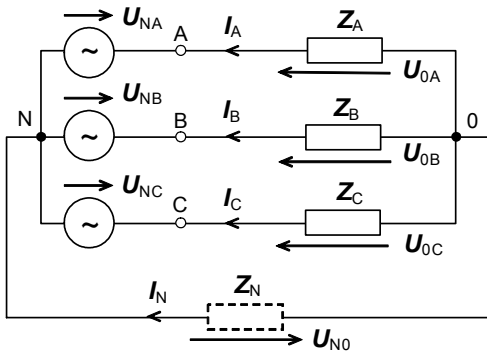


## Trojfázové obvody

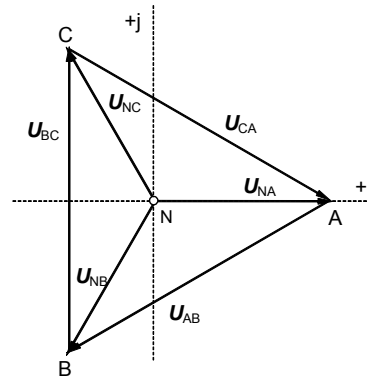
Cieľom laboratórnej úlohy je výpočtom a meraním určiť napätia a prúdy v trojfázovom obvode. Vyšetruvať budeme trojfázový obvod so súmerným trojfázovým zdrojom harmonického napätia a nesúmernou trojfázovou záťažou.

### Všeobecne

Trojfézový obvod so súmerným trojfázovým zdrojom a nesúmernou trojfázovou záťažou je na obr. 1, fázorový diagram napätí súmerného trojfázového zdroja zapojeného do hviezd je na obr. 2.



Obr. 1 Trojfázový obvod



Obr. 2 Fázorový diagram súmerného 3-fázového zdroja

Ak zvolíme počiatočnú fázu napätia  $U_{NA}$  nulovú, fázory fázových napätí súmerného zdroja zapojeného do hviezd pri priamom slede fáz sú

$$U_{NA} = U_f \cdot e^{j0} \quad U_{NB} = U_f \cdot e^{-j\frac{2}{3}\pi} \quad U_{NC} = U_f \cdot e^{j\frac{2}{3}\pi} \quad (1)$$

*Poznámka: V trojfázových a iných silnoprávných obvodoch sa používajú fázory efektívnych hodnôt, čiže veľkosti (moduly) fázorov sú efektívne hodnoty. Bod N sa nazýva neutrálny bod, prúd  $I_N$  je prúd neutrálneho vodiča.*

Veľkosť združených napätí súmerného trojfázového zdroja je  $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_z = \sqrt{3} \cdot U_f$ .

Impedancie  $Z_A, Z_B, Z_C$  sú impedancie záťaže (spotrebiča),  $Z_N$  je impedancia neutrálneho vodiča. Impedancia  $Z_N$  je porovnaní s impedanciami záťaže spravidla zanedbateľná (v neutrálnom vodiči nie je záťaž, teda je to impedancia samotného vodiča). V našom prípade môžeme predpokladať  $Z_N = 0$ . Druhým hraničným prípadom je stav, ak je neutrálny vodič rozpojený, vtedy je  $Z_N \rightarrow \infty, I_N = 0$ . Budeme analyzovať oba tieto prípady.

#### a) Štvorvodičový obvod ( $Z_N = 0$ )

Pre tento prípad je  $U_{N0} = 0, U_{0A} = U_{NA}, U_{0B} = U_{NB}, U_{0C} = U_{NC}$  a prúdy môžeme určiť priamo z Ohmovo zákona v komplexnom tvare

$$I_A = \frac{U_{0A}}{Z_A} \quad I_B = \frac{U_{0B}}{Z_B} \quad I_C = \frac{U_{0C}}{Z_C} \quad (2)$$

Prúd v neutrálnom vodiči určíme pomocou I. Kirchhoffovho zákona

$$I_N = -(I_A + I_B + I_C) \quad (3)$$

#### a) Trojvodičový obvod ( $Z_N \rightarrow \infty$ )

Pri nesúmernej záťaži (keď impedancie vo fázach A, B, C nie sú rovnaké) dôjde vo všeobecnosti k „vysunutiu“ bodu 0 z ťažiska trojuholníka združených napätí, čiže  $U_{N0} \neq 0$ . Najvhodnejší spôsob riešenia obvodu je uzlová metóda (metóda uzlových napätí). Fázor napätia  $U_{N0}$  je

$$U_{N0} = \frac{\frac{U_{NA}}{Z_A} + \frac{U_{NB}}{Z_B} + \frac{U_{NC}}{Z_C}}{\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C} + \frac{1}{Z_N}} \quad (4)$$

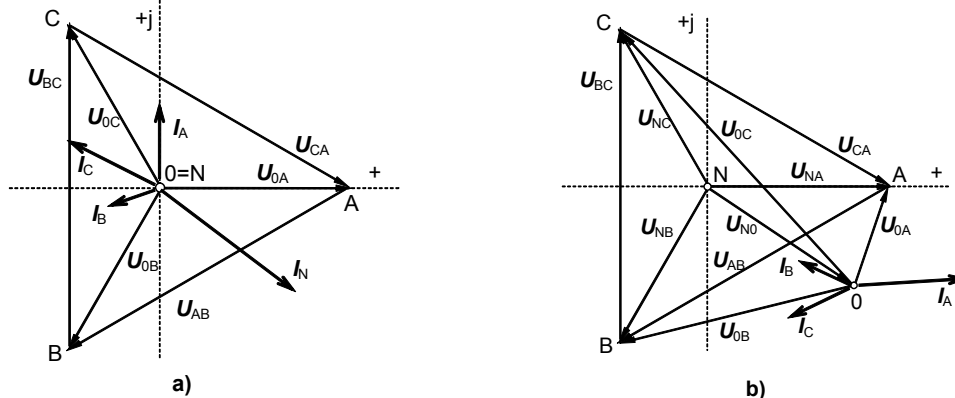
a fázory napätí na impedanciách

$$U_{0A} = U_{NA} - U_{N0} \quad U_{0B} = U_{NB} - U_{N0} \quad U_{0C} = U_{NC} - U_{N0} \quad (5)$$

Prúdy vo vodičoch sú

$$I_A = \frac{U_{NA} - U_{N0}}{Z_A} = \frac{U_{0A}}{Z_A} \quad I_B = \frac{U_{NB} - U_{N0}}{Z_B} = \frac{U_{0B}}{Z_B} \quad I_C = \frac{U_{NC} - U_{N0}}{Z_C} = \frac{U_{0C}}{Z_C} \quad I_N = 0 \quad (6)$$

Fázorový diagram napätí a prúdov štvorvodičového, resp. trojvodičového obvodu je pre určité zvolené impedancie  $Z_A, Z_B, Z_C$  na obrázku 3.



Obr. 3 Fázorový diagram a) štvorvodičového obvodu, b) trojvodičového obvodu

Ak v štvorvodičovom obvode je impedancia  $Z_N = 0$ , napätia  $U_{N0} = 0$  a napätia na impedanciách sú rovnako veľké  $U_{0A} = U_{0B} = U_{0C} = U_f$  (v praxi to zodpovedá normálnemu prevádzkovému stavu). Pri nerovnakých impedanciách  $Z_A, Z_B, Z_C$  sú však prúdy vo fázových vodičoch vo všeobecnosti rozdielne, pričom veľkosť prúdu v neutrálnom vodiči  $I_N$  môže byť väčšia ako prúdy vo fázových vodičoch. Preto v praxi má byť zaťaženie jednotlivých fáz čo najrovnomernejšie (pri súmernom zaťažení, t. j. ak  $Z_A = Z_B = Z_C$ , sústava prúdov vo fázových vodičoch je súmerná, prúd  $I_N$  je nulový).

V trojvodičovom obvode je vo všeobecnosti napätie  $U_{N0}$  nenulové, pričom v určitých prípadoch môže nadobúdať veľké hodnoty (pozri obr. 3b). V dôsledku toho napätia na niektorých impedanciách záťaže môžu byť väčšie ako fázové napätie zdroja  $U_f$ , na ktoré je záťaž dimenzovaná, čo môže spôsobiť poškodenie alebo zničenie spotrebičov. V praxi používanej rozvodnej sústave (3x230/400 V + N, 50 Hz) je to poruchový stav, ktorý v rozvodnej sieti nastane napr. náhodným prerušením alebo rozpojením obvodu neutrálneho vodiča. Preto sa trojvodičový obvod bez neutrálneho vodiča N používa len v obvodoch so súmernou záťažou (napr. na pripojenie trojfázových motorov).

### Úloha

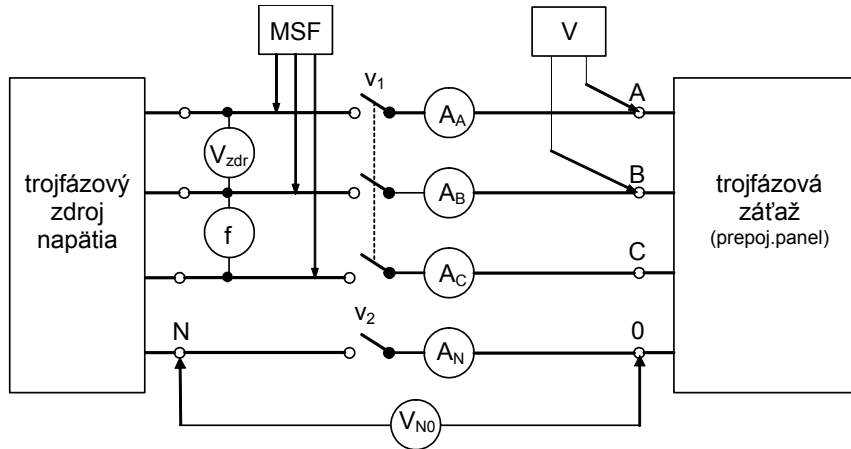
1. Zostavte 3-fázový obvod spojením 3-fázového súmerného zdroja zapojeného do hviezdy a 3-fázovej záťaže v zapojení do hviezdy
  - a) 3-vodičovým vedením ( $Z_N \rightarrow \infty$ ), alebo
  - b) 4-vodičovým vedením ( $Z_N = 0$ ).

Impedancie  $Z_A, Z_B, Z_C$  a  $Z_N$  zostavte predpísanou kombináciou prvkov  $R, L, C$ , ktoré sú k dispozícii na prepojovacom paneli.

2. Obvod pripojte na trojfázový zdroj. Odmerajte sled fáz, frekvenciu  $f$  a meraním určite veľkosť fázového napätia  $U_f$  a združeného napätia  $U_z$  trojfázového zdroja napätia. Vypočítajte hodnoty komplexných impedancií jednotlivých fáz  $Z_A, Z_B, Z_C$ .
3. Odmerajte veľkosti napätí na impedanciách jednotlivých fáz  $U_{0A}, U_{0B}, U_{0C}$ , napätie  $U_{N0}$ , a veľkosti prúdov  $I_A, I_B, I_C$ , (v štvorvodičovom obvode aj  $I_N$ ).

4. Prúdy v obvode a napätia na impedanciách vypočítajte analyticky riešením príslušného trojfázového obvodu. Namerané hodnoty napätí a prúdov porovnajte s hodnotami určenými výpočtom.
5. Z nameraných a vypočítaných hodnôt napätí a prúdov zostrojíte fázorový diagram napätí a prúdov obvodu.
6. Úlohy 3 až 5 zopakujte pre obrátený sled fáz trojfázového zdroja napätia.

### Zapojenie meracieho zariadenia



V, Vzdr, VN0 – voltmetre  
f – frekventomer

AA, AB, AC, AN – ampérmetre  
MSF – merač sledu fáz

### Postup pri meraní a výpočte

1. Zostavíme zapojenie meracieho zariadenia. Na prepojovacom paneli nastavíme predpísané zapojenie prvkov jednotlivých fáz trojfázovej záťaže.
2. Zostavený obvod pripojíme na trojfázový zdroj napätia. Zdrojom je trojfázový transformátor so zníženým (bezpečným) výstupným fázovým napätím  $U_f$ . Odmeriame sled fáz pomocou merača sledu fáz (je to v podstate asynchrónny motorček, pričom smer otáčania rotora je daný priamym, resp. obráteným sledom fáz). Odmeriame veľkosť fázových napätí zdroja  $U_{NA}$ ,  $U_{NB}$ ,  $U_{NC}$  a združených napätí  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ . Meranie robíme v zaťaženom stave, pretože zdroj nie je ideálny (má nenulové vnútorné impedancie, čo má vplyv na veľkosť výstupných napätí v zaťaženom stave). Ak sú rozdiely vo veľkostiach jednotlivých fázových, resp. združených napätí malé, môžeme s dostatočnou presnosťou postupovať tak, že aritmetický priemer nameraných napätí je fázové napätie  $U_f$ , resp. združené napätie  $U_z$  (pri ideálnom súmernom zdroji je  $U_z = \sqrt{3} \cdot U_f$ , ako to vidno aj z obrázka 2).

$$U_f = \frac{1}{3}(U_{NA} + U_{NB} + U_{NC}) \quad U_z = \frac{1}{3}(U_{AB} + U_{BC} + U_{CA})$$

Namerané veľkosti fázových a združených napätí zdroja zapíšeme do tabuľky 1.

Tabuľka 1  $f = \dots\dots$  Hz

$U_{NA}$ (V)	$U_{NB}$ (V)	$U_{NC}$ (V)	$U_f$ (V)
$U_{AB}$ (V)	$U_{BC}$ (V)	$U_{CA}$ (V)	$U_z$ (V)

Vypočítame komplexné impedancie  $Z_A$ ,  $Z_B$ ,  $Z_C$  zodpovedajúce nameranej frekvencii.

3. Odmeriame veľkosti napätí na impedanciách jednotlivých fáz  $U_{0A}$ ,  $U_{0B}$ ,  $U_{0C}$ , napätie  $U_{N0}$  a veľkosti prúdov  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ , (v štvorvodičovom obvode aj  $I_N$ ). Namerané hodnoty zapíšeme do tabuľky 2.

Tabuľka 2  $f = \dots\dots$  Hz sled fáz: .....

Hodnoty	$U_{0A}$ (V)	$U_{0B}$ (V)	$U_{0C}$ (V)	$U_{N0}$ (V)	$I_A$ (A)	$I_B$ (A)	$I_C$ (A)	$I_N$ (A)
namerané								
vypočítané								

4. Prúdy v obvode a napätia na impedanciách vypočítame analyticky riešením príslušného trojfázového obvodu. Pri priamom slede fáz pre fázové napätia zdroja použijeme vzťahy (1), za napätie  $U_f$  berieme hodnotu určenú z merania.

V štvorvodičovom obvode ( $Z_N = 0$ ) je  $U_{N0} = 0$ ,  $U_{0A} = U_{NA}$ ,  $U_{0B} = U_{NB}$ ,  $U_{0C} = U_{NC}$ . Prúdy určíme zo vzťahov (2).

V trojvodičovom obvode ( $Z_N \rightarrow \infty$ ,  $I_N = 0$ ) vypočítame fázor napätia  $U_{0N}$  metódou uzlových napätí zo vzťahu (4), fázory napätí na impedanciách zo vzťahu (5), fázory prúdov zo vzťahov (6). Vypočítané veľkosti napätí a prúdov zapíšeme do tabuľky 2.

(Určitou kontrolou správnosti výsledkov je, že súčet fázorov všetkých prúdov v obvode sa rovná nule.)

5. Zvolíme vhodné mierky napätia  $m_U = \dots$  V/cm a prúdu  $m_I = \dots$  A/cm.

Fázorový diagram z vypočítaných hodnôt (obr. 3a, resp. 3b) zostrojíme priamo na základe znalostí fázorov (t. j. veľkostí a fáz) všetkých napätí a prúdov v obvode.

Z merania poznáme len veľkosti (efektívne hodnoty) prúdov a napätí. Pri konštrukcii fázorového diagramu z merania postupujeme takto: Najprv zostrojíme súmernú hviezdu a trojuholník fázových a združených napätí zdroja (obr. 2). Pri trojvodičovom obvode potom postupne z bodov A, B, C, N pomocou kružidla zakreslíme oblúčky s veľkosťou zodpovedajúcou príslušným napätiam  $U_{0A}$ ,  $U_{0B}$ ,  $U_{0C}$ ,  $U_{N0}$ . Priesečník týchto oblúčikov je bod 0 (ak pre nepresnosť merania sa nepretínajú všetky oblúčky v jednom bode, bod 0 položíme do stredu medzi jednotlivými priesečníkmi). V štvorvodičovom obvode je  $U_{N0}$ , t. j. bod  $0 \equiv N$ . Fázový posun fázorov prúdov  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  voči fázorom napätí na impedanciách  $U_{0A}$ ,  $U_{0B}$ ,  $U_{0C}$  určíme na základe znalostí fáz impedancií  $Z_A$ ,  $Z_B$ ,  $Z_C$  (pozor na znamienko fáz pri impedancii indukčného, resp. kapacitného charakteru).

V trojvodičovom obvode má byť súčet fázorov  $I_A + I_B + I_C$  nulový. V štvorvodičovom obvode sa tento súčet rovná  $-I_N$ , jeho veľkosť má zodpovedať nameranej hodnote prúdu  $I_N$ .

6. Meranie a výpočet opakujeme pre obrátený sled fáz. Obrátený sled fáz dosiahneme vzájomnou zámenou dvoch ľubovoľných napájacích napätí na svorkách vyšetřovaného obvodu. Ak aj tu zvolíme fázu napätia  $U_{NA}$  rovnajúcu sa nule, fázory napätí zdroja budú

$$U_{NA} = U_f \cdot e^{j0} \quad U_{NB} = U_f \cdot e^{j\frac{2}{3}\pi} \quad U_{NC} = U_f \cdot e^{-j\frac{2}{3}\pi} \quad (1)$$

Skontrolujeme sled fáz a ďalej postupujeme rovnako ako v bodoch 3 až 5.

*Poznámka: Pri obrátenom slede fáz je vo všeobecnosti napätie  $U_{N0}$  aj prúdy v obvode iné ako pri priamom slede fáz. Dodržať priamy sled fáz je v praxi dôležité aj preto, že napr. smer otáčania trojfázových motorov je pri obrátenom slede fáz opačný. Preto v elektrických inštaláciách musia byť napr. všetky trojfázové zásuvky zapojené rovnako, tak, aby zapojenie kontaktov zásuviek aj vidlíc pripojených spotrebičov zodpovedalo priamemu sledu fáz.*