

ÚVOD

V roce 1972 byl B. Gilbertem poprvé publikován tzv. translineární princip [15], který se stal jednou z výchozích myšlenek tzv. „current-mode processing“, tj. zpracování signálu analogovými obvody v proudovém módu. Čtyři roky předtím, v roce 1968, publikovali K.C.Smith a A.S.Sedra princip nového obvodového prvku - proudového konveju CCII [13] a v roce 1970 princip dnes používaného proudového konveju druhé generace CCII [14]. V době svého vzniku však nebyl proudový konveju příliš aplikačně využíván, neboť nebyly zcela doceněny jeho výhody oproti klasickému operačnímu zesilovači. Dnes je proudový konveju považován za univerzální analogový stavební blok a jako takový je využíván ke konstrukci obvodů pracujících v napěťovém, proudovém i smíšeném módu. Jeho přednosti se však nejvíce uplatní v módu proudovém.

K dalším používaným stavebním blokům určeným ke konstrukci obvodů v proudovém módu patří transimpedanční operační zesilovač (TOZ) [10], který v prvním přiblížení představuje proudový konveju s oddělovacím napěťovým zesilovačem, a transkonduktor [15], což je v podstatě zdroj proudu řízený napětím.

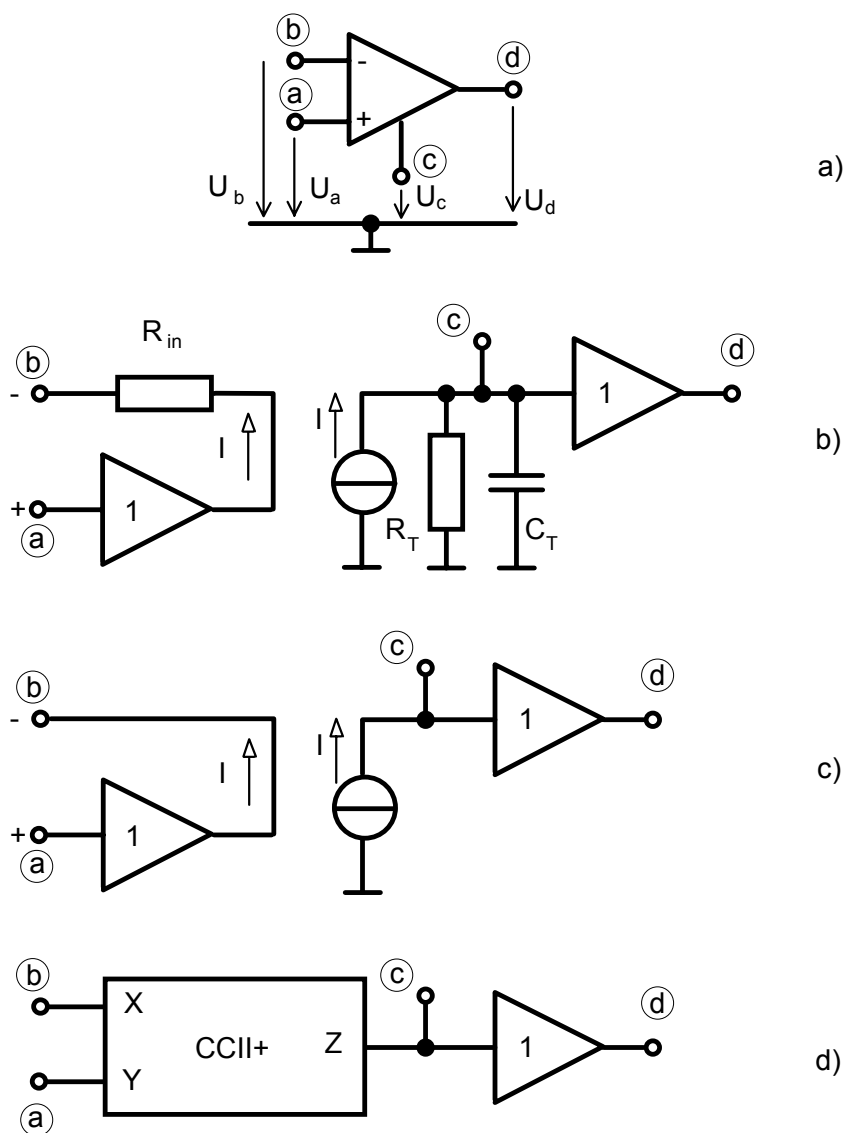
Předložená zpráva řeší problém efektivního popisu analogových a spínaných obvodů s proudovými konvejory. Úvodní kapitola je věnována základním informacím o makromodelech proudového konveju a TOZ. Pak je objasněn princip nových grafů signálových toků, který umožňuje rychlou orientační analýzu obvodů s idealizovanými prvky [3],[4]. Metoda je vhodná pro ověřování principiální správnosti funkce nově syntetizovaných filtrů s proudovými konvejory a transimpedančními operačními zesilovači. V další části jsou popsány možnosti algoritmizace analýzy analogových a spínaných obvodů s CCII a TOZ na bázi modifikované metody uzlových napětí [5], [6].

Uvedené algoritmy jsme včlenili do vyvíjeného programového produktu pro návrh a optimalizaci kmitočtových filtrů [12]. Nakonec je popsán způsob algoritmického popisu spínaných obvodů, který se osvědčil v programu SPIN [2],[5].

1. MAKROMODELY TOZ A CCII

Transimpedanční operační zesilovače (TOZ) jsou perspektivní integrované obvody, které jsou svými přenosovými vlastnostmi předurčeny k rychlému zpracování signálů v nejrůznějších aplikacích. Záslouhou 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" [15].

Operační zesilovač AD 844 s kompenzačním vývodem je daleko univerzálnější stavební prvek aktivních filtrů než klasický operační zesilovač [10]. V současné době jsou navrhována nová zapojení gyrátorů, univerzálních obvodů 2. řádu a bloků s nízkými citlivostmi [11],[15],[17],[18],[19].



Obr.1. Transimpedanční operační zesilovač: a) schématická značka, b) model s uvažováním vstupního odporu a transimpedance, c) idealizovaný model sestavený z řízených zdrojů, d) modelování idealizovaného TOZ pomocí pozitivního proudového konveju.

Makromodely TOZ na různých úrovních idealizace jsou na obr.1. 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 odebíráno 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. Z obrázku je zřejmé, že TOZ lze modelovat kaskádou pozitivního proudového konveju CCII a oddělovacího jednotkového zesilovače. Proto zaměříme pozornost především na problém analýzy proudového konveju.

Díky firmě *LTP Electronics* je pozitivní proudový konveju k dispozici jako monolitický integrovaný obvod *CCII01* [19]. Dosud nám není nic známo o výrobě integrovaného negativního proudového konveju.

2. ANALÝZA OBVODŮ S TOZ A CCII POMOCÍ GRAFŮ SIGNÁLOVÝCH TOKŮ

Grafy signálových toků (GST) mohou zastávat úlohu účinného nástroje pro rychlou kontrolní analýzu obvodů s TOZ a CCII. Mohou být využity i k urychlení počítačové analýzy. V neposlední řadě podporují i proces syntézy. Grafy se budou lišit pro různé úrovně modelů CCII, resp. TOZ z obr.1.

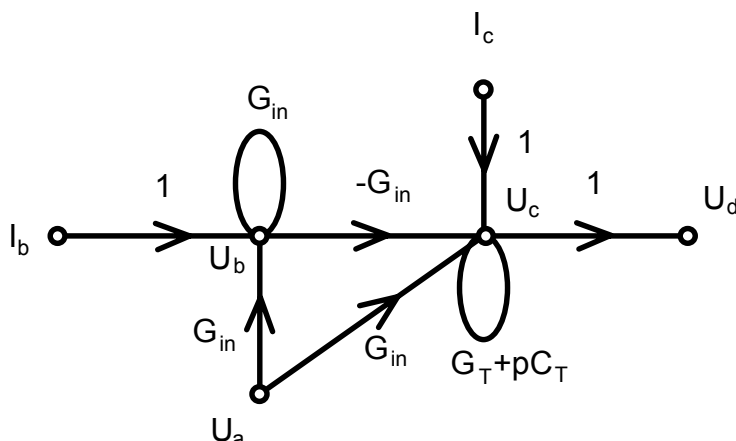
2.1. GRAFY CCII A TOZ S UVAŽOVÁNÍM VSTUPNÍHO ODPORU A TRANSIMPEDANCE

Model na obr.1b) lze popsat následující soustavou rovnic:

$$\begin{aligned} I_b &= G_{in}(U_b - U_a) = -I \\ I_c &= (G_T + pC_T)U_c - I = (G_T + pC_T)U_c + G_{in}(U_b - U_a) \\ U_d &= U_c, \end{aligned} \quad (1)$$

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

Grafově vyjádření těchto rovnic je na obr.2. Způsob práce s grafem je objasněn na následujícím příkladu.



Obr.2. Graf signálových toků modelu TOZ z obr.1b).

Příklad č.1: Invertující zesilovač.

Jak známo, TOZ můžeme zapojit obdobně jako klasický OZ do obvodu invertujícího zesilovače na obr.3a) [10]. Kompenzační vývod č.4 zůstane nevyužit. Je potřebné zajistit jeho důsledné galvanické oddělení k zajištění velké parazitní transimpedance a s tím související dosažitelné šířky pásma. Odpovídající graf je na obr.3b). Po jeho vyhodnocení získáme přenosovou funkci ve tvaru

$$\begin{aligned} K_{1-3} &= \frac{-G_1 G_{in}}{(G_1 + G_{in} + G_2)(G_T + pC_T) + G_{in} G_2}. \text{ Po úpravě} \\ K_{1-3} &= \frac{A_0}{1 + \frac{p}{\omega_0}}, A_0 = \frac{-G_1 G_{in}}{(G_1 + G_2 + G_{in})G_T + G_{in} G_2}, \omega_0 = \frac{(G_1 + G_2 + G_{in})G_T + G_{in} G_2}{(G_1 + G_2 + G_{in})C_T}. \end{aligned} \quad (2)$$

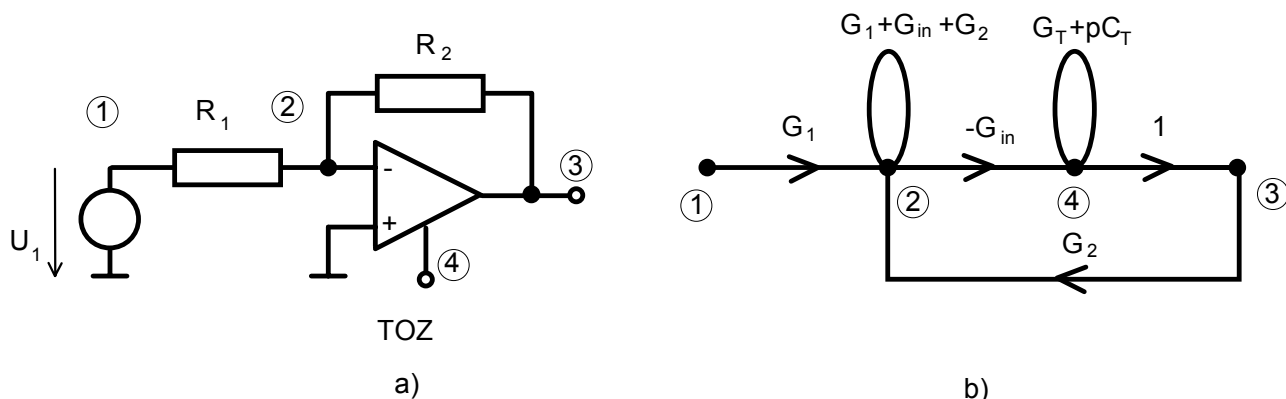
Pro $G_{in} \rightarrow \infty$ mohou být vzorce pro stejnosměrné zesílení a mezní frekvenci zjednodušeny:

$$A_0 = -\frac{G_1}{G_T + G_2} \approx -\frac{R_2}{R_1} \text{ pro } R_2 \ll R_T, \quad (3)$$

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

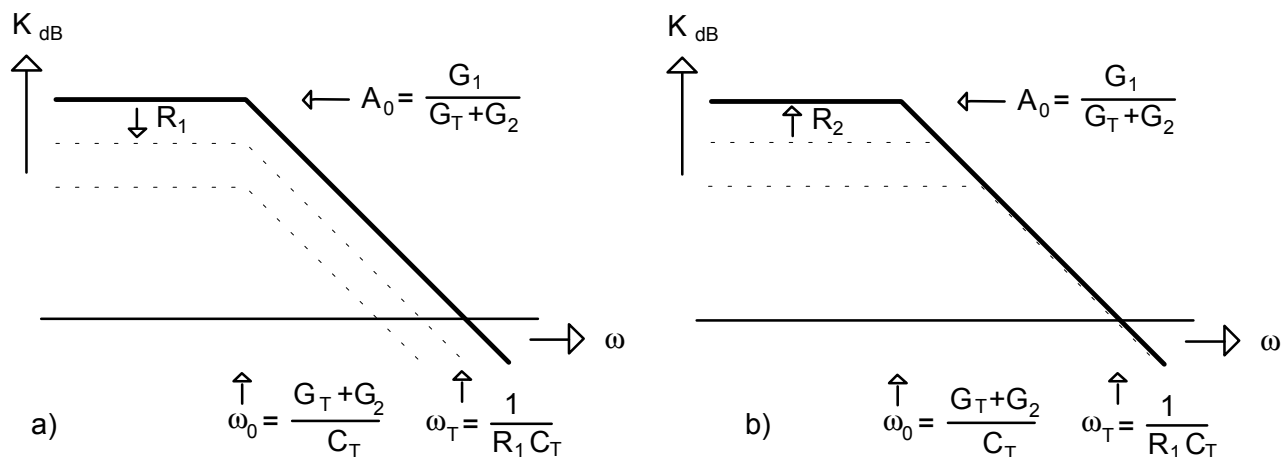
Tranzitní kmitočty pak je

$$\omega_T = \frac{1}{R_1 C_T} = \omega_0 A_0. \quad (4)$$



Obr.3. a) TOZ jako invertující zesilovač, b) příslušný graf.

Je zřejmé že závislost kmitočtové charakteristiky na rezistorech R_1 a R_2 je jiného charakteru než v případě zapojení s klasickým OZ. Při nastavování stejnosměrného zesílení pomocí R_1 se mění rovněž tranzitní kmitočty (viz obr.4a). Lomový kmitočty přitom zůstává konstantní. Řízení zisku pomocí R_2 má obdobný charakter jako v případě klasického OZ (viz obr.4b).



Obr.4. Kmitočtová charakteristika invertujícího zesilovače. Zisk je řízen pomocí a) R_1 , b) R_2 .

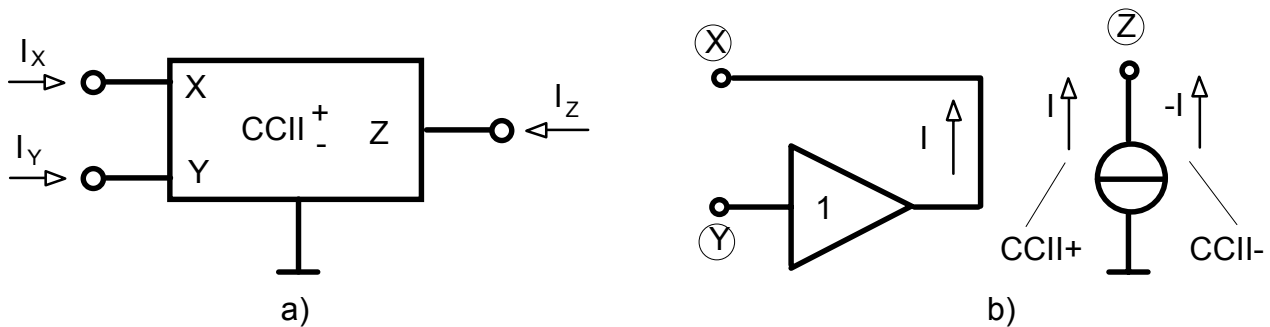
2.2. GRAFY IDEÁLNÍCH CCII A TOZ

V mnohých případech, zejména při ověřování správnosti principu daného zapojení, je žádoucí analyzovat obvody s CCII bez uvažování jejich parazitních vlastností. Pak použijeme k analýze modelu na obr.1c), resp. 1d). Ukážeme, že tento přístup pak vede na grafy signálových toků,

vyznačující se ekonomickou strukturou a snadným vyhodnocením [3],[4].

Uvažujme model ideálního proudového konvejuoru na obr.5b). Klasické rovnice proudového konvejuoru mají tvar [15]

$$\begin{bmatrix} I_Y \\ U_X \\ I_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & \\ 1 & & \\ & \pm 1 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_Y \\ I_X \\ U_Z \end{bmatrix}.$$



Obr.5. a) Vstupně-výstupní reprezentace proudového konvejuoru, b) jeho model sestavený z řízených zdrojů.

Znaménko +/- přísluší pozitivnímu/negativnímu proudovému konvejuoru.

Tyto rovnice však nejsou přímo vhodné ke generování grafu signálových toků. Výhodnější je vycházet z rovnic modifikované metody uzlových napětí (MMUN).

Uvažujme obvod na obr.6a). Pro daný obvod lze sestavit soustavu rovnic

$$\begin{aligned} U_X &= U_Y \\ I_1 &= Y_1(U_1 - U_X) \\ I_2 &= Y_2(U_2 - U_Y) \\ I_Y &= Y_2(U_Y - U_2) \\ I_X &= Y_1(U_X - U_1) - I \\ I_Z &= Y_3(U_Z - U_3) \mp I = \\ &= Y_3(U_Z - U_3) \pm I_X \mp Y_1(U_Y - U_1). \end{aligned} \quad (5)$$

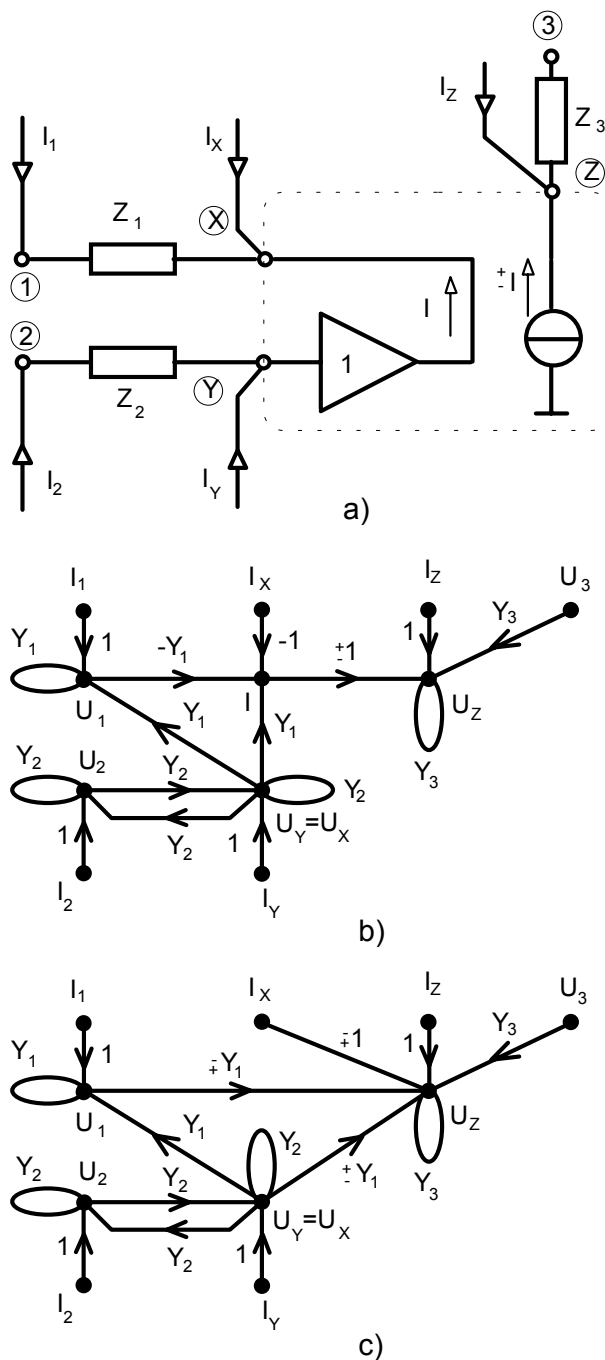
Na obr. 6b) a 6c) jsou znázorněny grafové reprezentace uvedených rovnic. První graf je výhodný v případě, hodláme-li počítat proud I . Druhý graf je redukovaný, kdy proměnná I je eliminována ze soustavy obvodových rovnic.

Zobecníme-li závěry získané analýzou zapojení na obr.6a), můžeme formulovat obecná pravidla pro tvorbu grafu obvodu s CCII. Tato pravidla zachycuje obr.7.

Prohlédneme-li si graf na obr.7a), zjistíme rozdíly oproti všeobecně známému MC grafu:

- V grafu chybí proměnná U_X , která je ztotožněna s proměnnou U_Y . Namísto ní se objevuje proměnná I . U této proměnné není vlastní smyčka.
- Přenosy směřující do proměnné I jsou až na znaménko totožné s přenosy, které by vznikly do proměnné U_X v případě klasického MC grafu.
- Přenosy vstupující do společné proměnné $U_Y=U_X$ jsou uvažovány jen pro proměnnou U_Y . Z toho plyne, že i vlastní smyčka společné proměnné $U_Y=U_X$ je uvažována jen pro proměnnou U_Y .

Přenosy vystupující ze společné proměnné $U_Y=U_X$ jsou uvažovány pro obě proměnné.



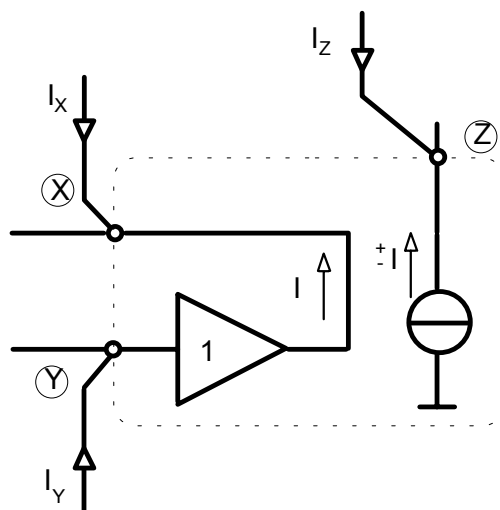
Obr.6. a) Příklad obvodu s proudovým konvejorem CCII, b) odpovídající graf, c) redukovaný graf.

- Přenos z proměnné I do proměnné U_Z je $+1$ nebo -1 podle toho, zda se jedná o pozitivní nebo negativní proudový konvektor.

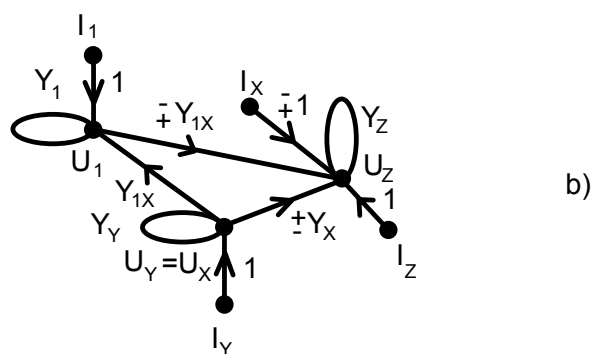
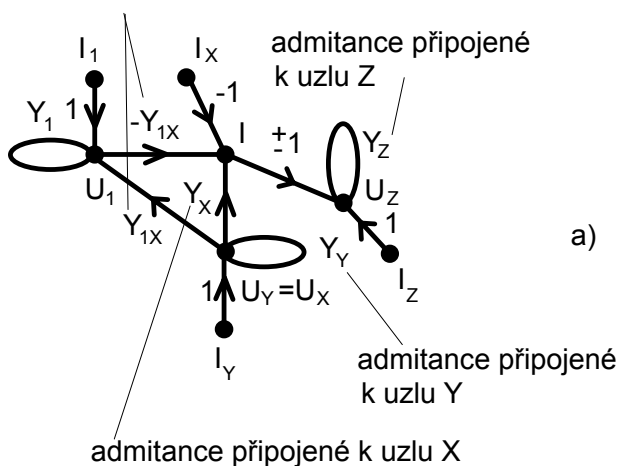
V případě redukovaného grafu (obr.7c) je proměnná I vynechána. Pak dojde k modifikaci přenosů do proměnné U_Z .

Protože transimpedanční OZ lze modelovat pomocí CCII+, získáme graf TOZ z výše zavedených grafů jejich doplněním o subgraf jednotkového zesilovače.

Způsob práce s grafy demonstrujeme na příkladech.



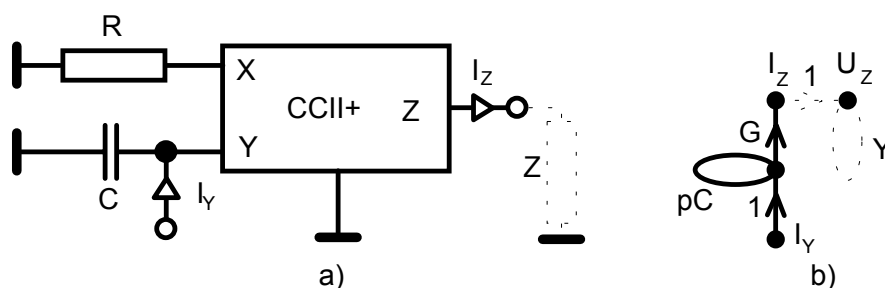
admitance zapojené
mezi uzly 1 a X



Obr.7. Princip tvorby grafu obvodů s CCII : a) normální, b) redukovaný graf.

Příklad č.2: Integrátor v proudovém módu [15].

Obvod na obrázku pracuje tak, že proud I_z je integrálem vstupního proudu I_y . V tomto případě je výhodné použít graf obsahující proud konvektor. Graf na obr. 8b) byl sestaven pomocí výše uvedených pravidel. V principu tento integrátor pracuje nezávisle na typu zátěže. Navíc nás zajímá proud I_z , nikoliv napětí U_z . Toto jsou důvody, proč čárkovaně nakreslená část grafu na obr.8b) je redundandní.



Obr.8. a) Integrátor v proudovém módu, b) odpovídající graf

Výsledný graf je velmi jednoduchý. Jeho vyhodnocení vede na výsledek

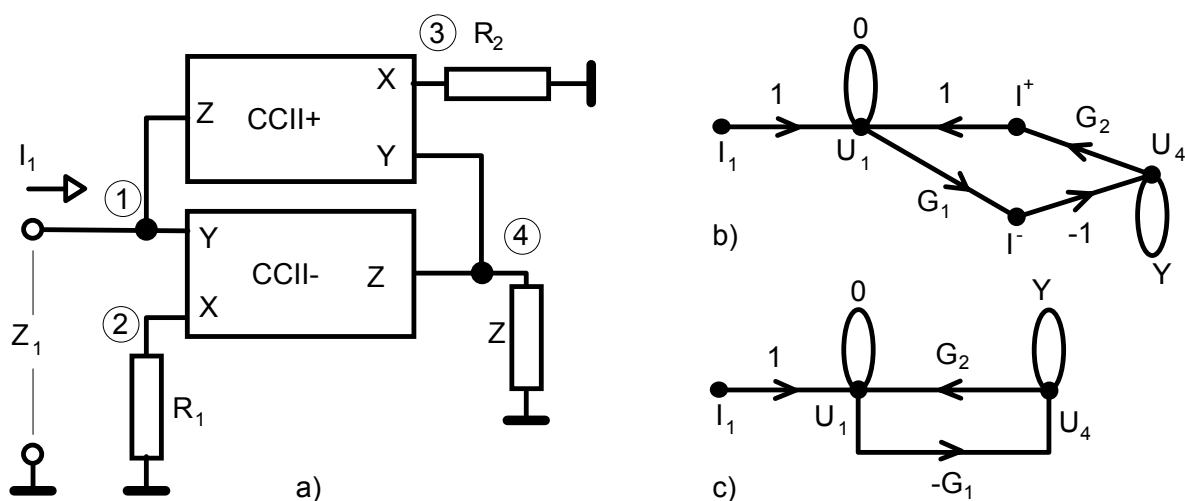
$$\frac{I_Z}{I_Y} = \frac{1}{pRC}. \quad (6)$$

Příklad č.3: Gyrátor [15].

Schéma gyrátoru s dvěma proudovými konvejory je na obr. 9a) a příslušné grafy na obr. b) a c). Proměnné U_1 přísluší vlastní smyčka s přenosem 0, protože k uzlu 1 není připojena žádná admitance.

Po vyhodnocení grafu získáme vztah pro vstupní impedanci:

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = \frac{Y}{0 - (-G_1 G_2)} = \frac{R_1 R_2}{Z}. \quad (7)$$

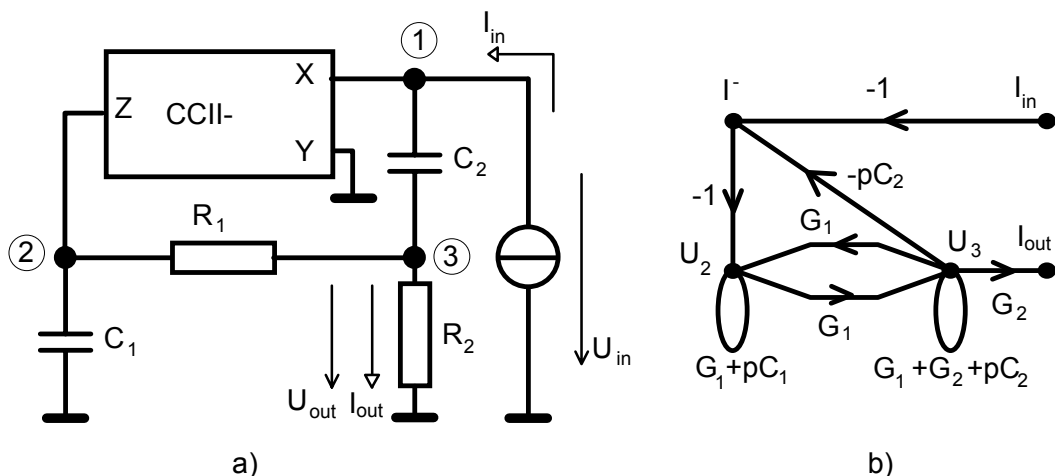


Obr.9. a) gyrátor s dvěma proudovými konvejory, b) graf, c) redukovaný graf.

Příklad č.4: Filtr v proudovém módu [15].

Graf z obr.10b) vyhodnotíme klasickým způsobem. Po malé úpravě získáme přenosovou funkci 2. řádu:

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{1}{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + p C_1 (R_1 + R_2) + 1}. \quad (8)$$

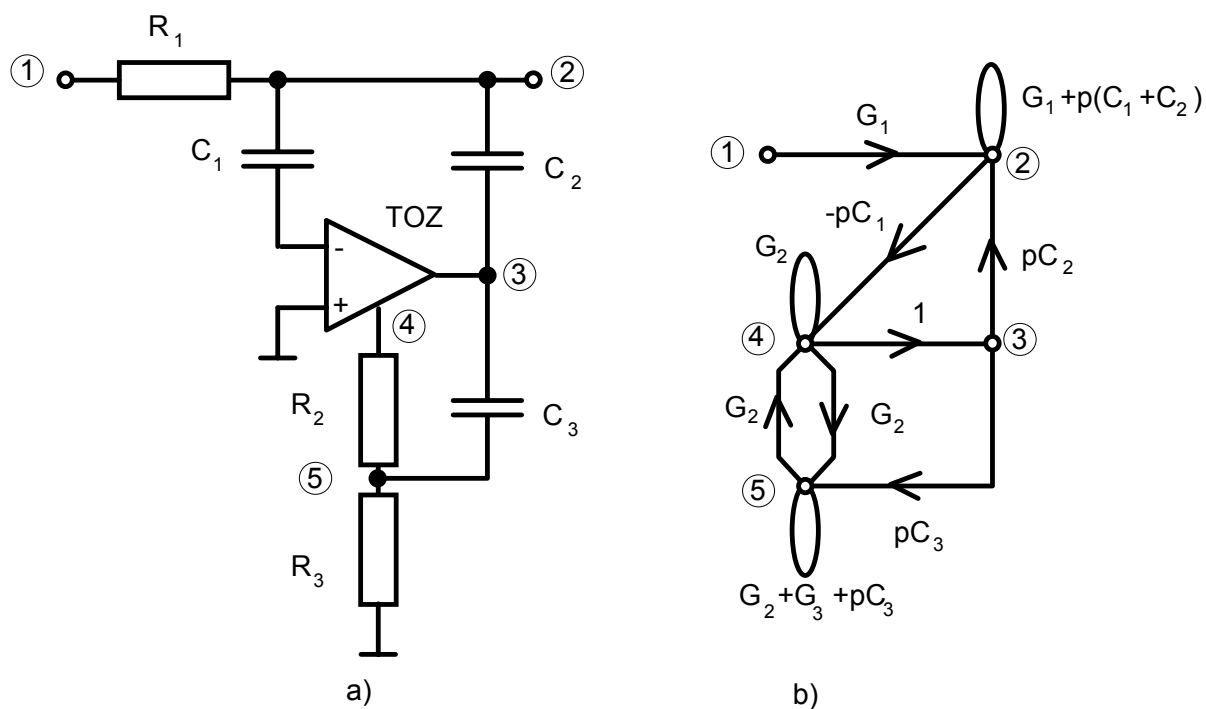


Obr.10. a) filtr 2. řádu v proudovém módu, b) jeho graf.

Příklad č.5: Dolní propust 3. řádu s transimpedančním OZ [18].

Na obr.11a) je zapojení filtru, který využívá kompenzačního vývodu k vhodnému tvarování kmitočtové charakteristiky [18]. Na obr.11b) je odpovídající graf, který je sestaven podle algoritmu uvedeného výše. Přenos z uzlu 4 do uzlu 3 je 1 - je to přenos jednotkového zesilovače umístěného mezi kompenzačním vývodem TOZ a jeho napět'ovým výstupem. Graf se vyhodnotí klasickým způsobem. Po jednoduché úpravě vyjde přenosová funkce 3. řádu:

$$K_{1-2} = \frac{1}{p^3 R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 C_3 + p^2 C_1 C_2 R_1 (R_2 + R_3) + p R_1 (C_1 + C_2) + 1}. \quad (9)$$

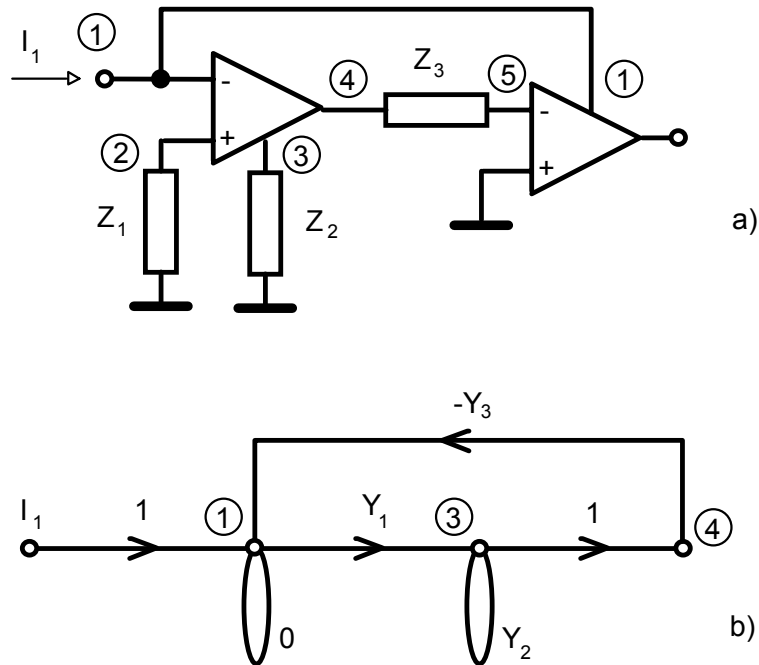


Obr.11. a) Filtr 3.řádu typu dolní propust, b) jeho graf.

Příklad č.6: Gyrátor s TOZ [11].

V [11] bylo publikováno zapojení gyrátoru s dvěma TOZ. Schéma je spolu s grafem na obr.12. Vyhodnocením grafu získáme snadno vztah pro vstupní impedanci

$$Z_{in} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{Y_2}{Y_1 Y_3} = \frac{Z_1 Z_3}{Z_2}. \quad (10)$$



Obr.12. a) Gyrátor s dvěma TOZ, b) graf pro výpočet vstupní impedance.

Příklad č.7: Filtr 5.řádu s nízkou citlivostí [18].

Zapojení filtru 5.řádu, u něhož je zařazenými oddělovacími zesilovači snížena jeho citlivost na tolerance parametrů součástek, jsme uvedli v [18]. Z obrázku 13 je zřejmé, že obvod je popsán poměrně jednoduchým grafem. Jeho vyhodnocení vede na přenosovou funkci

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

$$a_5 = R_1 R_2 R_3 R_4 R_5 C_1 C_2 C_3 C_4 C_5, a_4 = R_1 R_2 C_1 C_2 (R_3 R_4 C_3 C_4 + R_4 R_5 C_4 C_5 + R_3 R_5 C_3 C_5), \quad (11)$$

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

2.3. SHRUTÍ

Uvedené grafy signálových toků se uplatnily při rychlé analýze obvodů s transimpedančními operačními zesilovači a proudovými konvejory. Metoda byla průběžně ověřována srovnáváním s výstupy programu COCO.

