

GRAFY SIGNÁLOVÝCH TOKŮ VHODNÉ PRO VÝUKU ANALÝZY OBVODŮ

Dalibor Biolek*) and Viera Biolková**)

*) K301 VA Brno, Kounicova 65, 612 00 Brno, Czech Republic,
tel. (+420) 5 4118 2487, fax (+420) 5 4118 2888, dalibor.biolek@vabo.cz

**) ÚREL FEI VUT Brno, Purkyňova 118, 612 00 Brno, Czech Republic,
tel. (+420) 5 4114 9152, fax (+420) 5 4114 9244, biolkova@urel.fee.vutbr.cz

Abstrakt

V článku jsou diskutovány otázky spojené s používáním grafů signálových toků ve výuce lineárních obvodů. Jsou formulovány atributy, které by měly grafy vykazovat, aby vznikly základní podmínky pro jejich zařazení do učebních osnov. Jsou prezentovány grafy, které se jeví jako optimální pro rychlou „ruční“ analýzu obvodů s operačními zesilovači, s ideálními zesilovači napětí a zesilovači OTA.

Úvod

V průběhu posledních let vymizely z učebních osnov předmětů řady elektrotechnických fakult grafy signálových toků. Příčiny je třeba hledat v postupné změně způsobu výuky metod analýzy obvodů, která je vyvolána jednak větším využíváním analyzačních a simulačních programů, zejména však zásadními inovačními změnami celých učebních plánů. V zúženém prostoru na výuku analýzy je většinou dáвана přednost maticovým metodám, a to především modifikované metodě uzlových napětí, která se stala univerzální metodou počítačové simulace.

Důležitým pedagogickým cílem je poskytnout studentům účinný nástroj pro „ruční“ řešení relativně jednoduchých bloků s aktivními prvky jako jsou např. operační zesilovače. Takovéto běžné obvody by měl elektroinženýr být schopen řešit i bez pomoci počítače a specializovaného software. Je známo, že v těchto případech může být metoda grafů signálových toků podstatně výhodnější než modifikovaná metoda uzlových napětí. To však za předpokladu, jestliže grafová metoda vyhovuje alespoň následujícím podmínkám:

1. Musí existovat jednoduchá pravidla, na jejichž základě student sestaví graf přímo ze schématu obvodu bez nutnosti psaní pomocných rovnic.
2. Struktura grafu musí být dostatečně úsporná, jinak analýza relativně jednoduchého obvodu povede na příliš složitý a tudíž obtížně vyhodnotitelný graf.
3. Musí existovat jednoduchá pravidla pro vyhodnocení grafu, tj. pro extrakci výsledku přímo z grafu bez jakýchkoliv mezivýpočtů.
4. Graf musí umožňovat vyhodnocení napěťových a proudových přenosů i imitací.

Nejnámější grafy jsou grafy Masonovy (M) [1] a grafy Coatesovy (C) [2], případně grafy Masonovy-Coatesovy (MC) [3]. Pro pasivní obvody tyto grafy vyhovují všem uvedeným podmínkám. Situace se však dramaticky změní, objeví-li se v analyzovaném obvodu transformační prvek, jehož popis není kompatibilní s admitančními rovnicemi klasické metody uzlových napětí. Pak mnohá publikovaná řešení nevyhovují pravidlu č. 1, protože vlastnímu sestavení grafu musí předcházet sestavení obvodových rovnic [3].

Pro obvody obsahující aktivní prvky bylo vyvinuto několik typů grafů signálových toků [4], [5], [6]. Jejich rozbořem zjistíme, že:

Pravidla č. 1 a 2 bývají často v rozporu: K úspornému grafu se většinou dopracujeme aplikací pouček, které nejsou jednoduché k zapamatování [5]. Pravidlo č. 3 bývá automaticky splněno, pokud je výsledný graf typu M, C nebo MC. Pak použijeme známé Masonovo pravidlo. Pravidlo č. 4 není u některých grafů splněno například díky tomu, že během aplikace pravidla

č. 2 došlo k redukci některých proměnných, které jsou však nutné např. k určení imitančních poměrů.

V článku je popsána speciálně modifikovaná metoda MC-grafů s neorientovanými vlastními smyčkami, která se nám jeví jako optimální z hlediska naplňování výše uvedených atributů pro rychlou analýzu obvodů jak pasivních, tak i aktivních s obvodovými prvky typu operační zesilovač VFA (Voltage Feedback Amplifier), zdroj napětí řízený napětím a zesilovač OTA (Operational Transconductance Amplifier). Grafový popis se začíná neúměrně komplikovat u prvků typu „zdroj proudu řízený proudem“, což je důvod, proč například pro proudové konvejory nejsou klasické MC grafy příliš vhodné. V [7] je proto popsána odlišná metoda řešení obvodů s proudovými konvejory pomocí tzv. T-grafů. Zavádění do výuky je však diskutabilní.

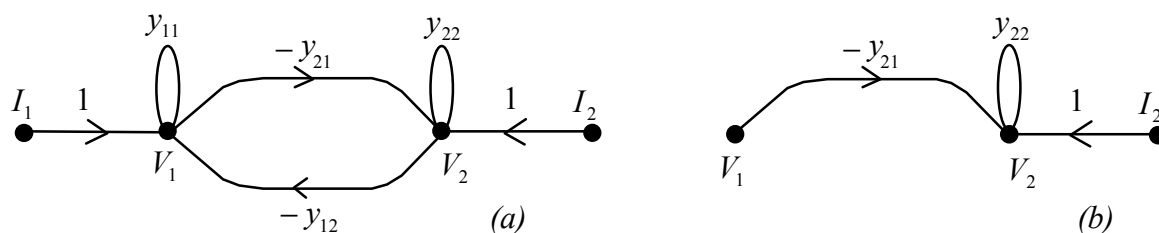
Masonův, Coatesův nebo Masonův-Coatesův graf?

Teorie rozlišuje řadu typů grafů, z nichž nejznámější jsou Masonův a Coatesův. Naše dlouhodobé zkušenosti ukazují, že jako nástroj pro ruční analýzu pasivních a aktivních obvodů je nejvhodnější Masonův-Coatesův (MC) graf s neorientovanými vlastními smyčkami, jehož základní koncepce je popsána v [3]. Uvažujme např. soustavu 2 rovnic (1), které lze upravit na tvar (2):

$$\begin{aligned} y_{11}V_1 + y_{12}V_2 &= I_1 \\ y_{21}V_1 + y_{22}V_2 &= I_2 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} y_{11}V_1 &= I_1 - y_{12}V_2 \\ y_{22}V_2 &= I_2 - y_{21}V_1 \end{aligned} \quad (2)$$

Pak odpovídající MC graf je na obr. 1 (a).



Obr. 1. MC grafy odpovídající soustavě rovnic (1): (a) úplný, (b) zkrácený.

Každý z dvou uzlů grafu, označených jako V_1 a V_2 , spolu s větvemi do něj vstupujícími představuje jednu z rovnic (2).

Vyhodnocení MC grafu se děje pomocí známého postupu, popsaného např. v [3], a proto jej zde nebudeme uvádět.

MC graf úplný nebo zkrácený?

Jestliže soustava rovnic (1) popisuje elektrický obvod, který je buzen ze zdroje V_1 , jehož napětí je známo, a jestliže nás nezajímá ani vstupní proud I_1 , odebíraný z tohoto zdroje, pak k analýze nepotřebujeme první z rovnic (2). V MC grafu tomu odpovídá redukce větví a vlastní smyčky podle obr. 1 (b).

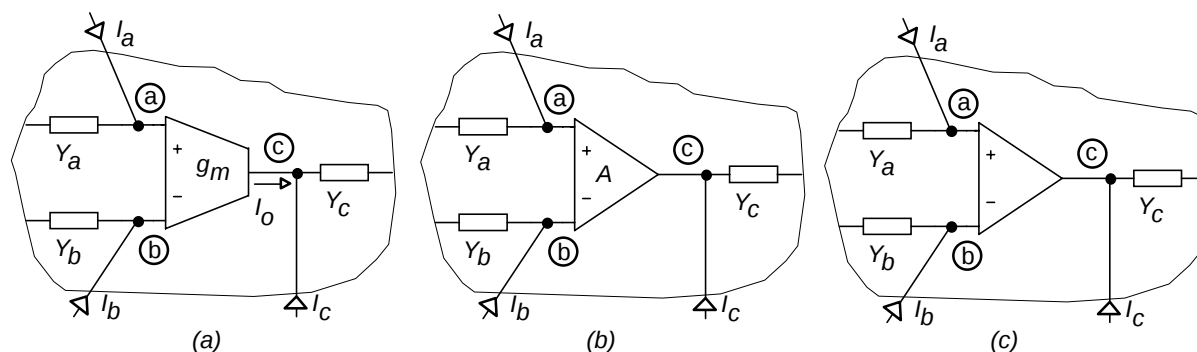
Zkrácený graf s výhodou konstruujeme v případech, kdy počítáme napěťové přenosy. Úplný graf je nutný např. za účelem výpočtů imitančních poměrů.

Speciální modifikace MC grafů

Uvažujme postupně CCVS (model zesilovače OTA na obr. 2a), VCVS (model napěťového zesilovače na obr. 2b) a ideální operační zesilovač (IOZ, obr. 2c). Na obrázcích je uvažováno konkrétní začlenění těchto prvků do obvodu. Protože všechny tyto prvky mají nekonečný vstupní odpor, neovlivní se připojením těchto prvků rovnice 1. K.z. pro uzly a a b . Znamená

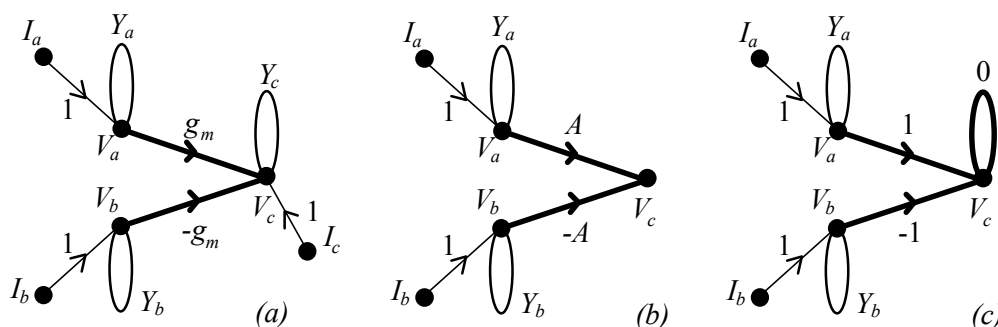
to, že MC graf bude mít v oblasti těchto uzlů klasickou podobu jako u pasivního obvodu. Poměry se však změní na výstupu. Uvažujme následující výstupní rovnice (uvedeno postupně pro VCVS, VCCS a IOZ):

$$Y_c V_c = I_c + g_m V_a - g_m V_b + \dots, V_c = A V_a - A V_b, 0 \cdot V_c = V_a - V_b. \quad (3)$$



Obr. 2. Prvky typu OTA (a), IZN (b) a IOZ (c) začleněné do obecného obvodu.

Všimněme si, že pouze první z rovnic je rovnice 1. K.z. pro uzel c . Tečkami jsou naznačeny další možné členy, generované plovoucí admittancí Y_c . Rovnice ostatních prvků jsou rovnice napětových vazebních podmínek, které platí v důsledku působení aktivního prvku tak, jak jsou napsány, tzn. že již nemohou být modifikovány dalšími prvky, připojenými k uzlu c . Příslušné MC grafy jsou na obr. 3. Silně jsou vyznačeny subgrafy vlastních aktivních prvků.



Obr. 3. MC grafy obvodů z obr. 2.

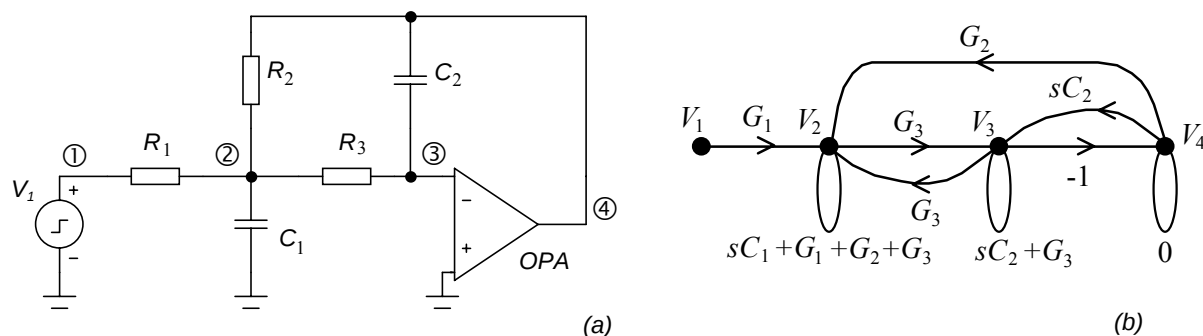
Z uvedeného vyplývají tyto zásady pro sestavování grafů obvodů s diskutovanými prvky:

- Prvek typu OTA o transkonduktanci g_m zapojený mezi uzly a , b a c podle obr. 2 a) respektujeme v grafu cestami orientovanými od uzlu V_a do uzlu V_c a od uzlu V_b do uzlu V_c o přenosech $+g_m$ a $-g_m$.
- Ideální zesilovač napětí o zesílení A zapojený mezi uzly a , b a c podle obr. 2 b) respektujeme v grafu cestami orientovanými od uzlu V_a do uzlu V_c a od uzlu V_b do uzlu V_c o přenosech $+A$ a $-A$ a vlastní smyčkou v uzlu V_c o přenosu 1 (tato smyčka se v souladu s teorií nemusí kreslit [3]). Navíc musí být dodržena tato zásada: **do uzlu V_c již nesmí směřovat žádná další cesta ani nesmí být modifikován uvedený přenos vlastní smyčky uzlu V_c .**
- Ideální operační zesilovač napětí zapojený mezi uzly a , b a c podle obr. 2 c) respektujeme v grafu cestami orientovanými od uzlu V_a do uzlu V_c a od uzlu V_b do uzlu V_c o přenosech $+1$ a -1 a vlastní smyčkou v uzlu V_c o přenosu 0. Navíc musí být dodržena tato zásada: **do uzlu V_c již nesmí směřovat žádná další cesta ani nesmí být modifikován uvedený přenos vlastní smyčky uzlu V_c .**

Žádná další pravidla není třeba znát, samozřejmě kromě obecného Masonova pravidla pro vyhodnocení grafu. Postup při analýze bude ukázán na ilustrativních příkladech.

Ilustrativní příklad

Na obr. 4 (a) je schéma aktivního filtru 2. řádu [8] a na obr. 4 (b) graf, zkonstruovaný dle výše definovaných pravidel. Budeme počítat přenos napětí, vystačíme proto se zkráceným grafem.



Obr. 4. (a) Filtr 2. řádu, (b) odpovídající MC graf.

Vyhodnocením grafu získáme známou přenosovou funkci:

$$\frac{V_4}{V_1} = \frac{-G_1 G_3}{0 + sC_2(sC_1 + G_1 + G_2 + G_3) + G_2 G_3} = -\frac{R_2 / R_1}{s^2 R_2 R_3 C_1 C_2 + sC_2(R_2 + R_3 + R_2 R_3 / R_1) + 1}.$$

Závěr

Popsané grafy signálových toků se zdají být vhodné pro zavedení do výuky jako nástroj pro rychlé řešení jednoduchých obvodů obsahujících zesilovače napětí, operační zesilovače a zesilovače OTA. K sestavení grafu přímo ze schématu potřebuje student zvládnout minimální počet pouček na zapamatování. Graf se vyhodnocuje známým Masonovým pravidlem.

Acknowledgement

This work is supported by the Grant Agency of the Czech Republic under grants No. 102/01/0432 & 102/00/0907, and by the research programme of BUT „Research of electronic communication systems and technologies”.

Literatura

- [1] MASON, S.J.: Feedback Theory: Further Properties of Signal Flow Graphs. Proc. IRE, Vol. 44, No. 7, pp. 920-926, 1956.
- [2] COATES, C.L.: Flow-graph Solution of Linear Algebraic Equations. IRE Trans. Circuit Theory, CT-6, pp. 170-187, 1959.
- [3] ČAJKA, J.-KVASIL, J.: Teorie lineárních obvodů. SNTL/ALFA, Praha 1979.
- [4] MIKULA, J.: Signal-Flow-Graph-gain with Respect to the General Node of a Graph. Electronics Letters, August 1969, No. 16, pp. 382-383.
- [5] BIOLEK, D.: Novel Signal Flow Graphs of Current Conveyors. 38th MWSCAS, Rio de Janeiro, Brazil August 13-16, 1995, pp. 1058-1061.
- [6] MIKULA, J.-POSPÍŠIL, J.: Analysis of circuits containing active transform elements. Electronic Horizon, Vol. 35, No. 4, pp. 161-167, 1974 (in Czech).
- [7] BIOLEK, D.-BIOLKOVÁ, V.: Analysis of circuits containing active elements by using modified T - graphs. CCCC01, Crete 2001 (to be published)
- [8] SCHAUMANN, R., GHAUSI, M.S., LAKER, K.R., Design of Analog Filters. Prentice Hall, 1990.