

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



Úvod

Analýza elektrických obvodů je nezbytná nejen pro výpočet obvodových veličin, ale další její funkcí je také porozumění jejich principům.

Analýza počítačovým programem přitom nepochybně představuje nejvýkonnější nástroj a to i pro syntézu obvodů a jejich optimalizaci, avšak pro vytvoření jasné představy je pak nezbytné řešení ruční, neboť platí zásada: co neprojde smysly, to není v mysli. Přitom však maticový počet je sám o sobě značně abstraktní, avšak grafové metody analýzy umožňují názornější vytvoření představy o obvodu. Ovšem co se týče výkonnosti pak analýze počítačem nemohou konkurovat v žádném případě.

Pro řešení obvodů se spínanými obvody, ať spínanými kapacitami anebo spínanými proudy existuje řada různých metod, z nichž mnohé jsou založeny na popisu obvodu rovnicemi v maticovém tvaru např. [1], [2], [3], [11], [17] aj., a jiné na popisu grafem např. [4], [12], [19] aj. Na následujících stránkách jsou popsány dvě metody, využívající pro řešení obvodů se spínanými kapacitami a proudy na rozdíl od dosud v literatuře uváděných řešení výlučně grafových konstrukcí, založených na tzv. transformačních grafech a na dvojgrafech, a to jedna pro řešení metodou uzlových nábojových rovnic a druhá metodou uzlových napětí.

Sám o sobě algebraický popis elektrického obvodu jeho parametry je natolik abstraktní, že proto někdy například admitanční matice bývá doplněna v záhlaví sloupků a řádků příslušnými veličinami [7]

$$\begin{array}{l} U_1 : \quad U_2 : \\ I_1 : \begin{array}{|c|c|} \hline y_{11} & y_{12} \\ \hline \end{array} \\ I_2 : \begin{array}{|c|c|} \hline y_{21} & y_{22} \\ \hline \end{array} \end{array} \quad (0.1)$$

popřípadě se doplní i směr [23] graficky.

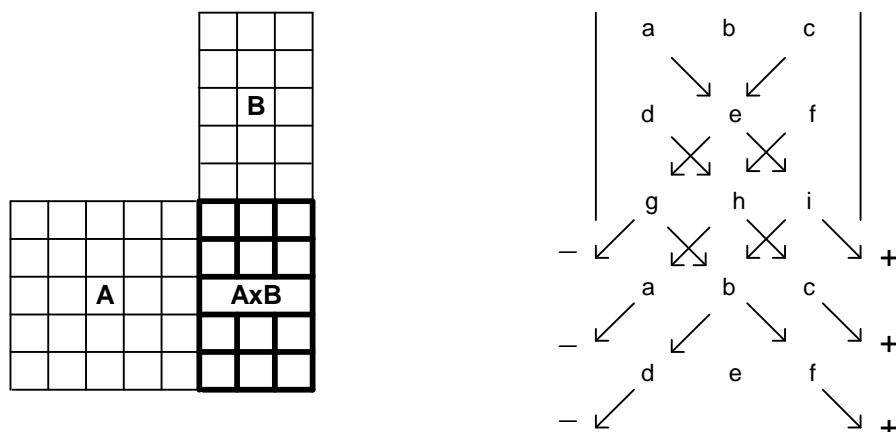
$$\begin{array}{c} \text{od} \\ \text{uzlu} \\ \downarrow \\ \begin{array}{|c|c|} \hline y_{11} & y_{12} \\ \hline y_{21} & y_{22} \\ \hline \end{array} \\ \leftarrow \\ \text{k} \\ \text{uzlu} \end{array} \quad (0.2)$$

Tento zápis (0.2) lze ovšem chápat také jako první krok na přechodu od ryze algebraického maticového popisu k popisu obvodu grafem, kdy pouhá matice (0.1) již nedokáže sama o sobě dostatečně názorně vystihnout všechny potřebné vazby, které se jí mají znázornit.

Stejně tak i pro přiblížení tak velmi jednoduché operace, jíž je násobení matic např. $\mathbf{C} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$, kdy prvky výsledné matice \mathbf{C} jsou dány vztahem (0.3)

$$c_{ik} = a_{i1} \cdot b_{1k} + a_{i2} \cdot b_{2k} + \dots + a_{in} \cdot b_{nk} = \sum_{\alpha=1}^n a_{i\alpha} \cdot b_{\alpha k} \quad (0.3)$$

se užívá různých tzv. multiplikačních schémat, které mají za účel tento relativně nepřehledný vztah graficky znázornit a tím i ozřejmit, a které však nejsou ve své podstatě ničím jiným, nežli vyjádřením matematických výrazů jednodušeji a názorněji grafy. Zcela analogicky se tak graficky ozřejmuje např. i Sarrusovo pravidlo za účelem jeho zpřehlednění. Příslušná grafická znázornění jsou na obr.0.1.



Obr.0.1 Grafické znázornění součinu dvou matic a Sarrusova pravidla

Je tudíž na zváženu, zda není na místě alespoň v některých případech se vyhnout zcela algebraickému popisu a zůstat u řešení ryze grafových.

Tím je zároveň dáno místo grafů i v popisu a v řešení elektrických obvodů.

Obecně lze tedy obvod popsat jak algebraicky, tak i graficky. Zatímco však v číslicové technice se pro popis a řešení obvodu užívá grafického znázornění běžně (například při zjednodušování Karnoughovou mapou), analýza lineárních elektrických obvodů se děje převážně cestou algebraických výpočtů, pouze pro jednoduchou analýzu obvodů nelineárních slouží grafická metoda zatěžovací přímky.

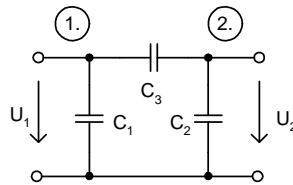
1. Transformační grafy v metodě uzlových nábojových rovnic pro řešení obvodů se spínanými kapacitami

1.1 Grafový popis obvodu s kapacitami pomocí uzlových nábojových rovnic

Popis obvodu s kapacitami metodou uzlových nábojových vychází ze vztahu (1.1) mezi nábojem Q a napětím U na kapacitoru C

$$Q = C \cdot U \quad (1.1)$$

Obvod jehož schéma zapojení je na obr.1.1 lze pak popsat následující soustavou rovnic (1.2) pro náboje jednotlivých uzlů.



Obr.1.1 Schéma pro popis obvodu metodou uzlových nábojových rovnic

$$\begin{aligned} Q_1 &= C_1 \cdot U_1 + C_3 \cdot (U_1 - U_2) \\ Q_2 &= C_2 \cdot U_2 + C_3 \cdot (U_2 - U_1) \end{aligned} \quad (1.2)$$

Za účelem grafického znázornění se tato soustava (1.2) upraví anulováním a roznásobením takže získá tvar (1.3)

$$\begin{aligned} 0 &= C_1 \cdot U_1 + C_3 \cdot U_1 - C_3 \cdot U_2 \\ 0 &= C_2 \cdot U_2 + C_3 \cdot U_2 - C_3 \cdot U_1 \end{aligned} \quad (1.3)$$

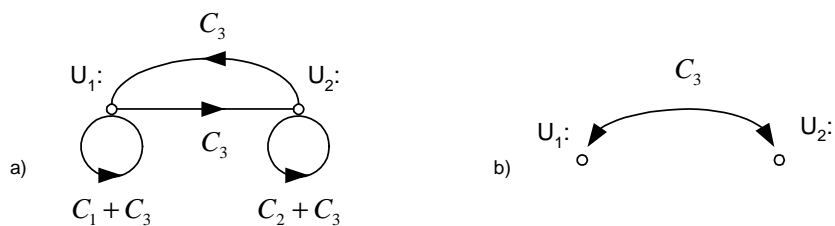
a po vytknutí napětí U_1 a U_2 tvar (1.4).

$$\begin{aligned} 0 &= (C_1 + C_3) \cdot U_1 - C_3 \cdot U_2 \\ 0 &= (C_2 + C_3) \cdot U_2 - C_3 \cdot U_1 \end{aligned} \quad (1.4)$$

Na závěr se z první rovnice vyjádří člen obsahující první napětí a ze druhé člen obsahující druhé napětí, takže soustavu lze přepsat do tvaru (1.5).

$$\begin{aligned} (C_1 + C_3) \cdot U_1 &= C_3 \cdot U_2 \\ (C_2 + C_3) \cdot U_2 &= C_3 \cdot U_1 \end{aligned} \quad (1.5)$$

První rovnici této soustavy (1.5) $(C_1 + C_3) \cdot U_1 = C_3 \cdot U_2$ lze interpretovat tak, že člen $(C_1 + C_3) \cdot U_1$ (který lze graficky znázornit vlastní smyčkou s přenosem $C_1 + C_3$ u uzlu U_1) je dán příspěvkem od uzlu U_2 o velikosti $C_3 \cdot U_2$ (což lze graficky znázornit větví vedoucí z uzlu U_2 do uzlu U_1 mající přenos C_3). Analogicky lze znázornit i druhou rovnici soustavy (1.5) $(C_2 + C_3) \cdot U_2 = C_3 \cdot U_1$ vlastní smyčkou s přenosem $C_2 + C_3$ u uzlu U_2 a větví vedoucí z uzlu U_1 do uzlu U_2 s přenosem C_3 . MC-graf reprezentující soustavu rovnic (1.5) je nakreslen na obr.1.2a. Zjednodušená forma tohoto MC-grafu, kdy se vlastní smyčky nekreslí a větve pouze naznačí obousměrnými šipkami je pak na obr.1.2b.

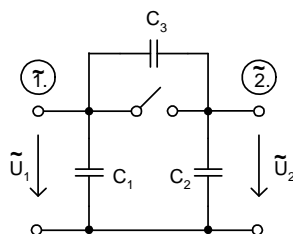


Obr.1.2 MC-graf soustavy rovnic (1.5)

Obvody se spínanými kapacitami se vyznačují tím, že obsahují kromě vlastních kapacitorů i další prvky, a to spínače a operační zesilovače.

1.2 Transformační graf spínače

Spínač nelze popsat kapacitou, takže v obvodu popisovaném metodou uzlových nábojových rovnic se chová jako neregulární prvek, vyvolávající svým sepnutím ztotožnění uzlů, mezi nimiž je zapojen.



Obr.1.3 Schéma obvodu se spínačem

Soustava uzlových nábojových rovnic popisující obvod z obr.1.3 před sepnutím má následující tvar (1.6)

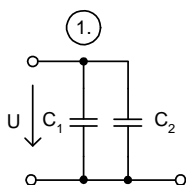
$$\begin{aligned} \tilde{Q}_1 &= C_1 \cdot \tilde{U}_1 + C_3 \cdot (\tilde{U}_1 - \tilde{U}_2) \\ \tilde{Q}_2 &= C_2 \cdot \tilde{U}_2 + C_3 \cdot (\tilde{U}_2 - \tilde{U}_1) \end{aligned} \quad (1.6)$$

a lze ji upravit na (1.7).

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_1 &= (C_1 + C_3) \cdot \tilde{U}_1 - C_3 \cdot \tilde{U}_2 \\ \tilde{Q}_2 &= (C_2 + C_3) \cdot \tilde{U}_2 - C_3 \cdot \tilde{U}_1 \end{aligned} \quad (1.7)$$

Po sepnutí spínače dojde ke ztotožnění uzlů $\tilde{1}$ a $\tilde{2}$ na jediný uzel 1, takže schéma zapojení získá tvar nakreslený na obr.1.4, které lze popsat jedinou rovnicí (1.8).

$$Q = (C_1 + C_2) \cdot U \quad (1.8)$$



Obr.1.4 Schéma obvodu po sepnutí spínače

Přitom však každé z původních napětí \tilde{U}_1 a \tilde{U}_2 neseprnutého obvodu lze vyjádřit pomocí napětí U obvodu seprnutého rovnicemi (1.9).

$$\begin{aligned}\tilde{U}_1 &= U \\ \tilde{U}_2 &= U\end{aligned}\tag{1.9}$$

které lze přepsat do tvaru (1.10)

$$\begin{aligned}\tilde{U}_1 &= 1.U \\ \tilde{U}_2 &= 1.U\end{aligned}\tag{1.10}$$

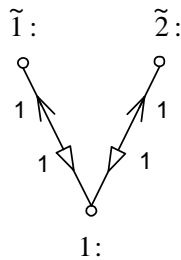
Výsledný náboj sepnutého obvodu bude dán součtem nábojů obou kapacitorů C_1 a C_2 obou uzlů (kapacitor C_3 je sepnutým spínačem nyní zkratován), takže pro tento celkový náboj Q platí rovnice (1.11).

$$Q = \tilde{Q}_1 + \tilde{Q}_2 = 1.\tilde{Q}_1 + 1.\tilde{Q}_2\tag{1.11}$$

Soustavu takto získaných tzv. transformačních rovnic (1.10) a (1.11), souhrnně (1.12)

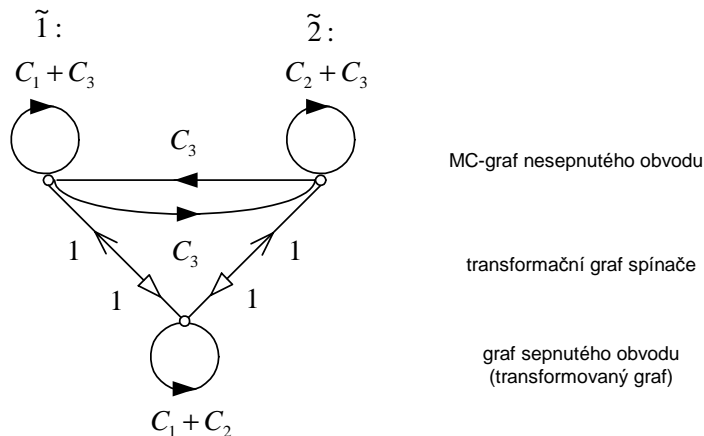
$$\begin{aligned}\tilde{U}_1 &= 1.U \\ \tilde{U}_2 &= 1.U \\ Q &= 1.\tilde{Q}_1 + 1.\tilde{Q}_2\end{aligned}\tag{1.12}$$

Lze nyní znázornit tzv. transformačním grafem spínače, který je nakreslen na obr.1.5, ve kterém šipka \Rightarrow přísluší koeficientům u napětí, tj.přenosu napětí a šipka \rightarrow koeficientům u nábojů, tj. přenosu náboje.



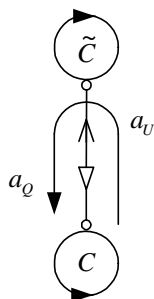
Obr.1.5 Transformační graf spínače

Porovnáním výchozí soustavy rovnic (1.7) a výsledné rovnice (1.8) s jejich grafickým znázorněním MC-grafem, který je na obr.1.6 lze pak snadno nalézt pravidlo pro vyhodnocení transformačního grafu.



Obr.1.6 Graf sepnutého a nesepnutého obvodu

Protože obecně lze rovnici (1.11) zapsat ve tvaru $Q = a_Q \cdot \tilde{Q}$ a rovnice (1.10) jako $\tilde{U} = a_U \cdot U$, bude po dosazení $Q = a_Q \cdot \tilde{Q} = a_Q \cdot \tilde{C} \cdot \tilde{U} = a_Q \cdot \tilde{C} \cdot a_U \cdot U = C \cdot U$ takže odsud je $a_Q \cdot \tilde{C} \cdot a_U = C$ čili transformovaný prvek C je dán vztahem $a_Q \cdot \tilde{C} \cdot a_U$, což je graficky znázorněno na obr.1.7, (resp. obecně $\sum a_Q \cdot \tilde{C} \cdot a_U$ pro více větví, jak plyne také i z obr.1.6).



Obr.1.7 K nalezení transformované kapacity

Protože však prvek C_3 se ve výsledku $C_1 + C_2$ nevyskytuje, je třeba, aby se v součtu $\sum a_Q \cdot \tilde{C} \cdot a_U$ objevil se záporným znaménkem. Proto se vztah rozšíří činitelem α na výsledný tvar (1.13),

$$a_Q \cdot \tilde{C} \cdot a_U \cdot \alpha = C \quad (1.13)$$

přičemž $\alpha = -1$, pokud větev přechází transformací na vlastní smyčku anebo naopak. Jinak je $\alpha = +1$. Uvedený postup umožňuje vyhnout se maticím popsaným v [5].

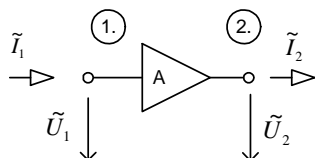
1.3 Transformační graf operačního zesilovače

1.3.1 Transformační graf zesilovače

Za účelem nalezení transformačního grafu operačního zesilovače se uvažuje obvod, popsaný soustavou rovnic (1.14), sestavených na základě I.Kirchhoffova zákona,

$$\begin{aligned} \tilde{I}_1 &= y_{11} \cdot \tilde{U}_1 + y_{12} \cdot \tilde{U}_2 \\ \tilde{I}_2 &= y_{21} \cdot \tilde{U}_1 + y_{22} \cdot \tilde{U}_2 \end{aligned} \quad (1.14)$$

k němuž se připojí zesilovač, jehož schéma zapojení je na obr.1.8 a jehož činnost je popsána rovnicemi $\tilde{U}_2 = A \cdot \tilde{U}_1$ a $\tilde{I}_2 = a \cdot \tilde{I}_1$, kde A označuje napět'ové a a proudové zesílení.



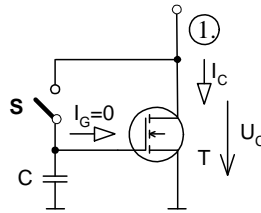
Obr.1.8 Schéma obecného zesilovače

Z rovnice pro napět'ové zesílení po jejím úpravě do tvaru (1.15), kdy je vyjádřeno vstupní napětí \tilde{U}_1 (což je nutné, protože vlivem nekonečně velkého napět'ového zesílení A operačního zesilovače nabývá pouze rovnice tohoto tvaru konečných hodnot), plyne že

$$\tilde{U}_1 = \frac{1}{A} \cdot U_2 \quad (1.15)$$

3 Transformační grafy v obvodech se spínanými proudy

Základním stavebním prvkem obvodů se spínanými proudy je tzv. paměťová proudová buňka (např. podle [17], [23], [24]), jejíž schéma je na obr. 3.1 a která obsahuje unipolární tranzistor T, kapacitor C a spínač S.



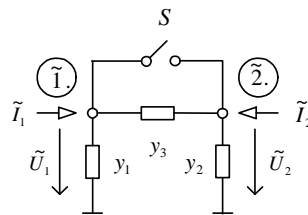
Obr.3.1 Schéma paměťové buňky obvodu se spínanými proudy

Pro grafové řešení obvodu složeného z takovýchto buněk je tedy nutno najít příslušné grafy výše uvedených základních prvků.

3.1 Transformační graf spínače

3.1.1 Konstrukce transformačního grafu spínače

Obvod se spínačem může mít jednoduché schéma zapojení, obsahující tři admitance a jeden spínač, které je na obr.3.2. Ideální spínač má v rozepnutém stavu nulovou vodivost, v sepnutém stavu pak vodivost nekonečnou. Z hlediska metody uzlových napětí se chová jako neregulární prvek, který nelze znázornit MC-grafem.

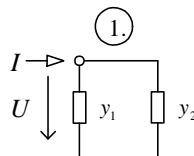


Obr.3.2 Schéma obvodu se spínačem

Avšak celý obvod z obr.3.2 lze již popsat soustavou rovnic (3.1), sestavenou na základě I.Kirchhoffova zákona.

$$\begin{aligned} \tilde{I}_1 &= y_1 \cdot \tilde{U}_1 + y_3 \cdot (\tilde{U}_1 - \tilde{U}_2) \\ \tilde{I}_2 &= y_2 \cdot \tilde{U}_2 + y_3 \cdot (\tilde{U}_2 - \tilde{U}_1) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Sepnutím spínače dojde ke zkratování admitance y_3 , neboť uzly $\tilde{1}$ a $\tilde{2}$ jsou nyní spojeny. Obvod má nyní jediný uzel 1, a jeho schéma zapojení je na obr.3.3.



Obr.3.3 Schéma obvodu po sepnutí spínače

Popis obvodu bude nyní tvořit jediná rovnice (3.2).

$$I = (y_1 + y_2) \cdot U \quad (3.2)$$

Spojení uzlů vyvolá i ztotožnění napětí \tilde{U}_1 a \tilde{U}_2 na jediné napětí U , což lze popsat soustavou rovnic (3.3).

$$\begin{aligned}\tilde{U}_1 &= U \\ \tilde{U}_2 &= U\end{aligned}\tag{3.3}$$

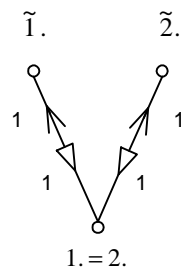
Proud I je nyní popsán rovnicí (3.4).

$$I = \tilde{I}_1 + \tilde{I}_2\tag{3.4}$$

Soustavu rovnic (3.3) a (3.4) lze přepsat jako transformační rovnice spínače (3.5).

$$\begin{aligned}\tilde{U}_1 &= 1.U \\ \tilde{U}_2 &= 1.U \\ I &= 1.\tilde{I}_1 + 1.\tilde{I}_2\end{aligned}\tag{3.5}$$

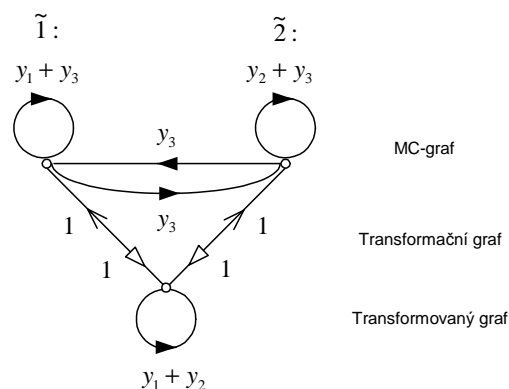
Tato soustava transformačních rovnic (3.5) může být znázorněna i graficky jako napět'ový transformační graf a proudový transformační graf, celkově transformační graf (tj. T-graf), který je nakreslen na obr.3.4. Větve transformačního grafu s přenosem napětí jsou označeny \Rightarrow a větve s přenosem proudu \rightarrow .



Obr.3.4 Transformační graf spínače

3.1.2 Vyhodnocení transformačního grafu spínače

Algoritmus vyhodnocení transformačního grafu lze opět snadno najít porovnáním MC-grafu před a po transformaci. Tyto grafy jsou na obr.3.5, kde MC-graf znázorňující soustavu rovnic (3.1) před sepnutím spínače je v horní části a MC-graf znázorňující rovnici po transformaci (3.2), tj. transformovaný graf, je dole.



Obr.3.5 K vyhodnocení transformačního grafu

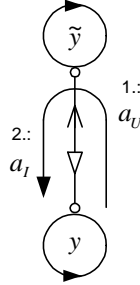
Protože rovnice (3.1), (3.2) a (3.5) mohou být zapsány v obecném tvaru např. (3.6)

$$\tilde{I} = \tilde{y}.\tilde{U}, \quad I = y.U, \quad I = a_I.\tilde{I}, \quad \tilde{U} = a_U.U\tag{3.6}$$

lze dosazením získat vztah (3.7).

$$I = a_I \tilde{I} = a_I \tilde{y} \tilde{U} = a_I \tilde{y} a_U U = y U \quad (3.7)$$

Výsledná admitance po transformaci je tedy dána vztahem $a_I \tilde{y} a_U = y$ jehož interpretace je taková, že výsledná transformovaná vodivost y se získá vynásobením členu a_U (jemuž odpovídá přenos větve napětí, jelikož jde o veličinu bezrozměrnou) se členem \tilde{y} (jemuž odpovídá výchozí admitance) a členu a_I (jemuž odpovídá přenos větve proudu, jelikož jde o veličinu bezrozměrnou) a který může být znázorněn graficky, což je ukázáno na obr.3.6.



Obr.3.6 Graf rovnice $a_I \tilde{y} a_U = y$

Výsledek transformovaného grafu na obr.3.5 je $y_1 + y_2$ a chybí v něm tedy admitance y_3 . Aby se tato admitance ze součtu $(y_1 + y_3) + (y_2 + y_3)$ získaného aplikací vztahu $a_I \tilde{y} a_U = y$ vyloučila je nezbytné, aby přenos větví y_3 byl brán se záporným znaménkem.

Pak bude totiž platit :

$$y = \sum a_I \tilde{y} a_U \alpha = (1 \cdot y_1 \cdot 1 \cdot 1 + 1 \cdot y_3 \cdot 1 \cdot 1) + (1 \cdot y_2 \cdot 1 \cdot 1 + 1 \cdot y_3 \cdot 1 \cdot 1) + 1 \cdot y_3 \cdot 1 \cdot (-1) + 1 \cdot y_3 \cdot 1 \cdot (-1) = y_1 + y_2$$

Vztah $a_I \tilde{y} a_U = y$ je tedy nutno rozšířit o koeficient α do tvaru (3.8)

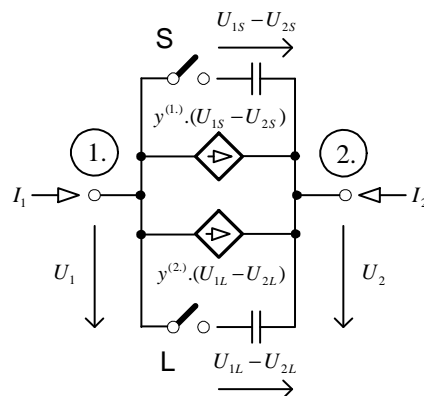
$$a_I \tilde{y} a_U \alpha = y \quad (3.8)$$

přičemž $\alpha = -1$ pokud se větev mění na vlastní smyčku anebo naopak. V ostatních případech pak je $\alpha = +1$.

3.2 Konstrukce sumárního MC-grafu z transformačních grafů

3.2.1 Popis obecného obvodu se spínanými proudy metodou uzlových napětí

Jednoduchý obvod se spínanými proudy v němž aktivní prvky jsou reprezentovány zdroji proudu o velikosti $y^{(i)} U_i$ řízenými napětími U_i může mít schéma zapojení, které je nakresleno na obr.3.7.



Obr.3.7 Schéma obvodu se spínanými proudy s řízenými zdroji

Tento obvod lze popsat rovnicemi (3.9) sestavenými na základě I.Kirchhoffova zákona pro oba dva uzly v jednotlivých fázích spínání S a L pro aktuální čas t .

$$\begin{aligned}
 I_{1S}(t) &= y_{21}^{(1)} \cdot [U_{1S}(t) - U_{2S}(t)] + y_{21}^{(2)} \cdot (U_{1L} - U_{2L}) \\
 I_{2S}(t) &= -y_{21}^{(1)} \cdot [U_{1S}(t) - U_{2S}(t)] - y_{21}^{(2)} \cdot (U_{1L} - U_{2L}) \\
 I_{1L}(t) &= y_{21}^{(1)} \cdot (U_{1S} - U_{2S}) + y_{21}^{(2)} \cdot [U_{1L}(t) - U_{2L}(t)] \\
 I_{2L}(t) &= -y_{21}^{(1)} \cdot (U_{1S} - U_{2S}) - y_{21}^{(2)} \cdot [U_{1L}(t) - U_{2L}(t)]
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Tuto soustavu rovnic lze po roznásobení přepsat do tvaru (3.10)

$$\begin{aligned}
 I_{1S}(t) &= +y_{21}^{(1)} \cdot U_{1S}(t) - y_{21}^{(1)} \cdot U_{2S}(t) + y_{21}^{(2)} \cdot U_{1L} - y_{21}^{(2)} \cdot U_{2L} \\
 I_{2S}(t) &= -y_{21}^{(1)} \cdot U_{1S}(t) + y_{21}^{(1)} \cdot U_{2S}(t) - y_{21}^{(2)} \cdot U_{1L} + y_{21}^{(2)} \cdot U_{2L} \\
 I_{1L}(t) &= +y_{21}^{(1)} \cdot U_{1S} - y_{21}^{(1)} \cdot U_{2S} + y_{21}^{(2)} \cdot U_{1L}(t) - y_{21}^{(2)} \cdot U_{2L}(t) \\
 I_{2L}(t) &= -y_{21}^{(1)} \cdot U_{1S} + y_{21}^{(1)} \cdot U_{2S} - y_{21}^{(2)} \cdot U_{1L}(t) + y_{21}^{(2)} \cdot U_{2L}(t)
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Pokud se nyní vyjádří rozdíl mezi sudou a lichou fází aplikací Z-transformace, tedy násobením operátorem $z^{-\frac{1}{2}}$, lze soustavu rovnic (3.10) přepsat do tvaru (3.11).

$$\begin{aligned}
 I_{1S} &= +y_{21}^{(1)} \cdot U_{1S} - y_{21}^{(1)} \cdot U_{2S} + z^{-\frac{1}{2}} y_{21}^{(2)} \cdot U_{1L} - z^{-\frac{1}{2}} y_{21}^{(2)} \cdot U_{2L} \\
 I_{2S} &= -y_{21}^{(1)} \cdot U_{1S} + y_{21}^{(1)} \cdot U_{2S} - z^{-\frac{1}{2}} y_{21}^{(2)} \cdot U_{1L} + z^{-\frac{1}{2}} y_{21}^{(2)} \cdot U_{2L} \\
 I_{1L} &= +z^{-\frac{1}{2}} y_{21}^{(1)} \cdot U_{1S} - z^{-\frac{1}{2}} y_{21}^{(1)} \cdot U_{2S} + y_{21}^{(2)} \cdot U_{1L} - y_{21}^{(2)} \cdot U_{2L} \\
 I_{2L} &= -z^{-\frac{1}{2}} y_{21}^{(1)} \cdot U_{1S} + z^{-\frac{1}{2}} y_{21}^{(1)} \cdot U_{2S} - y_{21}^{(2)} \cdot U_{1L} + y_{21}^{(2)} \cdot U_{2L}
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

Konečně po anulování se soustava rovnic (3.11) přepíše do obecného tvaru v němž se admitance označí y_{ij} , čímž získá tvar (3.12).

$$\begin{aligned}
 0 &= +y_{11} \cdot U_{1S} - y_{12} \cdot U_{2S} + z^{-\frac{1}{2}} y_{13} \cdot U_{1L} - z^{-\frac{1}{2}} y_{14} \cdot U_{2L} \\
 0 &= -y_{21} \cdot U_{1S} + y_{22} \cdot U_{2S} - z^{-\frac{1}{2}} y_{23} \cdot U_{1L} + z^{-\frac{1}{2}} y_{24} \cdot U_{2L} \\
 0 &= +z^{-\frac{1}{2}} y_{31} \cdot U_{1S} - z^{-\frac{1}{2}} y_{32} \cdot U_{2S} + y_{33} \cdot U_{1L} - y_{34} \cdot U_{2L} \\
 0 &= -z^{-\frac{1}{2}} y_{41} \cdot U_{1S} + z^{-\frac{1}{2}} y_{42} \cdot U_{2S} - y_{43} \cdot U_{1L} + y_{44} \cdot U_{2L}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Z první rovnice se vyjádří první člen $y_{11} \cdot U_{1S}$ obsahující první proměnnou tj. U_{1S} , ze druhé druhý člen $y_{22} \cdot U_{2S}$ obsahující druhou proměnnou U_{2S} , ze třetí člen $y_{33} \cdot U_{1L}$ a ze čtvrté člen $y_{44} \cdot U_{2L}$, čímž soustava získá tvar (3.13).

$$\begin{aligned}
 y_{11} \cdot U_{1S} &= y_{12} \cdot U_{2S} - z^{-\frac{1}{2}} y_{13} \cdot U_{1L} + z^{-\frac{1}{2}} y_{14} \cdot U_{2L} \\
 y_{22} \cdot U_{2S} &= y_{21} \cdot U_{1S} + z^{-\frac{1}{2}} y_{23} \cdot U_{1L} - z^{-\frac{1}{2}} y_{24} \cdot U_{2L} \\
 y_{33} \cdot U_{1L} &= -z^{-\frac{1}{2}} y_{31} \cdot U_{1S} + z^{-\frac{1}{2}} y_{32} \cdot U_{2S} + y_{34} \cdot U_{2L} \\
 y_{44} \cdot U_{2L} &= +z^{-\frac{1}{2}} y_{41} \cdot U_{1S} - z^{-\frac{1}{2}} y_{42} \cdot U_{2S} + y_{43} \cdot U_{1L}
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Tento zápis lze upravit do tvaru (3.14).

$$\begin{aligned}
 y_{11} \cdot U_{1S} &= y_{12} \cdot U_{2S} + \left[-z^{-\frac{1}{2}} y_{23} \cdot U_{1L} + z^{-\frac{1}{2}} y_{24} \cdot U_{2L} \right] \\
 y_{22} \cdot U_{2S} &= y_{21} \cdot U_{1S} + \left[z^{\frac{1}{2}} y_{23} \cdot U_{1L} - z^{\frac{1}{2}} y_{24} \cdot U_{2L} \right] \\
 y_{33} \cdot U_{1L} &= y_{34} \cdot U_{2L} + \left[-z^{-\frac{1}{2}} y_{31} \cdot U_{1S} + z^{-\frac{1}{2}} y_{32} \cdot U_{2S} \right] \\
 y_{44} \cdot U_{2L} &= y_{43} \cdot U_{1L} + \left[z^{\frac{1}{2}} y_{41} \cdot U_{1S} - z^{\frac{1}{2}} y_{42} \cdot U_{2S} \right]
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

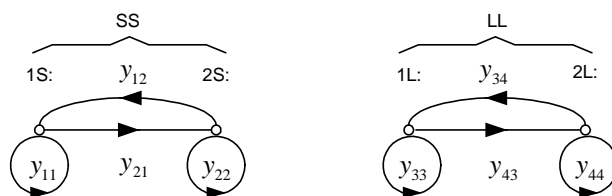
3.2.2 Konstrukce sumárního MC-grafu

Na základě platnosti principu superpozice lze nyní soustavu (3.14) rozdělit na dvě soustavy následovně: Části této soustavy rovnic (3.14) které neobsahují člen $z^{\frac{1}{2}}$, a reprezentují proto přenos ve fázích SS a LL, a to sice následující rovnice (3.15)

$$\begin{aligned}
 y_{11} \cdot U_{1S} &= y_{12} \cdot U_{2S} & y_{33} \cdot U_{1L} &= y_{34} \cdot U_{2L} \\
 y_{22} \cdot U_{2S} &= y_{21} \cdot U_{1S} & y_{44} \cdot U_{2L} &= y_{43} \cdot U_{1L}
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

Lze již snadno znázornit MC-grafy. Konstrukce těchto MC-grafů odpovídajících rovnicím (3.14) je následující:

Z prvních rovnic je vyjádřen první člen a ze druhých člen druhý. Grafická interpretace například první z rovnic (3.15) je taková, že člen $y_{11} \cdot U_{1S}$ (který je reprezentován vlastní smyčkou s přenosem y_{11} u uzlu 1S) je dán příspěvkem od uzlu 2S o velikosti $y_{12} \cdot U_{2S}$ (takže větve vedoucí z uzlu 2S do uzlu 1S má přenos y_{12}). Analogicky lze interpretovat i rovnice další, takže výsledný MC-graf soustavy rovnic (3.15) má tvar, který je na obr.3.8.



Obr.3.8 Graf soustavy rovnic (3.14)

Na základě platnosti principu superpozice kdy výsledný účinek je dán součtem účinků jednotlivých zdrojů působících samostatně, pak proto aby vznikla soustava rovnic (3.14), zbývá nyní přidat k soustavě rovnic (3.15) ještě soustavu rovnic (3.16).

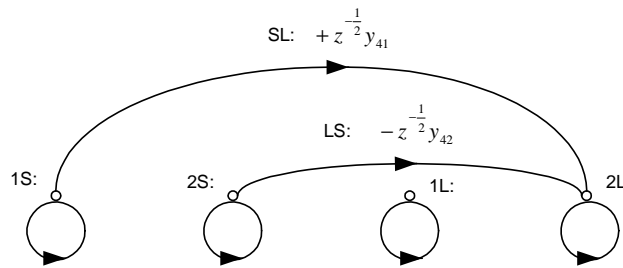
$$\begin{aligned}
 y_{11} \cdot U_{1S} &= -z^{-\frac{1}{2}} y_{13} \cdot U_{1L} + z^{-\frac{1}{2}} y_{14} \cdot U_{2L} \\
 y_{22} \cdot U_{2S} &= +z^{\frac{1}{2}} y_{23} \cdot U_{1L} - z^{\frac{1}{2}} y_{24} \cdot U_{2L} \\
 y_{33} \cdot U_{1L} &= -z^{-\frac{1}{2}} y_{31} \cdot U_{1S} + z^{-\frac{1}{2}} y_{32} \cdot U_{2S} \\
 y_{44} \cdot U_{2L} &= +z^{\frac{1}{2}} y_{41} \cdot U_{1S} - z^{\frac{1}{2}} y_{42} \cdot U_{2S}
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

Například poslední rovnice z této soustavy rovnic (3.16) má tvar (3.17)

$$y_{44} \cdot U_{2L} = +z^{-\frac{1}{2}} y_{41} \cdot U_{1S} - z^{-\frac{1}{2}} y_{42} \cdot U_{2S} \quad (3.17)$$

a její grafová interpretace je následující:

Příspěvek od uzlu 1S k uzlu 2L je dán členem $z^{-\frac{1}{2}} y_{41} \cdot U_{1S}$ (což znamená, že přenos větve y_{41} vedoucí z uzlu 1S do uzlu 2L je vynásoben členem $z^{-\frac{1}{2}}$) a členem $-z^{-\frac{1}{2}} y_{42} \cdot U_{2S}$ (což znamená, že přenos větve y_{42} vedoucí z uzlu 2S do uzlu 2L je vynásoben členem $-z^{-\frac{1}{2}}$). Odpovídající graf je na obr.3.9.

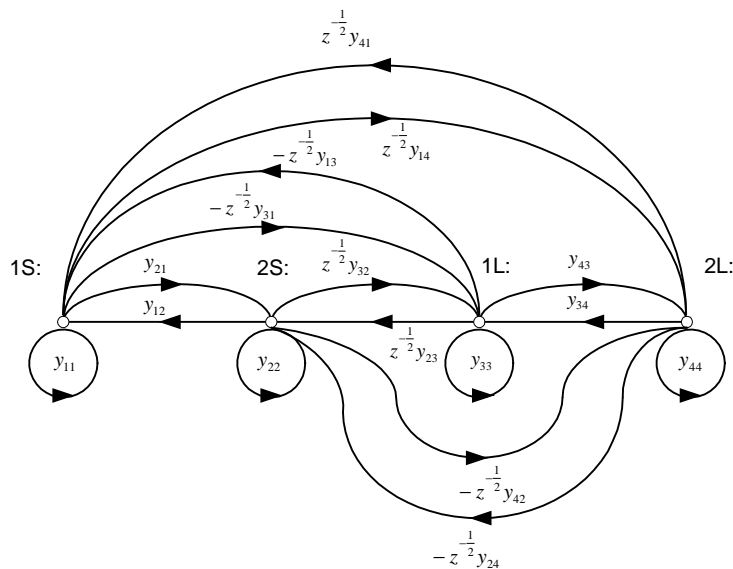


Obr.3.9 Graf rovnice (3.17) $y_{44} \cdot U_{2L} = z^{-1/2} \cdot y_{41} \cdot U_{1S} - z^{-1/2} \cdot y_{42} \cdot U_{2S}$

Zcela analogicky lze interpretovat i zbývající rovnice ze soustavy (3.16).

Na základě toho lze tedy zobecnit, že přenos větve z opačné fáze popisující příspěvek od stejnojmenného uzlu se násobí členem $-z^{-\frac{1}{2}}$, zatímco příspěvek od nestejnojmenného uzlu se násobí členem $+z^{-\frac{1}{2}}$.

Výsledný sumární MC-graf soustavy rovnic (3.14) je podle výše uvedených pravidel nakreslen na obr.3.10.



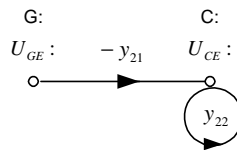
Obr.3.10 Graf soustavy rovnic (3.14)

3.2.3 MC-graf unipolárního tranzistoru

Protože podle obr.3.1 je vstupní proud unipolárního tranzistoru I_G nulový, lze unipolární tranzistor popsat pouze jedinou rovnicí $I_C = y_{21} \cdot U_{GE} + y_{22} \cdot U_{CE}$, která po anulování získá tvar $0 = y_{21} \cdot U_{GE} + y_{22} \cdot U_{CE}$ takže ji lze přepsat do tvaru (3.18)

$$y_{22} \cdot U_{CE} = -y_{21} \cdot U_{GE} \quad (3.18)$$

který lze interpretovat tak, že člen $y_{22} \cdot U_{CE}$ (jemuž odpovídá vlastní smyčka s přenosem y_{22} u uzlu U_{CE}) je dán příspěvkem od uzlu U_{GE} o velikosti $-y_{21} \cdot U_{GE}$ (takže větev vedoucí z uzlu U_{GE} do uzlu U_{CE} má přenos $-y_{21}$). Popsaná konstrukce je znázorněna MC-grafem na obr.3.11.



Obr.3.11 MC-graf unipolárního tranzistoru (rovnice $y_{22} \cdot U_{CE} = -y_{21} \cdot U_{GE}$)

3.2.4 Rozšíření sumárního MC-grafu pro výpočet přenosů proudů

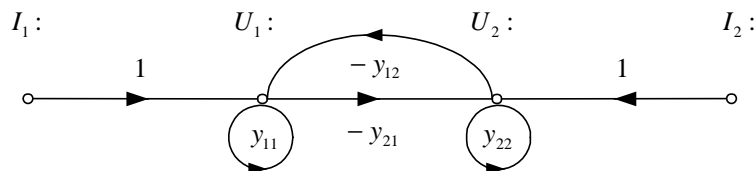
Dvojbran lze obecně popsat soustavou rovnic (3.19) sestavenou na základě platnosti 2.Kirchhoffova zákona,

$$\begin{aligned} I_1 &= y_{11} \cdot U_1 + y_{12} \cdot U_2 \\ I_2 &= y_{21} \cdot U_1 + y_{22} \cdot U_2 \end{aligned} \quad (3.19)$$

kterou lze přepsat do tvaru

$$\begin{aligned} y_{11} \cdot U_1 &= -y_{12} \cdot U_2 + I_1 \\ y_{22} \cdot U_2 &= -y_{21} \cdot U_1 + I_2 \end{aligned} \quad (3.20)$$

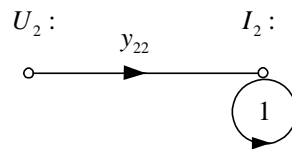
a např. druhou rovnici lze interpretovat tak, že napětí U_2 po vynásobení členem y_{22} je dáno příspěvkem od napětí U_1 o velikosti $-y_{21} \cdot U_1$ a příspěvkem od proudu I_2 o velikosti $1 \cdot I_2$, což lze graficky znázornit vlastní smyčkou s přenosem y_{22} u uzlu U_2 , dále větví vedoucí z uzlu U_1 do uzlu U_2 s přenosem o hodnotě $-y_{21}$ a větví z uzlu I_2 do uzlu U_2 s přenosem 1. Rovnice (3.19) resp. (3.20) lze tedy znázornit MC-grafem, který je nakreslen na obr.3.12.



Obr.3.12 Graf dvojbranu popsaného y-parametry

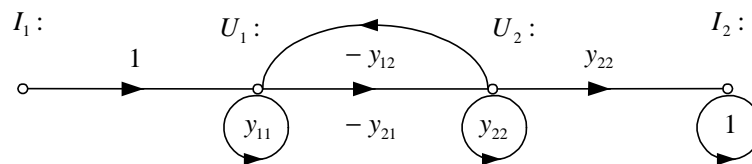
Tento graf obsahuje proudy, takže takovéto konstrukce lze již využít pro stanovení také proudových přenosů. Vstupní proud I_1 může být znázorněn buďto uzlem I_1 a větev vedoucí do uzlu U_1 se pak ohodnotí jedničkou, anebo se vstupní uzel ohodnotí jedničkou a větev vedoucí ze vstupního uzlu do uzlu U_1 pak musí mít přenos I_1 , čehož se využije zejména tehdy, bude-li mít obvod se spínanými proudy více vstupů.

Výstupní proud I_2 je popsán rovnicí $I_2 = y_{21} \cdot U_1 + y_{22} \cdot U_2$, souvislost mezi I_2 a U_2 je dána vztahem $I_2 = y_{22} \cdot U_2$, resp. $1 \cdot I_2 = y_{22} \cdot U_2$. Ten lze interpretovat tak, že člen $1 \cdot I_2$ (jemuž odpovídá vlastní smyčka u uzlu I_2) je dán příspěvkem od uzlu U_2 o velikosti $y_{22} \cdot U_2$ (jemuž odpovídá větev vedoucí z uzlu U_2 do uzlu I_2 s přenosem y_{22}). Tato konstrukce je znázorněna na obr.3.13.



Obr.3.13 MC-graf rovnice $1 \cdot I_2 = y_{22} \cdot U_2$

Doplněním této větve z obr.3.13 získá nyní MC-graf tvar který je na obr.3.14 a který lze již použít pro výpočet přenosu proudů $\frac{I_2}{I_1}$ aplikací Masonova vztahu $\frac{I_2}{I_1} = \frac{\sum P_{(i)} \cdot \Delta_{(i)}}{V - \sum S^{(K)} V^{(K)}}$.



Obr.3.14 MC-graf vhodný pro výpočet přenosu proudů

V tomto případě konkrétně bude mít Masonův vztah po dosažení tvar (3.21).

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\sum P_{(i)} \cdot \Delta_{(i)}}{V - \sum S^{(K)} V^{(K)}} = \frac{1(-y_{21})y_{22}}{y_{11} \cdot y_{22} \cdot 1 - (-y_{21}) \cdot (-y_{12}) \cdot 1} \quad (3.21)$$

3.2.5 Pravidla pro konstrukci sumárního MC-grafu obvodu se spínanými proudy na základě transformačních grafů

Na základě schématu zapojení se nejprve zakreslí MC-graf analyzovaného obvodu.

S využitím transformačních grafů spínačů se sestrojí transformované grafy pro každou ze čtyř fází spínání, tj. pro fáze SS, LL, SL a LS.

Překreslí se transformované grafy pro fáze spínání SS a LL.

Mezi uzly těchto grafů se zakreslí větve s přenosy získanými transformačními grafy pro fáze spínání SL a LS, přičemž přenosy větví mezi stejnojmennými uzly se navíc vynásobí členy $-z^{-\frac{1}{2}}$ a přenosy větví mezi nestejnojmennými uzly se navíc vynásobí členy $+z^{-\frac{1}{2}}$.

Graf se doplní větví s přenosem 1 vedoucí z uzlu I_{VST} do vstupního uzlu a větví vedoucí z výstupního uzlu do uzlu I_{VYST} s přenosem rovným přenosu vlastní smyčky y_{ZZ} u výstupního uzlu.

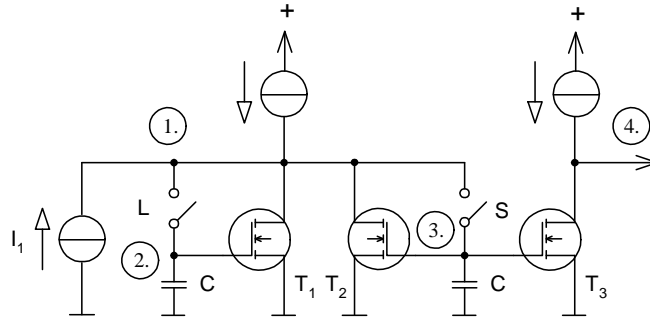
Z takto rozšířeného grafu se přenos proudů vypočte užitím Masonova pravidla.

3.3 Příklady řešení obvodu se spínanými proudy

Vlastní aplikace sumárního grafu na řešení obvodu se spínanými proudy bude ukázána na následujících příkladech.

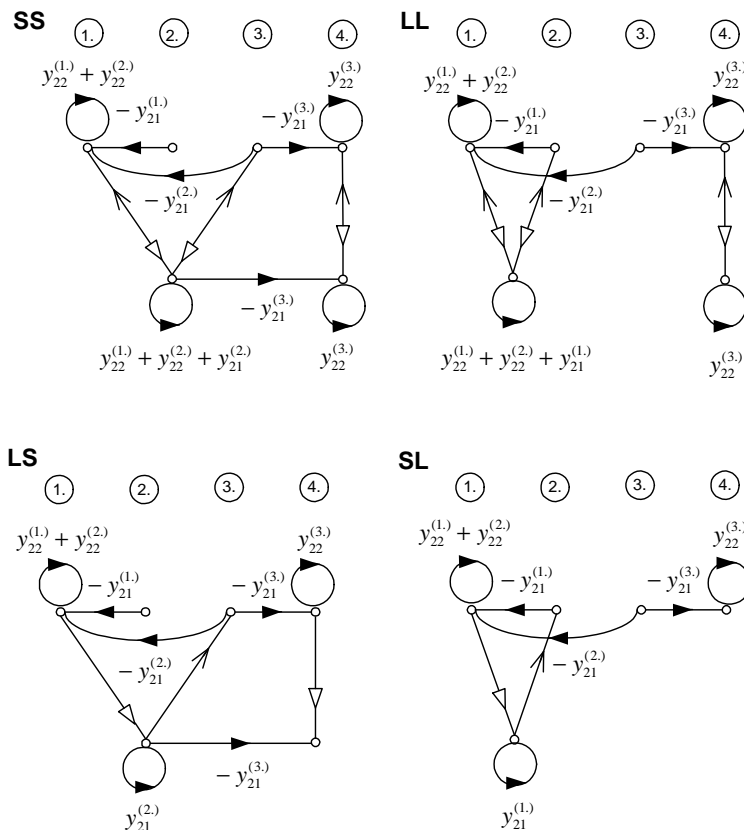
3.3.1 Řešení ztrátového integrátoru

Ztrátovému integrátoru, jehož schéma je na obr.3.15, buzenému proudy I_{1S} a I_{1L} se mají najít přenosy proudů $\frac{I_{4S}}{I_{1S}}$, $\frac{I_{4L}}{I_{1S}}$, $\frac{I_{4S}}{I_{1L}}$ a $\frac{I_{4L}}{I_{1L}}$.



Obr.3.15 Schéma zapojení k příkladu

Při řešení obvodu se nejprve zakreslí Masonův graf podle obr.3.16. Protože obvod má čtyři uzly, má čtyři uzly i jeho graf. Do uzlů, kam jsou zapojeny kolektory tranzistorů se zakreslí vlastní smyčky odpovídající výstupním vodivostem tranzistorů y_{22} a mezi uzly kde jsou hradla a kolektory tranzistorů se zakreslí větve, reprezentující příslušnými přenosy $-y_{21}$ jednotlivé tranzistory. Horní index i v závorkách u admitancí tj. $y^{(i)}$ zde značí i -tý tranzistor.



Obr.3.16 Grafy obvodu z obr.3.15 pro jednotlivé fáze spínání pro ztrátový integrátor

Následně se při řešení zakreslí transformační grafy spínačů, jejichž konstrukce byla však již popsána dosti zevrubně v odstavci 3.1.1.