

# 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](mailto:redakce@ben.cz)



# 1 Vícefázové obvody

Teorie silnoproudých elektrických obvodů vychází z obecné teorie elektrických obvodů a zkoumá obvody, které jsou spojeny s moderní výrobou a přenosem elektrické energie. Vyšetřuje především trojfázové obvody a to v normálním i havarijním stavu. Mezi nejdůležitější problémy patří ekonomika provozu elektrizační soustavy, kvalita přenášené elektrické energie, analýza rušivých vlivů na další blízká elektrotechnická zařízení a přepět'ové jevy, jež hrají důležitou roli v otázkách provozní spolehlivosti.

## 1.1 Trojfázová soustava

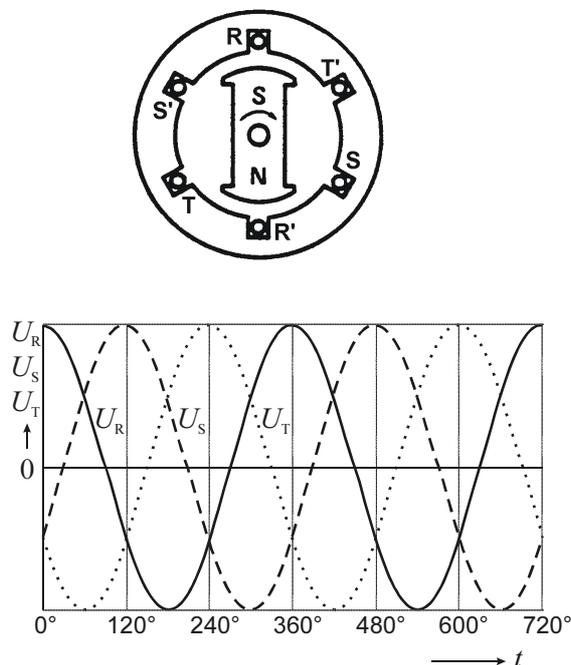
Trojfázové soustavy mají v elektroenergetice základní význam: pomocí trojfázových soustav se elektrická energie vyrábí, přenáší, distribuuje a spotřebuje. Pouze malé spotřebiče jsou jednofázové. Trojfázová soustava má vůči jednofázové soustavě tyto výhody:

- Trojfázové motory, generátory a transformátory mají výhodnější provozní vlastnosti (zejména vyšší účinnost) a nižší výrobní náklady.
- Přenos elektrické energie v trojfázové soustavě je hospodárnější, neboť ve vedení vznikají nižší ztráty, spotřeba materiálu na vodiče je menší.
- Z trojfázové sítě lze odebrat dvojí napětí.

### 1.1.1 Základní pojmy a vztahy

Zdroje harmonického napětí a proudu, které jsme až doposud uvažovali, nazýváme *jednofázovými zdroji*. V energetice se používají složitější zdroje elektrické energie: *trojfázové zdroje*. Jsou to zařízení, kdy v jediném konstrukčním celku jsou uspořádány tři jednofázové zdroje harmonického napětí, navzájem jsou elektricky nezávislé a mají stejný kmitočet. Jejich napětí (efektivní hodnota) jsou:  $U_{0R}$ ,  $U_{0S}$ ,  $U_{0T}$ . Zpravidla jsou navrženy tak, že  $U_{0R} = U_{0S} = U_{0T}$  a každá dvojice po sobě následujících napětí má fázový posun  $\alpha = 2\pi/3$ ; nazýváme je *souměrnými trojfázovými zdroji*. Nejsou-li splněny obě uvedené podmínky (např. při poruše některého zdroje) jde o *nesouměrný trojfázový zdroj*.

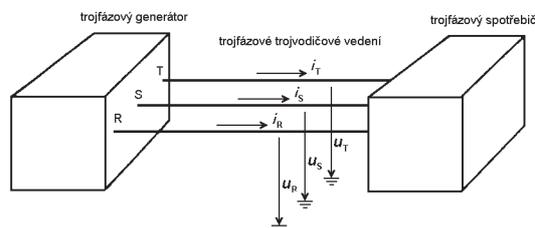
Na obr. 1.1 je naznačen princip typického trojfázového zdroje – dvupólového synchronního generátoru. Rotor tvořený elektromagnetem buzeným stejnosměrným proudem se otáčí v dutině statoru, v němž jsou v drážkách uloženy tři cívky, R–R', S–S',



Obr. 1.1 Princip trojfázového zdroje a časový průběh napětí indukovaného v cívkách

T–T', navzájem posunuté o 120°; R značí začátek a R' konec téže cívky, apod. Na obrázku je též uveden časový průběh napětí, které se indukují v jednotlivých cívkách.

Svorky trojfázového zdroje jsou mezi sebou vhodným způsobem propojeny, takže zdroj není do obvodu zapojen všemi svými šesti svorkami, ale pouze třemi, resp. čtyřmi svorkami. Trojfázové zdroje napájejí trojfázové vedení, tvořené třemi nebo čtyřmi vodiči, jimiž se přenáší elektrická energie k trojfázovým spotřebičům. Celek nazýváme *trojfázovým obvodem*. Jeho větve, na nichž jsou napětí (resp. jimiž procházejí proudy) nazýváme *fázemi*<sup>1</sup>.



Obr. 1.2 Příklad jednoduché energetické soustavy

<sup>1</sup> Slovo *fáze* má v teorii obvodů dvojitý význam: může to být větev trojfázového obvodu, anebo argument harmonické funkce.

Na obr. 1.2 je velmi jednoduchá trojfázová energetická soustava. V praxi se ovšem setkáváme s trojfázovými soustavami mnohem složitějšími.

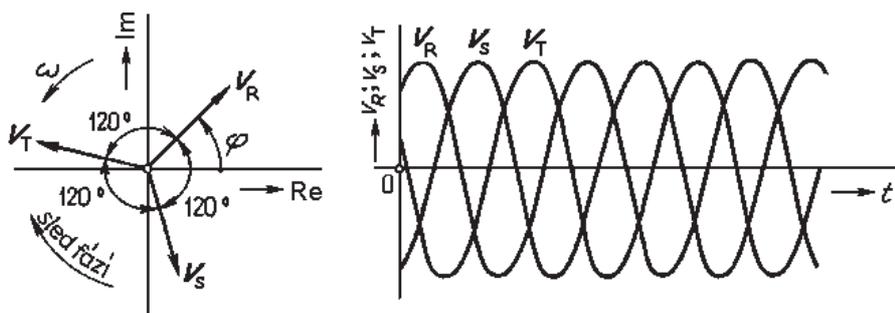
Trojfázová soustava veličin (napětí nebo proudů)  $v_R(t)$ ,  $v_S(t)$ ,  $v_T(t)$  je *souměrná* mají-li tyto veličiny stejnou efektivní hodnotu,  $V_R = V_S = V_T = V_f$  ( $V_f$  nazýváme *fázovou veličinou*) a jejich vzájemný fázový posun je  $2\pi/3$ :

$$(1.1) \quad \begin{aligned} v_R &= \sqrt{2} V_f \sin(\omega t + \varphi) \\ v_S &= \sqrt{2} V_f \sin(\omega t - 120^\circ + \varphi) \\ v_T &= \sqrt{2} V_f \sin(\omega t - 240^\circ + \varphi) = \sqrt{2} V_f \sin(\omega t + 120^\circ + \varphi) \end{aligned}$$

Nejsou-li splněny obě tyto podmínky, jde o *nesouměrnou* trojfázovou soustavu.

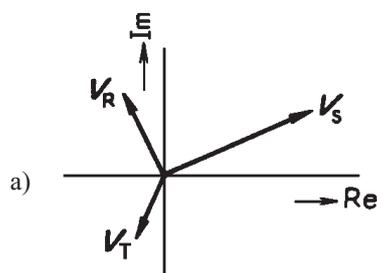
Pořadí, v němž veličiny trojfázové soustavy nabývají svého maxima, nazýváme *sledem fází*. Značíme jej posloupností po sobě následujících indexů.

Na obr. 1.3 je zobrazení souměrné trojfázové v komplexní rovině a jejich skutečný časový průběh, pro nějž platí rovnice (1.1). Sled fází je R-S-T.

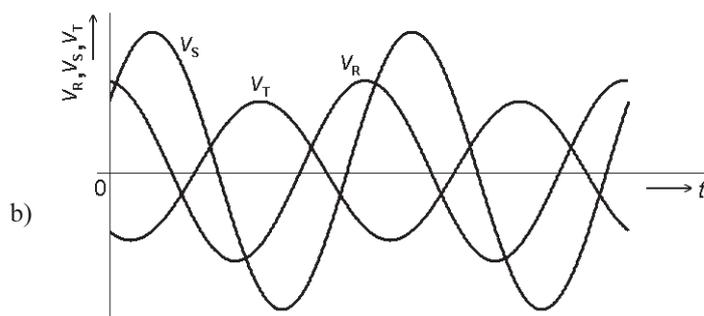


Obr. 1.3 Fázorový diagram a časový průběh souměrné trojfázové soustavy

Na obr. 1.4 je fázorový diagram a časový průběh nesouměrné trojfázové soustavy, při modulové i fázové nesymetrii (tj. není splněna žádná z obou podmínek souměrnosti). Sled fází je opět R-S-T.



Obr. 1.4a Fázorový diagram a časový průběh nesouměrné trojfázové soustavy



Obr. 1.4b Fázorový diagram a časový průběh nesouměrné trojfázové soustavy

Trojfázovou soustavu nazýváme *vyváženou*, jestliže pro ní platí

$$(1.2) \quad v_R(t) + v_S(t) + v_T(t) = 0,$$

čili, vyjádřeno fázorově,

$$(1.3) \quad \mathbf{V}_R + \mathbf{V}_S + \mathbf{V}_T = 0$$

Soustava, pro níž tyto vztahy neplatí, je *nevyvážená*.

### 1.1.2 Matematické vyjádření veličin souměrné trojfázové soustavy

U souměrné trojfázové soustavy není třeba pracovat s trojicí fázorů, postačí jediný fázor, neboť zbývající dva fázory jsou určeny podmínkou symetrie. Například u souměrné soustavy ( $\mathbf{V}_R$ ;  $\mathbf{V}_S$ ;  $\mathbf{V}_T$ ) postačí pracovat s fázorem  $\mathbf{V}_R$ , protože

$$(1.4) \quad \mathbf{V}_S = \mathbf{V}_R \angle -\frac{2}{3}\pi = \mathbf{V}_R \angle \frac{4}{3}\pi$$

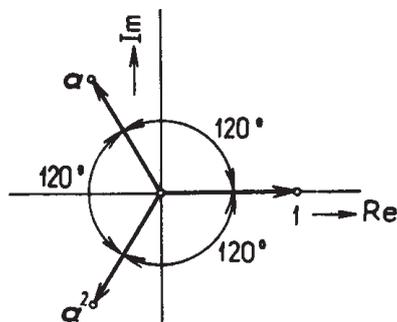
$$(1.5) \quad \mathbf{V}_T = \mathbf{V}_R \angle -\frac{4}{3}\pi = \mathbf{V}_R \angle \frac{2}{3}\pi$$

Jelikož v teorii trojfázových obvodů často pracujeme s výrazem  $\angle p$ , zavádíme pro něj název operátor natočení a jednodušší označení

$$(1.6) \quad \mathbf{a} = \angle \frac{2}{3}\pi = e^{j\frac{2}{3}\pi} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Pak zřejmě platí (obr. 1.5):

$$(1.7) \quad \mathbf{a}^2 = \angle \frac{4}{3}\pi = e^{j\frac{4}{3}\pi} = e^{-j\frac{4}{3}\pi} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$



Obr. 1.5 Zobrazení  $a$  a  $a^2$  v Gaussově rovině

Snadno se přesvědčíme, že platí vztah (budeme jej později často používat)

$$(1.8) \quad a^2 + a + 1 = 0,$$

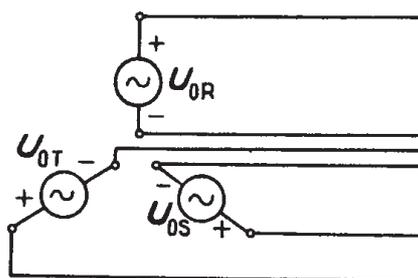
S použitím operátoru natočení vyjádříme vztahy (1.4) a (1.5) pro souměrnou trojfázovou soustavu přehledněji:

$$(1.9) \quad V_R, \quad V_S = a^2 V_R, \quad V_T = a V_R$$

Na základě rovnic (1.8) a (1.9) dostáváme hned rovnici (1.3). To znamená, že souměrná trojfázová soustava je vždy vyvážená. Obrácené tvrzení však obecně neplatí, tj. vyvážená soustava nemusí být souměrná.

### 1.1.3 Spojování trojfázových zdrojů

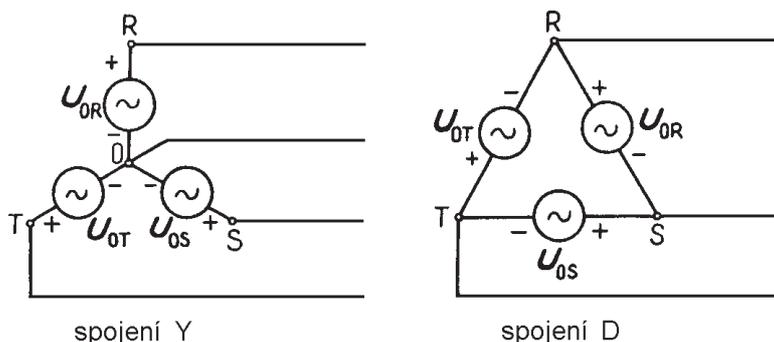
Jestliže má každý ze tří jednofázových zdrojů, jež dohromady tvoří trojfázový zdroj, samostatné dvou vodičové vedení, hovoříme o nevázané soustavě. Ke spojení zdroje se spotřebiči by pak bylo třeba šestivodičového vedení (obr. 1.6).



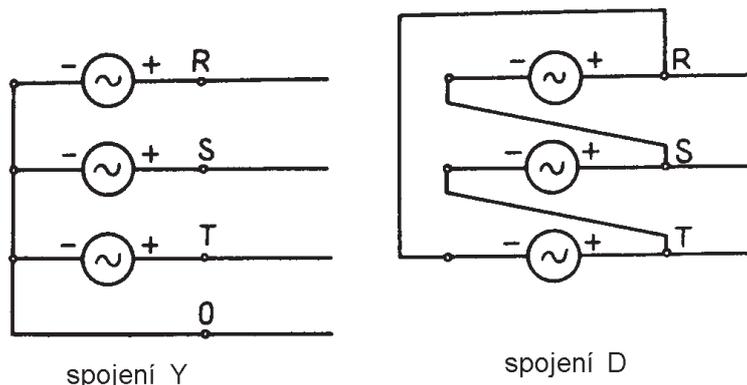
Obr. 1.6 Nevázaný trojfázový zdroj napětí

Vhodným spojením trojice zdrojů získáme vázanou soustavu, kterou spojíme se spotřebiči čtyřvodičovým anebo trojvodičovým vedením. Zdroje spojujeme dvěma základ-

ními způsoby: spojením do hvězdy a spojením do trojúhelníka (obr. 1.7). V praxi se používají pouze vázané trojfázové soustavy, neboť, v porovnání s rovnocenným vedením nevázané soustavy, na zhotovení vedení je třeba méně materiálu (podrobněji viz dále) a při spojení do hvězdy lze odebrat dvojí napětí.



Obr. 1.7 Vázané trojfázové zdroje – základní způsoby jejich spojování: spojení do hvězdy a spojení do trojúhelníka

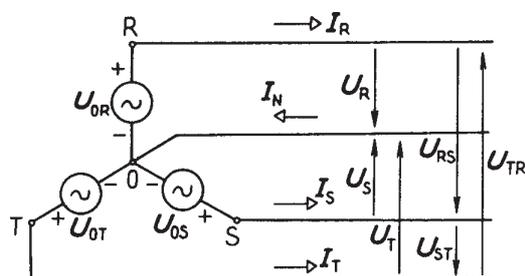


Obr. 1.8 Jiný způsob kreslení spojení do hvězdy a spojení do trojúhelníka

### Spojení do hvězdy

Písmenové označení: spojení s vyvedeným nulovým vodičem: YN, znak: Y–, spojení s nevyvedeným nulovým vodičem: Y, znak: Y, obr. 1.9.

Zdroje jsou jednou svorkou stejného znaménka (např. –) spojeny do uzlu, zvaného nulový bod (nebo stručně *nula*). Ke zbývajícím trojici svorek (opět stejného znaménka, v našem případě +) jsou připojeny fázové vodiče a z nulového bodu je obvykle vyveden nulový vodič. Zdroj tedy napájí čtyřvodičové vedení, z něhož lze získat dvojí napětí: mezi fázovými vodiči a nulovým vodičem jsou fázová napětí  $U_R$ ,  $U_S$ ,  $U_T$  a mezi dvojicemi fázových vodičů jsou sdružená napětí  $U_{RS}$ ,  $U_{ST}$ ,  $U_{TR}$ .



Obr. 1.9 Fázové a sružené napětí a proudy trojfázového zdroje spojeného do hvězdy

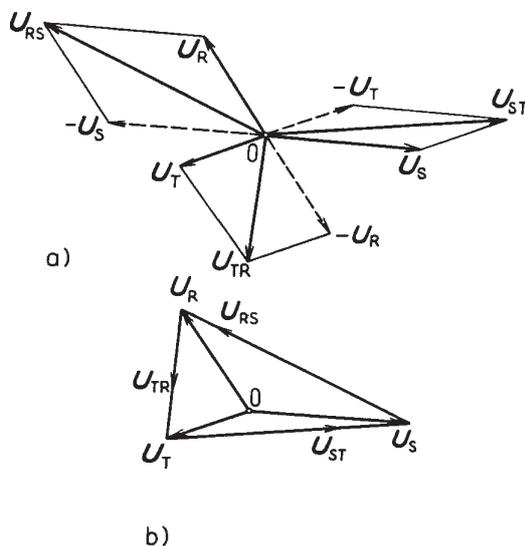
Sružená napětí lze vyjádřit pomocí fázových: ze druhého Kirchhoffova zákona plyne

$$\begin{aligned}
 U_{RS} &= U_R - U_S \\
 (1.10) \quad U_{ST} &= U_S - U_T \\
 U_{TR} &= U_T - U_R
 \end{aligned}$$

Sečtením rovnic (1.10) dostaneme důležitý vztah

$$(1.11) \quad U_{RS} + U_{ST} + U_{TR} = 0,$$

podle něhož sružená napětí tvoří vyváženou trojfázovou soustavu. Topografickým diagramem sružených napětí je trojúhelník, obr. 1.10.



Obr. 1.10 Fázorový (a) a topografický (b) diagram nesouměrné trojfázové soustavy fázových a sružených napětí

### Speciální případ: soustava fázových napětí je souměrná

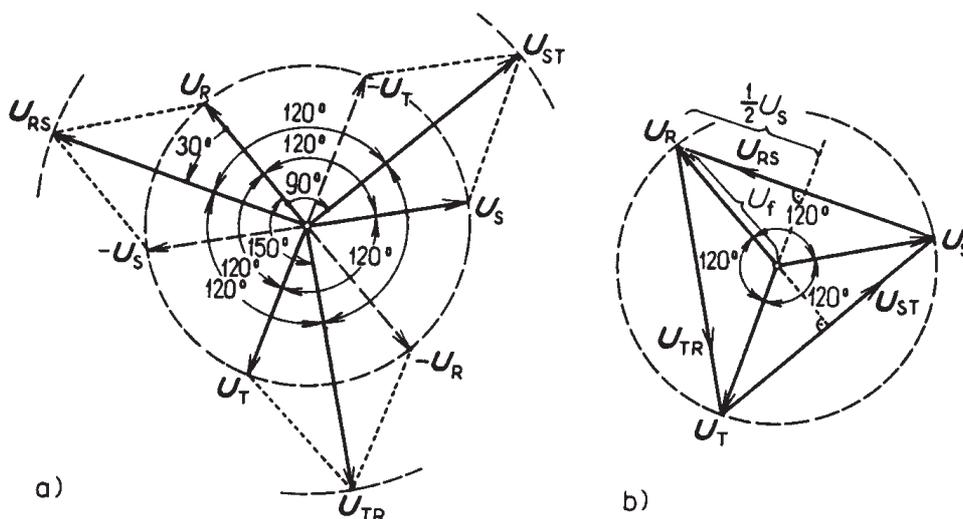
Je-li soustava fázových napětí souměrná, je souměrná též soustava sdružených napětí je souměrná. Označme: fázová napětí  $U_R = U_S = U_T = U_f$  a sdružená napětí  $U_{RS} = U_{ST} = U_{TR} = U_S$ . Z rovnic (1.9) a (1.10) plynou tyto vztahy:

$$\begin{aligned} U_{RS} &= U_R - U_S = U_R - a^2 U_R = U_R(1 - a^2) = \sqrt{3} U_R \angle 30^\circ \\ (1.12) \quad U_{ST} &= U_S - U_T = a^2 U_R - a U_R = U_R(a^2 - a) = \sqrt{3} U_R \angle -90^\circ \\ U_{TR} &= U_T - U_R = a U_R - U_R = U_R(a - 1) = \sqrt{3} U_R \angle 150^\circ \end{aligned}$$

Pro efektivní hodnoty platí

$$(1.13) \quad U_S = \sqrt{3} U_f$$

Z fázorového a topografického diagramu (obr. 1.11) je mj. zřejmá platnost rov. (1.3). V topografickém diagramu tvoří vektory sdružených napětí rovnostranný trojúhelník, tedy platí  $U_S/2 = U_f \cos 30^\circ$ , odkud plyne rov. (1.13).



Obr. 1.11 Fázorový (a) a topografický (b) diagram souměrné trojfázové soustavy fázových a sdružených napětí

Při nízkonapěťovém rozvodu elektrické energie se používá jmenovité napětí<sup>2</sup>  $U_f = 230$  V,  $U_S = \sqrt{3} \cdot 230 = 400$  V. Tato napěťová soustava se obvykle značí 400/230 V. Není-li vyveden nulový vodič, můžeme z této soustavy odebírat pouze sdružené napětí.

2 Uvedená napěťová soustava může být provozována s odchylkami  $-10\%$ ,  $+6\%$ . Napěťová soustava 400/230 V nahradila starší soustavu 380/220 V. V minulosti se též používala soustava 220/127 V. (Podrobněji viz normu ČSN IEC 38 – Normalizovaná napětí.)

Připojíme-li na trojfázové vedení spotřebič, procházejí fázovými vodiči vedení proudy  $I_R, I_S, I_T$  a nulovým vodičem prochází proud  $I_N$ . Aplikací prvního Kirchhoffova zákona na uzel 0 dostáváme

$$I_R + I_S + I_T = I_N$$

Pro souměrnou trojfázovou soustavu proudů  $I_R, I_S, I_T$  je podle rov. (1.3)  $I_N = 0$ . Nulový vodič by tedy nebylo třeba provádět. V praxi se však vyžaduje vždy, když zátěž může být nesouměrná. Pak totiž ani trojfázová soustava proudů není souměrná a nulový vodič se uplatní příznivě, jak poznáme dále.

Z obr. 1.7 je patrné, že sdružený proud  $I_S$  (tj. proud v každé fázi vedení) je roven fázovému proudu  $I_f$  (tj. proudu dodávaného jednotlivými zdroji):

$$(1.14) \quad I_S = I_f, \text{ kde } I_f = I_R = I_S = I_T$$

### Spojení do trojúhelníka

Písmenové označení: D, znak:  $\Delta$ , obr. 1.12.

Trojice zdrojů je spolu spojena tak, že tvoří smyčku, přičemž kladná svorka každého zdroje je spojena se zápornou svorkou následujícího zdroje. Toto spojení lze uskutečnit jen pro vyvážený trojfázový zdroj<sup>3</sup>. Ke svorkám zdroje jsou připojeny fázové vodiče trojvodičového vedení (obr. 1.12). Napětí zdroje je tedy též sdruženým napětím:

$$(1.15) \quad U_R = U_{RS}, \quad U_S = U_{ST}, \quad U_T = U_{TR}$$

tedy fázová napětí jsou rovna napětím sdruženým:

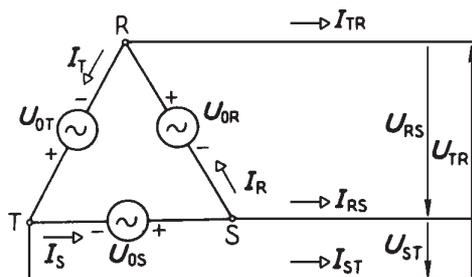
$$(1.16) \quad U_f = U_S$$

Jsou-li fázové proudy  $I_R, I_S, I_T$ , pak vodiči procházejí sdružené proudy

$$(1.17) \quad I_{RS} = I_S - I_R, \quad I_{ST} = I_T - I_S, \quad I_{TR} = I_T - I_R$$

Sečtením těchto rovnic dostáváme vztah mezi sdruženými proudy:

$$(1.18) \quad I_{RS} + I_{ST} + I_{TR} = 0$$



Obr. 1.12 Fázová a sdružená napětí a proudy trojfázového zdroje zapojeného do trojúhelníka

3 Pro napětí zdrojů platí tedy rovnice (1.12) a není-li trojfázový zdroj zatížen, neprochází fázovými zdroji proud. Kdyby napětí zdrojů netvořilo vyváženou soustavu, nebyl by součet napětí zdrojů nulový a smyčkou tvořenou trojicí zdrojů by procházel neomezeně velký proud. (U reálných obvodů by měl konečnou hodnotu, omezenou vnitřními impedancemi zdrojů.)

Proudy ve vodičích trojfázového vedení tedy tvoří vyváženou trojfázovou soustavu. Jejich topografický diagram je rovnostranný trojúhelník.

### Speciální případ: souměrná zátěž

Je-li soustava fázových proudů  $I_R, I_S, I_T$  souměrná, je též souměrná soustava sdružených proudů  $I_{RS}, I_{ST}, I_{TR}$ . Mezi sdruženým a fázovým proudem platí:

$$(1.19) \quad I_S = \sqrt{3} I_f$$

#### Příklad 1.1

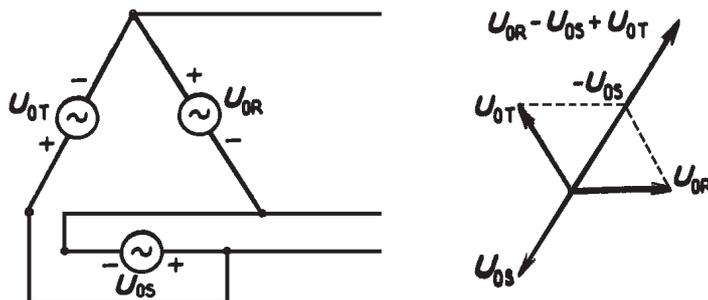
Trojfázový souměrný napěťový zdroj je spojen do trojúhelníka. Je přípustné změnit polaritu zdroje jedné fáze, podle obr. 1.13?

#### Řešení

Z fázorového diagramu je zřejmé, že v „trojúhelníku“ působí napětí,

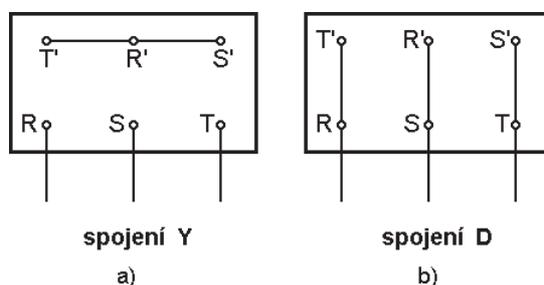
$$|U_{OR} - U_{OS} + U_{OT}| = 2U_f$$

jež při malé vnitřní impedanci zdrojů způsobí značný proud, který ohrožuje zdroje. Záměna polarity je tedy nepřipustná.



Obr. 1.13 Příklad nepřipustného spojení zdrojů trojfázového napětí

Svorky trojfázového indukčního motoru, k nimž jsou vyvedeny konce tří fází vinutí, bývají uspořádány podle obr. 1.14. Chceme-li motor připojit na síť  $3 \times 380 \text{ V}$ , propojí-



Obr. 1.14 Svorkovnice trojfázového indukčního motoru při spojení do hvězdy a do trojúhelníka.  $R, S, T$  jsou začátky a  $R', S', T'$  jsou konce vinutí fází.

me svorky podle obr. 1.14a, čímž spojíme vinutí do Y. Pro síť  $3 \times 230 \text{ V}$  propojíme svorky podle obr. 1.14b, čímž spojíme vinutí do D.

### Spojení do lomené hvězdy

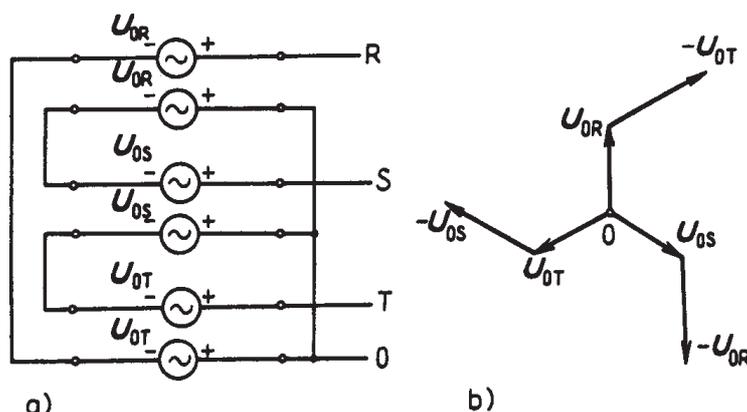
Písmenové označení: Z, znak: Z, obr. 1.15.

Používá se dvou trojic zdrojů, jejichž napětí  $U_{0R}$ ,  $U_{0S}$ ,  $U_{0T}$  tvoří trojfázovou souměrnou soustavu. Spojují se dvojice svorek souhlasné polaroty sousedních fází a zbývající svorky se připojí jednak k vedení, jednak do uzlu. Z fázového diagramu je zřejmé, že fázové napětí na vedení je

$$U_f = \sqrt{3}U,$$

kde  $U = U_{0R} = U_{0S} = U_{0T}$ .

Spojení do lomené hvězdy se používá pouze ve speciálních případech. Například u trojfázového transformátoru nesouměrně zatíženého se zlepši jeho vlastnosti, spojíme-li jeho výstupní vinutí do Z.



Obr. 1.15 Spojení do lomené hvězdy

## 1.1.4 Uzemnění trojfázových soustav

Rozlišujeme tyto případy:

- Soustava s izolovaným nulovým bodem* – nulový bod nemá úmyslné spojení se zemí (kromě spojení přes měřicí a ochranné přístroje s velmi velkou impedancí).
- Soustava s uzemněným nulovým bodem* – nulový bod je spojen se zemí přímo, nebo přes malý odpor. Rozlišujeme účinné uzemnění (při zemním spojení jedné fáze je nejvyšší efektivní hodnota zdravé fáze  $\leq 80\%$  nejvyššího sduženého napětí) a neúčinné uzemnění (není-li splněna tato podmínka).
- Soustava se zhášecí tlumivkou* – nulový bod je spojen se zemí přes zhášecí tlumivku.