

# Struktura a typy lékařských přístrojů

---

BAM31LET Lékařská technika

Jan Havlík | Katedra teorie obvodů | [xhavlikj@fel.cvut.cz](mailto:xhavlikj@fel.cvut.cz)

# Elektronické lékařské přístroje

---

- využití přístrojové techniky v medicíně
  - diagnostické systémy
    - např. elektrokardiografy, elektroencefalografy, ultrazvukové diagnostické systémy, tonometry, pulsní oxymetry a další
  - terapeutické systémy
    - např. kardiostimulátory, defibrilátory, ultrazvukové terapeutické systémy, radioterapeutické systémy a další
  - systémy pro chirurgii
    - anesteziologické systémy, kryochirurgické systémy, ultrazvukové chirurgické systémy, laserové systémy a další
  - podpora a náhrady orgánů
    - naslouchadla, kochleární implantáty, podpora zraku, mimotělní krevní oběh, systémy pro hemodialýzu a další

# Klasifikace přístrojů a systémů

---

- biomedicínské přístroje lze dělit podle
  - měřené veličiny
    - přístroje pro měření tlaku, průtoku, teploty atd.
  - principu snímání
    - rezistivní, induktivní, kapacitní, ultrazvukový, elektrochemický
  - podle orgánových systémů, pro jejichž sledování jsou určeny
    - kardiovaskulární systémy, dýchací ústrojí, endokrinologické systémy
  - podle klinické specializace, ve které se uplatňují
    - přístroje pro kardiologii, neurologii, radiologii, oftalmologii atd.

„Malá chyba na začátku se stane velkou na konci.“

Giordano Bruno (1548 – 1600)



# Způsoby měření

---

- přímé měření
  - např. měření délky pomocí délkoměru (mechanického), měření teploty apod.
- nepřímé měření
  - např. měření délky pomocí délkoměru (laserového), neinvazivní měření krevního tlaku (NIBP) apod.
- komparativní (nulové) měření
  - měření proti etalonu, resp. proti známé hodnotě měřené veličiny
  - např. můstkové měření odporu, komparační měření napětí apod.

# Vyhodnocení měření

---

- střední hodnota (mean value)

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^N \frac{X_i}{N}$$

- medián (median)
  - prostřední hodnota ve výběru, polovina hodnot je větších, polovina je menších
- modus (mode)
  - nejčastější hodnota ve výběru (u některých souborů dat, typicky u nečíselných dat jako např. u seznamu příjmení, krevních skupin apod. nelze, nebo lze jen velmi obtížně, jiný parametr definovat)

# Vyhodnocení měření

---

- rozptyl (střední kvadratická chyba)

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2$$

- směrodatná odchylka

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}$$

- pravděpodobnost, že se náhodná veličina bude od střední hodnoty lišit nejvýše o  $1\sigma$  je pro normální rozdělení 68 %, o  $2\sigma$  pak již 95 %

# Vyhodnocení měření

---

- standardní chyba střední hodnoty

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

- pak můžeme psát pro výsledek měření „s vysokou“ pravděpodobností

$$X = \bar{X} \pm \sigma_{\bar{X}}$$



# Chyby měření

---

- systematická (soustavná) chyba
  - při opakovaných měřeních za stejných podmínek zůstává stejná
  - např. principiální chyba použité měřicí metody, může souviset jak s fyzikální podstatou měření (např. stanovení kyslíkové saturace krve), tak se způsobem zpracování dat – postupem výpočtu (např. určení středního arteriálního tlaku z hodnot systolického a diastolického tlaku)
  - nelze určit statisticky, v některých případech lze odhadnout
- náhodná (statistická) chyba měření
  - vzniká náhodnými rušivými vlivy, např. vnějším rušením, otřesy, změnami podmínek měření, nepřesností odečtu apod.
  - nelze ji odstranit, lze ji však minimalizovat opakovaným měřením a statistickým zpracováním dat

# Charakteristiky lékařských přístrojů

- soubor parametrů umožňujících vzájemně srovnávat jednotlivé přístroje a kvantifikovat jejich vlastnosti
- v závislosti na frekvenci vstupní veličiny dělíme na
  - statické parametry (charakteristiky)

popisují chování systému pro stejnosměrné nebo velmi pomalu se měnící vstupní veličiny (některé sensory a systémy, např. piezoelektrické snímače, reagují pouze na změny vstupní veličiny)
  - dynamické parametry (charakteristiky)

popisují chování systému při změnách vstupních veličin

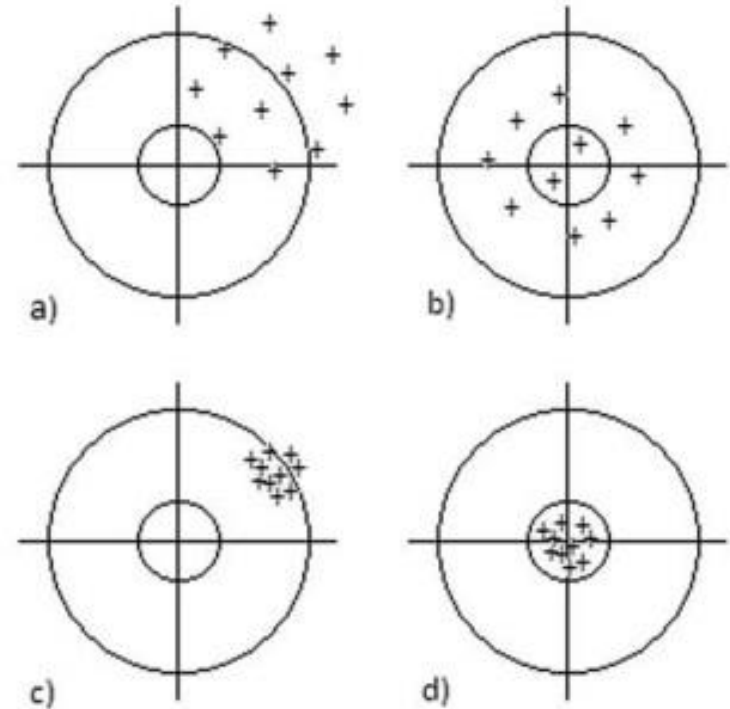
# Statické parametry

---

- přesnost měření (accuracy) [*CAR00*]
  - schopnost přístroje při opakovaných měřeních dosáhnout malé odchylky mezi střední hodnotou naměřených výsledků a hodnotou měřené veličiny
- rozptyl měření (precision) [*CAR00*]
  - schopnost přístroje při opakovaných měření vracet pro stejnou vstupní veličinu stejný nebo alespoň velmi podobný výsledek

# Statické parametry

- přesnost a rozptyl měření  
[CAR00]
  - malá přesnost, velký rozptyl
  - velká přesnost, velký rozptyl
  - malá přesnost, malý rozptyl
  - velká přesnost, malý rozptyl  
(ideální stav)



# Statické parametry

---

- chyba měření (accuracy) [*Web07*]
  - rozdíl mezi naměřenou a správnou hodnotou
  - udává se v procentech z naměřeného údaje nebo rozsahu (např.  $\pm 1\%$  z naměřeného údaje,  $\pm 1\%$  z rozsahu), u digitálních přístrojů v počtu číslic (např.  $\pm 1$  číslice), obvykle v kombinacích údajů
- rozlišení přístroje (precision) [*Web07*]
  - počet číslic, které přístroj zobrazuje (přístroj, který zobrazí naměřený údaj 2,3456 V má větší rozlišení než přístroj, který zobrazí 2,35 V)
- rozlišení, citlivost (resolution) [*Web07*]
  - nejmenší změna vstupní veličiny, kterou přístroj dokáže zaznamenat, např. u A/D převodníku 1 LSB

# Statické parametry

---

- reprodukovatelnost (opakovatelnost) měření
  - schopnost přístroje naměřit v různém čase při stejném vstupu stejnou hodnotu
- pro lineární přenosovou funkci
  - stejnosměrný posun (zero drift) → aditivní chyba
  - změna citlivosti (sensitivity drift)
    - změna směrnice přenosové funkce → multiplikativní chyba

# Statické parametry

---

- linearita

- necht' platí

$$y_1 = f(x_1)$$

$$y_2 = f(x_2)$$

- systém je lineární, pokud platí

$$y_1 + y_2 = f(x_1 + x_2)$$

$$K y_1 = f(K x_1)$$

- vstupní rozsah, dynamický rozsah

- povolený rozsah měřené veličiny příp. rozsah měřené veličiny, ve kterém je přístroj schopen měřit s definovanými parametry

# Statické parametry

---

- vstupní impedance
  - protože často měříme neelektrické veličiny, použijme zobecněnou definici impedance
  - pro každou měřenou veličinu  $X_{d1}$  (veličina typu úsilí) existuje taková veličina  $X_{d2}$  (veličina typu tok), že jejich součin má rozměr výkonu (jedná se o dvojice např. napětí – proud, síla – rychlost, tlak – průtok; první veličina vždy reprezentuje úsilí, s kterým lze dosáhnout děje vyjádřeného druhou veličinou)
$$P = X_{d1} \cdot X_{d2}$$
  - výkon reprezentuje množství energie, kterou za jednotku času odebereme z měřeného systému



# Statické parametry

---

- impedanci pak definujeme jako podíl fázorů (je třeba uvažovat harmonické průběhy veličin)

$$Z = \frac{X_{d1}}{X_{d2}}$$

- dosazením do rovnice pro výkon dostaneme

$$P = X_{d1} \cdot X_{d2} = \frac{X_{d1}^2}{Z} = Z \cdot X_{d2}^2$$

- pro minimalizaci ovlivnění měřeného děje (minimalizaci energie spotřebované při měření) potřebujeme při měření veličin typu  $X_{d1}$  (veličina typu úsilí) systémy s co největší impedancí, pro měření veličin typu  $X_{d2}$  (veličina typu tok) naopak systémy s impedancí jdoucí k nule

# Dynamické parametry

---

- parametry popisující chování systému při změnách vstupních veličin
- pouze ve výjimečných případech jsou biologické signály stejnosměrné nebo jen velmi pomalu se měnící (např. tělesná teplota), obvykle jsou to signály se spektrem frekvencí od jednotek do desítek Hz
- časové závislosti mezi vstupní a výstupní veličinou popisujeme pomocí přenosových charakteristik
- vztah mezi vstupní veličinou a výstupem ve frekvenční (operátorové) oblasti popisuje přenosová funkce

# Přenosové charakteristiky

---

- impulsní charakteristika  $w(t)$ 
  - odezva obvodu na Diracův impuls  $\delta(t)$

$$w(t) = \mathcal{L}^{-1} \{P(p)\}$$

- přechodová charakteristika  $a(t)$ 
  - odezva obvodu na jednotkový skok  $\mathbf{1}(t)$

$$a(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{P(p)}{p} \right\}$$

# Přenosová funkce

---

- přenosová funkce lineárního systému s konstantními parametry je racionální lomená funkce

$$P(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{b_M(j\omega)^M + \dots + b_1(j\omega) + b_0}{a_N(j\omega)^N + \dots + a_1(j\omega) + a_0}$$

- vstupní veličina je harmonická
- výstupní veličina je také harmonická, se stejnou frekvencí jako vstupní veličina, amplituda a fáze výstupu jsou funkcí frekvence

# Přenosová funkce

---

- přenosová funkce nultého řádu

$$a_0 y(t) = b_0 x(t)$$

$$P(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{b_0}{a_0} = K$$

- výstup je frekvenčně nezávislý na vstupu

# Přenosová funkce

---

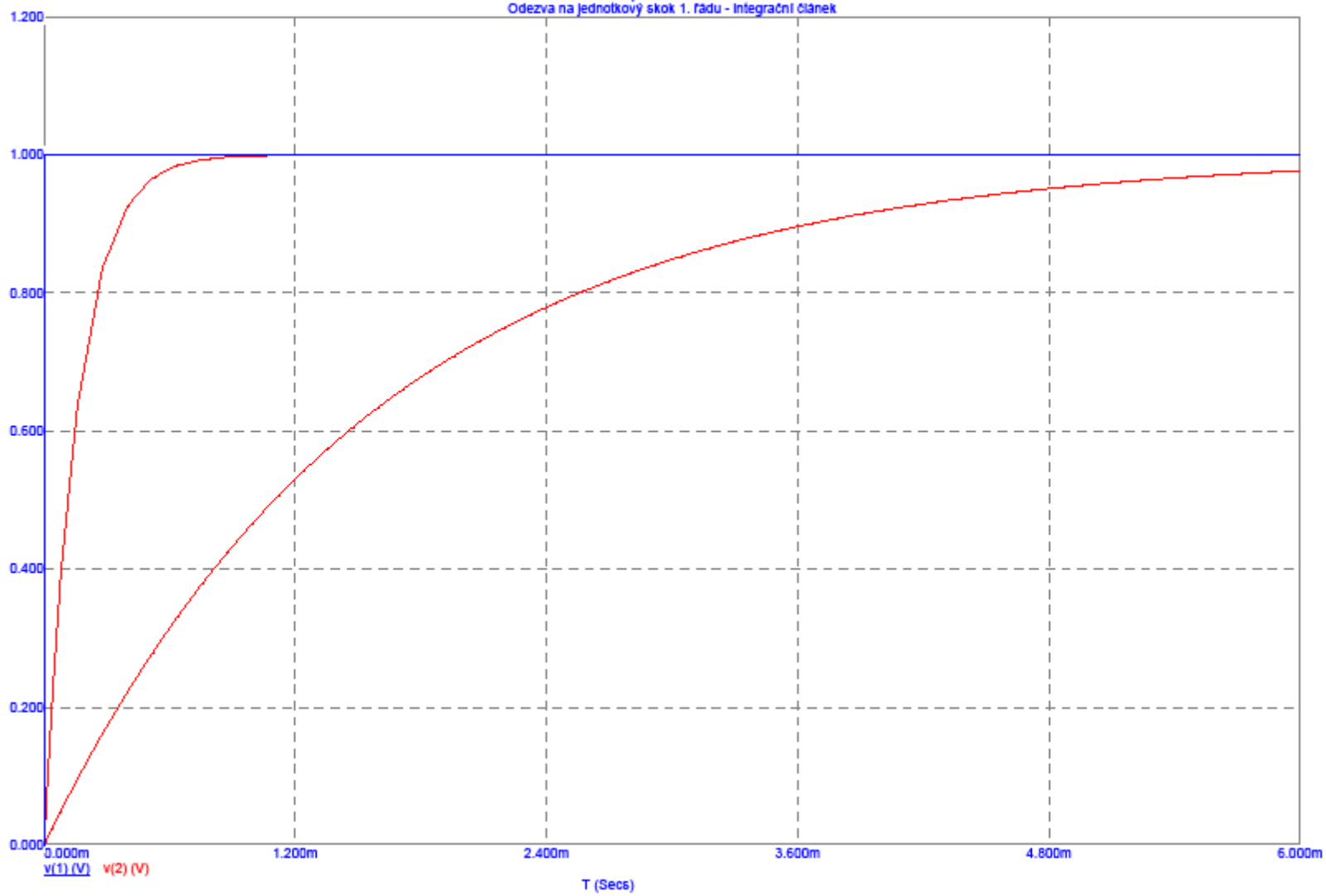
- přenosová funkce prvního řádu

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t)$$

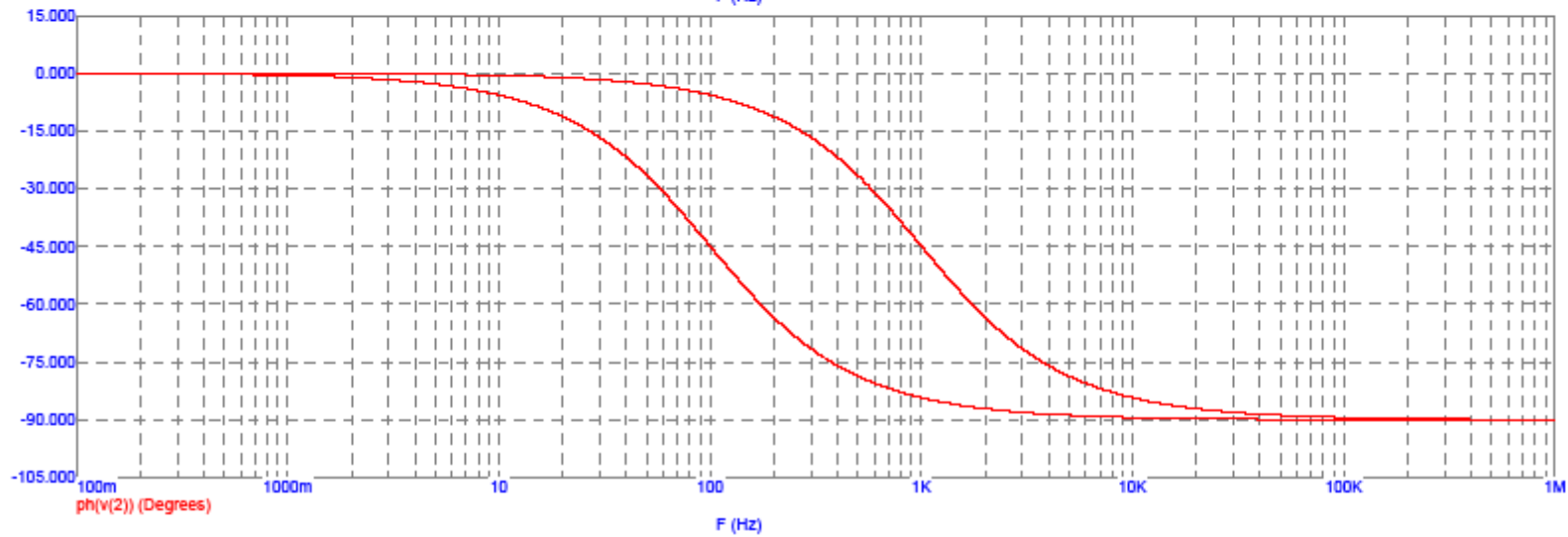
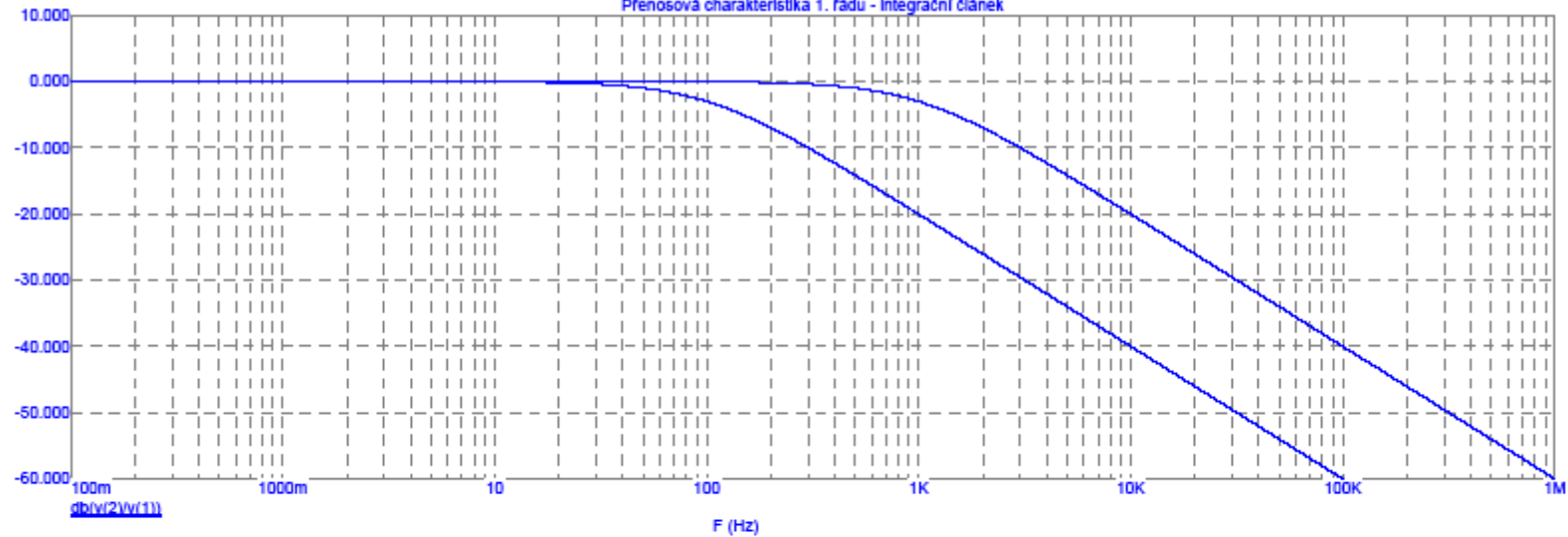
$$P(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{K}{1 + j\omega\tau}$$

- výstup je frekvenčně závislý na vstupu, na asymptotické modulové frekvenční charakteristice je jeden bod zlomu

Micro-Cap 8 Evaluation Version  
Odezva na jednotkový skok 1. řádu - Integrovní členek



Micro-Cap 8 Evaluation Version  
Přenosová charakteristika 1. řádu - Integrovní článek





# Přenosová funkce

---

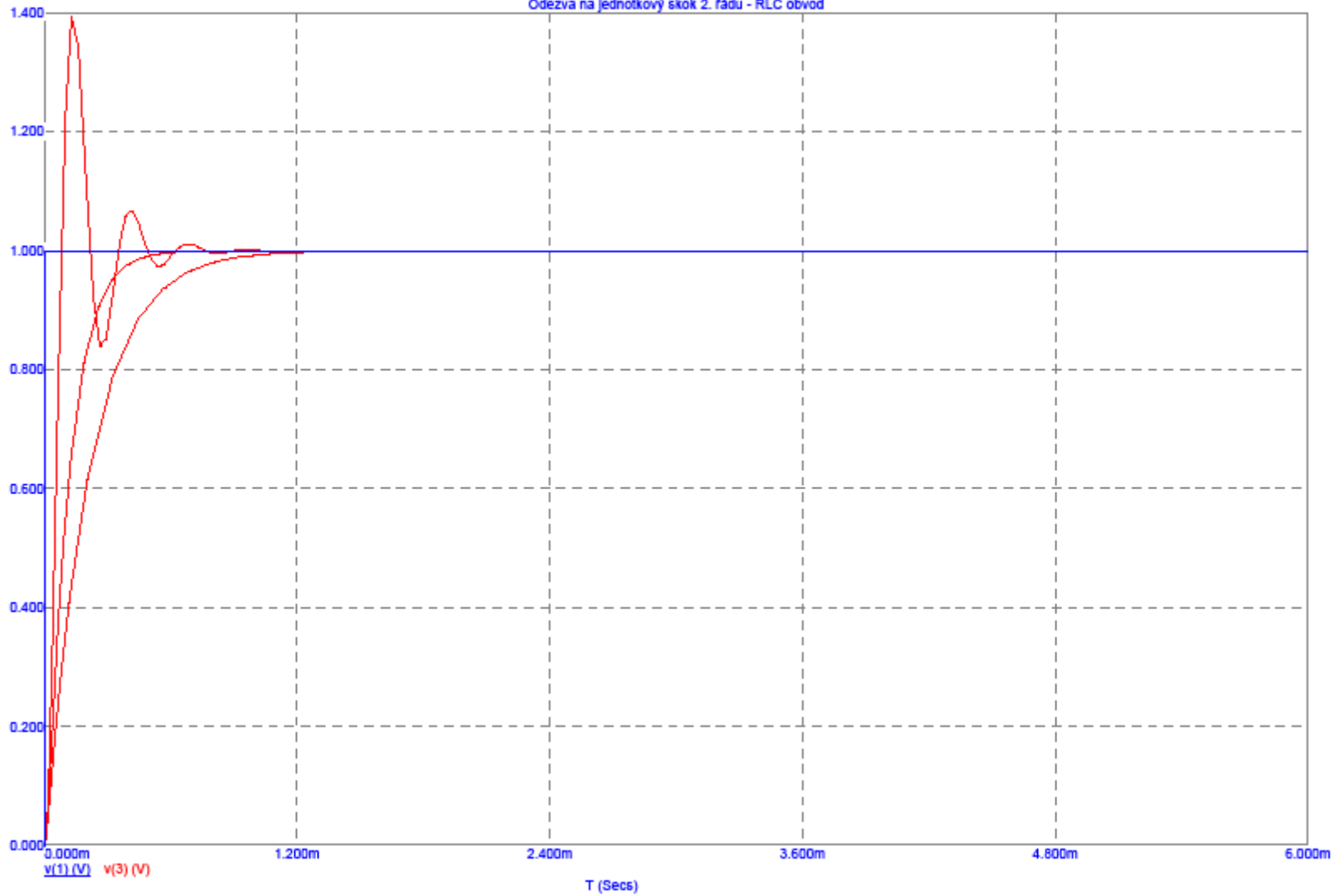
- přenosová funkce druhého řádu

$$a_2 \frac{dy^2(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t)$$

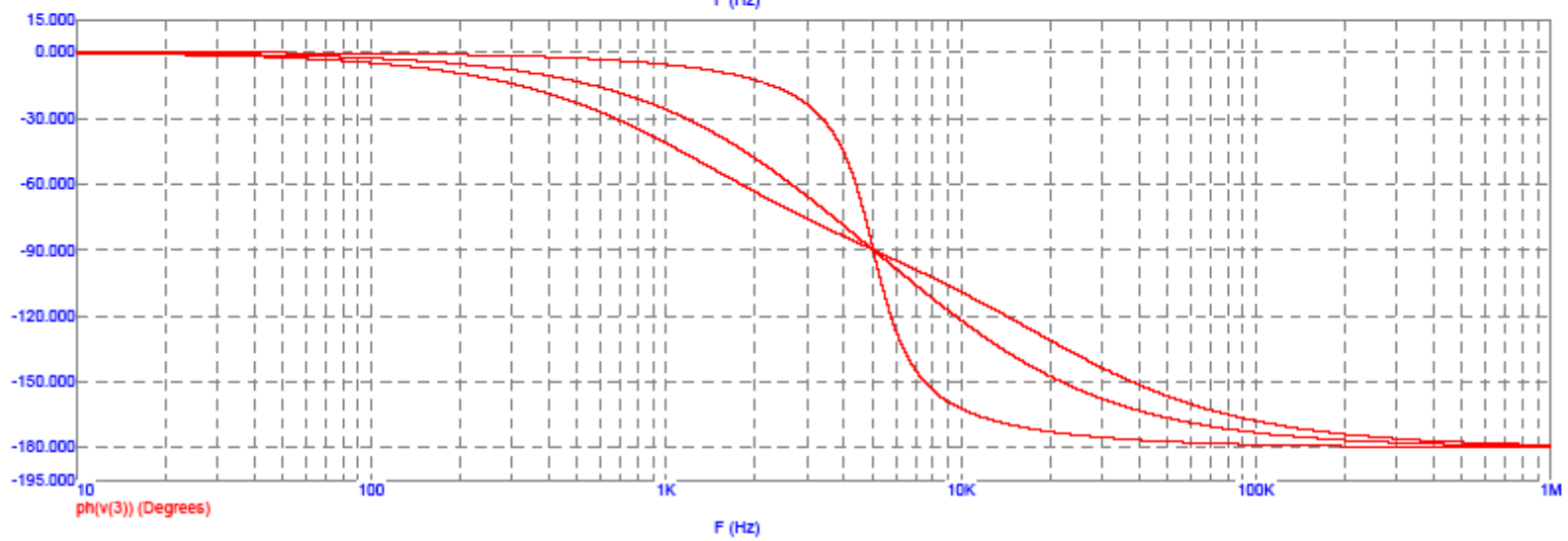
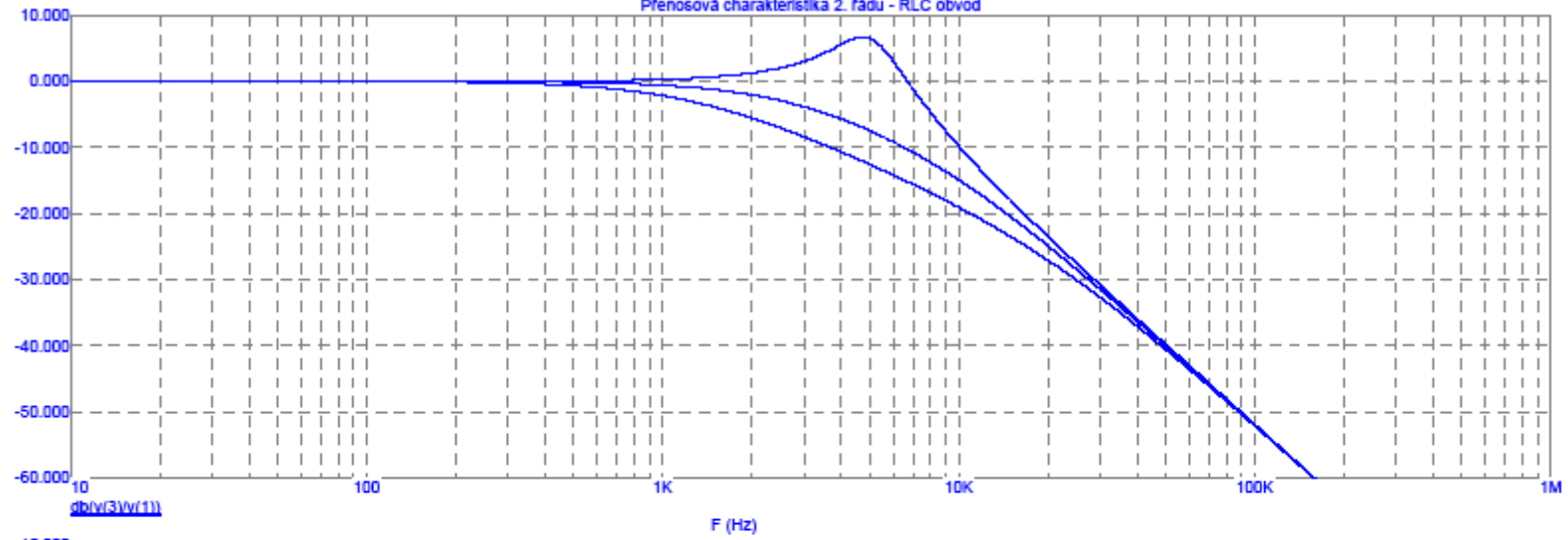
$$P(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{K}{j\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 2aj\frac{\omega}{\omega_0} + 1}$$

- výstup je frekvenčně závislý na vstupu, na asymptotické modulové frekvenční charakteristice jsou dva body zlomu

Micro-Cap 8 Evaluation Version  
Odezva na jednotkový skok 2. řádu - RLC obvod



Micro-Cap 8 Evaluation Version  
Přenosová charakteristika 2. řádu - RLC obvod

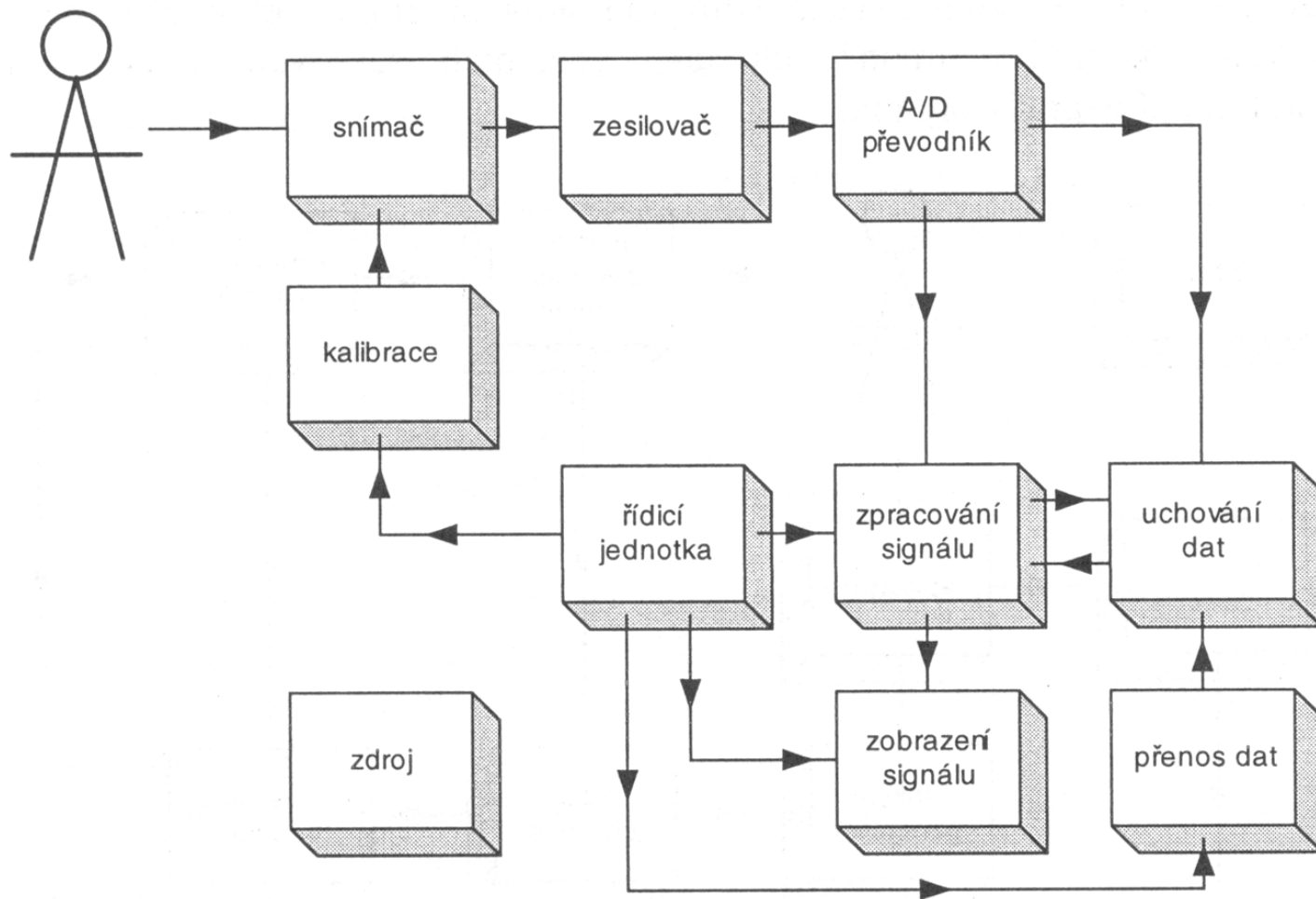


# Obecné schéma lékařského přístroje

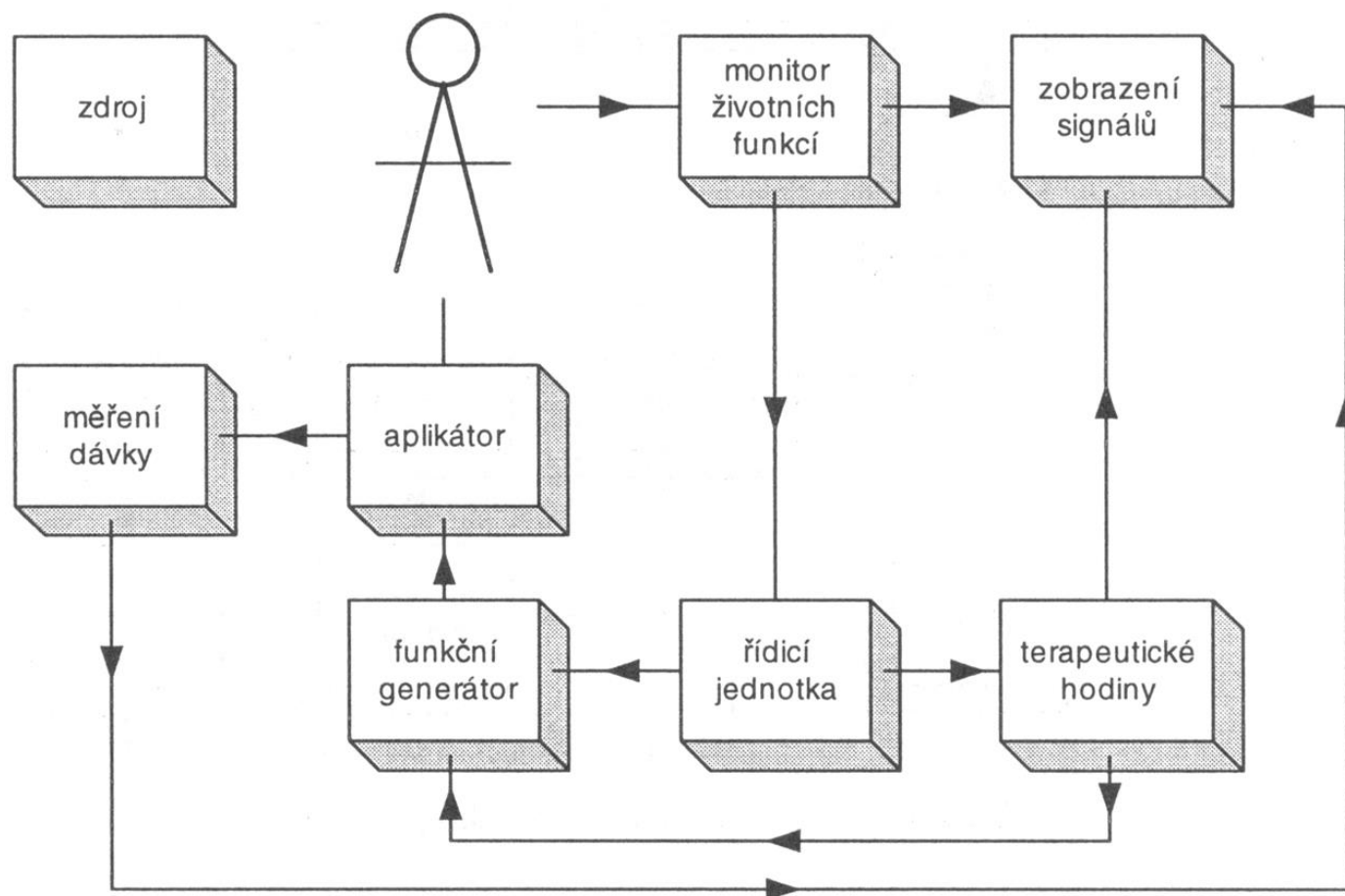
---

- diagnostické přístroje
  - přístroje jsou určeny pro sledování životních funkcí pacienta
  - transport signálu (energie) především ve směru od sledované osoby k přístroji
- terapeutické přístroje
  - přístroje jsou určeny pro ovlivnění stavu pacienta
  - transport signálu (energie) především ve směru od přístroje ke sledované osobě

# Diagnostické přístroje



# Terapeutické přístroje



# Požadavky na přístroje

---

- požadavky na elektrické lékařské přístroje jsou uvedeny v příslušných normách a standardech
  - ČSN EN 60601-1 Zdravotnické elektrické přístroje – Část 1: Všeobecné požadavky na základní bezpečnost a nezbytnou funkčnost (platné pro ČR a EU)
  - dále např. ČSN EN 60601-2-25 Zdravotnické elektrické přístroje – Část 2: Zvláštní požadavky na bezpečnost elektrokardiografů
  - ANSI<sup>1</sup>, AAMI<sup>2</sup> standards (platné USA, celosvětově)

<sup>1</sup> American National Standards Institute

<sup>2</sup> The Association for the Advanced of Medical Instrumentation

# Literatura

---

1. Rozman, J. a kol.: Elektronické přístroje v lékařství. Academia, Praha, 2006.
2. Webster, J. G.: Medical Instrumentation – Application and Design. Wiley, 4th ed., 2007.
3. Carr, J. J., Brown, J. M.: Introduction to Biomedical Equipment Technology. Prentice Hall, 4th ed., 2000.