

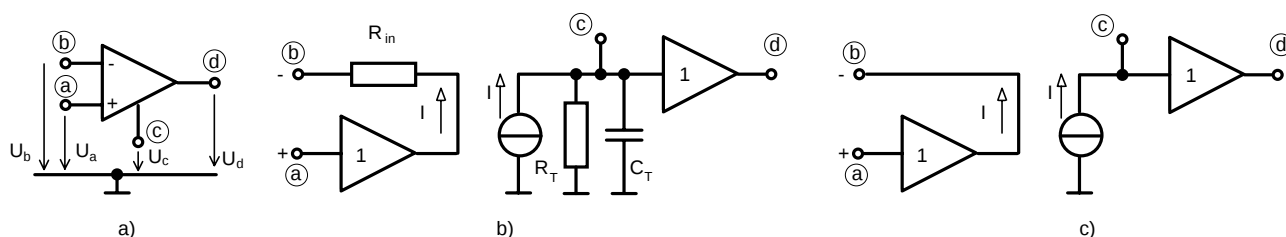
ÚSPORNÝ POPIS OBVODŮ S TRANSIMPEDANČNÍMI OPERAČNÍMI ZESILOVAČI MODIFIKOVANOU METODOU UZLOVÝCH NAPĚTÍ

Dalibor Biolek, VA Brno, katedra elektrotechniky a elektroniky

ÚVOD

Transimpedanční operační zesilovače (TOZ) dnes patří k perspektivním stavebním prvkům pro analogové zpracování signálů. V souvislosti s konstrukcí kmitočtových filtrů jsou zajímavé především TOZ s kompenzačním vývodem, z nichž typickým představitelem je integrovaný obvod AD 844 firmy Analog Devices [1]. V příspěvku jsou vysvětleny různé způsoby popisu těchto obvodů v rámci všeobecně rozšířené modifikované metody uzlových napětí. Pozornost je věnována i popisu ideálního TOZ, který může při vhodné redukci obvodových veličin snížit o dvojku počet obvodových rovnic. To je významné z hlediska rychlosti počítačové analýzy rozsáhlých obvodů a zejména obvodů s vícefázovým spínáním.

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.

Z idealizovaného modelu na obr.1c) vyplývá, že TOZ je klasickým pozitivním proudovým konvejorem CCII+ doplněným oddělovacím zesilovačem. Samotný konvektor dodává na trh firma LTP Electronics pod označením CCII01.

ZÁKLADNÍ MODEL TOZ

Pro náhradní schéma na obr.1b) lze zapsat následující soustavu rovnic:

$$I_a = 0, I_b = -I, I_c = (G_T + sC_T)U_c - I, I = G_{in}(U_a - U_b), U_d = U_c,$$

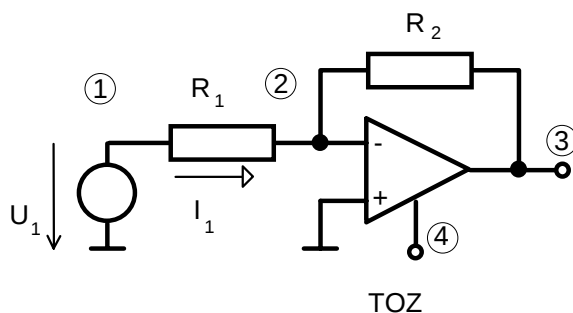
kde I_a, I_b, I_c jsou proudy tekoucí zvenčí do uzlů a, b a c . Rovnice lze přepsat do přehledného maticového tvaru:

$$\begin{array}{c|c|c|c|c} & U_a & U_b & U_c = U_d & I \\ \hline a & & & & \\ b & & & & -1 \\ c & & & G_T + pC_T & -1 \\ I & -G_{in} & G_{in} & & 1 \end{array} \quad \begin{array}{c} U_a \\ U_b \\ U_c = U_d \\ I \end{array} = \begin{array}{c} I_a \\ I_b \\ I_c \\ 0 \end{array} \quad (1)$$

Čtvercová matice na levé straně je modifikovaná admitanční matice TOZ. Při použití této matice lze ze soustavy rovnic určit kromě uzlových napětí i proud I řízeného zdroje.

Řádek s označením " I " je tzv. *zakázaný řádek* [2]. Znamená to, že při začleňování matice do celkové matice obvodu již není možné do tohoto řádku dopisovat další symboly. V opačném případě by totiž došlo k narušení rovnice $I = G_{in}(U_a - U_b)$. Dále je třeba dát pozor na to, že tato rovnice zde nahrazuje rovnici 1. Kirchhoffova zákona pro uzel d .

Uvažované náhradní schéma TOZ obsahuje celkem 5 uzlů. Díky redukci uzlového napětí U_d má matice rozměr 4x4. Způsob práce s danou maticí ukážeme na příkladu invertujícího zesilovače na obr.2. Tvar soustavy rovnic závisí na tom, známe-li budicí proud I_1 nebo napětí U_1 :



Obr.2. Zapojení TOZ jako invertujícího zesilovače.

$$\begin{array}{c|c|c|c|c} & U_1 & U_2 & U_3 = U_4 & I \\ \hline 1 & G_1 & -G_1 & & \\ 2 & -G_1 & G_1 + G_2 & -G_2 & -1 \\ 4 & & & G_T + pC_T & -1 \\ I & & G_{in} & & 1 \end{array} \quad \begin{array}{c} U_1 \\ U_2 \\ U_3 = U_4 \\ I \end{array} = \begin{array}{c} I_1 \\ \\ \\ \end{array}, \quad \begin{array}{c|c|c|c|c} & U_1 & U_2 & U_3 = U_4 & I \\ \hline 1 & 1 & & & \\ 2 & -G_1 & G_1 + G_2 & -G_2 & -1 \\ 4 & & & G_T + pC_T & -1 \\ I & & G_{in} & & 1 \end{array} \quad \begin{array}{c} U_1 \\ U_2 \\ U_3 = U_4 \\ I \end{array} = \begin{array}{c} U_1 \\ \\ \\ \end{array}.$$

U posledně uvedené soustavy rovnic byla použita známá úprava, která spočívá v tom, že namísto rovnice 1. Kirchhoffova zákona pro uzel, k němuž je připojen ideální zdroj napětí, píšeme napěťovou rovnici typu *uzlové napětí = napětí zdroje*.

V některých případech nás zajímají jen napěťové poměry v obvodu. V tom případě je možné vyloučit proud řízeného zdroje z množiny neznámých branových veličin a snížit tak řád obvodové matice. Z čtvrté rovnice v soustavě (1) vyjádříme proud I a dosadíme do zbylých tří rovnic. Získáme redukovanou soustavu rovnic

$$\begin{array}{c|c|c|c} & U_a & U_b & U_c = U_d \\ \hline a & & & \\ b & -G_{in} & G_{in} & \\ c & -G_{in} & G_{in} & G_T + pC_T \end{array} \quad \begin{array}{c} U_a \\ U_b \\ U_c = U_d \end{array} = \begin{array}{c} I_a \\ I_b \\ I_c \end{array} \quad (2)$$

V případě výše uvedeného invertujícího zesilovače dostáváme redukovanou soustavu rovnic

$$\begin{array}{c}
U_1 \quad U_2 \quad U_3 = U_4 \\
\begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & G_1 & -G_1 \\ \hline 2 & -G_1 & G_1 + G_2 + G_{in} \\ \hline 4 & & G_{in} \end{array} \quad \begin{array}{|c|c|c|} \hline & & -G_2 \\ \hline & & G_T + pC_T \\ \hline \end{array} \\
\end{array} = \begin{array}{|c|} \hline U_1 \\ \hline U_2 \\ \hline U_3 = U_4 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline I_1 \\ \hline \\ \hline \\ \hline \end{array}, \quad \begin{array}{c}
U_1 \quad U_2 \quad U_3 = U_4 \\
\begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 1 & \\ \hline 2 & -G_1 & G_1 + G_2 + G_{in} \\ \hline 4 & & G_{in} \end{array} \quad \begin{array}{|c|c|c|} \hline & & -G_2 \\ \hline & & G_T + pC_T \\ \hline \end{array} \\
\end{array} = \begin{array}{|c|} \hline U_1 \\ \hline U_2 \\ \hline U_3 = U_4 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline U_1 \\ \hline \\ \hline \\ \hline \end{array}.$$

IDEALIZOVANÝ TOZ

Při modelování obvodů s TOZ na nejnižší úrovni se zanedbává jak vstupní odpor R_{in} ($R_{in} \rightarrow 0$, tedy $G_{in} \rightarrow \infty$), tak i vliv transimpedance ($R_T \rightarrow \infty$, $C_T \rightarrow 0$). Odpovídající model TOZ je na obr.1c). Díky zanedbání vstupního odporu dojde k další redukci počtu rovnic. Uzlová napětí U_a a U_b pak totiž budou totožná. Aplikujeme-li uvedená zjednodušení na soustavu rovnic (1), dostaneme její redukovaný tvar

$$\begin{array}{c}
U_a = U_b \quad U_c = U_d \quad I \\
\begin{array}{|c|c|c|} \hline a & & \\ \hline b & & -1 \\ \hline c & & -1 \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{|c|c|} \hline U_a = U_b \\ \hline U_c = U_d \\ \hline I \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline I_a \\ \hline I_b \\ \hline I_c \\ \hline \end{array}. \quad (3)
\end{array}$$

Aplikujme tento popis na invertující zesilovač na obr.2. Pak

$$\begin{array}{c}
U_1 = U_2 \quad U_3 = U_4 \quad I \\
\begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & G_1 - G_1 & \\ \hline 2 & G_1 - G_1 + G_2 & -1 \\ \hline 4 & & -1 \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{|c|c|} \hline U_1 = U_2 \\ \hline U_3 = U_4 \\ \hline I \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline I_1 \\ \hline \\ \hline \\ \hline \end{array}, \quad \begin{array}{c}
U_1 = U_2 \quad U_3 = U_4 \quad I \\
\begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 1 & \\ \hline 2 & G_1 - G_1 + G_2 & -1 \\ \hline 4 & & -1 \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{|c|c|} \hline U_1 = U_2 \\ \hline U_3 = U_4 \\ \hline I \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline U_1 \\ \hline \\ \hline \\ \hline \end{array}.
\end{array}$$

K maximální redukci počtu rovnic dojde v případě, nezahrneme-li proud řízeného zdroje do souboru neznámých veličin. Proud I je možné vyjádřit z rovnic 1. Kirchhoffova zákona buď pro uzel b nebo c (2. a 3. rovnice v soustavě 3). Vyjádříme proud I například z 3. rovnice. Po dosazení do 2. rovnice a úpravě vyjde redukovaná soustava

$$\begin{array}{c}
U_a = U_b \quad U_c = U_d \\
\begin{array}{|c|c|} \hline a & \\ \hline b-c & \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{|c|c|} \hline U_a = U_b \\ \hline U_c = U_d \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline I_a \\ \hline I_b - I_c \\ \hline \end{array}. \quad (4)
\end{array}$$

Admitanční matice ideálního TOZ je prázdná a symbolicky znázorňuje transformaci branových napětí a proudů. Z uvedeného je zřejmé, že zapojením TOZ do obvodu (t.j. čtyřpólu) dojde k snížení počtu obvodových rovnic o dvojku. To může vést k významnému urychlení analýzy rozsáhlých obvodů, jak uvidíme v závěrečném příkladu.

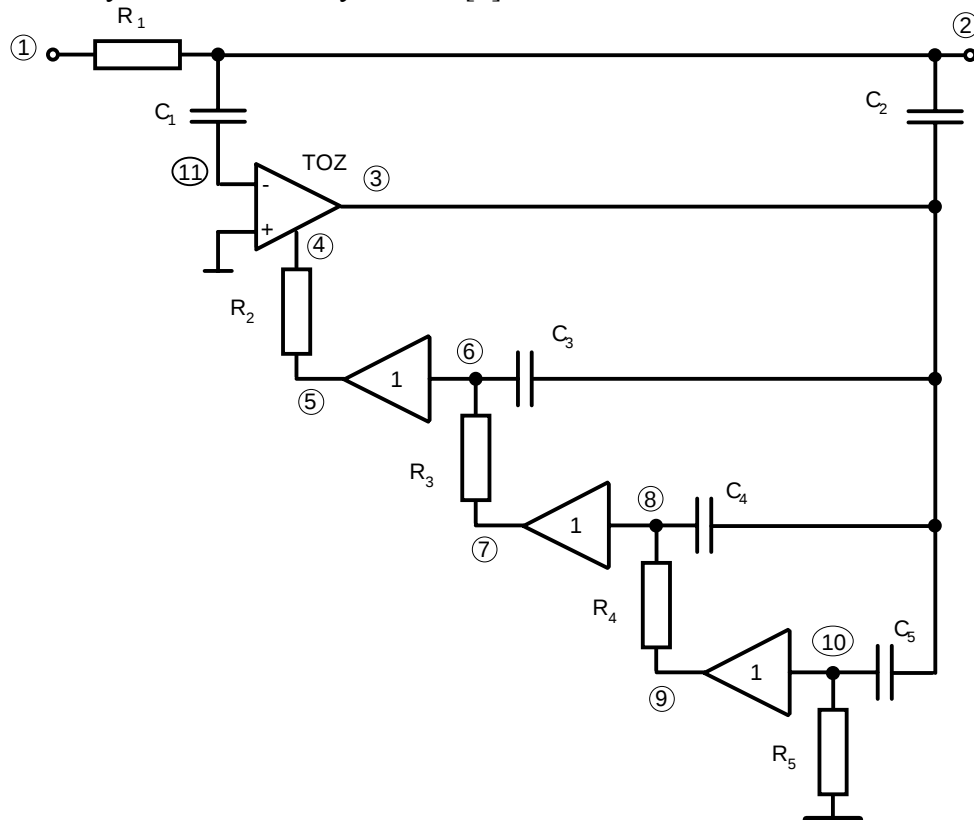
Aplikujeme-li tento popis na zapojení invertujícího zesilovače z obr.2, dostaneme:

$$\begin{array}{c}
U_1 \quad U_3 = U_4 \\
\begin{array}{|c|c|} \hline 1 & G_1 \\ \hline 2-4 & -G_1 \end{array} \quad \begin{array}{|c|} \hline U_1 \\ \hline U_3 = U_4 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline I_1 \\ \hline \\ \hline \end{array}, \quad \begin{array}{c}
U_1 \quad U_3 = U_4 \\
\begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 1 \\ \hline 2-4 & -G_1 \end{array} \quad \begin{array}{|c|} \hline U_1 \\ \hline U_3 = U_4 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline U_1 \\ \hline \\ \hline \end{array}.
\end{array}$$

Na závěr uvedme ekonomický popis filtru z obr.3, který má 11 uzlů [3]. Filtr je popsán soustavou šesti rovnic.

ZÁVĚR

Uvedené metody ekonomického popisu obvodů s transimpedančními operačními zesilovači a proudovými konvejory jsou snadno algoritmizovatelné. V současné době jsou použity v programu SPIN pro rychlou analýzu spínaných obvodů [4]. Dále zamýšlíme jejich implementaci do programu NAF pro uživatelský návrh kmitočtových filtrů [5].



Obr.3. a) Filtr 5.řádu s nízkými citlivostmi [3].

	U_1	U_2	$U_3 = U_4$	$U_5 = U_6$	$U_7 = U_8$	$U_9 = U_{10}$		
1	G_1	$-G_1$					U_1	I_1
2	$-G_1$	$G_1 + p(C_1 + C_2)$	$-pC_2$				U_2	
11-4		$-pC_1$	$-G_2$	G_2			$U_3 = U_4$	
6			$-pC_3$	$G_3 + pC_3$	$-G_3$		$U_5 = U_6$	
8			$-pC_4$		$G_4 + pC_4$	$-G_4$	$U_7 = U_8$	
10			$-pC_5$			$G_5 + pC_5$	$U_9 = U_{10}$	

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] BIOLEK,D.: Výuka obecných metod analýzy lineárních obvodů. STO-5, VA Brno 1994, publikováno v tomto sborníku.
- [3] VRBA,K.-VRBA,R.: Antialiasing lowpass filter with a transimpedance OpAmp for ECG signal processing. 12-th international conference BIOSIGNAL'94, Brno, s.150-152. Czech Republic.

- [4] BIOLEK,D.: Modeling of periodically switched networks using mixed s-z description.
AMSE'94, Lyon, Vol 1, pp. 199 - 210. France.
- [5] HÁJEK,K.-SEDLÁČEK,J.: The synthesis with internal optimization loops and internal analysis.
AMSE'94, Lyon, Vol 1, pp. 263 - 266. France.