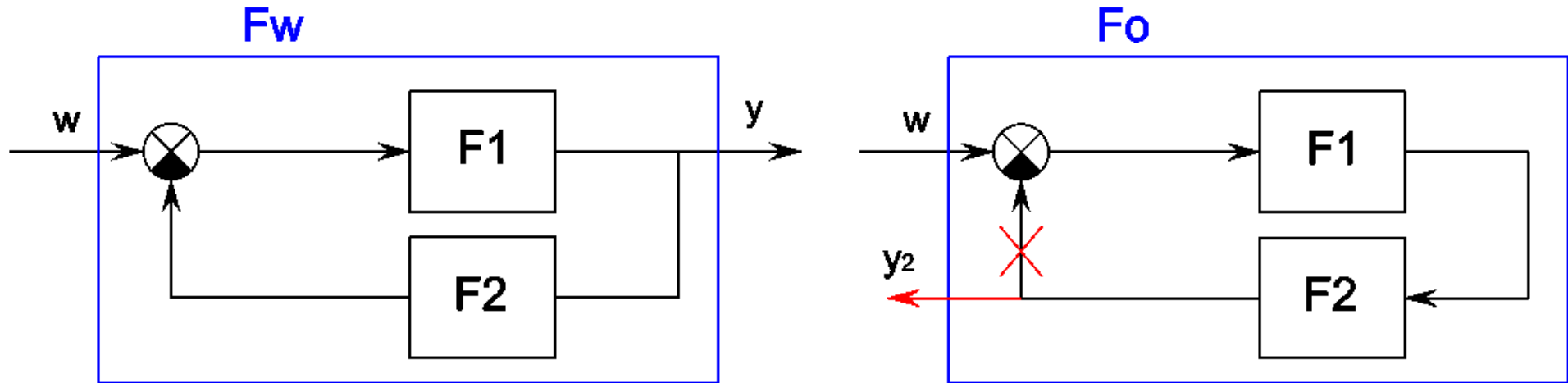
PI regulátor

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



Uzavřená vs. rozpojená (otevřená) smyčka

(potřeba pro Nyquistovo kritérium stability)

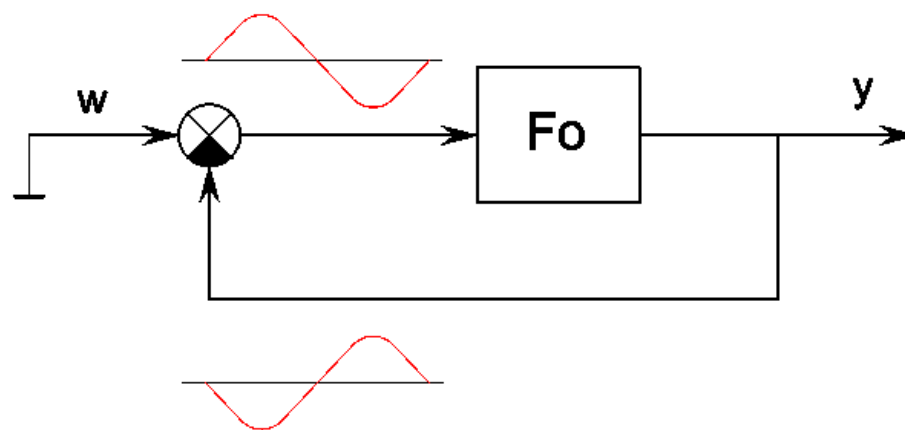
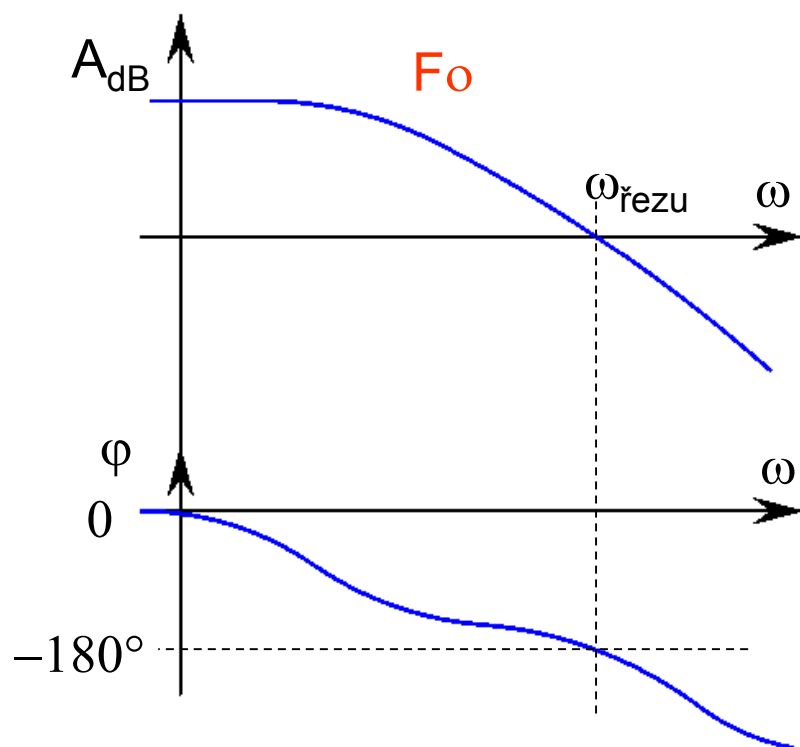


$$F_w = \frac{Y(p)}{W(p)}$$

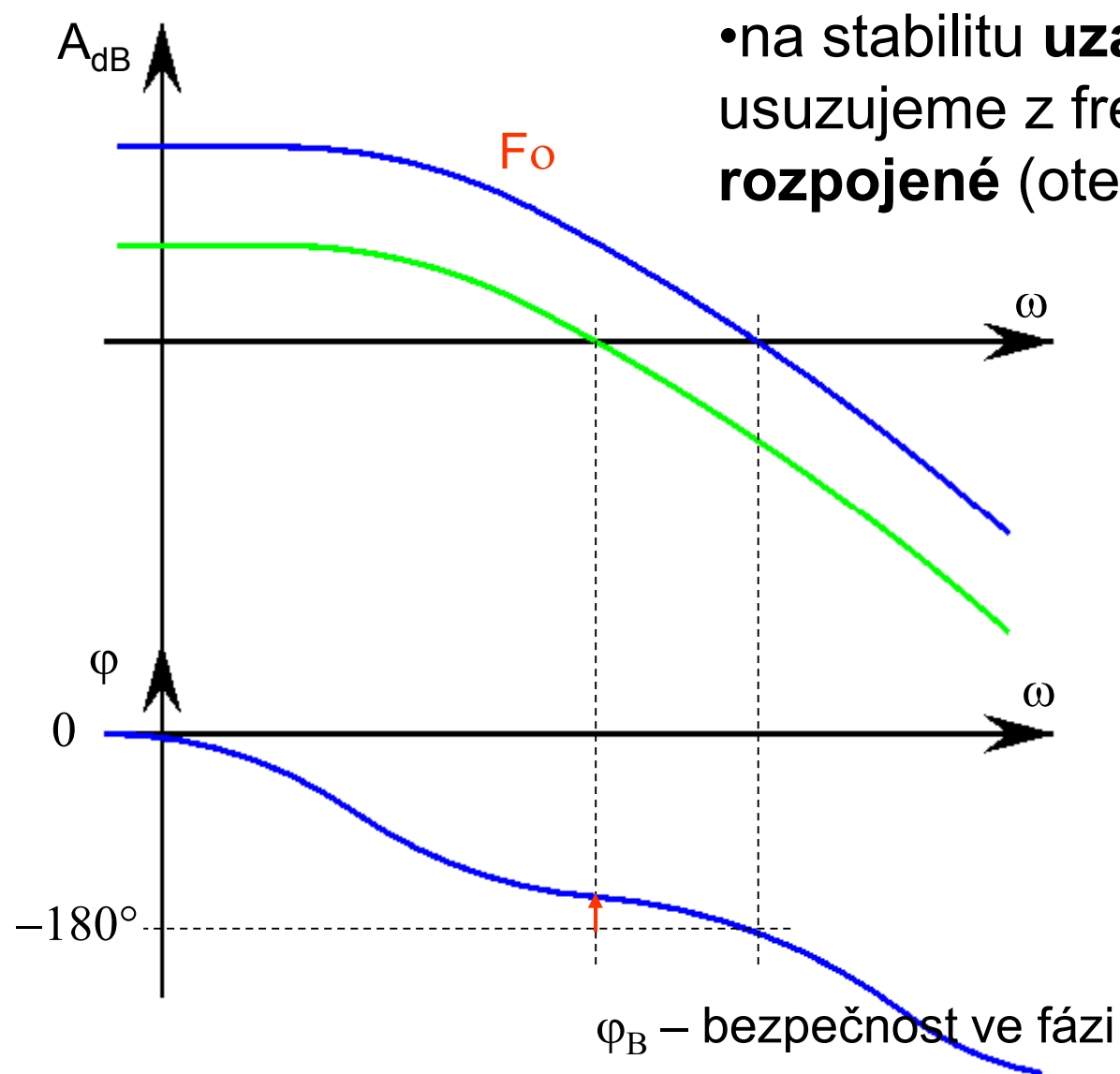
$$F_o = \frac{Y_2(p)}{W(p)}$$

otevřená smyčka pro Nyquistovo kritérium stability nesouvisí s řízením v otevřené smyčce → raději rozpojená

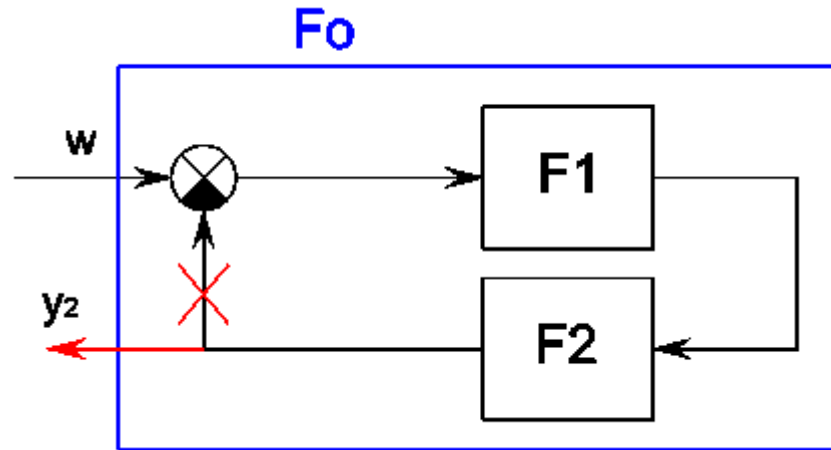
Nyquistovo kritérium stability



Nyquistovo kritérium stability



Nyquistovo kritérium stability – jak nakreslit Fo



$$F_o = \frac{Y_2(p)}{W(p)} = F_1 \cdot F_2$$

- **Amlitudová logaritmická charakteristika**

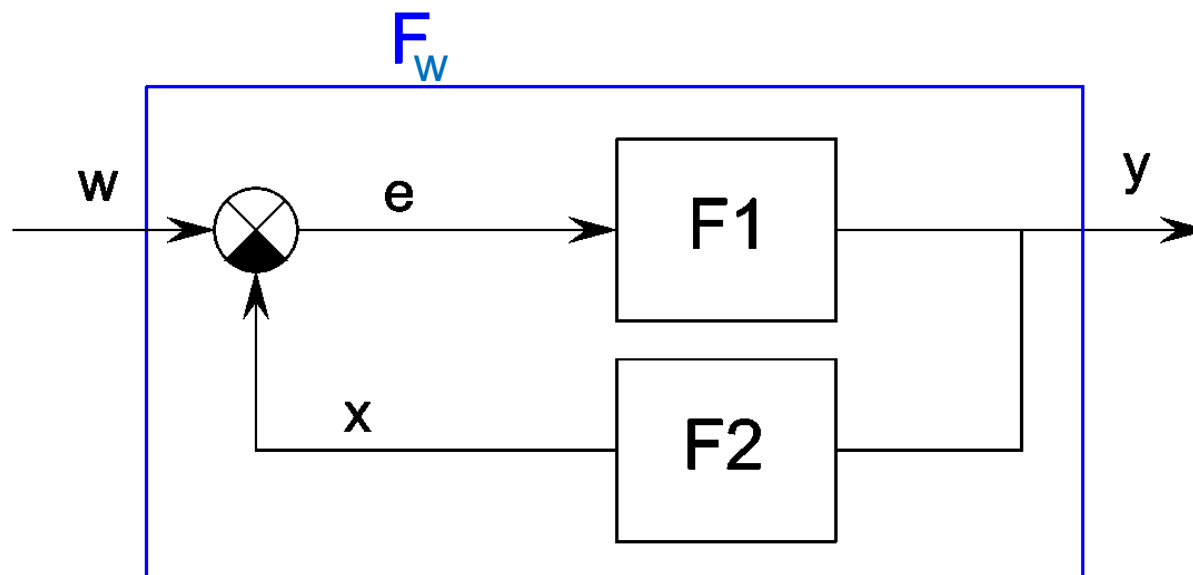
$$20 \cdot \log |F_o| = 20 \cdot \log |F_1 \cdot F_2| = 20 \cdot \log |F_1| + 20 \cdot \log |F_2|$$

- **Charakteristika Fo je součtem charakteristik $F_1 + F_2 + \dots$, které jsou (zpravidla) jednoduché**

Přenos uzavřené smyčky

$$F_2 = \frac{x}{y} \rightarrow x = F_2 \cdot y$$

$$e = w \mp x = w \mp F_2 \cdot y$$



$$F_1 = \frac{y}{e} \rightarrow y = F_1 \cdot e = F_1 \cdot (w \mp F_2 \cdot y) = F_1 \cdot w \mp F_1 \cdot F_2 \cdot y$$

$$y(1 \pm F_1 \cdot F_2) = F_1 \cdot w$$

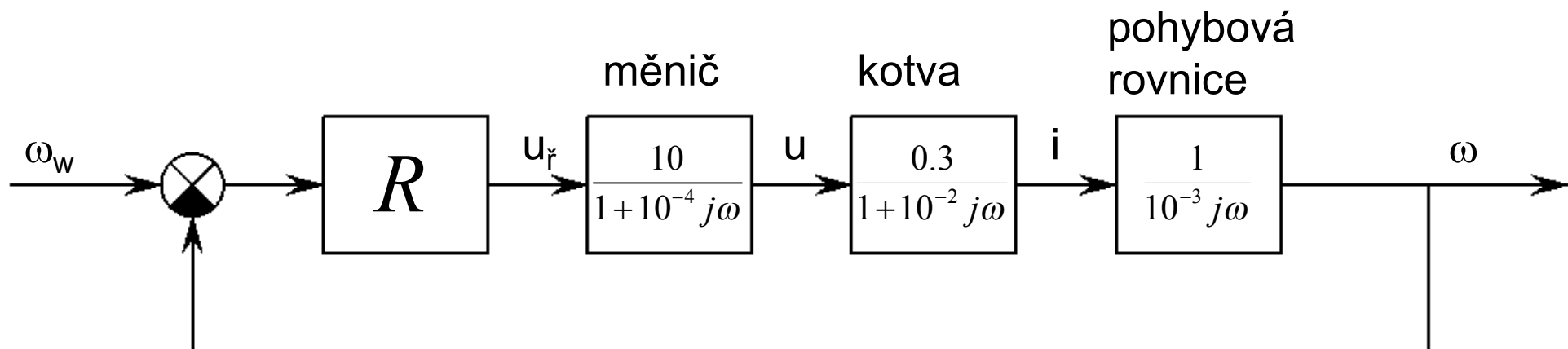
$$F_w = \frac{y}{w} = \frac{F_1}{1 \pm F_1 \cdot F_2} = \frac{F_0}{1 \pm F_0} \cdot \frac{1}{F_{z.v.}}$$

$$F_0 \gg 1 \Rightarrow F_w \approx 1$$

$$F_0 \ll 1 \Rightarrow F_w \approx F_0$$


 na RT bude Fzv = 1

**Příklad návrhu P-regulátoru
(regulace rychlosti malého ss motoru)
na příště čtverečkovaný papír, „tahák“**



Příklad návrhu P-regulátoru (regulace rychlosti malého ss motoru)

