

Aplikace matematiky

Vít Jelínek

Sestrojování signálových grafů elektrických lineárních obvodů

Aplikace matematiky, Vol. 8 (1963), No. 4, 273–285

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/102860>

Terms of use:

© Institute of Mathematics AS CR, 1963

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://dml.cz>

SESTROJOVÁNÍ SIGNÁLOVÝCH GRAFŮ ELEKTRICKÝCH LINEÁRNÍCH OBVODŮ

VÍT JELÍNEK

(Došlo dne 27. listopadu 1962.)

Je popsána metoda sestrojování signálových grafů elektrických lineárních obvodů. Obvod, který má být znázorněn signálovým grafem (a na základě tohoto grafu řešení), změníme užitím zobecněných náhradních obvodů některých jeho prvků na obvod jednodušší, jehož řešení dovedeme bezprostředně udat. Sestavíme signálový graf zjednodušeného obvodu využívající znalosti jeho řešení. Nakonec tento graf podle jistých pravidel doplníme a získáme tak signálový graf původního obvodu. Metoda nahrazuje dosud užívané, ne dost dobře odůvodněné postupy sestrojování signálových grafů.

1. ÚVOD

Metoda signálových grafů¹⁾ je moderní metoda analýsy elektrických lineárních obvodů, velmi vhodná pro řešení úloh technické praxe. S jejími základy byli čtenáři seznámeni v práci [1], jejíž znalost zde předpokládáme.

Řešíme-li obvod signálovým grafem, rozpadá se postup na dvě etapy:

- a) sestrojení grafu,
- b) řešení grafu.

Metodika řešení grafů je vypracována značně podrobně. Běžně se používá dvou metod: postupné redukce grafu a přímého výpočtu na základě Masonova pravidla. Autor tohoto článku vypracoval maticovou metodu řešení signálových grafů [2].

Metodice sestrojování grafů byla věnována pozornost daleko menší, ačkoliv tyto otázky jsou neméně důležité. Obvykle se při sestavování grafů postupuje způsobem více méně intuitivním; snadno pak mohou vzniknout pochybnosti o správnosti získaných grafů.

Úkolem tohoto článku je proto podat jednoduchá obecná pravidla sestrojování signálových grafů.

¹⁾ V člancích [1], [2] se používá názvu „grafy signálových toků“, což je doslovný překlad anglického „signal flow graphs“. Poněvadž je toto označení zbytečně dlouhé, budeme používat stručnějšího „signálové grafy“.

Při konstrukci grafů budeme používat náhradních obvodů n -pólů. Proto se nejdříve zmíníme o vlastnostech náhradních obvodů a jistým způsobem je zobecníme. Teprve potom přistoupíme k vlastnímu výkladu metody. Nakonec uvedeme několik jednoduchých typických příkladů.

2. ŘÍDICÍ PRVKY A ŘÍZENÉ ZDROJE

Při řešení elektrických obvodů často jejich jednotlivé prvky, zejména prvky aktivní, nahrazujeme náhradními obvody s tzv. řízenými zdroji napětí a proudu. Příkladem mohou být všeobecně známé náhradní obvody triody.

Řízený zdroj napětí (proudu) je ideální zdroj napětí (proudu), jehož napětí (proud) je úměrné napětí nebo proudu v jiné části obvodu.

Pro účely konstrukce signálových grafů bude užitečné pojem řízeného zdroje zobecnit a současně zavést i protějšky řízených zdrojů – řídicí prvky. Učiníme tak následující definicí.

Nechť je dána soustava složená z dvojpólů

$$M_1, M_2, \dots, M_m; \quad N_1, N_2, \dots, N_n; \quad P_1, P_2, \dots, P_p; \quad Q_1, Q_2, \dots, Q_q.$$

Napětí na jejich svorkách označme po řadě

$$U_{M_1}, U_{M_2}, \dots, U_{M_m}; \quad U_{N_1}, U_{N_2}, \dots, U_{N_n}; \quad U_{P_1}, U_{P_2}, \dots, U_{P_p}; \quad U_{Q_1}, U_{Q_2}, \dots, U_{Q_q},$$

proudy jimi procházející

$$I_{M_1}, I_{M_2}, \dots, I_{M_m}; \quad I_{N_1}, I_{N_2}, \dots, I_{N_n}; \quad I_{P_1}, I_{P_2}, \dots, I_{P_p}; \quad I_{Q_1}, I_{Q_2}, \dots, I_{Q_q}.$$

Přitom $m, n, p, q \geq 0$; m, n není současně rovno nule a také p, q není současně rovno nule.

Nechť napětí a proudy dvojpólů závisí podle vztahů

$$(1a) \quad U_{M_i} = \sum_{k=1}^p A_{ik} U_{P_k} + \sum_{l=1}^q B_{il} I_{Q_l} \quad (i = 1, 2, \dots, m),$$

$$I_{N_j} = \sum_{k=1}^p C_{jk} U_{P_k} + \sum_{l=1}^q D_{jl} I_{Q_l} \quad (j = 1, 2, \dots, n),$$

$$(1b) \quad I_{P_k} = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, p),$$

$$U_{Q_l} = 0 \quad (l = 1, 2, \dots, q).$$

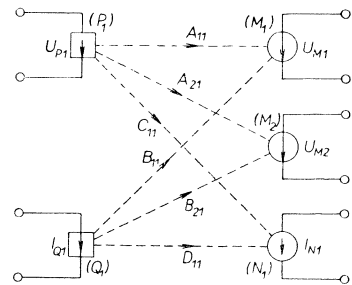
Matice soustavy $m + n$ rovnic (1a) nechť má v každém řádku a každém sloupci aspoň jeden nenulový prvek.

Potom zmíněnou soustavu dvojpólů nazveme soustavou řízených zdrojů a řídicích prvků. Dvojpóly M_i nazveme řízenými zdroji napětí, dvojpóly N_j řízenými zdroji proudu. Dvojpóly P_k nazveme napěťovými řídicími prvky, dvojpóly Q_l proudovými řídicími prvky. Přenosy (koeficienty) $A_{ik}, B_{il}, C_{jk}, D_{jl}$ nazveme řídicími přenosy.

Příklad soustavy řízených zdrojů a řídicích prvků ($m = 2, n = p = q = 1$) je na obr. 1. Řízené zdroje jsou vyznačeny kruhovými značkami, řídicí prvky čtvercovými značkami. Šipky uvnitř značek vyjadřují orientaci napětí resp. proudu. Značka pro řízený zdroj napětí a proudový řídicí prvek naznačuje nulový vnitřní odpor, značka pro řízený zdroj proudu a napěťový řídicí prvek naznačuje nekonečně velký vnitřní odpor těchto dvojpólů. U řízeného zdroje napětí a napěťového řídicího prvku se hrot šipky dotýká okraje značky, u řízeného zdroje proudu a proudového řídicího prvku je hrot šipky asi ve středu značky. Řídicí přenosy jsou vyznačeny orientovanými čárkovanými čarami. Stejných znaků jako pro řízené zdroje budeme používat i pro obyčejné (tj. neřízené) zdroje.

Tato symbolika umožňuje přehledně kreslit i značně komplikované náhradní obvody. Pro konstrukci grafů je velmi užitečné zejména důsledné grafické rozlišování prvků s nulovým a nekonečným vnitřním odporem.

Zobecnění pojmu řízeného zdroje spočívá v tom, že jeden a týž zdroj může být řízen několika signály současně. Zavedení řídicích prvků je ryze formální obrat, který má usnadnit kreslení složitých náhradních obvodů. Řídicí prvek je v podstatě jen zdůrazněným označením napětí mezi určitou dvojicí uzlů resp. proudu v určité větvi obvodu.



Obr. 1. Příklad soustavy řídicích prvků a řízených zdrojů.

3. NĚKTERÉ DŮLEŽITÉ NÁHRADNÍ OBVODY

Libovolný n -pól lze znázornit náhradním obvodem s řízenými zdroji, a to zpravidla různými způsoby. Nemůžeme zde otázku náhradních obvodů řešit obecně; uvedeme jen náhradní obvody některých důležitých prvků. Jednoduchých zásad, podle nichž jsou sestaveny, je pak možno použít i pro ostatní případy.

3.1. Dvojpóly. I nejjednodušší útvary, tj. dvojpóly, můžeme znázorňovat náhradními obvody s řízenými zdroji. Tyto neobvyklé náhradní obvody mají pro sestrojování signálových grafů základní důležitost.

Pasivní dvojpól je popsán rovnicí

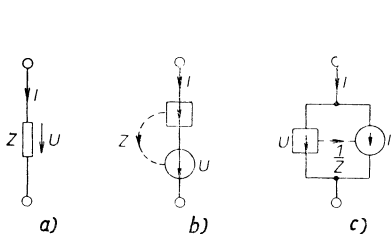
$$U = ZI,$$

respektive

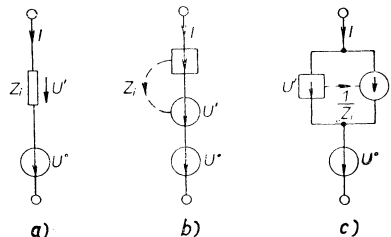
$$I = \frac{1}{Z} U.$$

Na obr. 2 jsou nakresleny náhradní obvody, které bezprostředně vycházejí z těchto dvou forem rovnice pasivního dvojpólu.

Na základě náhradních obvodů pasivních dvojpólů lze vytvořit i náhradní obvody dvojpólů aktivních. Aktivní dvojpól můžeme znázornit náhradním obvodem s (neřízeným) ideálním zdrojem napětí v sérii s pasivním dvojpólem podle obr. 3a. Pasivní dvojpól můžeme nahradit náhradním obvodem podle obr. 2b resp. 2c. Dostaneme tak náhradní obvody aktivního dvojpólu, které jsou na obr. 3b resp. 3c.

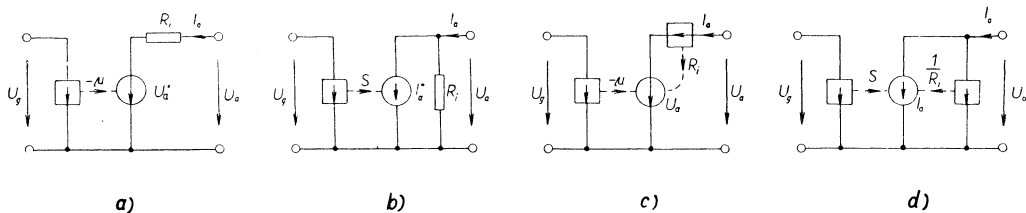


Obr. 2. Náhradní obvody pasivního dvojpólu: a) schematický znak pasivního dvojpólu, b), c) náhradní obvody s řízenými zdroji.



Obr. 3. Náhradní obvody aktivního dvojpólu: a) běžný náhradní obvod s (neřízeným) ideálním zdrojem napětí, b), c) z něho odvozené náhradní obvody s řízenými zdroji.

Podobně je možno vyjít i z duálního znázornění aktivního dvojpólu, které je tvořeno paralelním spojením (neřízeného) ideálního zdroje proudu a pasivního dvojpólu. Celkem je tedy možno vytvořit čtyři náhradní obvody aktivního dvojpólu s řízenými zdroji.



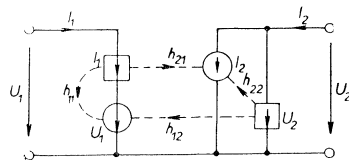
Obr. 4. Náhradní obvody triody:

a), b) náhradní obvody s jedním řídicím prvkem a jedním řízeným zdrojem, c), d) z nich odvozené náhradní obvody se dvěma řídicími prvky a jedním řízeným zdrojem.

3.2 Trioda. Náhradní obvody triody jsou na obr. 4. Na obr. 4a a 4b jsou náhradní obvody s jedním řídicím prvkem a jedním řízeným zdrojem. Až na způsob kreslení se shodují s obvody běžně používanými. Na základě obecné definice soustavy řídicích prvků a řízených zdrojů lze z nich snadno odvodit náhradní obvody se dvěma řídicími prvky a jedním řízeným zdrojem podle obr. 4c a 4d, které jsou pro aplikace obvykle výhodnější.

3.3 Transistor. Pro sestrojování signálových grafů je možno použít kteréhokoliv známého náhradního obvodu transistoru. Na základě obecné definice soustavy řídicích prvků a řízených zdrojů můžeme i zde dospět k novým užitečným tvarům.

Výhodné jsou zejména obvody se dvěma řízenými zdroji a dvěma řídicími prvky, které bezprostředně vycházejí z admitanční, impedanční nebo některé smíšené matice transistoru. Na obr. 5 je jako příklad uveden náhradní obvod transistoru odvozený ze smíšené matice $[h_{ik}]$. Náhradní obvod má stejný tvar pro zapojení se společnou bází, emitorem i kolektorem. Záleží jen na tom, kterému zapojení přísluší použitá matice $[h_{ik}]$.



Obr. 5. Náhradní obvod transistoru odvozený z matice $[h_{ik}]$.

4. DEFINICE SIGNÁLOVÉHO GRAFU ELEKTRICKÉHO OBVODU

Při řešení elektrického obvodu hledáme obvykle, jak závisí napětí a proudy ve zvolených místech obvodu na napětích ideálních zdrojů napětí a proudech ideálních zdrojů proudu, které obvod obsahuje. (Skutečné zdroje předem nahrazujeme příslušnými náhradními obvody s ideálními zdroji.)

Pro stručnost budeme napětím (proudům) ideálních zdrojů říkat vstupní signály, hledaným napětím (proudům) výstupní signály.

Nechť je dán elektrický obvod O , jehož vstupní signály jsou x_1, x_2, \dots, x_n , výstupní signály y_1, y_2, \dots, y_m . Řešení obvodu je dáno systémem lineárních rovnic

$$(2) \quad y_j = \sum_{k=1}^n P_{jk} x_k \quad (j = 1, 2, \dots, m).$$

Nechť je dále dán signálový graf G těchto vlastností:

- a) Zřídla grafu jsou x_1, x_2, \dots, x_n .
- b) Graf obsahuje uzly y_1, y_2, \dots, y_m , z nichž každý je buď vnitřním uzlem²⁾ nebo norem. Kromě toho neobsahuje již graf žádné nory, může však obsahovat libovolný počet dalších vnitřních uzlů.
- c) Mezi signály x_i a y_j platí stejné vztahy jako v obvodu O , tj. rovnice (2).

Za těchto podmínek budeme signálový graf G nazývat signálovým grafem obvodu O .

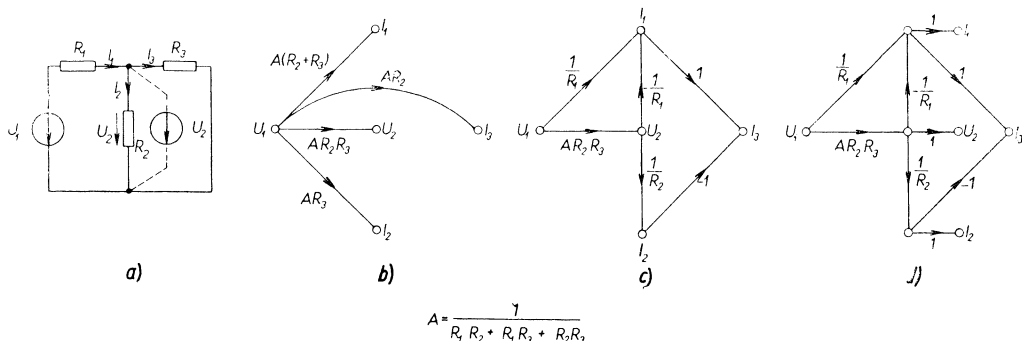
Jestliže signálový graf obvodu O má tu vlastnost, že uzly y_1, y_2, \dots, y_m jsou vesměs nory, řekneme, že je v normálním tvaru.

Pro řešení obvodu pomocí grafu vyžadujeme obvykle, aby graf byl dán v normálním tvaru. Signálový graf, který není v normálním tvaru, můžeme snadno do normálního tvaru uvést. Postupujeme takto: Jestliže určitému signálu y_j je přiřazen vnitřní uzel, vyvedeme z tohoto uzlu větev s jednotkovým přenosem a zakončíme norem. Označíme y_j přesuneme potom k tomuto novému noru. Tím postupně dosáhneme toho, že všechny uzly y_j jsou nory.

²⁾ Vnitřní uzel je takový uzel, který není ani zřídlem ani norem.

Na obr. 6a je jednoduchý elektrický obvod. (Čárkovaně kresleného zdroje si nevyšimejme.) Jeho vstupním signálem je U_1 , za výstupní signály považujeme U_2, I_1, I_2, I_3 . Na obr. 6b, 6c, 6d jsou signálové grafy tohoto obvodu. Nebudeme teď vysvětlovat způsob, kterým byly sestaveny (to učiníme v následující kapitole). Všimněme si jen toho, že graf na obr. 6b je v normálním tvaru, graf na obr. 6c nikoliv. Úpravou grafu na obr. 6c získáme graf v normálním tvaru, který je na obr. 6d.

Všechny uvedené grafy jsou přímé (neobsahují smyčky). Obecně ovšem může být signálový graf elektrického obvodu smyčkový.



Obr. 6. Ukázky signálových grafů elektrického obvodu. (K definici signálového grafu a k výkladu metody sestavení signálového grafu na základě známého řešení obvodu.)

5. SESTROJENÍ SIGNÁLOVÉHO GRAFU NA ZÁKLADĚ ZNÁMÉHO ŘEŠENÍ OBVDU

Základní úlohou konstrukce signálových grafů je sestavení grafu na základě známého řešení elektrického obvodu. Důležitost této úlohy spočívá v tom, že sestavení signálového grafu obvodu, jehož řešení neznáme, převádíme na tuto jednodušší obrácenou úlohu.

Známe-li řešení obvodu ve tvaru (2), je sestavení grafu velmi jednoduché. Každý ze vstupních signálů x_1, x_2, \dots, x_n je znázorněn zřídlem, každý z výstupních signálů y_1, y_2, \dots, y_m norem, každý (nenulový) koeficient P_{jk} je znázorněn větví, která vychází ze zřídla x_k a končí v noru y_j .

Vraťme se k obvodu na obr. 6a. Jeho řešení je dáno rovnicemi

$$\begin{aligned} U_2 &= AR_2 R_3 U_1, \\ I_1 &= A(R_2 + R_3) U_1, \\ I_2 &= AR_3 U_1, \\ I_3 &= AR_2 U_1, \end{aligned}$$

kde

$$A = \frac{1}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}.$$

Signálový graf na obr. 6b je nakreslen na základě těchto rovnic podle zásad, které byly právě uvedeny.

V některých případech nemusí být výhodné konstruovat graf na základě celkového řešení obvodu (2), nýbrž sestavovat jej postupně z určitých řešení dílčích. Uvedeme nyní pravidlo, o které se takový postup opírá.

Nechť je dán elektrický obvod O , jehož vstupní signály jsou x_1, x_2, \dots, x_n , výstupní signály jsou y_1, y_2, \dots, y_m .

Předpokládejme, že je sestaven dílčí signálový graf G_k vyjadřující, jak závisí k výstupních signálů na signálech vstupních. Pro jednoduchost předpokládejme, že je to právě k prvních výstupních signálů, totiž signály y_1, y_2, \dots, y_k . (Toho lze vždy dosáhnout vhodným očíslováním signálů.)

Obvod O nyní upravíme. Ze skupiny signálů y_1, y_2, \dots, y_k vybereme l signálů ($0 \leq l \leq k$) $y_{a_1}, y_{a_2}, \dots, y_{a_l}$. Jestliže signál y_{a_1} je napětí (proud), zařadíme mezi příslušnou dvojici svorek (do příslušné větve) ideální zdroj napětí (proudu) o velikosti y_{a_1} . Podobnou úpravu provedeme i pro signály $y_{a_2}, y_{a_3}, \dots, y_{a_l}$.

Vznikne tak obvod O_k se vstupními signály $x_1, x_2, \dots, x_n, y_{a_1}, y_{a_2}, \dots, y_{a_l}$; za výstupní signál budeme považovat y_{k+1} . Najdeme řešení tohoto obvodu, tj. rovnici

$$(3) \quad y_{k+1} = \sum_{i=1}^n A_i x_i + \sum_{j=1}^l B_{a_j} y_{a_j}.$$

Graf G_k doplníme uzlem y_{k+1} . Z každého zřídla x_j zavedeme do něho větev s přenosem A_i , z každého uzlu y_{a_j} větev s přenosem B_{a_j} .

Tím dostaneme graf G_{k+1} , který vyjadřuje, jak v obvodu O závisí signály $y_1, y_2, \dots, y_k, y_{k+1}$ na signálech vstupních.

Naznačíme ve stručnosti důkaz tohoto pravidla. Jestliže mezi dvojicí svorek (do větve), mezi nimiž bylo napětí (již tekla proud) y_{a_j} , vložíme ideální zdroj napětí (proudu), jehož velikost je rovněž y_{a_j} , nezmění se tím napětí ani proudy v uvažovaném obvodu. To platí pro $j = 1, 2, \dots, l$. Proto také zavedením zmíněných pomocných zdrojů se nezmění velikost signálu y_{k+1} . Z toho vyplývá, že rovnice (3) odvozená pro upravený obvod O_k platí i pro původní obvod O . Doplnění grafu, které bylo popsáno, je jen grafickým vyjádřením rovnice (3).

Sestavujeme-li graf postupným způsobem, vypočteme nejdříve, jak závisí signál y_1 na signálech vstupních, a znázorníme tuto závislost grafem G_1 . Pak na základě uvedeného pravidla doplníme tento graf na graf G_2 , ten doplníme na graf G_3 atd. Po m krocích dospějeme ke grafu G_m , který je hledaným signálovým grafem uvažovaného obvodu. Pokud je toho třeba, uvedeme ještě získaný graf do normálního tvaru.

Vrátíme se k obvodu na obr. 6a a ukážeme postupné sestavení jeho signálového grafu, který je na obr. 6c. Vstupním signálem je U_1 , výstupní signály jsou U_2, I_1, I_2, I_3 .

1) Nejdříve vypočteme závislost U_2 na U_1 (jde o zatížený dělič napětí):

$$U_2 = AR_2R_3U_1.$$

Tuto rovnici znázorníme grafem se zřídlem U_1 , norem U_2 a větví AR_2R_3 .

2) Zařadíme zdroj o napětí U_2 mezi příslušnou dvojici svorek, jak je to na obr. 6a vyznačeno čárkovaně. Vyjádříme závislost I_1 na U_1, U_2 :

$$I_1 = \frac{1}{R_1} U_1 - \frac{1}{R_1} U_2.$$

Graf doplníme o uzel I_1 a větve s přenosy $1/R_1, -1/R_1$.

3) Ponechajíc zapojen zdroj U_2 , vyjádříme závislost I_2 na U_1, U_2 :

$$I_2 = \frac{1}{R_2} U_2.$$

Graf doplníme uzlem I_2 a větví s přenosem $1/R_2$.

4) Vypustíme zdroj U_2 . Zařadíme ideální zdroje proudu s proudy I_1, I_2 do míst, kde jsou šipky s označením I_1, I_2 . Vyjádříme závislost I_3 na U_1, I_1, I_2 :

$$I_3 = I_1 - I_2.$$

Graf doplníme uzlem I_3 a větvemi s přenosem $+1, -1$.

Nakonec ještě upravíme graf do normálního tvaru podle obr. 6d.

Metodu postupného sestavení grafu lze obměnit následujícím způsobem: Vedle signálů vstupních a výstupních zavedeme ještě vhodně zvolené signály pomocné z_1, z_2, \dots, z_r . Opět to budou napětí (proudy) v určitých místech daného obvodu. Při sestavování grafu tyto signály přiřadíme k signálům výstupním. Je třeba postupovat tak, aby v získaném signálovém grafu každému ze signálů z_1, z_2, \dots, z_r byl přiřazen vnitřní uzel (nikoliv nor). Při uvádění grafu do normálního tvaru pak těmto signálům ponecháme přiřazený vnitřní uzly.

Výhoda postupné metody sestavování signálového grafu spočívá v tom, že při postupu vhodně voleném je zpravidla výpočet potřebných přenosů jednodušší a přehlednější než hledání řešení obvodu ve tvaru (2).

6. OBECNÁ METODA SESTROJENÍ SIGNÁLOVÉHO GRAFU ELEKTRICKÉHO OBVODU

Přejdeme nyní k nejdůležitější otázce – k otázce sestrojování signálových grafů obvodů, jejichž řešení neznáme, jejichž řešení chceme na základě grafu určit. Ponevadž jsme se již seznámili se všemi nezbytnými pomocnými pojmy a postupy, bude výklad velmi jednoduchý.

Nechť je dán obvod O se vstupními signály x_1, x_2, \dots, x_n a výstupními signály y_1, y_2, \dots, y_m .

Jistý počet prvků obvodu (dvojpolů, elektronek, transistorů aj.) nahradíme vhodně zvolenými náhradními obvody. Upravený obvod bude obsahovat obecně q řízených zdrojů se signály v_1, v_2, \dots, v_q a r řídicích prvků se signály w_1, w_2, \dots, w_r .

Obvod O změníme na obvod O' tím, že vypustíme všechny řídicí přenosy mezi řídicími prvky a řízenými zdroji. Tím se z řízených zdrojů stanou obyčejné (neřízené) zdroje. Vstupní signály v obvodu O' jsou $x_1, x_2, \dots, x_n, v_1, v_2, \dots, v_q$; za výstupní signály budeme považovat $y_1, y_2, \dots, y_m, w_1, w_2, \dots, w_r$. Budeme předpokládat, že volba náhradních obvodů byla provedena takovým vhodným způsobem, že řešení obvodu O' dovedeme udat.

Nakreslíme signálový graf obvodu O' na základě jeho známého řešení podle zásad vysvětlených v předchozí kapitole.

Tento graf doplníme větvemi vyjadřujícími řídicí přenosy: Existuje-li v obvodu O mezi řídicím prvkem se signálem w_k a řízeným zdrojem v_j nenulový přenos Q_{jk} , vložíme do grafu větev s tímto přenosem, která bude vycházet z uzlu w_k a končit v uzlu v_j . Budeme ještě předpokládat, že volba náhradních obvodů byla provedena tak, že v získaném grafu jsou signály v_1, v_2, \dots, v_q a w_1, w_2, \dots, w_r znázorněny vnitřními uzly. (Jiná volba náhradních obvodů by neměla praktický význam.)

Získaný graf je signálovým grafem obvodu O .

Řešením grafu kterýmkoliv známým způsobem získáme řešení obvodu O , tj. závislost výstupních signálů na signálech vstupních.

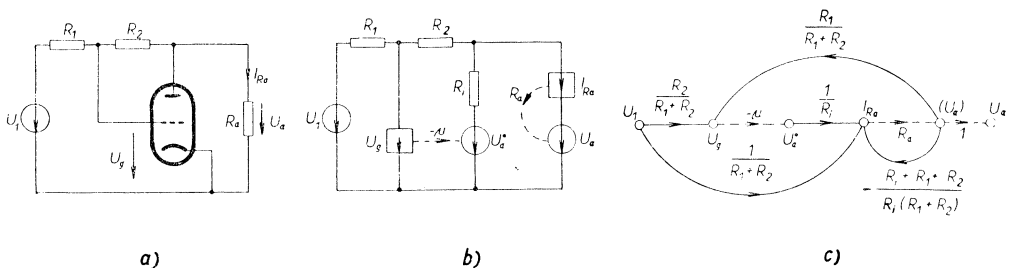
7. PŘÍKLADY

Použití obecné metody konstrukce signálových grafů, která byla popsána v předchozí kapitole, ukážeme na třech jednoduchých příkladech.

7.1 Triodový zesilovač s paralelní napětovou zpětnou vazbou. Schéma obvodu je na obr. 7a. Naším úkolem je najít zesílení, tj. přenos U_a/U_1 .

Nejdříve nakreslíme náhradní obvod. Jeden z vhodných náhradních obvodů je na obr. 7b. Trioda je znázorněna náhradním obvodem podle obr. 4a. Pracovní odpor R_a je nahrazen podle obr. 2b.

Vypuštěním řídicích přenosů vznikne obvod, který je natolik jednoduchý, že jeho řešení dovedeme bezprostředně udat. Vyjádříme je signálovým grafem podle obr. 7c (bez čárkovaných větví).



Obr. 7. Triodový zesilovač s paralelní napětovou zpětnou vazbou.

Graf doplníme čárkovanými větvemi s přenosem $-\mu, R_a$, které vyjadřují řídicí přenosy. Nakonec graf upravíme do normálního tvaru tím, že signálu U_a přiřadíme nor (značeno rovněž čárkovaně).

Řešení grafu lze provést např. užitím Masonova pravidla. Graf má dvě smyčky s přenosy

$$-\frac{\mu R_a R_1}{R_i(R_1 + R_2)}; \quad -\frac{R_a(R_i + R_1 + R_2)}{R_i(R_1 + R_2)}.$$

Uurčíme determinant grafu:

$$\Delta = 1 + \frac{\mu R_a R_1}{R_i(R_1 + R_2)} + \frac{R_a(R_i + R_1 + R_2)}{R_i(R_1 + R_2)}.$$

Ze zřídla U_1 vycházejí dvě přímé cesty končící v noru U_a . Jejich přenosy jsou

$$\frac{R_a}{R_1 + R_2}; \quad -\frac{\mu R_a R_2}{R_i(R_1 + R_2)}.$$

Poněvadž každá z cest inciduje s oběma smyčkami, je hledaný přenos roven součtu přenosů přímých cest dělenému determinantem grafu. Po jednoduché úpravě dostaneme

$$U_a = \frac{R_a(R_i - \mu R_2)}{R_a(R_i + \mu R_1) + (R_a + R_i)(R_1 + R_2)} U_1.$$

Všimněme si, že podle toho, jak volíme odpor R_2 , může být přenos záporný nulový nebo kladný.

7.2 Zatížený katodový invertor. Na obr. 8a je schéma katodového invertoru, který je zatížen impedancí Z zapojenou mezi anodu a katodu. (Tak je proveden např. fázovací čtyřpól; impedance Z je složena z odporu a kondensátoru v sérii.) Máme určit, jak závisí U_2, U_3 na U_1 .

Náhradní obvod je na obr. 8b. Tentokrát jsme použili náhradního obvodu triody podle obr. 4c.

Vypustíme řídicí přenosy a nakreslíme signálový graf podle obr. 8c (bez čárkovaných větví). Při sestavování tohoto grafu postupujeme takto:

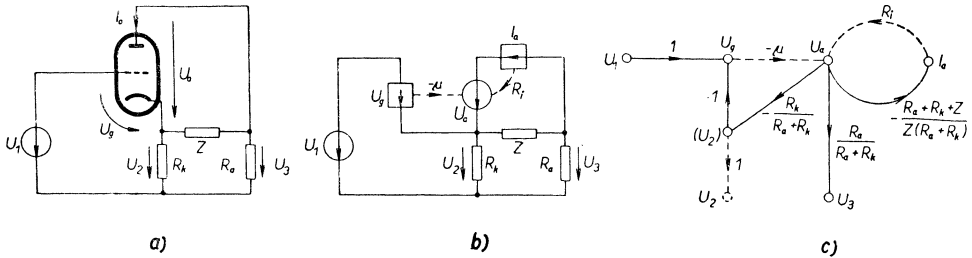
- 1) Vyjádříme závislost U_2 na U_1, U_a ,
- 2) závislost I_a na U_1, U_a ,
- 3) závislost U_3 na U_1, U_a .
- 4) Paralelně k odporu R_k připojíme zdroj o napětí U_2 . Vyjádříme závislost U_g na U_1, U_a, U_2 .

Přidáme čárkované větve vyjadřující řídicí přenosy. Graf uvedeme do normálního tvaru tím, že pro signál U_2 zřídíme nor (vyznačeno rovněž čárkovaně).

Řešením grafu dostáváme

$$U_2 = \frac{\mu R_k Z}{Z(\mu R_k + R_i) + (R_a + R_k)(R_i + Z)} U_1,$$

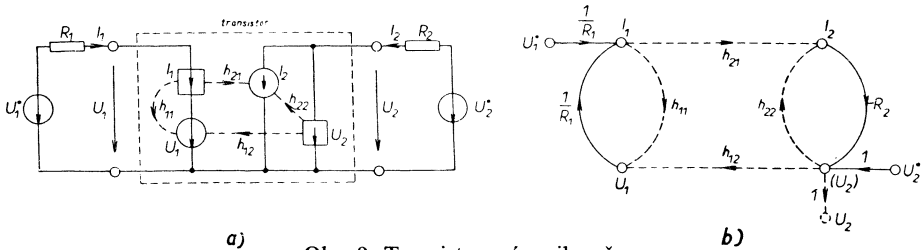
$$U_3 = - \frac{\mu R_a Z}{Z(\mu R_k + R_i) + (R_a + R_k)(R_i + Z)} U_1.$$



Obr. 8. Katodový invertor.

Z odvozených výsledků vyplývá jedna zajímavá, málo zřejmá vlastnost obvodu. Volíme-li $R_a = R_k$, dodává obvod dvě navzájem symetrická napětí při libovolné zátěži Z .

7.3 Transistorový zesilovač. Na obr. 9a je náhradní obvod transistorového zesilovače. Transistor je znázorněn náhradním obvodem podle obr. 5. Můžeme si představit, že U_1^0 je vnitřní napětí budícího zdroje, R_1 jeho vnitřní odpor, R_2 pracovní odpor transistoru, a že U_2^0 vyjadřuje kolísání napájecího napětí. Máme určit, jak závisí U_2 na U_1^0, U_2^0 .



Obr. 9. Transistorový zesilovač.

Sestrojení signálového grafu, který je na obr. 9b, je snadné a nepotřebuje výkladu.

Jeho řešením dostáváme

$$U_2 = - \frac{1}{\Delta} h_{21} \frac{R_2}{R_1} U_1^0 + \frac{1}{\Delta} \left(1 + \frac{h_{11}}{R_1} \right) U_2^0,$$

kde Δ je determinant grafu,

$$\Delta = 1 + \frac{h_{11}}{R_1} + h_{22} R_2 + \frac{R_2}{R_1} |h_{ik}|.$$

8. ZÁVĚR

Postup, který byl popsán, dovoluje jednoduše a přehledně sestrojovat signálové grafy elektrických obvodů. Poněvadž je teoreticky odůvodněný, vylučuje pochybnosti o správnosti získaného grafu.

Používání náhradních obvodů nelze považovat za nevýhodu, neboť právě značná libovůle v tom, které prvky nahradíme a jakých náhradních obvodů použijeme, dovoluje pružně se přizpůsobit povaze řešené úlohy a volit účelný způsob výpočtu.

Metoda signálových grafů, jejíž dílčí problematice byl věnován tento článek, znamená značný přínos pro analýsu elektrických obvodů, a to zejména pro řešení praktických úloh. Je proto třeba, aby jí u nás byla věnována větší pozornost než dosud.

Literatura

- [1] Tuero, M.: Metoda grafů signálových toků. Slabopr. Obz. 20 (1959), čís. 10, str. 608—615.
[2] Jelínek, V.: Řešení grafů signálových toků maticovou metodou. Aplikace matematiky 8 (1963), čís. 1, str. 55—63.

Резюме

ПОСТРОЕНИЕ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ГРАФОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЛИНЕЙНЫХ СХЕМ

ВИТ ЕЛИНЕК (Vít Jelínek)

Описывается метод, основанный на применении обобщенных эквивалентных схем. Эквивалентная схема содержит систему управляемых источников и управляющих элементов. Управляемый источник может быть одновременно управляем несколькими управляющими элементами; управляющий элемент может управлять несколькими источниками (гл. 2, рис. 1). Приведено несколько примеров типических эквивалентных схем (гл. 3).

Процесс построения графа следующий:

Образуется удобная эквивалентная схема данной схемы. После этого выпускаются все переносы между управляющими элементами и источниками. Возникнет упрощенная схема, решение которой можно сразу же написать. На основании этого решения строится по несложным правилам (гл. 5) граф упрощенной схемы. Граф дополняется ветвями, выражающими зависимость управляемых источников от управляющих элементов (гл. 6). Таким образом получится граф первоначальной схемы. На трех примерах показано практическое применение метода (гл. 7).

Summary

CONSTRUCTING SIGNAL FLOW GRAPHS OF LINEAR ELECTRIC CIRCUITS

VÍT JELÍNEK

The method described is based on generalized equivalent circuits. The equivalent circuit contains a system of controlled sources and control elements. A source may be controlled by several control elements simultaneously, and a control element may control several sources (Chap. 2, Fig. 1). Examples of some important equivalent circuits are given (Chap. 3).

The process of constructing a flow graph is as follows: An appropriate equivalent circuit of the given circuit is formed. Then the transfers from the control elements to the controlled sources are removed. In this way, a simplified circuit is obtained the solution of which can be written by inspection. Using this solution, the flow graph of the simplified circuit may be constructed according to certain simple rules (Chap. 5). To this graph there are then added branches expressing the dependence of the controlled sources upon the control elements and thus the flow graph of the original circuit is found (Chap. 6). Three illustrative examples of using this method are presented (Chap. 7).

Adresa autora: Prom. fyzik *Vít Jelínek*, Rudišova 4, Brno.