

3. ÚSPORNÝ POPIS OBVODŮ S TRANSIMPEDANČNÍMI OPERAČNÍMI ZESILOVAČI MODIFIKOVANOU METODOU UZLOVÝCH NAPĚTÍ

V této kapitole jsou vysvětleny různé způsoby popisu obvodů s transimpedančními operačními zesilovači, resp. s proudovými konvejory v rámci všeobecně rozšířené modifikované metody uzlových napětí. Pozornost je věnována i popisu ideálního TOZ, který může při vhodné redukci obvodových veličin snížit o dvojnásobek počet obvodových rovnic. To je významné z hlediska rychlosti počítačové analýzy rozsáhlých obvodů a zejména obvodů s vícefázovým spínáním.

3.1 MODEL TOZ S UVAŽOVÁNÍM VSTUPNÍHO ODPORU A TRANSIMPEDANCE

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

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

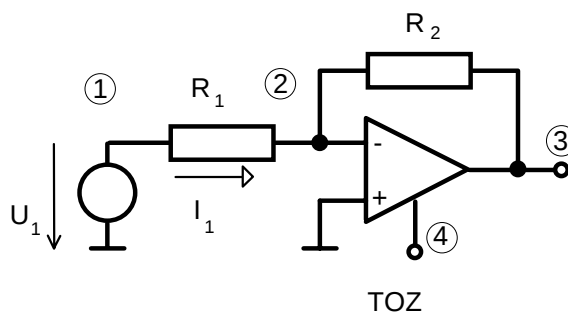
kde I_a, I_b, I_c jsou proudy tekoucí zvenčí do uzlů a, b a c . Rovnice lze přepsat do přehledného maticového tvaru:

$$\begin{array}{c|c|c|c|c} & U_a & U_b & U_c = U_d & I \\ \hline a & & & & \\ b & & & & -1 \\ c & & & G_T + pC_T & -1 \\ I & -G_{in} & G_{in} & & 1 \end{array} \begin{array}{c} U_a \\ U_b \\ U_c = U_d \\ I \end{array} = \begin{array}{c} I_a \\ I_b \\ I_c \\ 0 \end{array} \quad (12)$$

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*. 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.14. Tvar soustavy rovnic závisí na tom, známe-li budící proud I_1 nebo napětí U_1 :



Obr.14. Zapojení TOZ jako invertujícího zesilovače.

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

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

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 (12) vyjádříme proud I a dosadíme do zbylých tří rovnic. Získáme redukovanou soustavu rovnic

$$\begin{array}{c}
U_a \quad U_b \quad U_c = U_d \\
\begin{array}{c|c|c}
a & & \\
b & -G_{in} & G_{in} \\
c & -G_{in} & G_{in}
\end{array}
\end{array}
=
\begin{array}{c}
\begin{array}{c|c}
U_a \\
U_b \\
U_c = U_d
\end{array}
=
\begin{array}{c|c}
I_a \\
I_b \\
I_c
\end{array}
.
\end{array} \quad (13)$$

V případě výše uvedeného invertujícího zesilovače dostáváme redukovanou soustavu rovnic

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

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

3.2. MODEL IDEÁLNÍHO 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 (12), dostaneme její redukovaný tvar

$$\begin{array}{c}
U_a = U_b \quad U_c = U_d \quad I \\
\begin{array}{c|c|c}
a & & \\
b & & -1 \\
c & & -1
\end{array}
\end{array}
=
\begin{array}{c}
\begin{array}{c|c}
U_a = U_b \\
U_c = U_d \\
I
\end{array}
=
\begin{array}{c|c}
I_a \\
I_b \\
I_c
\end{array}
.
\end{array} \quad (14)$$

Aplikujme tento popis na invertující zesilovač na obr.14. Pak

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

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

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 14). Vyjádříme proud I například z 3. rovnice. Po dosazení do 2. rovnice a úpravě vyjde redukovaná soustava

$$\begin{array}{c} U_a = U_b \quad U_c = U_d \\ \begin{array}{c|c} a & \\ b-c & \end{array} \end{array} \quad \begin{array}{c} U_a = U_b \\ U_c = U_d \end{array} = \begin{array}{c} I_a \\ I_b - I_c \end{array}. \quad (15)$$

Admitanční matice ideálního TOZ je prázdná a symbolicky znázorňuje transformaci branových napětí a proudů. Z uvedeného je zřejmé, že zapojením TOZ do obvodu (tj. 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.14, dostaneme:

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

Na závěr uvedme ekonomický popis filtru z obr.13, který má 11 uzlů. Filtr je popsán soustavou šesti rovnic.

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

3.3. SHRUTÍ

Uvedené metody ekonomického popisu obvodů s transimpedančními operačními zesilovači a proudovými konvejory jsou snadno algoritimizovatelné. V současné době jsou použity v programu SPIN pro rychlou analýzu spínaných obvodů [2],[5]. Dále zamýšlíme jejich implementaci do programu NAF pro uživatelský návrh kmitočtových filtrů [12].

4. POČÍTAČOVÁ ANALÝZA REÁLNÝCH SPÍNANÝCH OBVODŮ S TRANSIMPEDANČNÍMI OPERAČNÍMI ZESILOVAČI

V této kapitole je popsán nový algoritmus sestavování obvodových rovnic lineárních obvodů s externím spínáním, které obsahují transimpedanční operační zesilovače (TOZ). Algoritmus byl úspěšně implementován do programu SPIN pro analýzu reálných spínaných obvodů.

4.1. KONCEPCE POČÍTAČOVÉ ANALÝZY

Transimpedanční operační zesilovač je perspektivním stavebním prvkem, který lze s výhodou využít i při konstrukci filtrů se spínanými kapacitami (SC).

Protože dosud není k dispozici program pro kmitočtovou analýzu spínaných filtrů s TOZ, který je potřebný pro ověřování výsledků syntézy, rozhodli jsme se takovýto program vytvořit. Za základ jsme zvolili program SPIN [7], který jsme rozšířili o model transimpedančního operačního zesilovače. Program poskytuje správné výsledky i v případě, kdy v obvodu nejsou přítomny spínače a spínaný obvod je tím redukován na klasický lineární stacionární obvod.

V [7] jsme popsali obecnou koncepci programu SPIN, kterou je možno shrnout do těchto bodů:

- Sestavení obvodových rovnic.
- Časově - frekvenční předzpracování obvodových rovnic.
- Semisymbolický výpočet zobecněných přenosových funkcí.

Začlenění modelu TOZ do programu SPIN spadá do prvního bodu. V dalším popíšeme způsob začlenění rovnic TOZ do soustavy rovnic modifikované metody uzlových napětí.

4.2. ALGORITMUS TVORBY OBVODOVÝCH ROVNIC

Problémem analýzy spínaných obvodů je relativně velký počet rovnic (v případě N -fázového spínání zhruba N krát větší počet než u obvodů nespínaných). Základem pro sestavování obvodových rovnic je modifikovaná metoda uzlových napětí (MMUN). V zájmu minimálního počtu rovnic je naše řešení následující:

- Pro každou spínací fázi o délce trvání T_1 , resp. T_2 nalezneme soubor nezávislých branových veličin

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_1 &= [v_1^1, v_1^2, \dots, v_1^{n_1}]^T \dots \text{ fáze 1,} \\ \mathbf{v}_2 &= [v_2^1, v_2^2, \dots, v_2^{n_2}]^T \dots \text{ fáze 2,} \end{aligned} \quad (16)$$

kde n_1 , resp. n_2 je počet nezávislých veličin ve fázi 1, resp. 2. Způsob hledání těchto veličin jsme podrobně popsali v [7].

- Pro branové veličiny lze sestavit soustavu diferenciálních rovnic modifikované metody uzlových napětí v operátorovém tvaru

$$\begin{aligned} \underbrace{(\mathbf{G}_1^M + p\mathbf{C}_1^M)}_{\mathbf{Y}_1^M} \mathbf{V}_1 &= \mathbf{D}_1 \mathbf{W}_1 + \mathbf{C}_{12}^M \mathbf{v}_2(kT^-), \\ \underbrace{(\mathbf{G}_2^M + p\mathbf{C}_2^M)}_{\mathbf{Y}_2^M} \mathbf{V}_2 &= \mathbf{D}_2 \mathbf{W}_2 + \mathbf{C}_{21}^M \mathbf{v}_1(kT + T_1^-), \end{aligned} \quad (17)$$

kde $\mathbf{G}_1^M$, resp. $\mathbf{G}_2^M$ je modifikovaná matice vodivostí rozměru $(n_1 \times n_1)$, resp. $(n_2 \times n_2)$,
 $\mathbf{C}_1^M$, resp. $\mathbf{C}_2^M$ je modifikovaná matice reaktancí rozměru $(n_1 \times n_1)$, resp. $(n_2 \times n_2)$,

$\mathbf{C}_{12}^M$, resp. $\mathbf{C}_{21}^M$ je modifikovaná přechodová matice rozměru $(n_1 \times n_2)$, resp. $(n_2 \times n_1)$,
 $\mathbf{D}_1$, resp. $\mathbf{D}_2$ jsou jisté incidenční vektory rozměru $(n_1 \times 1)$, resp. $(n_2 \times 1)$,
 $\mathbf{W}_1$, resp. $\mathbf{W}_2$ jsou Laplaceovy obrazy budících signálů ve fázi 1, resp. 2.

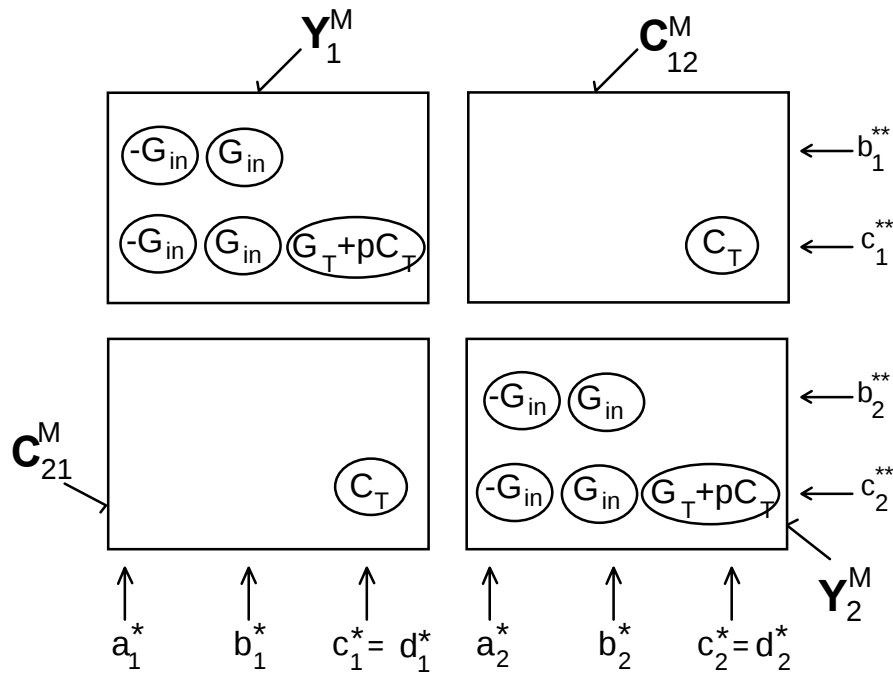
Rovnice (17) mají klíčový význam pro počítačovou analýzu, neboť je lze vždy sestavit pro jakýkoliv reálný lineární spínaný obvod bez ohledu na to, zdali je v okamžiku přepnutí do jiné fáze splněna podmínka konzistence počátečních podmínek [16]. V praxi to znamená, že simulátor bude poskytovat správné a přesné výsledky i v případě, že spínaný obvod obsahuje části, kde v důsledku ideálních spínačů dochází k skokovému přebíjení kapacitorů Diracovými impulsy.

Výše uvedené obvodové matice se vytvářejí postupným skládáním matic jednotlivých obvodových prvků. Způsob sestavování matic rezistivních a akumulacních prvků a klasických operačních zesilovačů jsme popsali v [7]. Dále popíšeme způsob začlenění *TOZ* v rámci dvou často používaných modelů z obr.1 b) a c).

Proudy, tekoucí z vnějších zdrojů do uzlů a , b a c označíme i_a , i_b a i_c . Pak lze pro model na obr.1b psát soustavu algebraicko - diferenciálních rovnic v časové nebo operátorové oblasti:

časová oblast		operátorová oblast
$i_a = 0$		$I_a = 0$
$i_b = G_{in}(u_b - u_a)$	$\Rightarrow$	$I_b = G_{in}(U_b - U_a)$
$i_c = G_T u_c + C_T \frac{d}{dt} u_c + G_{in}(u_b - u_a)$		$I_c = (G_T + pC_T)U_c + G_{in}(U_b - U_a) - C_T u_c(0^+)$
$u_d = u_c$		$U_d = U_c$

Z uvedených operátorových rovnic lze odvodit algoritmus tvorby obvodových matic, který je znázorněn na obr.15. Jedná se o zobecnění známého pravidla pro tvorbu admitanční matice analogových obvodů. Je zřejmé, že v případě spínaného obvodu s dvoufázovým spínáním je třeba sestavit ne jednu, ale čtyři matice: klasickou admitanční matici pro každou fázi a dvě tzv. přechodové matice. Prvky přechodových matic jsou tvořeny parametry reaktančních členů, které zprostředkovávají přenos energie z jedné spínací fáze do druhé.



Obr.15. Způsob zápisu parametrů reálného *TOZ* do obvodových matic spínaného obvodu. Symboly *, resp. ** jsou označeny tzv. napěťové a proudové koeficienty uzlů [7].

Z obrázku je zřejmé, že při použití tohoto popisu dochází k redukci počtu obvodových rovnic o jedničku, protože se využívá rovnosti napětí U_c a U_d .

V případě modelování ideálního TOZ podle obr.1c) dojde k redukci počtu rovnic o dvojku, neboť nyní bude zabezpečena i rovnost napětí U_a a U_b . Z obrázku 1c) vyplývají transformační rovnice

$$\begin{aligned}I_a &= 0, I_b = -I, I_c = -I, \\U_a &= U_b, U_c = U_d.\end{aligned}$$

Znamená to, že působení ideálního TOZ je třeba respektovat pouze transformací proudových a napěťových koeficientů uzlů, konkrétně rovností proudových koeficientů uzlů a a b , napěťových koeficientů uzlů a a b a c a d . Proudový koeficient uzlu d je nulový.

4.3. SHRnutí

Popsané algoritmy sestavení obvodových rovnic spínaných obvodů s TOZ byly začleněny do vyvíjeného simulačního programu a s úspěchem testovány. V budoucnu je hodláme rozšířit o složitější modely TOZ a CCII.