

ŘEŠENÍ OBVODŮ S TRANSIMPEDANČNÍMI OPERAČNÍMI ZESILOVAČI POMOCÍ GRAFŮ SIGNÁLOVÝCH TOKŮ

Dalibor Biolek, VA Brno

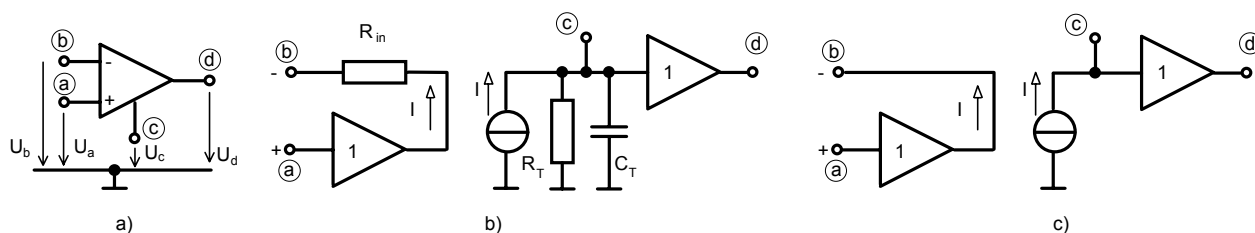
ÚVOD

Transimpedanční operační zesilovače (TOZ) jsou perspektivní integrované obvody, které jsou svými přenosovými vlastnostmi předurčeny k rychlému zpracování signálů v nejrůznějších aplikacích. Zasluhou firmy Analog Devices je dnes tento stavební prvek běžně dostupný ve formě monolitického operačního zesilovače AD 844. Na bázi transimpedančních zesilovačů se vyvíjí progresivní směr v obvodové technice kmitočtových filtrů - tzv. "current-mode & voltage-mode filters" [1].

Operační zesilovač AD 844 s kompenzačním vývodem je daleko univerzálnější stavební prvek aktivních filtrů než klasický operační zesilovač. V současné době jsou navrhována nová zapojení gyrátorů, univerzálních obvodů 2. řádu a bloků s nízkými citlivostmi. Dosud však chybí efektivní nástroj pro usnadnění syntézy a rychlou ověřovací analýzu.

V příspěvku jsou prezentovány nové grafy signálových toků, které popisují transimpedanční zesilovač na různých úrovních složitosti modelu. Na poměrně složitých zapojeních (filtry do 5.řádu) je ukázáno, že uvedená metoda vede na ekonomický popis obvodu grafem s následným nenáročným vyhodnocením. Výsledky analýzy jsou konfrontovány se symbolickými výstupy programu COCO.

NÁHRADNÍ SCHÉMATA TRANSIMPEDANČNÍHO OZ



Obr.1. a) schématická značka TOZ, b) náhradní schéma s uvažováním vlivu vstupního odporu R_{in} a transimpedance, c) idealizovaný TOZ: $R_{in}=0$, $C_T=0$, $R_T \rightarrow \infty$.

Srdcem TOZ je zdroj proudu řízený proudem vytékajícím ze vstupní svorky -. Vstup je nesymetrický, neinvertující vstup je oddělen jednotkovým zesilovačem. Proud I protéká vstupním odporem R_{in} , jehož typická hodnota je u AD 844 50Ω . Řízený proud pak vytváří výstupní napětí průtokem přes tzv. transimpedanci, která je tvořena reálným odporem R_T (asi $3M\Omega$.) a kapacitou C_T (asi $4,5\text{ pF}$). Výstupní napětí je odebráno přes oddělovací jednotkový zesilovač. Mezní kmitočet zesilovače bez zavedené zpětné vazby je roven $1/(2\pi R_T C_T)$ a je tedy podstatně vyšší než u klasických operačních zesilovačů (typicky 12 kHz).

Z katalogu výrobce je možné vyčíst další parametry, jako například vstupní odpor a kapacita neinvertujícího vstupu a výstupní odpor, kterými je možné dále zpřesnit model na obr.1b). Abstrahujeme-li naopak od uvedených parazitních parametrů, dostaneme idealizovaný model TOZ na obr.1c). Tento model je vhodný pro rychlou orientační analýzu za účelem ověření principiální funkčnosti zapojení.

Graf reálného TOZ

Model na obr.1b) lze popsat rovnicemi

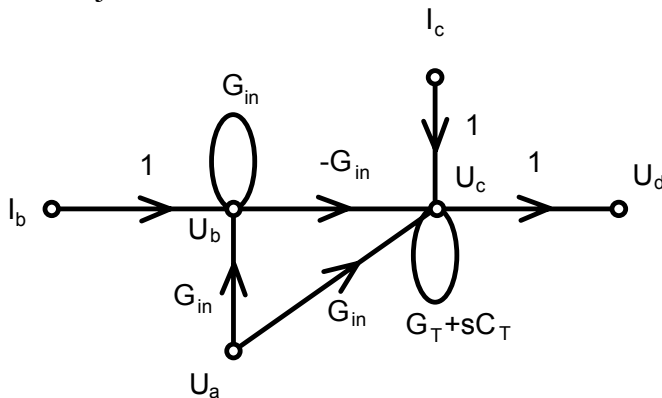
$$I_b = G_{in}(U_b - U_a) = -I$$

$$I_c = (G_T + sC_T)U_c - I = (G_T + sC_T)U_c + G_{in}(U_b - U_a)$$

$$U_d = U_c,$$

kde I_b a I_c jsou proudy tekoucí z vnějších zdrojů do uzlů b a c .

Vyjádření těchto rovnic pomocí grafu je na obr.2. Práci s tímto grafem si ozřejmíme na příkladu invertujícího zesilovače.



Obr.2. Graf TOZ podle modelu na obr.1b).

Příklad 1: Invertující zesilovač

Transimpedanční OZ lze zapojit obdobně jako klasický OZ do známého invertujícího zapojení na obr.3a). Kompenzační vývod 4 zůstává nevyužit. Je třeba postarat se o jeho důkladné galvanické oddělení od ostatních elektrod z důvodu zachování vysokého mezního kmitočtu. Obvodu odpovídá graf na obr.3b), jehož vyhodnocením podle klasických pravidel získáme přenosovou funkci ve tvaru

$$K_{1-3} = \frac{-G_1 G_{in}}{(G_1 + G_{in} + G_2)(G_T + sC_T) + G_{in} G_2}. \text{ Po úpravě}$$

$$K_{1-3} = \frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_0}}, A_0 = \frac{-G_1 G_{in}}{(G_1 + G_2 + G_{in})G_T + G_{in} G_2}, \omega_0 = \frac{(G_1 + G_2 + G_{in})G_T + G_{in} G_2}{(G_1 + G_2 + G_{in})C_T}.$$

Pro $G_{in} \rightarrow \infty$ se vztahy pro stejnosměrné zesílení a mezní kmitočet zjednoduší:

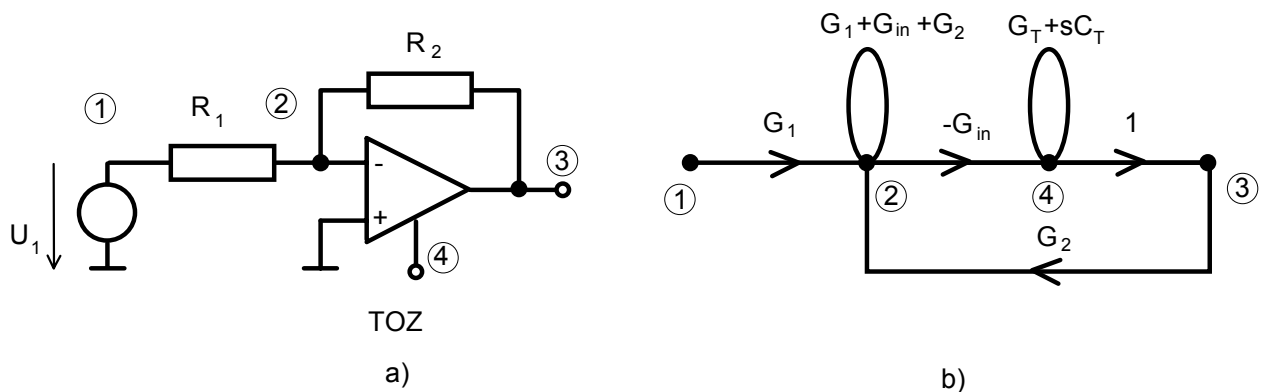
$$A_0 = -\frac{G_1}{G_T + G_2} \approx -\frac{R_2}{R_1} \text{ pro } R_2 \ll R_T,$$

$$\omega_0 = \frac{G_T + G_2}{C_T} \approx \frac{1}{R_2 C_T} \text{ pro } R_2 \ll R_T.$$

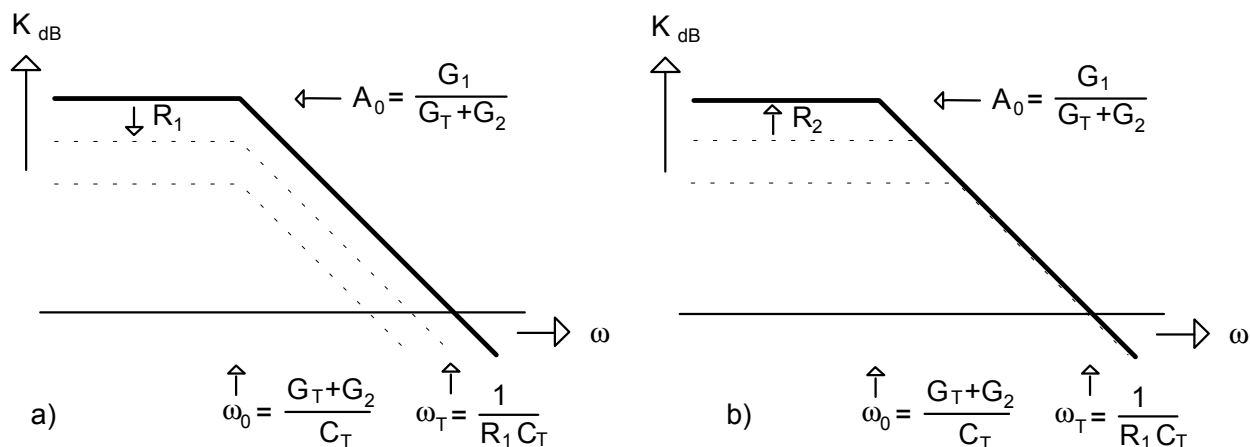
Tranzitní kmitočet bude

$$\omega_T = \frac{1}{R_1 C_T} = \omega_0 A_0.$$

Z vzorců plyne jiný mechanismus závislosti kmitočtových charakteristik na vnějších odporech R_1 a R_2 než u klasického OZ. Měníme-li stejnosměrné zesílení pomocí R_1 , snižuje se s klesajícím zesílením současně i tranzitní kmitočet (obr.4a). Lomový kmitočet zůstává zachován. Řízení zesílení pomocí R_2 má obdobný charakter jako u klasického OZ, jak je naznačeno na obr.4b).

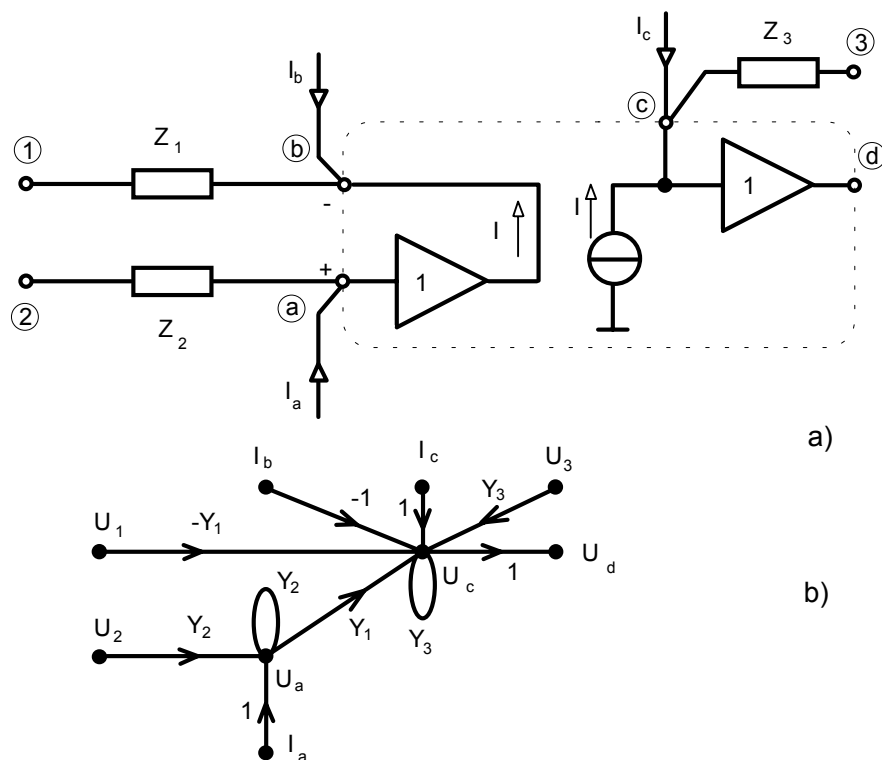


Obr.3. a) Zapojení TOZ jako invertujícího zesilovače, b) odpovídající graf



Obr.4. Změna kmitočtové charakteristiky invertujícího zapojení při řízení zesílení odporem a) R_1 , b) R_2 .

Graf ideálního TOZ



Obr.5. a) příklad obvodu s ideálním TOZ, b) odpovídající graf.

Uvažujme obvod na obr.5 a). Pro tento obvod je možno zapsat následující rovnice:

$$U_a = U_b$$

$$I_a = Y_2(U_a - U_2)$$

$$I_b = Y_1(U_b - U_1) - I$$

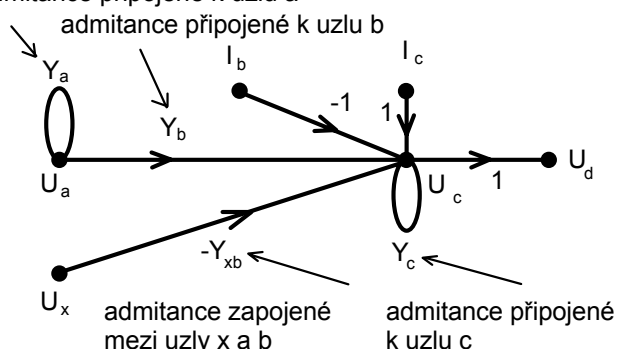
$$I_c = Y_3(U_c - U_3) - I = Y_3(U_c - U_3) + I_b - Y_1(U_a - U_1)$$

$$U_c = U_d.$$

Grafické znázornění uvedených rovnic je na obr.5b). Zobecněním lze dospět k obecnému pravidlu pro sestavování grafu obvodu s ideálním TOZ na obr.6. V grafu se vynechává uzel, odpovídající invertujícímu vstupu TOZ. Admittance, připojené k tomuto uzlu, tvoří přenosy cest do uzlu c (kompenzační uzel) a jsou předznačeny záporně.

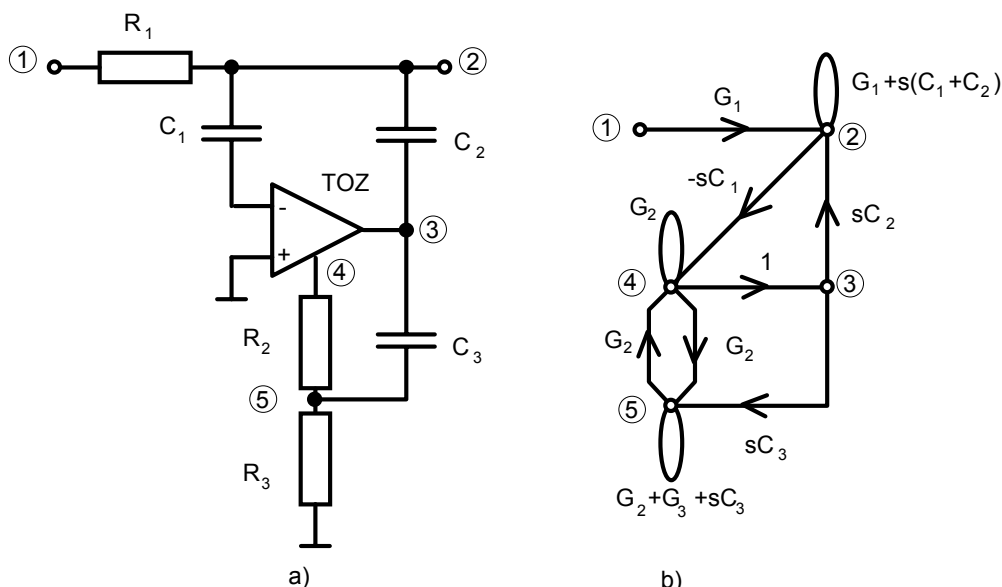
Práci s tímto grafem si blíže objasníme na několika příkladech.

admittance připojené k uzlu a



Obr.6. Princip tvorby grafu obvodu s ideálním TOZ.

Příklad 2: Dolní propust 3. řádu.



Obr.7. a) Filtr 3.řádu typu dolní propust, b) jeho graf.

Na obr.7a) je zapojení filtru, který využívá kompenzačního vývodu k vhodnému tvarování kmitočtové charakteristiky [1]. Na obr.7b) je odpovídající graf, který je sestaven podle algoritmu

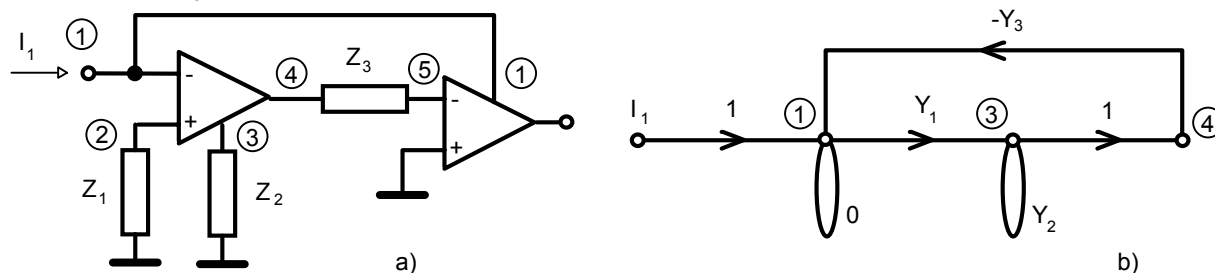
uvedeného výše. Graf se vyhodnotí klasickým způsobem. Po jednoduché úpravě vyjde přenosová funkce 3. řádu:

$$K_{1-2} = \frac{1}{s^3 R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 C_3 + s^2 C_1 C_2 R_1 (R_2 + R_3) + s R_1 (C_1 + C_2) + 1}.$$

Příklad 3: Gyrátor s TOZ.

V [2] bylo publikováno zapojení gyrátoru s dvěma TOZ. Schéma je spolu s grafem na obr.8. Vyhodnocením grafu získáme snadno vztah pro vstupní impedanci

$$Z_{in} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{Y_2}{Y_1 Y_3} = \frac{Z_1 Z_3}{Z_2}.$$



Obr.8. a) Gyrátor s dvěma TOZ, b) graf pro výpočet vstupní impedance.

Příklad 4: Filtř 5.řádu s nízkou citlivostí.

Zapojení filtru 5.řádu, u něhož je zařazenými oddělovacími zesilovači snížena jeho citlivost na tolerance parametrů součástek, bylo uvedeno v [5]. Z obrázku 9 je zřejmé, že obvod je popsán poměrně jednoduchým grafem. Jeho vyhodnocení vede na přenosovou funkci

$$K_{1-2} = \frac{1}{a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1},$$

$$a_5 = R_1 R_2 R_3 R_4 R_5 C_1 C_2 C_3 C_4 C_5, a_4 = R_1 R_2 C_1 C_2 (R_3 R_4 C_3 C_4 + R_4 R_5 C_4 C_5 + R_3 R_5 C_3 C_5),$$

$$a_3 = C_1 C_2 R_1 R_2 (R_3 C_3 + R_4 C_4 + R_5 C_5), a_2 = R_1 R_2 C_1 C_2, a_1 = R_1 (C_1 + C_2).$$

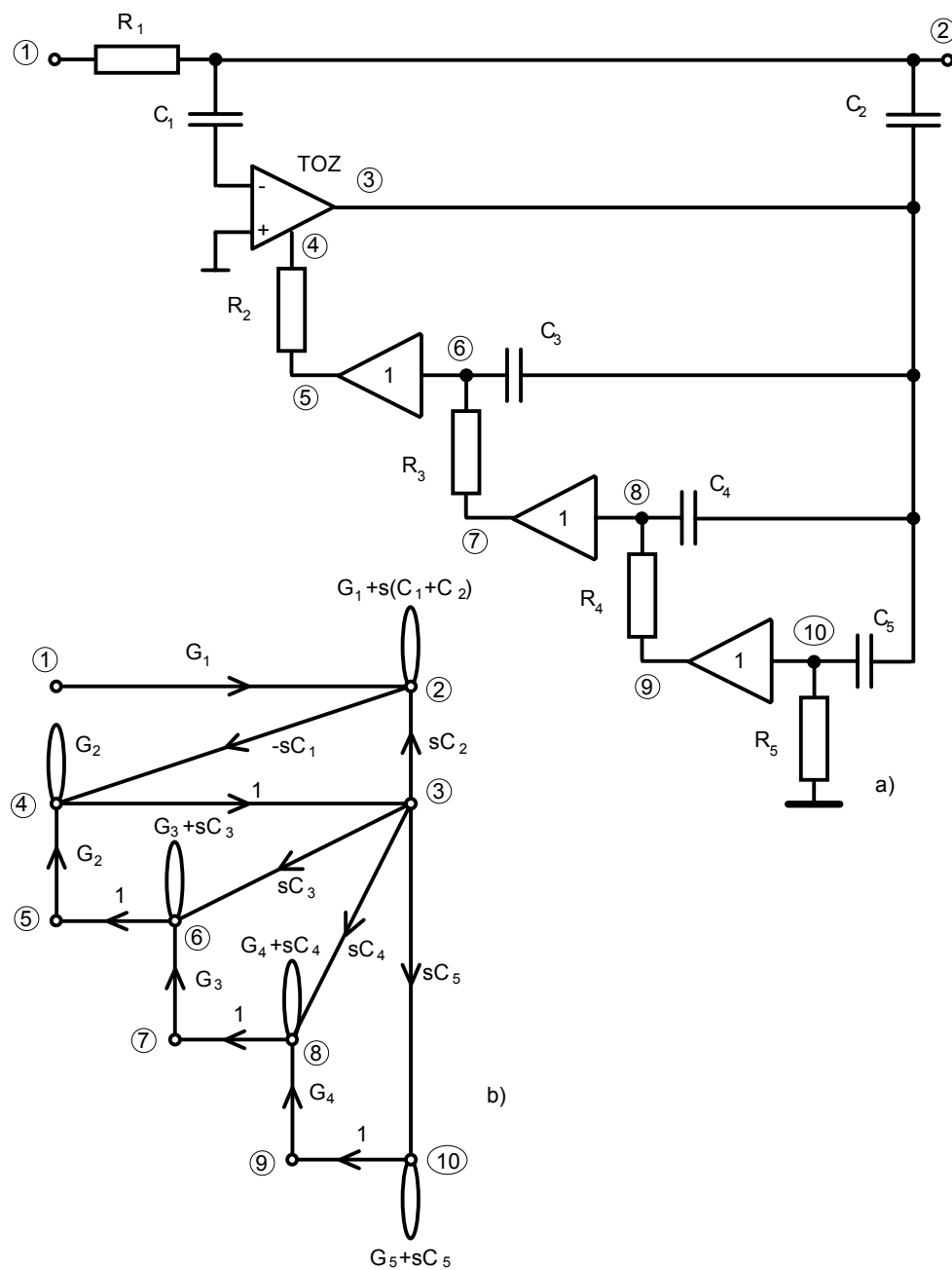
ZÁVĚR

V příspěvku je na příkladech objasněn princip rychlé analýzy obvodů s transimpedančními operačními zesilovači pomocí nových grafů signálových toků. Výsledky analýzy konkrétních obvodů byly konfrontovány s výstupy programu COCO pro symbolickou analýzu obvodů [3].

LITERATURA

- [1] FABRE,A.: Insensitive voltage-mode and current-mode filters from commercially available transimpedance opamps. IEE Proceedings-G, Vol.140, No.5, 1993, pp.319-321.
- [2] FABRE,A.: Gyrator implementation from commercially available transimpedance operational amplifiers. Electronics Letters, Vol.28, No.3, 1992, pp.263-264.
- [3] ČAJKA,J.-VRBA,K.-BIOLEK,D.: Improved program for symbolic analysis and synthesis of electrical networks. International AMSE Conference SYS'94, Lyon, France. To be printed.
- [4] VRBA,K.-VRBA,R.: Synthetic circuit elements of higher order in a low-noise highpass filter design. International AMSE Conference SYS'94, Lyon, France. To be printed.

[5] VRBA,K.-VRBA,R.: Antialiasing lowpass filter with a transimpedance OpAmp for ECG signal processing. 12-th international conference BIOSIGNAL'94, Brno, Czech Republic. To be printed.



Obr.9. a) Filtr 5.řádu, b) jeho graf.