2. ZÁKLADNÍ METODY ANALÝZY ELEKTRICKÝCH OBVODŮ

2.1. Úvod

Analýzou elektrické soustavy rozumíme výpočet všech napětí a všech proudů v soustavě. Při analýze se snažíme soustavu rozdělit na jednotlivé obvodové prvky, které popíšeme podle jejich dominantních vlastností. Pokud je to možné, ostatní vlastnosti zanedbáme nebo je vyjádříme pomocí dalších, přídavných, tzv. parazitních obvodových prvků. Například dominantní vlastností reálné cívky je její schopnost akumulovat energii v magnetickém poli. Reálná cívka je však navinuta z vodiče o konečném elektrickém odporu, takže v ní vznikají ztráty Jouleovým teplem. Pokud tyto ztráty nemůžeme v dané aplikaci zanedbat, bereme je v úvahu např. tím, že pro cívku sestavíme náhradní schéma, obsahující sériový rezistor. Často musíme uvažovat i kapacity cívky (mezi jednotlivými závity, mezi vývody). Podobná situace nastává i u jiných částí analyzované soustavy, (např. reálný kondenzátor, dioda, tranzistor, integrovaný obvod).

Analýza obvodu tedy začíná sestavením jeho elektrického schématu. Metodou analýzy rozumíme pak způsob matematického popisu vztahů mezi obvodovými veličinami, tj. napětími a proudy a případně i elektrickými náboji resp. magnetickými toky.

Metodu volíme podle různých hledisek.

1. Podle toho, které procesy u daného obvodu sledujeme (poloha stejnosměrných pracovních bodů, ustálený stav, přechodný stav, ...)
2. Podle vstupního signálu (malý, velký signál, periodický, jednorázový, ...)
3. Podle kmitočtu (nulový, nízký, vysoký, nekonečný)
4. Podle linearity či nelinearity obvodu
5. Podle složitosti obvodu
6. Podle prostředků, které máme při analýze k dispozici (kalkulátor, počítač, speciální matematické programy, ...)

Analýza obvykle není jednorázový akt. Probíhá v několika cyklech, při kterých postupně získáváme podrobnější znalosti o zkoumaném obvodu a často jsme nuceni i hlouběji studovat principy procesů, které v obvodu probíhají. V každém případě musíme dosažené výsledky kriticky hodnotit a pokud je to možné, srovnat řešení získaná pomocí více postupů, případně s výsledky experimentu.

V této kapitole se naučíme několik základních metod analýzy **lineárních** obvodů. Budeme je nejprve aplikovat na tzv. **obvody nesetrvačné**, tj. obvody, ve kterých nejsou žádné akumulační prvky. Napětí a proudy (odezvy) nesetrvačného obvodu v každém okamžiku závisejí pouze na napětích resp. proudech zdrojů budicího signálu v tomtéž okamžiku. Rychlost, jakou se vstupní signály mění v čase, nehraje žádnou roli. Je-li tedy signál např. obdélníkový, mají i odezvy obdélníkový průběh, mění-li se s časem harmonicky (sinusově, kosinusově), jsou i odezvy harmonické. Při analýze těchto obvodů vycházíme pro jednoduchost z předpokladu konstantních (někdy se říká "stejnosměrných") vstupních napětí a proudů. Proto se nesetrvačné obvody často označují jako **obvody stejnosměrné**. Výsledky analýzy jsou však platné pro libovolné časové průběhy vstupních signálů.

Jak v průběhu kursů TE1 a TE2 poznáme, metody, které se naučíme používat k analýze nesetrvačných obvodů, lze po určitém zobecnění použít i pro analýzu v dalších situacích, např. pro tzv. symbolický výpočet harmonického ustáleného stavu v lineárních obvodech (kapitola 3 těchto skript) nebo pro analýzu přechodných jevů operátorovou metodou (bude obsahem kursu TE2).
Všechny metody analýzy obvodů jsou založeny na využití Kirchhoffových zákonů.
Protože přímá aplikace Kirchhoffových zákonů vede obecně na veliký počet nezávislých rovnic (při *n* uzlech a *v* větvích v obvodu formulujeme ***n-1*** rovnici KZ1 a *v* rovnic KZ2), používáme postupy, které počet neznámých snižují a tím proces analýzy zjednodušují. Tyto postupy můžeme rozdělit na:

a. Metody analýzy pro speciální případy
b. Univerzální metody analýzy.

Metody "pro speciální případy" se vyznačují tím, že při jejich použití vystačíme se základními matematickými operacemi, tj. slučováním, násobením a dělením. Jsou proto vhodné pro "ruční" výpočty s kalkulátorem, bez počítače. Na druhé straně však jsou použitelné pouze pro řešení určitých, jednodušších skupin obvodů s jediným zdrojem signálu. Dále vyžadují promyšlenou volbu jednotlivých kroků při analýze obvodu. Tím jsou do značné míry závislé na osobě, která řešení provádí a málo vhodné pro počítač.
"Univerzálními" metodami dokážeme analyzovat obvody libovolné složitosti. Musíme však vždy řešit soustavu rovnic, které jsme formulovali pro určitou množinu nezávislých obvodových veličin. Rovnice lze formulovat podle určitých pevných algoritmů a proto tento krok může být automatizován a svěřen počítači. Metody vyžadují použití počítače s vhodnými matematickými programy pro řešení soustav rovnic s reálnými nebo i komplexními koeficienty. "Ručně" jimi řešíme jen velmi jednoduché obvody.

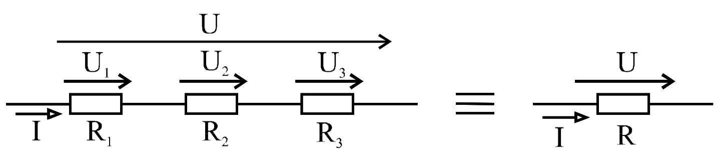
2.2. Metody pro speciální případy

2.2.1. Metoda postupného zjednodušování obvodu

Je založena na předpokladu, že v obvodu můžeme identifikovat kombinace rezistorů, které jsou zapojeny do série nebo paralelně a nahradit je jediným rezistorem. To nám umožní nalézt celkový odpor obvodu, vypočítat proud dodávaný do obvodu zdrojem (předpokládáme, že je v obvodu jen jediný) a postupně pak všechny zbývající obvodové veličiny.

Sériové spojení rezistorů

Pod sériovým spojením rozumíme takovou kombinaci, kdy všemi rezistory protéká týž proud. Celkové napětí na sériové kombinaci je pak rovno součtu dílčích úbytků. Příklad takového spojení se třemi rezistory ukazuje obr.2.1.



Obr.2.1

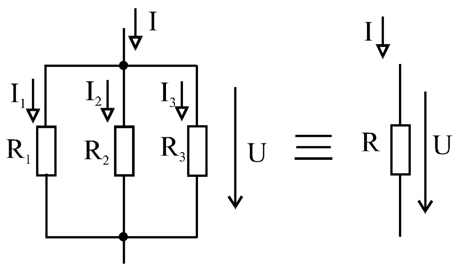
Protože celkové napětí $U = U_1 + U_2 + U_3 = I(R_1 + R_2 + R_3) = I.R$,
je celkový odpor kombinace roven součtu dílčích odporů $R = R_1 + R_2 + R_3$, obecně pro n rezistorů v sérii

$$R = \sum_{j=1}^{n} R_j \ .$$

Výsledný odpor je vždy větší než největší z odporů v sériové kombinaci. Jsou-li pak rezistory dva a platí-li $R_1 \le R_2$, je zřejmé, že výsledná hodnota R leží v intervalu mezi velikostí většího odporu a jejím dvojnásobkem, tj. $R_2 < R \le 2R_2$.

Paralelní spojení rezistorů

Na všech rezistorech, které jsou spojeny paralelně, je stejně veliké napětí. Celkový proud, vstupující do paralelní kombinace, je roven součtu dílčích proudů. Příklad se třemi rezistory je na obr.2.2.



Obr.2.2

Platí zřejmě

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U}{\frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

obecně $R = \dfrac{1}{\sum_{j=1}^{n} \frac{1}{R_j}}$, resp. $G = \sum_{j=1}^{n} G_j$.

Výsledný odpor je vždy menší než nejmenší z paralelně spojených odporů.
Pro jednoduchost používáme někdy pro paralelní spojení zkráceného značení

$$R = R_1 \,//\, R_2 \,//...//\, R_n \quad .$$

Pro praktické použití je dobré pamatovat si upravený vztah pro výsledný odpor paralelního spojení dvou rezistorů

$$R = R_1 \,//\, R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

a vědět, že velikost výsledného odporu leží v intervalu mezi polovinou a celou hodnotou menšího z odporů, tj. je-li opět $R_1 \le R_2$, platí

$$R_1 / 2 \le R < R_1 .$$

Ukážeme to na příkladech .

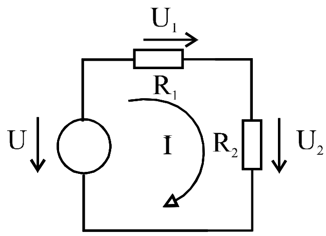
Příklad 2.1

1. $R_1 = 10\,\Omega$, $R_2 = 20\,\Omega$; R musí ležet mezi 5 a 10 ohmy. Skutečně R=10.20/30= =6.6667 Ω
2. $R_1 = 10\Omega$, $R_2 = 1000\Omega$; R=10.1000/1010=9.9009901 Ω
3. $R_1 = R_2 = 10\Omega$; $R = R_1 / 2 = 5\Omega$.

Aplikaci metody postupného zjednodušování budeme ilustrovat na řešení několika jednoduchých obvodů.

Příklad 2.2

Na obr.2.3 je schéma tzv. odporového děliče napětí, složené ze dvou rezistorů R_1 a R_2 a napájeného napětím *U*. Hledáme velikosti napětí U_1 a U_2 na obou rezistorech.



Obr.2.3

Protože celkový odpor obvodu je $R_1 + R_2$, je proud obvodem $I = U/(R_1 + R_2)$ a napětí na rezistorech jsou

$$U_1 = I.R_1 = U\frac{R_1}{R_1 + R_2},$$

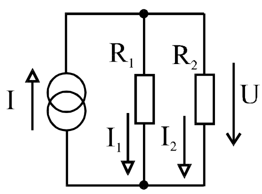
$$U_2 = I.R_2 = U\frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Tento výsledek lze zobecnit i na dělič složený z většího počtu rezistorů v sérii: napětí na výstupu je rovno součinu napětí zdroje a zlomku, v jehož čitateli je odpor, z něhož je výstupní napětí odebíráno a ve jmenovateli celkový odpor děliče.

Poznamenejme ještě, že zlomek, kterým vstupní napětí násobíme, je bezrozměrný a nazývá se činitel přenosu napětí.

Příklad 2.3

Obr.2.4 představuje dělič proudu, složený ze dvou rezistorů spojených paralelně a napájený ze zdroje proudu *I*. Zajímáme se o to, jak se vstupní proud dělí na dílčí proudy I_1 a I_2.



Obr.2.4

Protože $U = I.R = I\dfrac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$,

jsou proudy větvemi

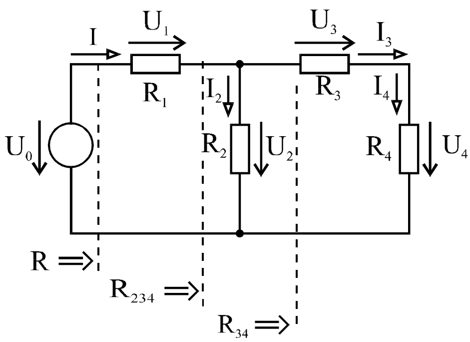
$$I_1 = I\frac{R_2}{R_1 + R_2} = I\frac{G_1}{G_1 + G_2},$$

$$I_2 = I\frac{R_1}{R_1 + R_2} = I\frac{G_2}{G_1 + G_2}.$$

Příklad 2.4.

Jako příklad poněkud složitějšího obvodu uvažujme tzv. příčkový článek na obr.2.5a. Parametry obvodových prvků jsou : R_1 *=15 W,* R_2 *=10W,* R_3 *=8W,* R_4 *=2W,* U_0 *=5 V.*

Rezistory R_3 a R_4 jsou v sérii. Proto celkový odpor větve vpravo od čárkované čáry je R_{34} *=10W.* Ten je paralelně s R_2. Tedy $R_{234} = R_2 \,//\, R_{34} = 10 \,//\, 10 = 5\,\Omega$. Celkový odpor obvodu, k němuž je připojen zdroj napětí U_0, je roven $R = R_1 + R_{234} = 15 + 5 = 20\Omega$. Proud *I* dodávaný zdrojem je *I=* U_0 */R=5/20=0,25 A.*



Obr.2.5a

Nyní vypočítáme zbývající napětí a proudy v obvodu. Napětí U_2 na svorkách rezistoru R_2 najdeme jako výstupní napětí děliče napájeného napětím U_0 a složeného z rezistorů R_1 a R_{234}, *tj.*

$$U_2 = U_o \frac{R_{234}}{R_1 + R_{234}} = 5\frac{5}{5+15} = 1{,}25V \,.$$

Toto napětí můžeme také vypočítat jako rozdíl napájecího napětí U_0 a úbytku na R_1, tedy

$$U_2 = U_o - I.R_1 = 5 - 0{,}25.15 = 1{,}25V \,.$$

Proud rezistorem R_2

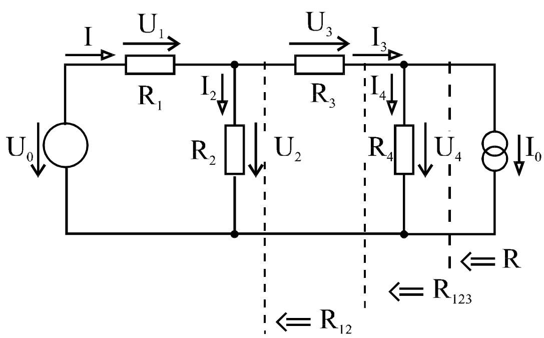
$I_2 = U_2 / R_2 = 1{,}25/10 = 1{,}25\,A$, proto $I_3 = I_4 = I - I_2 = 0{,}25 - 0{,}125 = 0{,}125\,A$

a napětí $U_3 = 1V,\ U_4 = 0{,}25V$.

Tím je analýza obvodu ukončena.

Příklad 2.5

Uvažujme stejný obvod jako v předešlém příkladu, avšak doplněný zdrojem proudu I_0 *=0,25 A* paralelně k rezistoru R_4, jak je zřejmé z obr.2.5b. Napětí zdroje je v tomto případě U_0 *=2,5 V*. K řešení použijeme principu superpozice. Jednotlivé obvodové veličiny (napětí, proudy) budou součtem hodnot daných zdrojem napětí U_0 (to budou poloviny hodnot, vypočítaných v předešlém příkladu, označíme je jednou čarou) a hodnot vyvolaných zdrojem proudu I_0 (označíme dvěma čarami).



Obr.2.5b

Počítáme-li příspěvky zdroje proudu I_0, zdroj napětí nahradíme zkratem. Vypočítáme odpory $R_{12} = R_1 \,//\, R_2 = 15\,//\,10 = 6\,\Omega$, $R_{123} = R_{12} + R_3 = 6 + 8 = 14\,\Omega$, $R = R_{123} \,//\, R_4 = 14\,//\,2 = 1{,}75\,\Omega$. Napětí na svorkách rezistoru R_4, způsobené pouze proudem I_0, potom bude $U_4'' = -I.R_4 = -0{,}4375V$ (záporné znaménko je dáno orientací proudu I_0).

Dále pak $U_2'' = -U_1'' = U_4.R_{12} / R_{123} = -0{,}1875V$,

$U_3'' = 0{,}25V,\ I_1'' = 0{,}0125\,A,\ I_2'' = -0{,}01875\,A,\ I_3'' = 0{,}03125\,A$

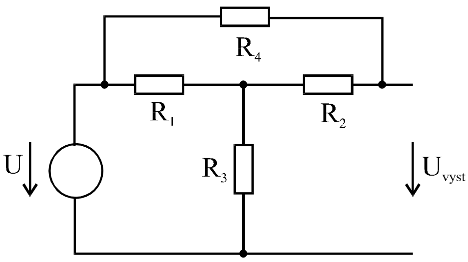
a konečně $I_4'' = -0{,}21875\,A$.

Výsledné hodnoty pak budou

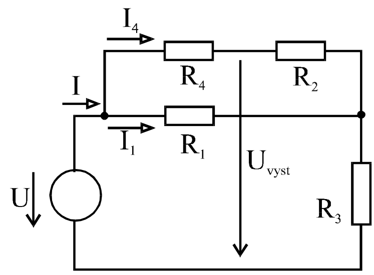
$U_4 = U_4' + U_4'' = 0{,}125 - 0{,}4375 = -0{,}3125V$, $U_2 = 0{,}4375V$, $U_1 = 2{,}0625V$,
$I_1 = 0{,}1375\,A$, $I_2 = 0{,}04375\,A$, $I_3 = 0{,}09375\,A$, $I_4 = -0{,}15625\,A$.

Příklad 2.6

Hledáme výstupní napětí $U_{výst}$ obvodu na obr.2.6a (přenosový článek "přemostěné T").



Obr.2.6a



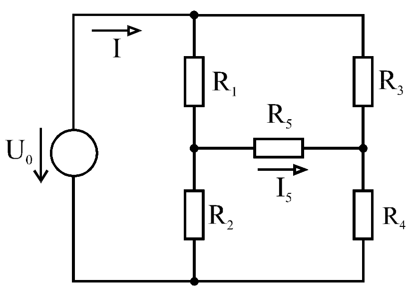
Obr.2.6b

Hodnoty parametrů prvků jsou $R_1 = 18\,k\Omega$, $R_2 = 3\,k\Omega$, $R_3 = 4\,k\Omega$, $R_4 = 6\,k\Omega$, $U = 25V$.

Na původním schématu možná není na první pohled jasné, které rezistory jsou v sérii a které paralelně. Proto může být užitečné schéma překreslit, jak ukazuje obr.2.6b. Vidíme, že celkový odpor obvodu je $R = R_1 //(R_4 + R_2) + R_3 = 18//(9+3)+4 = 10\,k\Omega$. Proud zdroje pak je *I=U/R=2,5mA* a ten se dělí na I_1 *=0,83333 mA* a I_4 *=1,66667 mA* .
Nás zajímá výstupní napětí,které je $U_{výst} = U - R_4.I_4 = 25 - 10 = 15V$.

Příklad 2.7

Na obr.2.7 je nakresleno schéma můstku, které se používá k měření odporů nebo jejich relativně malých změn (např. při měření teploty termistory nebo platinovými teploměry nebo při měření mechanického napětí pomocí tenzometrů). Zajímáme se o proud I_5 diagonálou můstku. V tomto případě nám však ani překreslení schématu neumožní identifikovat v obvodu sériově a paralelně zapojené větve. Toto schéma, i když je velmi jednoduché, nelze tedy metodou postupného zjednodušování řešit. Proto musíme schéma přeměnit postupem, kterému se říká transfigurace (odstavec 2.2.3), nebo použít některou z univerzálních metod pro řešení obvodů (část 2.3 těchto skript).



Obr.2.7

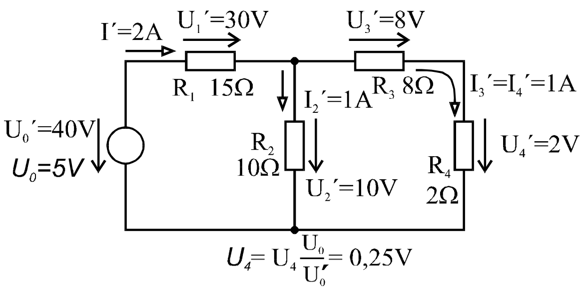
Poznámka:

Metoda postupného zjednodušování je v principu použitelná i pro obvody s nelineárními rezistory. Pro výsledné odpory paralelního nebo sériového spojení musíme však odvodit (nejlépe graficky na základě zadaných charakteristik jednotlivých rezistorů) příslušné nelineární charakteristiky. Podrobnosti jsou uvedeny v kapitole 4 těchto skript.

2.2.2. Metoda úměrných veličin

Metoda úměrných veličin je použitelná pouze pro lineární obvody, ve kterých platí přímá úměrnost mezi napětími a proudy u každého obvodového prvku a v obvodu jako celku. Dále je nutno, aby v obvodu byl pouze jediný nezávislý zdroj napětí nebo proudu. Při použití této metody postupujeme tak, že ve vhodném místě v obvodu odhadneme (případně zvolíme) velikost napětí nebo proudu některé větve a postupně určíme tomuto odhadu odpovídající "fiktivní" napětí a proudy v celém obvodu. Vypočítáme tak i potřebnou velikost "fiktivního" napětí resp. proudu napájecího zdroje. Takto vypočítaná hodnota se obecně liší od hodnoty zadané. Protože však velikosti všech napětí a proudů v obvodu jsou přímo úměrné hodnotě parametru zdroje, dostaneme skutečné velikosti všech obvodových veličin tak, že jejich fiktivní hodnoty násobíme poměrem skutečné a fiktivní hodnoty zdroje.

Příklad 2.8.
Metodu úměrných veličin použijeme k řešení příčkového článku, který jsme již řešili metodou postupného zjednodušování v příkladu 2.5. Postup řešení ilustruje obr.2.8.



Obr.2.8

Začneme např. tím, že zvolíme proud výstupním obvodem $I_3' = I_4' = 1A$. To nám dovolí vypočítat fiktivní hodnoty napětí U_3' a U_4' na rezistorech R_3 a R_4 a v jejich součtu i napětí U_2' na rezistoru R_2. Dostaneme ihned proud I_2' a na základě prvního Kirchhoffova zákona i proud zdroje $I' = I_2' + I_3'$. Pak již snadno získáme úbytek U_1' na rezistoru R_1 a konečně fiktivní napájecí napětí U_0'. Je to napětí, jaké by muselo na vstupu obvodu být, aby v obvodu skutečně působily "čárkované" proudy a napětí. Protože však je U_0' různé od U_0, musíme všechny hodnoty jednotlivých veličin ve schématu násobit konstantou *k* rovnou $k = \dfrac{U_o}{U_o'} = \dfrac{5}{40} = 0{,}125$.

Dostaneme tak hodnoty stejné jako v příkladu 2.5.

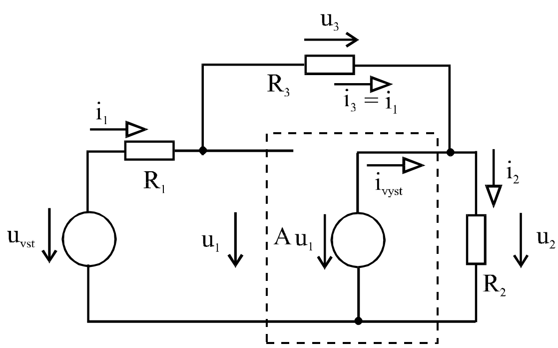
Poznámka:
1. Je-li vstupní napětí např. U_0 = 5mV, tj. 1000 krát menší, jsou i všechna ostatní napětí ve stejném poměru menší, tj. místo ve voltech jsou jejich hodnoty v milivoltech.

2. Je-li vstupní napětí proměnné v čase, má např. sinusový průběh s amplitudou 5V, pak i všechny veličiny v obvodu jsou analogicky časově proměnné, v daném případě jsou tedy také sinusové s amplitudou, číselně rovnou vypočítaným hodnotám (případně se záporným znaménkem před funkcí sinus).

Metoda úměrných veličin je v principu použitelná i pro řešení některých jednoduchých, ale pro praxi významných, obvodů s řízenými zdroji nebo ideálními operačními zesilovači. Ukážeme to na následujících dvou příkladech.

Příklad 2.9.

Schéma na obr.2.9 představuje zesilovač napětí (zdroj napětí řízený napětím) se zesílením *A*, napájený ze zdroje signálu u_{vst} s vnitřním odporem R_1, zatížený rezistorem R_2 a doplněný zpětnou vazbou z výstupu na vstup prostřednictvím rezistoru R_3. Zajímáme se především o celkové zesílení *K*, definované jako poměr výstupního napětí u_2 k napětí signálu u_{vst} a o celkový odpor R_{vst}, kterým je zatížen zdroj signálu (tzv. vstupní odpor obvodu).



Obr.2.9

Při použití metody úměrných veličin odhadneme např. u_2'. To nám dovolí ihned vypočítat proud $i_2' = u_2' / R_2$ a vstupní napětí zesilovače $u_1' = u_2' / A$. Tím známe i napětí na rezistoru R_3, $u_3' = u_1' - u_2'$ a proud $i_3' = u_3' / R_3$, který je roven vstupnímu proudu i_1'. Zbývající veličiny $i_{výst}$ a u_{vst}' již dostaneme jednoduchou aplikací Kirchhoffových zákonů.

Výsledný přenos napětí je pak

$$K = \frac{u_2}{u_{vst}} = \frac{AR_2}{R_1(1-A)+R_2}$$

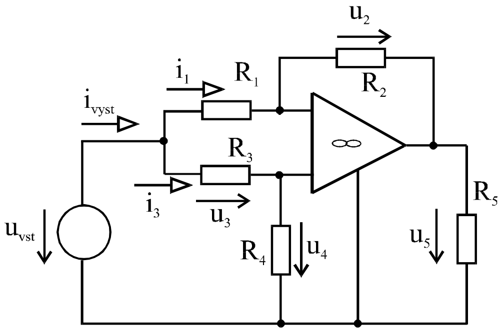
a vstupní odpor

$$R_{vst} = \frac{u_{vst}}{i_1} = R_1 + \frac{R_2}{1-A}.$$

Jsou-li např. parametry obvodových prvků $R_1 = 5\,k\Omega$, $R_2 = 2\,k\Omega$, $R_3 = 100\,k\Omega$, $A = -4$ a napětí signálu u_{vst} *=1 V*, jsou napětí v obvodu u_1 *=0,8 V*, u_2 *= – 3,2 V*, přenos napětí $K = -3{,}2$, vstupní odpor $R_{vst} = 25\,k\Omega$.

Příklad 2.10.

Na obr.2.10 je schéma obvodu s ideálním operačním zesilovačem. Zajímá nás opět přenos napětí $K = u_5 / u_{vst}$.



Obr.2.10

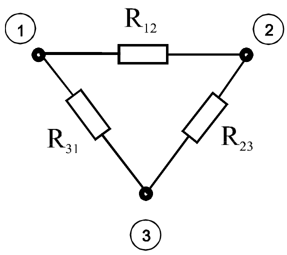
Protože do vstupních svorek operačního zesilovače neteče proud, vypočítáme napětí u_4 na rezistoru R_4 jednoduše jako výstupní napětí děliče $u_4 = u_{vst} \dfrac{R_4}{R_3 + R_4}$.
Vzhledem tomu, že i vstupní napětí ideálního operačního zesilovače je nulové, jsou napětí na rezistorech R_1 a R_3 stejně veliká a v důsledku toho platí $i_1 = i_3 \dfrac{R_3}{R_1}$. Potom tedy

$$u_5 = u_4 - R_2.i_1 = u_{vst} \frac{R_4}{R_3 + R_4} - R_2.\frac{u_{vst}}{R_3 + R_4}.\frac{R_3}{R_1} = u_{vst} \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 (R_3 + R_4)} = u_{vst}.K$$

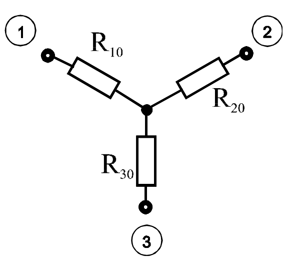
Poznámka:
Ukazuje se, že ani touto metodou nelze řešit příklad s rezistorovým můstkem na obr.2.7. Ať začneme s odhadem kteréhokoli proudu nebo napětí v obvodu, nemůžeme jednoduše postupovat po jednotlivých větvích obvodu až ke svorkám zdroje. Zvolíme-li např. proud rezistorem R_5, nemůžeme jednoduchým způsobem zjistit, jak se tento proud rozděluje na dva proudy v koncových uzlech tohoto rezistoru. Podobně to dopadne při jakékoli jiné volbě.

2.2.3. Transfigurace obvodu

V některých případech jednodušších obvodů může být užitečný postup, při kterém část obvodu nahradíme jiným zapojením, které se zvnějšku chová zcela stejně, ale je výhodnější z hlediska analýzy. Taková náhrada se nazývá transfigurace obvodu.
Nejjednodušším případem je transfigurace zapojení do hvězdy na zapojení do trojúhelníku a naopak. Zapojení do trojúhelníku je na obr.2.11a, zapojení do hvězdy na obr.2.11b.



Obr.2.11a



Obr.2.11b

Oba obvody mají být ekvivalentní pokud jde o jejich chování vzhledem k vnějšímu světu. Znamená to jinými slovy, že pokud každý obvod uzavřeme do krabičky a necháme z ní vystupovat pouze tři vývody, žádným způsobem nejsme zvnějšku schopni obvody vzájemně rozlišit. Jediné, co se dá zvnějšku měřit, jsou vstupní odpory mezi jednotlivými vývody. Ekvivalence je tedy podmíněna splněním tří vztahů:

$$\frac{R_{12}(R_{23}+R_{31})}{R_{12}+R_{23}+R_{31}} = R_{10}+R_{20}, \qquad \frac{R_{23}(R_{31}+R_{12})}{R_{12}+R_{23}+R_{31}} = R_{20}+R_{30} \quad ,$$

$$\frac{R_{31}(R_{12}+R_{23})}{R_{12}+R_{23}+R_{31}} = R_{30}+R_{10} \, .$$

Jsou to rovnice lineární vzhledem k odporům hvězdy R_{10}, R_{20}, R_{30}. Proto z nich snadno tyto odpory vypočítáme, jsou-li zadány odpory trojúhelníku. Řešením lineárních rovnic dostaneme odpory pro zapojení do hvězdy:

$$R_{10} = \frac{R_{12}R_{31}}{\Sigma R}, \quad R_{20} = \frac{R_{23}R_{12}}{\Sigma R}, \quad R_{30} = \frac{R_{31}R_{23}}{\Sigma R}, \qquad (2-3), (2-4), (2-5)$$

Ve jmenovatelích všech zlomků je součet odporů trojúhelníku

$$\Sigma R = R_{12}+R_{23}+R_{31} \, .$$

Výpočet odporů trojúhelníku z odporů hvězdy již tak jednoduchý není. Jde totiž o soustavu nelineárních rovnic (rovnice obsahují součiny hledaných odporů). Výsledkem řešení soustavy rovnic jsou vztahy pro odpory rezistorů trojúhelníku :

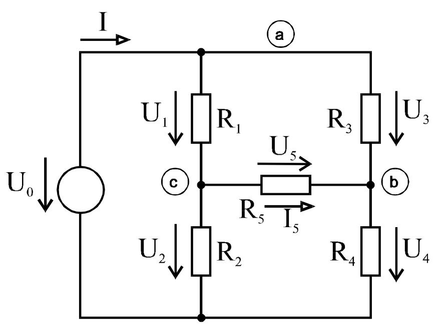
$$R_{12} = R_{10}+R_{20}+\frac{R_{10}R_{20}}{R_{30}}, \quad R_{23} = R_{20}+R_{30}+\frac{R_{20}R_{30}}{R_{10}}, \quad R_{31} = R_{30}+R_{10}+\frac{R_{30}R_{10}}{R_{20}}$$

(2 – 6), (2 – 7), (2 – 8)

Ukážeme nyní, jak lze pomocí transfigurace analyzovaný obvod přeměnit a umožnit tak jeho řešení některou z jednoduchých metod.

Příklad 2.11.

Vrátíme se k můstku, jehož schéma je nyní překresleno na obr.2.12a. Proud I ze zdroje nemůžeme jednoduše zjistit, protože nedokážeme snadno vypočítat celkový odpor, který obvod pro napájecí zdroj představuje.



Obr.2.12a

Rezistory R_1, R_2 a R_5 však můžeme pokládat za zapojené do hvězdy a nahradit je proto třemi jinými rezistory zapojenými do trojúhelníku, jak ukazuje obr.2.12b. Pak již snadno najdeme vstupní odpor obvodu jako

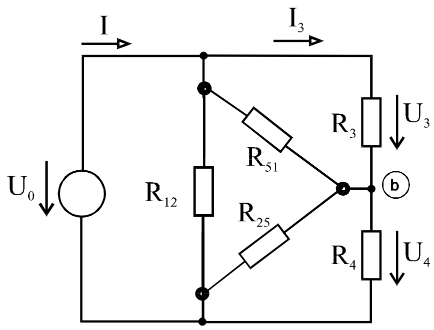
$$R_{vst} = R_{12} \,//((R_{51} \,//\, R_3)+(R_{25} \,//\, R_4))$$

a vypočítáme proud.

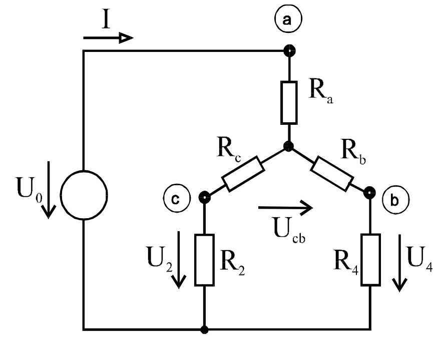
Jinou možností je náhrada trojúhelníku tvořeného rezistory R_1, R_3 a R_5 ekvivalentní hvězdou z rezistorů

R_a, R_b, R_c, jak je nakresleno na obr.2.12c. Vstupní odpor je pak $R_{vst} = R_a + (R_c + R_2) // (R_b + R_4)$.

Jakmile známe vstupní proud *I*, vypočítáme jednoduše všechny ostatní obvodové veličiny.



Obr.2.12b



Obr.2.12c

Uvažujme konkrétní numerické hodnoty odporů
$R_1 = R_3 = 100\,\Omega$, $R_2 = 101\,\Omega$, $R_4 = 99\,\Omega$, $R_5 = 20\,\Omega$ a napájecí napětí můstku *U=1 V*.
Pak pro odpory ve schématu na obr.2.12b dostaneme R_{12} *=706W*, R_{25} *=141,2W*, R_{51} *=139,80198W* a vstupní proud bude *I=100,00458mA*. Problém je, že nám toto schéma neposkytne bezprostředně informaci o hledaném proudu rezistorem R_5, protože jeho levá svorka byla při transfiguraci hvězdy na trojúhelník redukována.

Lépe je proto v tomto případě použít transfigurace podle obr.2.12c, při které koncové uzly rezistoru R_5 zůstaly zachovány. Pro hodnoty rezistorů po transfiguraci dostaneme R_a *=45,454545 W*, $R_b = R_c$ *=9,090909 W*. Proud¨ze zdroje je opět *I=100,00458 mA*. Pro napětí mezi uzly *c, b* dostaneme U_{cb} *=8,333715 mV* a hledaný proud diagonálou mostu $I_5 = U_{cb} / R_5 =$ *0,41668576 mA*.