

Vážení zákazníci,

dovolujeme si Vás upozornit, že na tuto ukázkou knihy se vztahují autorská práva, tzv. copyright.

To znamená, že ukáзка má sloužit výhradně pro osobní potřebu potenciálního kupujícího (aby čtenář viděl, jakým způsobem je titul zpracován a mohl se také podle tohoto, jako jednoho z parametrů, rozhodnout, zda titul koupí či ne).

Z toho vyplývá, že není dovoleno tuto ukázkou jakýmkoliv způsobem dále šířit, veřejně či neveřejně např. umístováním na datová média, na jiné internetové stránky (ani prostřednictvím odkazů) apod.

redakce nakladatelství BEN – technická literatura
redakce@ben.cz

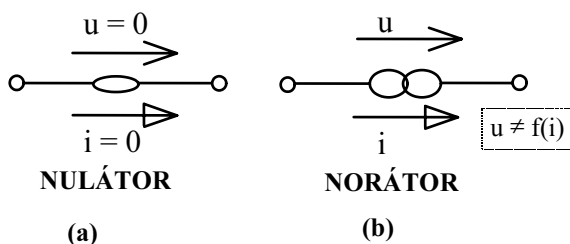


5 NULOROVÉ MODELY

Spokojíme-li se pouze se základní analýzou elektronického obvodu s ideálními prvky, osvědčuje se často užití nulorových modelů aktivních prvků.

NULÁTOR – obr. 24a – představuje abstraktní dvojpól, jímž neprotéká proud a na němž je stále nulové napětí.

NORÁTOR – obr. 24b – představuje abstraktní dvojpól, jímž mohou protékat libovolné proudy, bez ohledu na přiložené napětí.



Obr. 24 a) Schematická značka pro NULÁTOR a b) pro NORÁTOR

Jedná se o degenerované (singulární) dvojpóly, které se nemohou samostatně vůbec vyskytovat. Počet nulátorů a norátorů musí být v každém systému vždy stejný. Dvojici nulátor – norátor říkáme NULOR [38, 39, 40, 41, ...].

Paralelní řazení nulátoru a norátoru tak reprezentuje zcela obyčejný zkrat (a lze také zkratem nahradit). Nulátor „zajistí“ nulové napětí, norátor „propustí“ libovolný proud i při nulovém napětí.

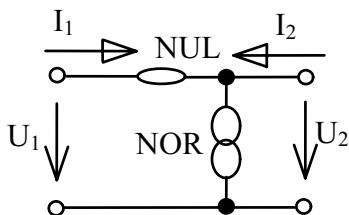
Sériové řazení nulátoru a norátoru naopak reprezentuje rozpojený obvod (a lze také vypustit z obvodu, aniž se mění funkce). Nulátorem neproteče žádný proud a norátor „odolá“ jakémukoliv napětí.

Na základě těchto triviálních vlastností lze snadno objasnit modely zesilovacích struktur, které budou dále uvedeny.

Začneme od velmi jednoduchého modelu na obr. 25. Nulátor zajišťuje rovnost

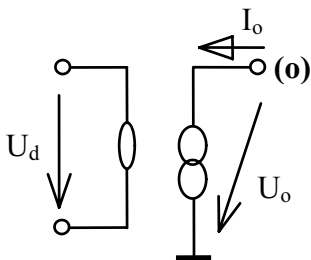
$$U_2 = U_1$$

Proud I_1 je nulový a proto je vstupní odpor U_1/I_1 nekonečný. Norátorem protéká libovolný proud, aniž je ovlivněno výstupní napětí $U_2 = U_1$. Napětí U_2 není funkcí proudu I_2 , to znamená, že výstupní odpor je nulový. Jedná se o **zdroj napětí řízený napětím** (s přenosem 1, tedy ideální **sledovač napětí**).



Obr. 25 Nulorový model sledovače napětí

Nulorový model **operačního zesilovače** je na obr. 26. Vstupní (diferenční) napětí $U_d = 0$ pro libovolné výstupní napětí U_o , tomu odpovídá nekonečné zesílení $A = U_o/U_d$. Vstupní proud je nulový, výstupní napětí U_o není funkcí I_o , tedy výstupní odpor je nulový. To vyhovuje definici ideálního OZ.



Obr. 26 Nulorový model operačního zesilovače

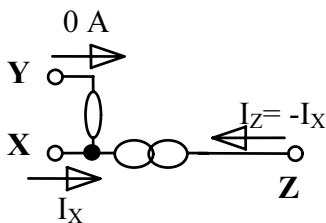
Velmi jednoduchý je i **model CCII-** na obr. 27. Nulátor zajišťuje ideální shodu

$$U_x = U_y$$

Norátor zajišťuje rovnost

$$I_z = -I_x$$

bez ohledu na napětí U_x a U_z . Proud I_z není funkcí napětí, jedná se tedy o **zdroj proudu**.

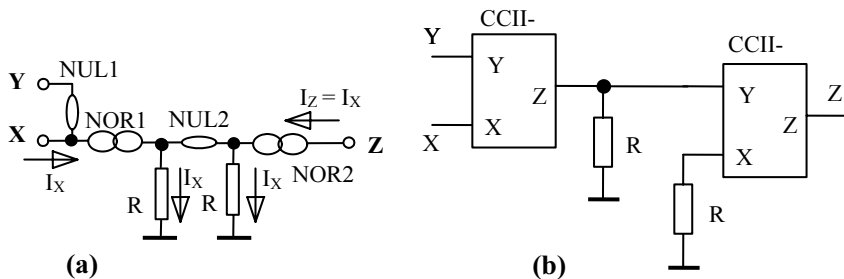


Obr. 27 Nulorový model CCII-

CCII- není nic jiného než ideální tranzistor s nekonečně velkým proudovým zesilovacím činitelem ($Y \equiv B$), nulovým úbytkem napětí mezi bázi a emitorem ($X \equiv E$) a proudem kolektoru ($Z \equiv C$; $I_C = -I_Z$), který je roven proudu emitoru ($I_X = I_E$):

$$I_C = -I_Z = -(-I_X) = I_E$$

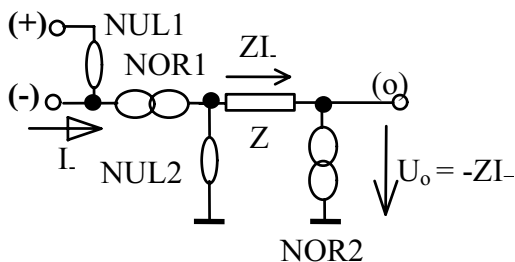
Nulorový model CCII+ je poněkud složitější. K otočení směru výstupního proudu (oproti CCII-) musíme přidat NUL2 a NOR2 – obr. 28a – a dva rezistory R (v modelech často hodnoty 1 Ω).



Obr. 28 a) Nulorový model CCII+
b) interpretace CCII+ pomocí dvou obvodů CCII- a rezistorů R

Napětí na prvním odporu R (vyvolané proudem I_X) se „přenesse“ přes NUL2 na druhý odpor R a „vygeneruje“ proud $I_Z = I_X$ požadované polarity. Díky NOR2 není I_Z funkcí výstupního napětí. Při pohledu na obr. 27 není nutné situaci na obr. 28b nijak speciálně objasňovat – obvod CCII+ lze realizovat pomocí dvou obvodů CCII-.

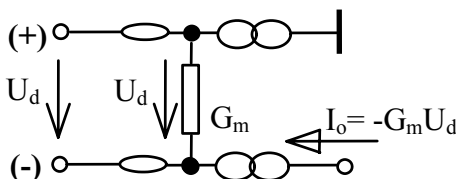
Nulorové modely ICCII lze rovněž sestavit. Stačí před vstup Y zařadit nulorový model invertoru. Modely jsou již poměrně složité, nemají praktický význam. Obdobné tvrzení platí i pro Nortonův zesilovač.



Obr. 29 Nulorový model transimpedančního zesilovače (srovnej s obr. 22)

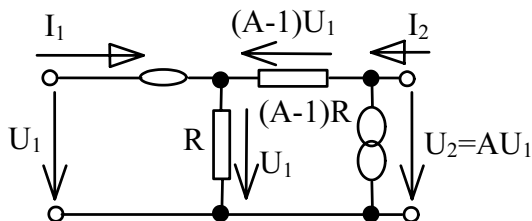
Nulorový **model transimpedančního zesilovače** je na obr. 29. Model není „otrocky“ složen z modelů CCII+, impedance Z a sledovače. Používá přímo převodník proud-napětí, který je modelován NUL2, impedancí Z a NOR2.

Nulorový **model transadmitančního zesilovače** je na obr. 30. „Funkce“ modelu je zřejmá z uvedených poměrů.



Obr. 30 Nulorový model OTA

Užitečný je i **model zesilovače s konečným zesílením** na obr. 31. Z čistě modelového pohledu můžeme volit A kladné i záporné, podle potřeby. Modelu je celkem „jedno“, že záporný odpor („pasivní“) nelze realizovat.



Obr. 31 Ideální zesilovač napětí se zesílením A

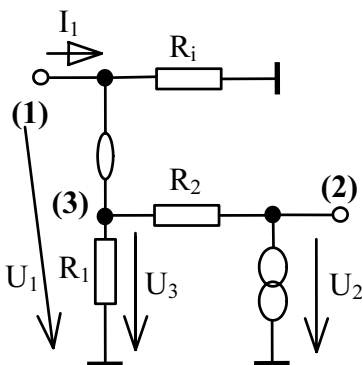
Vzhledem k tomu, že poslední tři modely v sobě nesou informaci o Z , G_m a A , je možné do těchto modelů zahrnout i frekvenční degradaci vyjmenovaných vlastností tak, jak bylo uvedeno dříve. V tomto smyslu mohou některé nulorové modely zahrnout „do sebe“ i jistou míru neideálnosti – jsou-li vhodně konstruovány.

Algoritmus pro vytvoření admitančně-nulorového modelu

Algoritmus můžeme poměrně snadno zjistit v citované literatuře. Stručně:

- 1) Aktivní prvky obvodu nahradíme nulorovými modely.
- 2) Určíme admitanční matici obvodu, ve kterém neuvažujeme nulátory a norátory (platí stejná poznámka jako u metody zobecněných uzlových napětí).
- 3) Sjednotíme **napětí** uzlů propojených **nulátory** – tedy i odpovídající **sloupce** „pasivní matice“ z kroku 2. „Sjednocení“ s **referenčním** uzlem znamená nulové napětí – příslušný sloupec se **škrtná** (nulátor představuje **napětíové propojení** uzlů).
- 4) Sjednotíme budící **proudy** uzlů propojených **norátorem** – tedy i odpovídající **řádky** „pasivní matice“. „Sjednocení“ s **referenčním** uzlem vede ke **škrtnutí** příslušného řádku – včetně budícího proudu uzlu (uzlová napětí nejsou součástí řádku – patří ke sloupcům; norátor představuje **proudové propojení** uzlů).

Jako první příklad uveďme nulorový model neinvertujícího zapojení z obr. 2.



Obr. 32 Nulorový model obvodu z obr. 2 (R_1 – ss odpor nutný pro správnou funkci reálného OZ; I_1 – budící proud)

Nejdříve sestavíme „pasivní matici“ (3 nezávislé uzly, tedy čtvercová 3×3) – bez uvažování nuloru:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{ccc}
 & \overbrace{1 \quad 2 \quad 3} & \\
 1 & \begin{array}{|c|c|c|} \hline G_1 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline U_1 \\ \hline \end{array} \\
 2 & \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0 & G_2 & -G_2 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline U_2 \\ \hline \end{array} \\
 3 & \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0 & -G_2 & G_1 + G_2 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline U_3 \\ \hline \end{array} \\
 \end{array}
 \end{array}
 \Bigg) = \begin{array}{|c|} \hline I_1 \\ \hline 0 \\ \hline 0 \\ \hline \end{array}$$

Nulátor mezi uzly (1) a (3) vede k identitě $U_1 = U_3 = U_{1,3}$, ke sloupci 1. se přičítá sloupec 3. Norátor z uzlu (2), na referenční uzel, znamená, že se škrtná 2. řádek. Potom výsledný model obvodu (je v něm jednoznačně zachycena „historie“ úprav) je:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{cc}
 & \begin{array}{cc} 1+3 & 2 \end{array} \\
 1 & \begin{array}{|c|c|} \hline G_1 & 0 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline U_{1,3} \\ \hline \end{array} \\
 3 & \begin{array}{|c|c|} \hline G_1+G_2 & -G_2 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|} \hline U_2 \\ \hline \end{array} \\
 \end{array}
 \end{array}
 = \begin{array}{|c|} \hline I_1 \\ \hline 0 \\ \hline \end{array}
 \quad (31)$$

Pomocí Cramerova pravidla snadno určíme, že

$$U_{1,3} = I_1 / G_1 = R_1 I_1$$

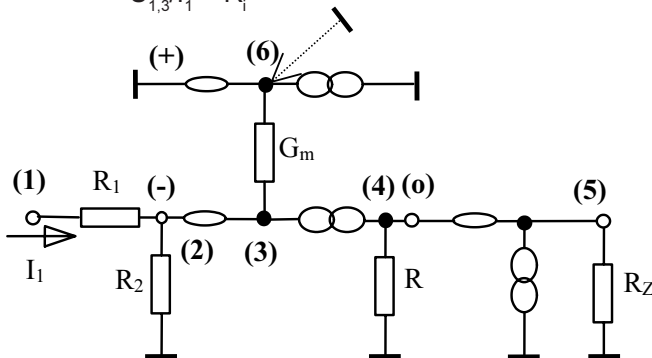
$$U_2 = I_1 (1 + G_1 / G_2) / G_1 = R_1 I_1 (1 + R_2 / R_1)$$

takže přenos je

$$U_2 / U_{1,3} = 1 + R_2 / R_1$$

a vstupní impedance (odpor) je

$$U_{1,3} / I_1 = R_1$$



Obr. 33 Nulorový model obvodu z obr. 5 (OTA + sledovač)

Jako druhý příklad uveďme nulorový model zapojení z obr. 5, navíc je připojen zatěžovací odpor R_z – obr. 33.

Při zcela rutinním postupu přiřadíme čísla uzlům, sestavujeme matici (6×6) a doplníme pasivní prvky obvodu:

	1	2	3	4	5	6				
1	G_1	$-G_1$	0	0	0	0		U_1	=	I_1
2	$-G_1$	G_1+G_2	0	0	0	0		U_2		0
3	0	0	G_m	0	0	$-G_m$		U_3		0
4	0	0	0	G	0	0		U_4		0
5	0	0	0	0	G_z	0		U_5		0
6	0	0	$-G_m$	0	0	G_m		U_6		0

Sečítají se (nulátory) sloupce (2. a 3.) a (4. a 5.). Sečítají se řádky (3. a 4. – norátor); škrtná se sloupec 6. – nulátor na zem; škrtná se řádek 5. a řádek 6. – norátory na zem.

Postup mohl ovšem být trochu modifikován. Uzel (6) vlastně není uzlem, protože paralelní kombinace „nulátor – norátor“ představuje zkrat proti referenčnímu uzlu – vyznačeno přerušovaně na obr. 33. Stačilo tedy sestavit matici (5×5) pro prvních pět uzlů. Konečný výsledek bude samozřejmě stejný.

Po provedení popsanych úkonů (vyznačených ve výchozí matici) obdržíme admitanční model obvodu na obr. 33 ve tvaru

	1	2 + 3	4 + 5		
1	G_1	$-G_1$	0		U_1
2	$-G_1$	G_1+G_2	0		$U_{2,3}$
3+4	0	G_m	G		$U_{4,5}$

(32)

ze kterého určíme, že přenos struktury na obr. 33 je

$$U_{4,5}/U_1 = (-G_m/G) \cdot (G_1/(G_1 + G_2)) = -G_m R \cdot R_2/(R_1 + R_2)$$

Nulorové modely dalších aktivních struktur lze nalézt např. v [42, 40, 43]. Příliš složité nulorové modely nejsou zrovna nejvhodnější – zvětšují počet uzlů. Velmi dobře vyhovuje model OZ, CCII– a sledovače napětí.