

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Scottovo zapojení transformátorů

Autor práce: **Bc. František Šonda**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.**

2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. František ŠONDA**
Osobní číslo: **E21N0026K**
Studijní program: **N0714A060017 Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Scottovo zapojení transformátorů**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

1. Popište Scottovo zapojení transformátorů a uveďte jeho vlastnosti.
2. Uveďte matematický popis pro výpočet napětí, proudů a výkonu ve všech vinutích.
3. Pro zvolená zatížení proveďte výpočet analyticky a vhodně zobrazte vypočtené veličiny.
4. Pro zvolená zatížení proveďte experimentální ověření měřením.
5. Shrňte získané poznatky.



Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací: **min. 10**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**


Seznam doporučené literatury:

1. Irwing Gottlieb: Practical Transforme Handbook. Plant A Tree 1998. ISBN 0 7506 3992 pp. 83.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.**
Katedra výkonové elektroniky a strojů

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **25. srpna 2023**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan


Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. října 2022

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na Scottovo zapojení transformátoru a jeho vlastností. V první části této diplomové práce popisujeme způsoby zapojení Scottova transformátoru a jeho vlastností. Dále se zabýváme matematickým popisem pro výpočet napětí, proudů a výkonů ve všech vinutí. Následuje analytický výpočet, který zobrazujeme ve vhodně zvolených vypočtených veličinách. V další části práce provádíme experimentální ověření měření. Závěr této práce je věnován zhodnocení a shrnutí získaných poznatků.

Klíčová slova

Scottův transformátor, matematický popis, analytické měření, experimentální měření, měření odporové zátěže, měření indukční zátěže, parametrické měření transformátoru.

Abstract

This master thesis is focused on Scott's transformer connection and its properties. In the first part of this thesis describes the ways of connecting the Scott transformer and its properties. Next, we deal with a mathematical description for calculating voltages, currents and power in all windings. This is followed by an analytical calculation, which is displayed in suitably selected calculated quantities. In the next part of the thesis, we perform experimental verification by measurement. The conclusion of this thesis is devoted to the evaluation and summary of the acquired knowledge.

Key Words

Scott transformer, mathematical description, analytical measurement, experimental measurement, resistive load measurement, inductive load measurement, parametric measurement of transformer.

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Bohumilu Skalovi, Ph.D. za odborné vedení práce a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat.

Obsah

Úvod	- 1 -
1 Scottův transformátor	- 2 -
1.1 Historie Scottova transformátoru	- 2 -
1.2 Zapojení Scottova transformátoru	- 3 -
1.3 Použití Scottova transformátoru	- 4 -
2 Matematický popis	- 5 -
2.1 Matematický výpočet Scottova transformátoru	- 5 -
2.1.1 Napětíové poměry Scottova transformátoru	- 6 -
2.1.2 Proudové poměry Scottova transformátoru	- 8 -
2.1.3 Charaktery jednotlivých zátěží Scottova transformátoru	- 10 -
2.1.4 Výkonové poměry Scottova transformátoru	- 16 -
2.2 Výpočet napětí	- 17 -
2.3 Výpočet proudu	- 18 -
2.4 Výpočet poměru	- 18 -
2.5 Přehled ztrát	- 19 -
3 Analytický výpočet	- 21 -
3.1 Analytický výpočet Scottova transformátoru	- 21 -
3.1.1 Experimentální určení počtu závitů	- 21 -
3.1.2 Výpočet magnetické indukce	- 22 -
3.1.3 Výpočet magnetického toku	- 23 -
3.1.4 Výpočet permeability magnetického obvodu	- 23 -
3.1.5 Výpočet magnetizační indukčnosti	- 23 -
3.1.6 Výpočet spřaženého toku primární cívky	- 24 -
3.1.7 Výpočet magnetické energie primární cívky	- 24 -
3.2 Měření Scottova transformátoru	- 25 -
3.3 Analytický výpočet v odporové zátěži	- 31 -
3.4 Analytický výpočet v induktivní zátěži	- 32 -
4 Experimentální ověření měřením	- 34 -
4.1 Měření naprázdno	- 34 -

4.1.1	Třífázové měření naprázdno	- 34 -
4.1.2	Jednofázové měření naprázdno – transformátor A.....	- 37 -
4.1.3	Jednofázové měření naprázdno – transformátor B	- 38 -
4.2	Vyhodnocení měření naprázdno	- 40 -
4.3	Měření nakrátko	- 41 -
4.3.1	Jednofázové měření nakrátko	- 41 -
4.4	Vyhodnocení měření nakrátko.....	- 42 -
4.5	Náhradní schéma s parametrickými výpočty transformátoru	- 43 -
4.6	Měření při odporové zátěži	- 45 -
4.6.1	Měření zapojení odporové zátěže transformátoru A + B	- 45 -
4.6.2	Měření zapojení odporové zátěže transformátoru A	- 48 -
4.6.3	Měření zapojení odporové zátěže transformátoru B.....	- 51 -
4.7	Měření při indukivní zátěži.....	- 54 -
4.7.1	Měření zapojení indukivní zátěže transformátoru A + B.....	- 54 -
4.7.2	Měření zapojení indukivní zátěže transformátoru A	- 57 -
4.7.3	Měření zapojení indukivní zátěže transformátoru B	- 60 -
5	Shrnutí získaných poznatků.....	- 63 -
	Seznam literatury a informačních zdrojů.....	I
	Přílohy	II

Seznam symbolů a zkratk

DMK – 32	Analyzátor třífázové sítě
HVDC	Vysokonapěťové stejnosměrné zařízení
TDS 2024B	Osciloskop

B	T	Magnetická indukce
$\cos \varphi$	-	Účinit
f	Hz	Frekvence
H	$A \cdot m^{-1}$	Intenzita magnetického pole
I_a	A	Proud zátěže transformátoru A
I_b	A	Proud zátěže transformátoru B
I_k	A	Proud nakrátko
I_0	A	Proud naprázdno
I_1	A	Primární proud
I_2	A	Sekundární proud
I_μ	A	Magnetizační proud
k_A	-	Převodový poměr transformátoru A
k_B	-	Převodový poměr transformátoru B
k_p	-	Převod transformátoru
L	H	Indukčnost
L_μ	H	Magnetizační indukčnost
N	-	Počet závitů primární odbočky
N_{zpom}	-	Počet závitů pomocné cívky
N_1	-	Počet závitů primární strany
N_2	-	Počet závitů sekundární strany
P	W	Činný výkon
ΔP_{cu}	W	Ztráty ve vinutí
ΔP_d	W	Přídavné ztráty
ΔP_{Fe}	W	Ztráty v železe
ΔP_{FeH}	W	Hysterezní ztráty
ΔP_{FeV}	W	Ztráty vířivými proudy
ΔP_k	W	Ztráty nakrátko
ΔP_0	W	Ztráty naprázdno
ΔP_{mg}	W	Magnetické ztráty
Q	var	Jalový výkon
R	Ω	Odpor
S	VA	Zdánlivý výkon
T	$^{\circ}C$	Teplota

U	V	Napětí
U_k	V	Napětí nakrátko
U_0	V	Napětí naprázdno
U_1	V	Primární napětí
U_2	V	Sekundární napětí
U_a	V	Napětí zátěže transformátoru A
U_b	V	Napětí zátěže transformátoru B
U_i	V	Indukované napětí
$U_{i\ max}$	V	Maximální indukované napětí
$U_{i\ prim}$	V	Indukované primární napětí
$U_{i\ pom}$	V	Indukované napětí pomocné cívky
$U_{i\ sec}$	V	Indukované sekundární napětí
U_{iz}	V	Závitové napětí
W_{mag}	J	Celková magnetická energie
w_{mag}	J/ m ³	Měrná magnetická energie
X_L	Ω	Rozptylová indukce
X_μ	Ω	Magnetizační reaktance
X_σ	Ω	Podélná reaktance
ω	Rad.s ⁻¹	Úhlová rychlost
Ψ	Wb	Sprážený tok
ϕ	Wb	Magnetický indukční tok
μ_r	-	Permeabilita

Úvod

Elektroenergetika má svůj původ v aplikacích stejnosměrného proudu. Vývoj indukčního motoru a transformátoru na konci 19. století však učinil střídavý proud ekonomicky schůdnějším než stejnosměrný. Střídavý přenos a rozvod elektrické energie se brzy poté staly uznávanou praxí. Přesto stále existuje mnoho aplikací stejnosměrného napájení, které mimo jiné zahrnují vysokonapěťové stejnosměrné (HVDC) přenosové systémy, stejnosměrné pohonné systémy, aplikace elektrolýzy a tavení, pulsně šířkově modulované regulátory a elektronické aplikace vyžadující stejnosměrná napětí sběrnice pro polovodičové a vakuová trubicová zařízení. Většina komerčních energetických systémů jsou založena na přenosu a distribuci střídavého proudu.

Cílem této práce je studovat vlastnosti při použití Scottova zapojení transformátorů, které převádějí trojfázovou síť na dvoufázovou. Zřejmá výhoda převedení na dvoufázový střídavý výkon je o jednu třetinu snížení počtu pevných částí a potřebných řídicích zařízení. Téhož lze dosáhnout i pomocí výkonových měničů. Je pravda, že cena polovodičových součástek v posledních letech dramaticky klesla, ale přesto se uvažuje o výhodách. Jde zejména o ztráty měniče a obsah harmonických, které v případě použití transformátorů zcela odpadají.

V této práci bylo cílem popsat zapojení Scottova transformátoru. Dále bylo provedeno experimentální měření v laboratoři fakulty, a následně bylo provedeno porovnání analytického měření s experimentálním.

V analytických výpočtech byly provedeny výpočty parametrů náhradního schéma na základě provedení měření naprázdno a nakrátko. Dále bylo provedeno experimentální měření při odporové a induktivní zátěži, symetrické i nesymetrické ve dvoufázovém systému.

1 Scottův transformátor

Scottovo zapojení transformátorů se používá zejména ve vysokonapěťových, méně často i v nízkonapěťových systémech. Jsou pojmenovány po svém vynálezci, elektroinženýrovi Charles F. Scottovi, který si konstrukci nechal patentovat v roce 1885. [4]

Scottovy transformátory jsou v elektrotechnice významné nejen pro trakci, ale i pro elektrické topné systémy, protože poskytují galvanické oddělení. Toto galvanické oddělení je dosaženo použitím primárního a sekundárního vinutí [1,4]

Pokud se s tím počítá již při návrhu, je možné je používat v jistém rozsahu frekvencí. Díky tomu jsou vhodné pro použití v různých aplikacích, včetně distribuce elektrické energie a regulace napětí. Scottovo zapojení transformátorů lze samozřejmě připojit k jiným transformátorům. [1]

1.1 Historie Scottova transformátoru

Historie Scottova zapojení je způsob spojení dvou jednofázových transformátorů do třífázové transformátorové sítě. Toto zapojení vyvinul kolem roku 1894 Charles F. Scott. V té době byl zaměstnán ve společnosti Westinghouse Electric and Manufacturing Company a úzce spolupracoval se slavným vynálezcem Nikolou Teslou na indukčním motoru na střídavý proud. [4]

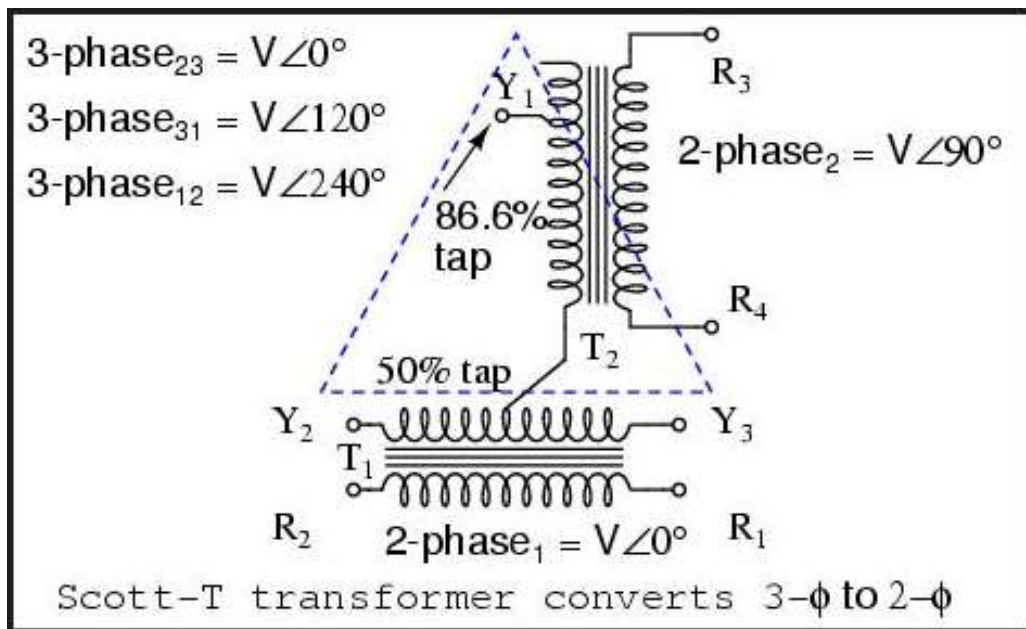
Později Scott pracoval pro Glasgow Corporation a Scottovu metodu zapojení vyvinul jako způsob, jak zvýšit účinnost a spolehlivost městské elektrické soustavy. Před Scottovou prací bylo třífázové napájení zajišťováno pomocí tří samostatných transformátorů, které byly zapojeny v konfiguraci delta. Tato metoda však byla neefektivní a náchylná k poruchám, a proto se Scott snažil vyvinout lepší řešení. [4]

Po mnoha experimentech a zkouškách přišel Scott s nápadem posunout primární a sekundární vinutí každého transformátoru o 90 stupňů. To umožnilo rovnoměrné rozložení třífázového napětí a zlepšila se celková účinnost systému. [4]

Scottova práce se setkala s velkým zájmem a nadšením a jeho metoda zapojení třífázových transformátorů se rychle stala standardem v oboru. Scottovo zapojení se dodnes hojně používá v elektrických energetických systémech po celém světě a je považováno za jednu z hlavních inovací v oblasti elektrotechniky. [4]

1.2 Zapojení Scottova transformátoru

V konfiguraci Scott-T jsou primární a sekundární vinutí každého transformátoru posunuta o 90 stupňů a dva transformátory jsou zapojeny do tvaru "T". [3,4]



Obrázek č. 1 – Zapojení Scott-T transformátoru (převzato z [4])

Scottovo spojení transformátorů je relativně snadno realizovatelné. Lze je rychle a snadno instalovat a po správném nakonfigurování vyžadují menší údržbu než trojice transformátorů. To z nich činí nákladově efektivní řešení v oblasti elektrické energie. [4]

1.3 Použití Scottova transformátoru

Scottův transformátor se používá v různých aplikacích v průmyslu, energetice a dalších oblastech. Zde jsou některé příklady:

- **Přenos energie:** Scottův transformátor se používá pro přenos třífázového proudu na dvě jednofázová vedení, což je užitečné pro přenos energie na vzdálené místo. Používá se v vysokonapěťových přenosových sítích a také v alternativních zdrojích energie, jako jsou větrné turbíny a solární panely.
- **Elektrické motory:** Scottův transformátor se používá k napájení třífázových elektrických motorů z dvoufázového napájení. Používá se například v průmyslových aplikacích, jako jsou pumpy, ventilátory a kompresory.
- **Elektrické topné systémy:** Scottův transformátor se používá v elektrických topných systémech, kde je potřeba přenést třífázový proud na dvě jednofázové větve.
- **Elektrické měření:** Scottův transformátor se používá v některých typech elektroměrů pro měření vysokého napětí.

Je mnoho aplikací a využití Scottova transformátoru. Vždy závisí na konkrétních potřebách a požadavcích v průmyslu a energetice. [5]

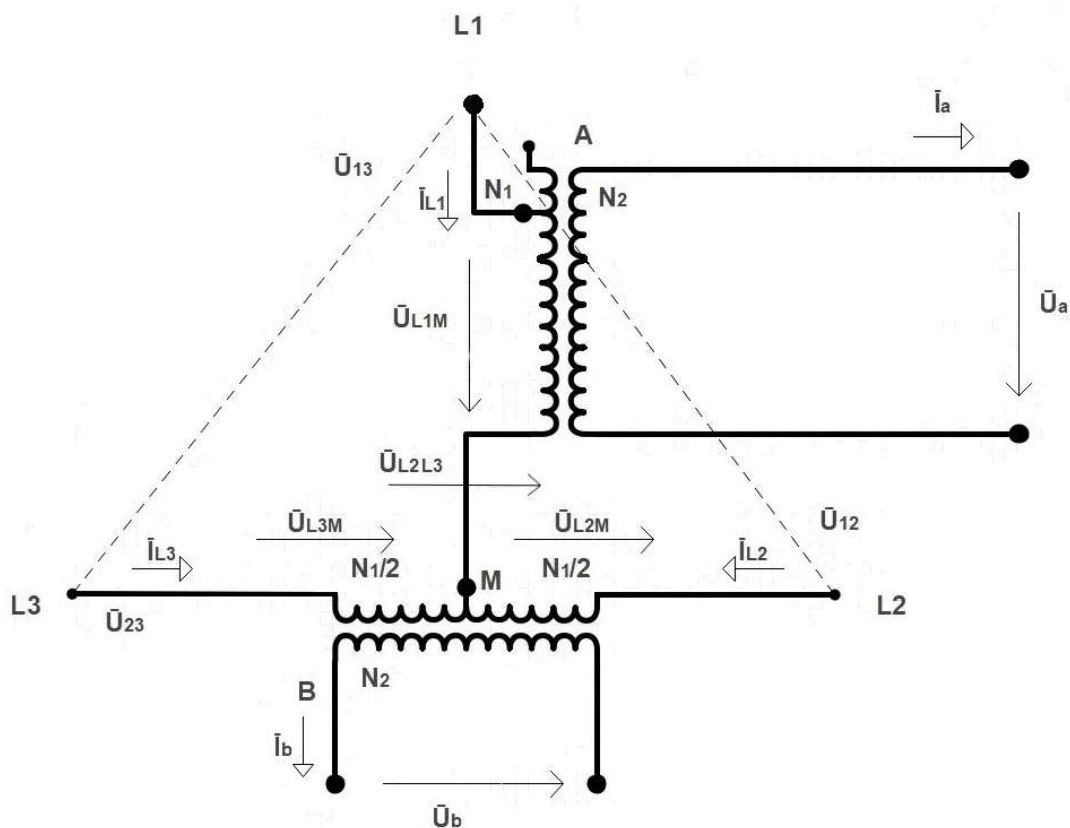
2 Matematický popis

Jedním z klíčových faktorů, které je třeba vzít v úvahu při výpočtu proudu, napětí a výkonu v transformátoru se Scottovým zapojením, je typ zátěže, ke které je transformátor připojen. Zátěž, tedy elektrické zařízení nebo systém, kterému transformátor dodává energii, může mít významný vliv na proud a napětí v transformátoru. Pokud je například zátěž čistě odporová, proud a napětí v transformátoru se vypočítá poměrně snadno. Pokud je však zátěž složitějším systémem, jako je indukční motor nebo nelineární elektronický obvod, může být výpočet proudu a napětí v transformátoru náročnější.

2.1 Matematický výpočet Scottova transformátoru

Scottovo zapojení se skládá ze dvou jednofázových transformátorů zapojenými podle obrázku č. 2. Skládá se z pomocného transformátoru A a hlavního transformátoru B, kde jmenovité výkony obou transformátorů jsou stejné. Odbočka u hlavního transformátoru B je na 50 % primárního vinutí, která je připojena k primárnímu vinutí pomocného transformátoru A. Druhý konec pomocného transformátoru A je připojen k síti z odbočky na 86,6 % vinutí. Na sekundární straně Scottova transformátoru je vytvářeno pravouhlé dvoufázové napětí. [6]

Často se oba transformátory konstruují stejně, aby byly vzájemně zaměnitelné. Prostě se použijí jen potřebné odbočky z vinutí. Tím klesá počet výrobních variant a skladové hospodářství se zjednoduší. [6]



Obrázek č. 2 – Schéma zapojení vinutí Scottova transformátoru

2.1.1 Napěťové poměry Scottova transformátoru

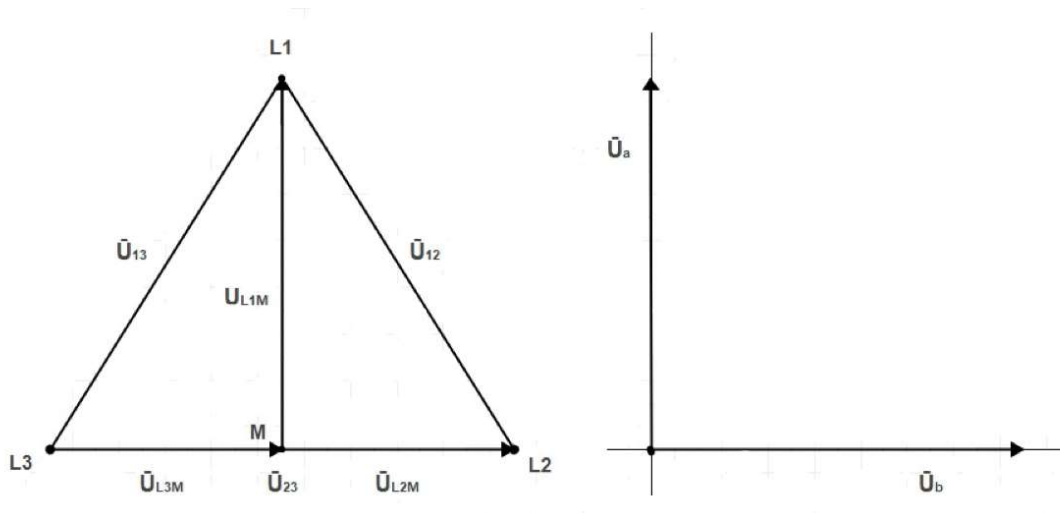
Fázory napětí v jednotlivých smyčkách můžeme vyjádřit:

$$\bar{U}_{13} + \bar{U}_{L3M} - \bar{U}_{L1M} = 0 \Rightarrow \bar{U}_{L1M} = \bar{U}_{L3M} + \bar{U}_{13} \quad (2.1)$$

$$\bar{U}_{23} - \bar{U}_{L2L3} = 0 \Rightarrow \bar{U}_{23} = \bar{U}_{L2L3} \quad (2.2)$$

$$\bar{U}_{12} + \bar{U}_{L1M} + \bar{U}_{L2M} = 0 \Rightarrow \bar{U}_{L1M} = -\bar{U}_{L2M} - \bar{U}_{12} \quad (2.3)$$

Na obrázku č.3 je znázorněn fázorový diagram napětí Scottova transformátoru.



Obrázek č. 3 – Fázorový diagram napětí Scottova transformátoru

Základním požadavkem zapojení Scottova transformátoru je stejné napětí na sekundární straně jak hlavního transformátoru, tak i pomocného transformátoru, a i stejný počet závitů obou sekundárních vinutí transformátorů. Pokud budou použity dva stejné transformátory, pak velikost napětí \bar{U}_{L1M} při symetrickém napětí je:

$$\bar{U}_{L1M} = \bar{U}_{L2L3} * \cos 30^\circ = \bar{U}_{L2L3} * \frac{\sqrt{3}}{2} \cong \bar{U}_{L2L3} * 0,866 \quad (2.4)$$

Za rovnosti této rovnice by však $\bar{U}_a \neq \bar{U}_b$ protože \bar{U}_a by dosahovalo pouze 86,6 % \bar{U}_b . Proto musíme snížit (upravit) počet závitů, nebo vyvést odbočku pomocného transformátoru A primárního vinutí tak aby platilo $\bar{U}_a = \bar{U}_b$.

Počty závitů a převod napětí lze vyjádřit vztahem:

$$\frac{\bar{U}_{L2L3}}{\bar{U}_b} = \frac{N_1}{N_2} \quad a \quad \frac{\bar{U}_{L1M}}{\bar{U}_a} = \frac{N}{N_2} \quad (2.5)$$

Kde N_1 je počet závitů primárního vinutí pomocného transformátoru A, N_2 je počet závitů sekundárního vinutí jak pomocného transformátoru A tak i hlavního transformátoru B a N je počet závitů z vyvedené odbočky primárního vinutí pomocného transformátoru A. [6]

Při $\bar{U}_a = \bar{U}_b$ platí:

$$\bar{U}_a = \bar{U}_b = \frac{N_2}{N} * \bar{U}_{L1M} = \frac{N_2}{N_1} * \bar{U}_{L2L3} \quad (2.6)$$

$$\frac{\bar{U}_{L1M}}{\bar{U}_{L2L3}} = \frac{N}{N_1} \quad (2.7)$$

A po úpravě platí:

$$\frac{\bar{U}_{L1M}}{\bar{U}_{L2L3}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.8)$$

$$\frac{N}{N_1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \quad \Rightarrow \quad N = \frac{\sqrt{3}}{2} * N_1 \quad (2.9)$$

Ze vztahu (2.9) je jasně patrné, že primární vinutí pomocného transformátoru A musí mít N závitů, tak aby platilo $\bar{U}_a = \bar{U}_b$.

Po dosazení ze vztahu (2.9) do vztahu (2.6) nám vychází:

$$\bar{U}_a = \frac{N_2}{\frac{\sqrt{3}}{2} * N_1} * \bar{U}_{L1M} \quad (2.10)$$

$$\bar{U}_b = \frac{N_2}{N_1} * \bar{U}_{L2L3} \quad (2.11)$$

2.1.2 Proudové poměry Scottova transformátoru

Jestliže magnetizační proud transformátorů zanedbáme, pak magnetomotorické napětí primárních a sekundárních stran se bude rovnat. Proud \bar{I}_{L1} se v bodě M (obrázek č. 3) vydělí dvěma (každá polovina primárního vinutí hlavního transformátoru B je navinuta na stejném jádře a výsledné magnetomotorické napětí je rovno nule). [6]

Proudy hlavního transformátoru B můžeme vyjádřit vztahem:

$$\bar{I}_{L2L3} * N_1 = \bar{I}_b * N_2 \quad \Rightarrow \quad \bar{I}_{L2L3} = \frac{N_2}{N_1} * \bar{I}_b \quad (2.12)$$

Proudy pomocného transformátoru A vyjádříme vztahem:

$$\bar{I}_{L1} * \frac{\sqrt{3}}{2} * N_1 = \bar{I}_a * N_2 \quad \Rightarrow \quad \bar{I}_{L1} = \frac{N_2}{N_1} * \frac{2}{\sqrt{3}} * \bar{I}_a \quad (2.13)$$

Pokud budeme uvažovat, že převod transformátoru bude $\frac{N_1}{N_2} = 1$ a zanedbáme magnetizační proud na sekundárních stranách transformátorů, pak pro napájecí proud \bar{I}_{L1} bude platit:

$$\bar{I}_{L1} = \frac{2}{\sqrt{3}} * \bar{I}_a \cong 1,15 * \bar{I}_a \quad (2.14)$$

A pro napájecí proudy \bar{I}_{L2} a \bar{I}_{L3} platí:

$$\bar{I}_{L2} = \bar{I}_{L2L3} - \frac{\bar{I}_{L1}}{2} = \frac{N_2}{N_1} * \left(\bar{I}_b - \frac{1}{\sqrt{3}} * \bar{I}_a \right) \quad (2.15)$$

$$\bar{I}_{L3} = -\bar{I}_{L2L3} - \frac{\bar{I}_{L1}}{2} = -\frac{N_2}{N_1} * \left(\bar{I}_b + \frac{1}{\sqrt{3}} * \bar{I}_a \right) \quad (2.16)$$

Použitím Kirchhoffova zákona:

$$\bar{I}_{L1} + \bar{I}_{L2} + \bar{I}_{L3} = 0 \quad (2.17)$$

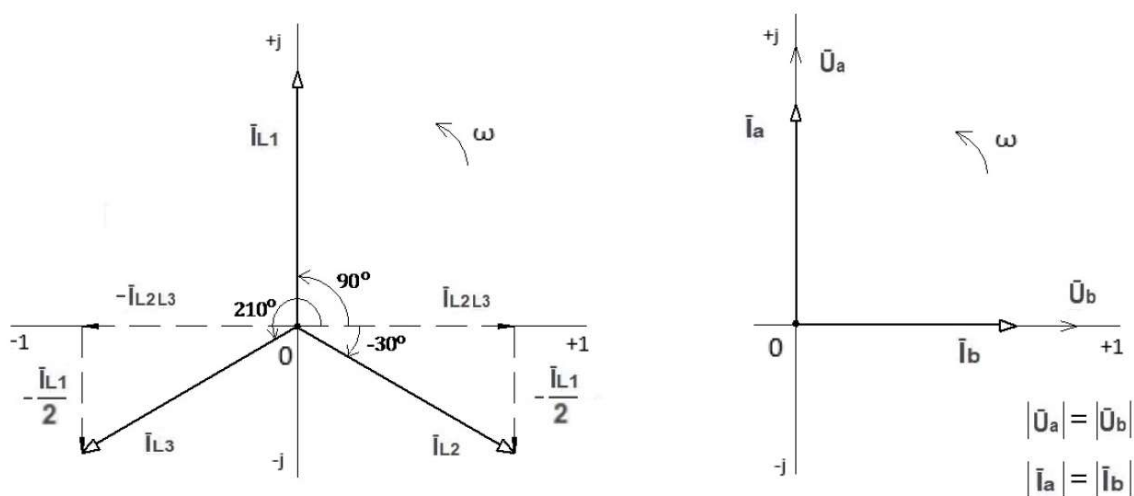
a dosazením vzorců (2,14), (2,15), (2,16) do (2,17) bude platit pro bod M:

$$\frac{N_2}{N_1} * \frac{2}{\sqrt{3}} * \bar{I}_a + \frac{N_2}{N_1} * \left(\bar{I}_b - \frac{1}{\sqrt{3}} * \bar{I}_a \right) + \left(-\frac{N_2}{N_1} \right) * \left(\bar{I}_b + \frac{1}{\sqrt{3}} * \bar{I}_a \right) = 0 \quad (2.18)$$

2.1.3 Charaktery jednotlivých zátěží Scottova transformátoru

Činný charakter zátěže, $\bar{Z}_a = \bar{Z}_b = R$:

Fázorový diagram proudů je znázorněn na obrázku č. 4.



Obrázek č. 4 – Fázorový diagram pro činný charakter zátěže Scottova transformátoru

Sekundární proudy:

$$\bar{I}_a = 1 * e^{j90^\circ} \quad (2.19)$$

$$\bar{I}_b = 1 * e^{j0^\circ} \quad (2.20)$$

Primární proudy podle vztahů (2,14), (2,15), (2,16):

$$\bar{I}_{L2L3} = \bar{I}_b = 1 * e^{j0^\circ} \quad (2.21)$$

$$\bar{I}_{L1} = \frac{2}{\sqrt{3}} * \bar{I}_a = \frac{2}{\sqrt{3}} * 1 * e^{j90^\circ} = \frac{2}{\sqrt{3}} * e^{j90^\circ} \cong 1,15 * e^{j90^\circ} \quad (2.22)$$

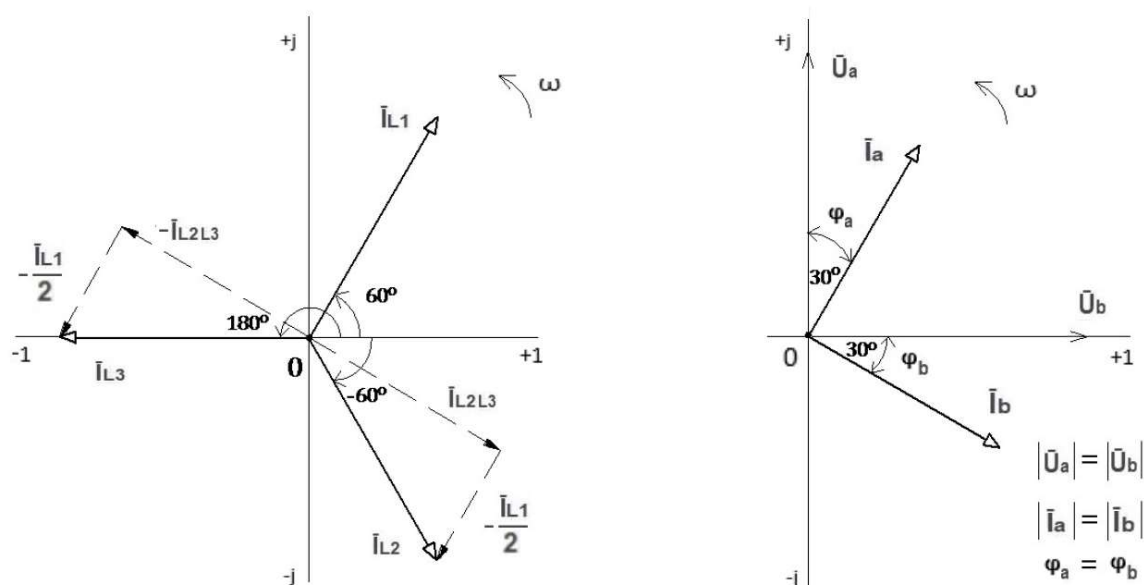
$$\bar{I}_{L2} = \bar{I}_{L2L3} - \frac{\bar{I}_{L1}}{2} = 1 * e^{j0^\circ} - \frac{\frac{2}{\sqrt{3}}}{2} * e^{j9^\circ} = \frac{2}{\sqrt{3}} * e^{-j30^\circ} \cong 1,15 * e^{-j30^\circ} \quad (2.23)$$

$$\bar{I}_{L3} = -\bar{I}_{L2L3} - \frac{\bar{I}_{L1}}{2} = 1 * e^{j180^\circ} - \frac{\frac{2}{\sqrt{3}}}{2} * e^{j9^\circ} = \frac{2}{\sqrt{3}} * e^{j210^\circ} \cong 1,15 * e^{j210^\circ} \quad (2.24)$$

Z výpočtů nám vychází, že síťové proudy jsou stejně veliké a liší se jen o fázové posuny o $\frac{2\pi}{3}$. Scottův transformátor zatížený stejnou zátěží tvoří symetrickou zátěž.

Komplexní charakter zátěže, $|\bar{Z}_a| = |\bar{Z}_b|$, $\cos \varphi_a = \cos \varphi_b$:

Fázorový diagram proudů je znázorněn na obrázku č. 5.



Obrázek č. 5 – Fázorový diagram pro komplexní charakter zátěže Scottova transformátoru

Sekundární proudy:

$$\bar{I}_a = 1 * e^{j60^\circ} \quad (2.25)$$

$$\bar{I}_b = 1 * e^{-j30^\circ} \quad (2.26)$$

Primární proudy podle vztahů (2,14), (2,15), (2,16):

$$\bar{I}_{L2L3} = \bar{I}_b = 1 * e^{-j30^\circ} \quad (2.27)$$

$$\bar{I}_{L1} = \frac{2}{\sqrt{3}} * \bar{I}_a = \frac{2}{\sqrt{3}} * 1 * e^{j60^\circ} = \frac{2}{\sqrt{3}} * e^{j60^\circ} \cong 1,15 * e^{j60^\circ} \quad (2.28)$$

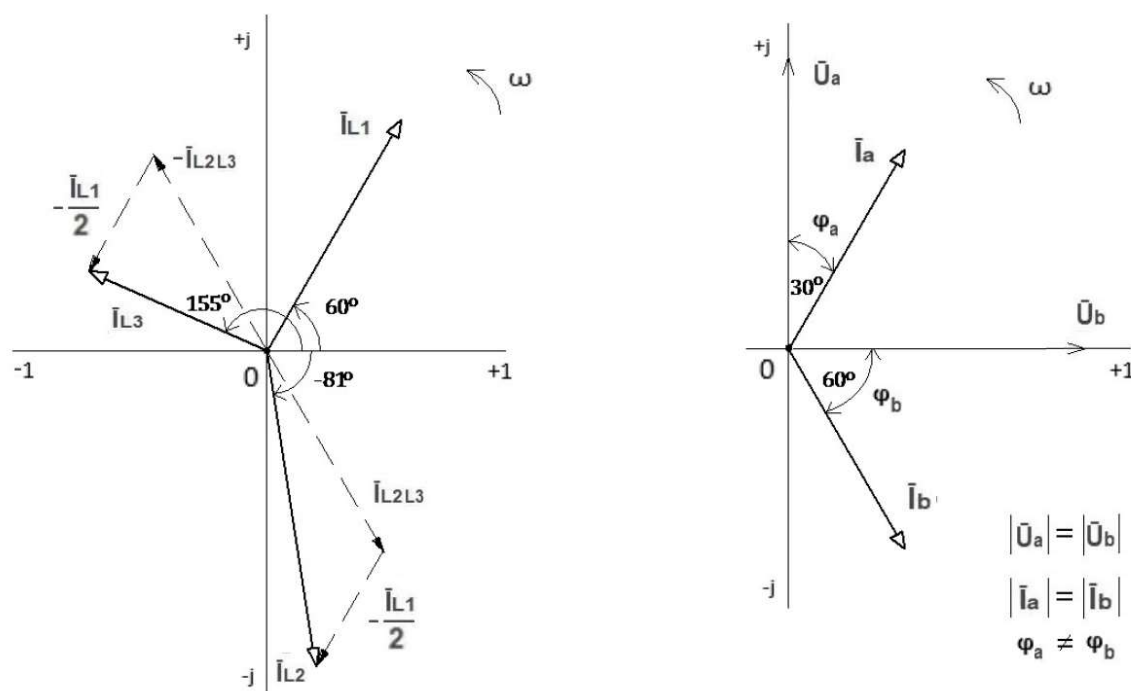
$$\bar{I}_{L2} = \bar{I}_{L2L3} - \frac{\bar{I}_{L1}}{2} = 1 * e^{-j30^\circ} - \frac{2}{2\sqrt{3}} * e^{j60^\circ} = \frac{2}{\sqrt{3}} * e^{-j60^\circ} \cong 1,15 * e^{-j60^\circ} \quad (2.29)$$

$$\bar{I}_{L3} = -\bar{I}_{L2L3} - \frac{\bar{I}_{L1}}{2} = 1 * e^{j150^\circ} - \frac{2}{2\sqrt{3}} * e^{j60^\circ} = \frac{2}{\sqrt{3}} * e^{j180^\circ} \cong 1,15 * e^{j180^\circ} \quad (2.30)$$

Z výpočtů nám vychází, že i tyto síťové proudy jsou stejně veliké. Scottův transformátor zatížený i touto komplexní zátěží tvoří symetrickou zátěž.

Komplexní charakter zátěže, $|\bar{Z}_a| = |\bar{Z}_b|$, $\cos \varphi_a \neq \cos \varphi_b$:

Fázorový diagram proudů je znázorněn na obrázku č. 6.



Obrázek č. 6 – Fázorový diagram pro komplexní charakter zátěže Scottova transformátoru

Sekundární proudy:

$$\bar{I}_a = 1 * e^{j60^\circ} \quad (2.31)$$

$$\bar{I}_b = 1 * e^{-j60^\circ} \quad (2.32)$$

Primární proudy podle vztahů (2,14), (2,15), (2,16):

$$\bar{I}_{L2L3} = \bar{I}_b = 1 * e^{-j60^\circ} \quad (2.33)$$

$$\bar{I}_{L1} = \frac{2}{\sqrt{3}} * \bar{I}_a = \frac{2}{\sqrt{3}} * 1 * e^{j60^\circ} = \left(\frac{\sqrt{3}}{3} + j \right) = \frac{2}{\sqrt{3}} * e^{j60^\circ} \cong 1,15 * e^{j60^\circ} \quad (2.34)$$

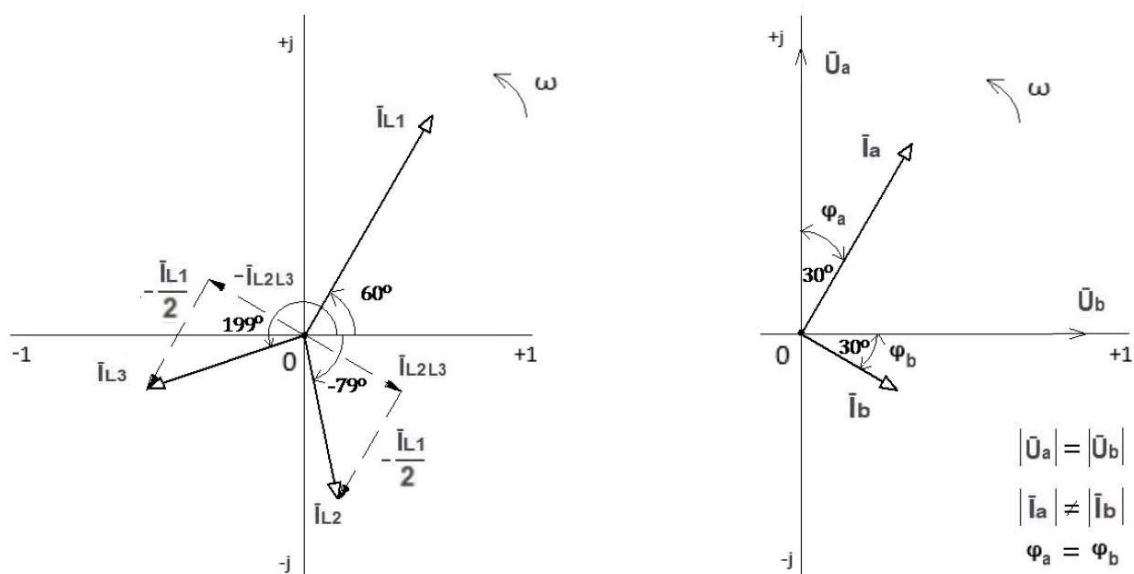
$$\begin{aligned} \bar{I}_{L2} &= \bar{I}_{L2L3} - \frac{\bar{I}_{L1}}{2} = 1 * e^{-j60^\circ} - \frac{\sqrt{3}}{2} * e^{j60^\circ} = \left(\frac{3 - \sqrt{3}}{6} - j \frac{1 + \sqrt{3}}{2} \right) \\ &\cong 1,38 * e^{-j81,2^\circ} \end{aligned} \quad (2.35)$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_{L3} &= -\bar{I}_{L2L3} - \frac{\bar{I}_{L1}}{2} = 1 * e^{j120^\circ} - \frac{\sqrt{3}}{2} * e^{j60^\circ} = \left(-\frac{3 + \sqrt{3}}{6} + j \frac{-1 + \sqrt{3}}{2} \right) \\ &\cong 0,87 * e^{j155,1^\circ} \end{aligned} \quad (2.36)$$

Scottův transformátor zatížený stejnou komplexní zátěží ale různými účinitky nám vytváří nesymetrickou zátěž napájecí sítě.

Komplexní charakter zátěže, $|\bar{Z}_a| \neq |\bar{Z}_b|$, $\cos \varphi_a = \cos \varphi_b$:

Fázorový diagram proudů je znázorněn na obrázku č. 7.



Obrázek č. 7 – Fázorový diagram pro komplexní charakter zátěže Scottova transformátoru

Sekundární proudy:

$$\bar{I}_a = 1 * e^{j60^\circ} \quad (2.37)$$

$$\bar{I}_b = 1 * e^{-j30^\circ} \quad (2.38)$$

Primární proudy podle vztahů (2,14), (2,15), (2,16):

$$\bar{I}_{L2L3} = \bar{I}_b = \frac{1}{2} * e^{-j30^\circ} \quad (2.39)$$

$$\bar{I}_{L1} = \frac{2}{\sqrt{3}} * \bar{I}_a = \frac{2}{\sqrt{3}} * 1 * e^{j60^\circ} = \left(\frac{\sqrt{3}}{3} + j \right) = \frac{2}{\sqrt{3}} * e^{j60^\circ} \cong 1,15 * e^{j60^\circ} \quad (2.40)$$

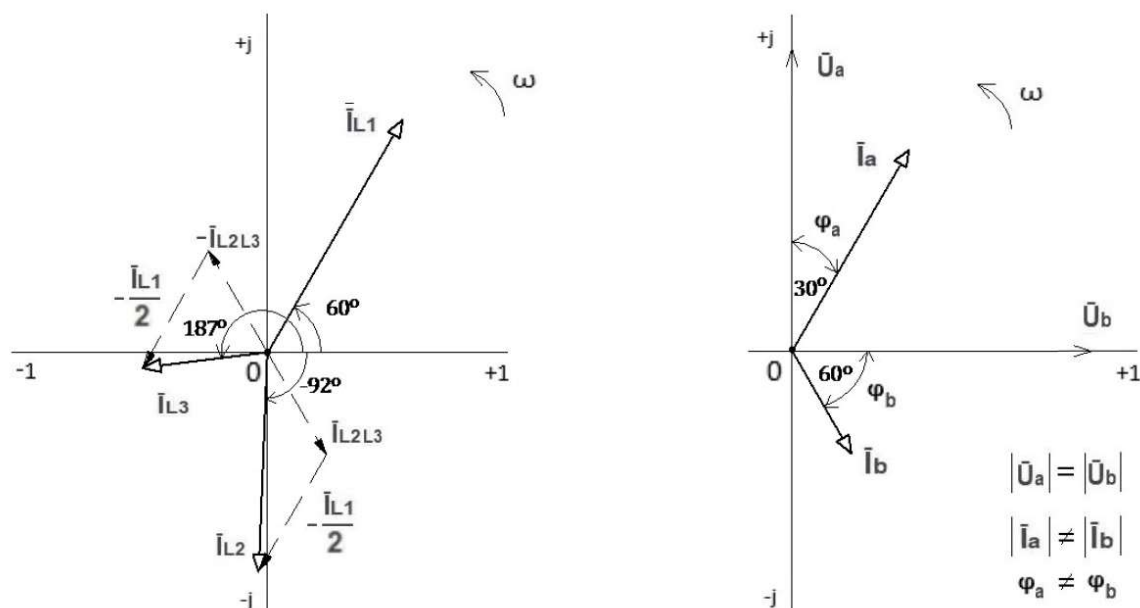
$$\bar{I}_{L2} = \bar{I}_{L2L3} - \frac{\bar{I}_{L1}}{2} = \frac{1}{2} * e^{-j30^\circ} - \frac{\frac{2}{\sqrt{3}}}{2} * e^{j60^\circ} = \left(\frac{\sqrt{3}}{12} - j \frac{3}{4} \right) \cong 0,76 * e^{-j79,1^\circ} \quad (2.41)$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_{L3} &= -\bar{I}_{L2L3} - \frac{\bar{I}_{L1}}{2} = \frac{1}{2} * e^{j150^\circ} - \frac{\frac{2}{\sqrt{3}}}{2} * e^{j60^\circ} = \left(-\frac{5\sqrt{3}}{12} - j \frac{1}{4} \right) \\ &\cong 0,76 * e^{j199,1^\circ} \end{aligned} \quad (2.42)$$

Scottův transformátor zatížený různou komplexní zátěží ale stejnými účinníky nám vytváří nesymetrickou zátěž napájecí sítě.

Komplexní charakter zátěže, $|\bar{Z}_a| \neq |\bar{Z}_b|$, $\cos \varphi_a \neq \cos \varphi_b$:

Fázorový diagram proudů je znázorněn na obrázku č. 8.



Obrázek č. 8 – Fázorový diagram pro komplexní charakter zátěže Scottova transformátoru

Sekundární proudy:

$$\bar{I}_a = 1 * e^{j60^\circ} \quad (2.43)$$

$$\bar{I}_b = 1 * e^{-j60^\circ} \quad (2.44)$$

Primární proudy podle vztahů (2,14), (2,15), (2,16):

$$\bar{I}_{L2L3} = \bar{I}_b = \frac{1}{2} * e^{-j60^\circ} \quad (2.45)$$

$$\bar{I}_{L1} = \frac{2}{\sqrt{3}} * \bar{I}_a = \frac{2}{\sqrt{3}} * 1 * e^{j60^\circ} = \left(\frac{\sqrt{3}}{3} + j \right) = \frac{2}{\sqrt{3}} * e^{j60^\circ} \cong 1,15 * e^{j60^\circ} \quad (2.46)$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_{L2} &= \bar{I}_{L2L3} - \frac{\bar{I}_{L1}}{2} = \frac{1}{2} * e^{-j60^\circ} - \frac{\frac{2}{\sqrt{3}}}{2} * e^{j60^\circ} = \left(\frac{3 - 2\sqrt{3}}{12} - j \frac{2 + \sqrt{3}}{4} \right) \\ &\cong 0,93 * e^{-j92,4^\circ}\end{aligned}\quad (2.47)$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_{L3} &= -\bar{I}_{L2L3} - \frac{\bar{I}_{L1}}{2} = \frac{1}{2} * e^{j120^\circ} - \frac{\frac{2}{\sqrt{3}}}{2} * e^{j60^\circ} = \left(-\frac{3 + 2\sqrt{3}}{12} - j \frac{2 - \sqrt{3}}{4} \right) \\ &\cong 0,54 * e^{j187,1^\circ}\end{aligned}\quad (2.48)$$

Scottův transformátor zatížený různou komplexní zátěží i různými účinitky nám vytváří opět nesymetrickou zátěž napájecí sítě. [6]

2.1.4 Výkonové poměry Scottova transformátoru

Pokud Scottův transformátor bude mít převod $\frac{N_1}{N_2} = 1$, napětí $|\bar{U}_a| = |\bar{U}_b| = |\bar{U}_{L2L3}| = 1V$, sekundární proud $|\bar{I}_a| = |\bar{I}_b| = 1$, účinitk $\cos \varphi_a = \cos \varphi_b = 1$, a symetrické napájení, zanedbáme činné ztráty pak na základě základního vztahu. [7]

$$\bar{S} = \bar{U} * \bar{I}^* \quad (2.49)$$

můžeme odvodit:

$$\bar{S}_a = \bar{U}_a * \bar{I}_a^* = 1 * e^{j90^\circ} * 1 * e^{-j90^\circ} = 1 \text{ (VA)} \quad (2.50)$$

$$\bar{S}_b = \bar{U}_b * \bar{I}_b^* = 1 * e^{j0^\circ} * 1 * e^{j0^\circ} = 1 \text{ (VA)} \quad (2.51)$$

S ohledem na uvedené vzorce budou primární proudy o $\frac{2}{\sqrt{3}}$ vyšší než sekundární proudy, pak můžeme napsat, že zdánlivý výkon na transformátoru B bude:

$$\begin{aligned}\bar{S}_B &= \bar{U}_{L2L3} * \bar{I}_{L2}^* = 1 * e^{j0^\circ} * \frac{2}{\sqrt{3}} * e^{j30^\circ} = \frac{2}{\sqrt{3}} * e^{j30^\circ} = \left(1 + j \frac{\sqrt{3}}{3} \right) \\ &\cong 1,15 * e^{j30^\circ} \text{ (VA)}\end{aligned}\quad (2.52)$$

A pro zdánlivý výkon na transformátoru A bude platit:

$$\bar{S}_A = \bar{U}_{L1M} * \bar{I}^*_{L1} = \frac{\sqrt{3}}{2} * e^{j90^\circ} * \frac{2}{\sqrt{3}} * e^{-j90^\circ} = 1 \text{ (VA)} \quad (2.53)$$

Z těchto výpočtů vyplývá, že činný výkon dodaný transformátorem do sekundárních zátěží je roven celkovému činnému výkonu dodanému transformátoru z napájecí třífázové sítě. Zdánlivý výkon dodaný z napájecí sítě je vyšší než zdánlivý výkon dodaný do sekundárních zátěží. [7]

Zdánlivý výkon transformátoru A je $\bar{S}_A = \bar{U}_{L1M} * \bar{I}^*_{L1} = 1 \text{ (VA)}$ a je nižší než zdánlivý výkon transformátoru B, který je $\bar{S}_B = \bar{U}_{L2L3} * \bar{I}^*_{L2} \cong 1,15 \text{ (VA)}$. [7]

2.2 Výpočet napětí

Výpočet indukovaného napětí v jednom závitě cívky s časovou změnou toku je dáno základním vztahem:

$$U_i = \frac{d\phi}{dt} \quad (2.54)$$

Je-li změna toku je sinusová, jeho okamžitá hodnota je dána vztahem:

$$\phi = \phi_{max} \sin \omega t \quad (2.55)$$

$$U_i = \omega \phi_{max} \cos \omega t \quad (2.56)$$

A maximální hodnota indukovaného napětí při $\cos \omega t = 1$ v jednom závitě je:

$$U_{i \max} = 2\pi f \phi_{max} \quad (2.57)$$

Efektivní hodnota indukovaného napětí v jednom závitě při sinusovém průběhu je:

$$U_i = \pi\sqrt{2} * f \phi_{max} = 4,44f \phi_{max} \quad (2.58)$$

Pokud měříme indukované napětí v primární a sekundární cívce, pak její velikost je dána vztahem:

$$U_{i\ prim} = 4,44N_{prim}\phi f \quad (2.59)$$

$$U_{i\ sec} = 4,44N_{sec}\phi f \quad (2.60)$$

Převod transformátoru je dán vztahem:

$$k_p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{i\ 1}}{U_{i\ 2}} = \frac{I_2}{I_1} \quad (2.61)$$

kde k_p je převodový poměr transformátoru, N_1 je počet závitů na primární cívce, N_2 je počet závitů na sekundární cívce, U_1 je napětí primárního vinutí, U_2 je napětí sekundárního vinutí, I_1 je proud primárního vinutí a I_2 je proud sekundárního vinutí. [2]

2.3 Výpočet proudu

Proud protékající transformátorem se Scottovým zapojením závisí na řadě faktorů, včetně napětí zdroje, zatížení systému a vlastností samotných transformátorů. Obecně platí, že proud protékající transformátory ve Scottově zapojení bude rovnoměrně rozdělen mezi jednotlivé fáze třífázového, a i dvoufázového systému, pokud ovšem napětí budou stejná a budou stejně zatíženy i jednotlivé fáze. Každý transformátor bude přenášet část celkového výkonu. [1]

Výpočet proudu a napětí v transformátorech s připojením „Scott“ je složitý proces, který zahrnuje několik faktorů a úvah. Pro úplné pochopení a přesný výpočet proudu a napětí v transformátoru se Scottovým zapojením je nutné mít základní znalosti principů fungování transformátoru a také určité znalosti z elektrotechniky a analýzy obvodů. [1]

2.4 Výpočet poměru

Převod transformátorů se liší v závislosti na požadovaném vstupním a výstupním napětí. [1]

Převod Scottova transformátoru závisí na poměru počtu závitů na primárním a sekundárním vinutí a na použité odbočce. [1]

$$k_A = \frac{U_1}{U_2} = \frac{347}{230} = 1,509 (-) \quad (2.62)$$

Převodový poměr pro transformátor B je 1:1,732.

$$k_B = \frac{U_1}{U_2} = \frac{400}{230} = 1,732 (-) \quad (2.63)$$

kde k_A je převodový poměr transformátoru A, k_B je převodový poměr transformátoru B, U_1 je napětí primárního vinutí a U_2 je napětí sekundárního vinutí. [2]

Pokud se používá Scottův transformátor pro jiná napětí, může mít jiný převodový poměr.

2.5 Přehled ztrát

Ztráty transformátoru se skládají ze ztrát v mědi ve vinutí, které jsou způsobeny odporem vinutí a z magnetických ztrát v jádru transformátoru. [2]

Ztráty v mědi jsou dány vztahem:

$$\Delta P_{cu} = RI^2 \quad (2.64)$$

Ztráty naprázdno vyjádříme vztahem:

$$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{j1} \quad (2.65)$$

Kde ztráty v železe ΔP_{Fe} se ještě dělí na ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{FeH} + \Delta P_{FeV} \quad (2.66)$$

Ztráty nakrátko vyjádříme vztahem:

$$\Delta P_k = \Delta P_{jk} + \Delta P_d \quad (2.67)$$

3 Analytický výpočet

3.1 Analytický výpočet Scottova transformátoru

3.1.1 Experimentální určení počtu závitů

Pokud k transformátoru nemáme katalogový list nebo výpočtový list, určíme jeho počet závitů následovně. Na transformátor navineme ručně pomocnou cívku s několika závitů libovolného vodiče. Na tomto známém počtu závitů změříme indukované napětí ve stavu transformátoru naprázdno. Napájíme při tom stranu vyššího napětí, nejlépe napětím jmenovitým. [2]

Pokud na pomocné cívce naměříme indukované napětí U_{ipom} a známe počet závitů pomocné cívky N_{zpom} pak závitové napětí lze vyjádřit vztahem:

$$U_{iz} = \frac{U_{ipom}}{N_{zpom}} \quad (3.1)$$

Počet závitů nižšího napětí N_2 lze vyjádřit ze známého fázového napětí U_{f2} :

$$N_2 = \frac{U_{f2}}{U_{iz}} \quad (3.2)$$

Převod transformátoru vypočítáme ze sdružených napětí dle vztahu:

$$k = \frac{U_1}{U_2} \quad (3.3)$$

A určíme počet závitů primárního vinutí vztahem:

$$N_1 = k * N_2 \quad (3.4)$$

3.1.2 Výpočet magnetické indukce

Rovnicí pro indukované napětí:

$$U_i = 4,44 * N * \Phi * f = 4,44 * N * B * S_{Fe} * f \quad (3.5)$$

Z měření V-A charakteristiky naprázdno můžeme určit B-H charakteristiku. Potřebujeme k tomu znát nejen počty závitů, ale i rozměry magnetického obvodu. [2]

Amplitudu magnetické indukce vypočteme následujícím způsobem:

$$B = \frac{U_i}{4,44 * N * S_{Fe} * f} \quad (T) \quad (3.6)$$

Magnetické napětí – její amplitudu určíme ze vztahu:

$$U_{m1} = N_1 * I_0 * \sqrt{2} \quad (A) \quad (3.7)$$

$$H = \frac{N_1 * I_0}{l_{Fe}} \quad (A \cdot m^{-1}) \quad (3.8)$$

Ve stavu nakrátko, pokud nezanedbáváme magnetizační proud platí:

$$U_m = N_1 * I_1 - N_2 * I_2 - N_1 * I_\mu \quad (A \cdot m^{-1}) \quad (3.9)$$

Amplitudu intenzity magnetického pole provádíme podle vztahu:

$$H = \frac{N_1 * I_1 - N_2 * I_2}{l_{Fe}} * \sqrt{2} \quad (A \cdot m^{-1}) \quad (3.10)$$

Přesnost výpočtu zde závisí na přesnosti měření primárního a sekundárního proudu. Nepřesnost měření (výchyly, kalibrace, zaokrouhlení) nám způsobí nepřesnost pro výpočet permeability. [2]

3.1.3 Výpočet magnetického toku

Magnetický tok (amplitudu) Φ určíme z rovnice:

$$\phi = B * S_{Fe} \text{ (mWb)} \quad (3.11)$$

3.1.4 Výpočet permeability magnetického obvodu

$$\mu_r = \frac{B}{H * \mu_0} \text{ (-)} \quad (3.12)$$

Poměrná permeabilita je závislá na sycení magnetického obvodu. S rostoucím sycením klesá její hodnota. Je vhodné navrhnout takové sycení magnetického obvodu, kdy je ještě hodnota poměrné permeability blízko svého maxima. [2]

3.1.5 Výpočet magnetizační indukčnosti

Ze vztahu určíme magnetizační proud:

$$I_\mu = I * \sin\varphi \text{ (A)} \quad (3.13)$$

Pak magnetizační reaktanci ze vztahu:

$$X_\mu = \frac{U_f}{I_\mu} \text{ (\Omega)} \quad (3.14)$$

A z magnetizační reaktance vypočteme magnetizační indukčnost:

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{\omega} \text{ (H)} \quad (3.15)$$

Magnetizační indukčnost je závislá (tak jako poměrná permeabilita) na sycení magnetického obvodu. S rostoucím sycením její hodnota klesá. [2]

3.1.6 Výpočet spřaženého toku primární cívky

Spřažený tok je rozdílný v podstatě pro každý závit primární cívky. Pokud se nejedná o rozptylový transformátor, tento rozptylový tok zanedbáme a budeme předpokládat, že platí zjednodušeně:

$$\Psi = N_1 * \phi \text{ (Wb)} \quad (3.16)$$

Obdobně se určuje i tok spřažený se sekundární cívkou. [2]

3.1.7 Výpočet magnetické energie primární cívky

Pro lineární magnetické obvody je možné určit magnetickou energii akumulovanou v magnetickém obvodu několika způsoby.

Měrnou magnetickou energii vypočítáme ze vztahu:

$$w_{mag} = \frac{1}{2} B_m * H_m \text{ (J/m}^3\text{)} \quad (3.17)$$

Pak celkovou magnetickou energii v jádře:

$$W_{mag} = w_{mag} * V \text{ (J)} \quad (3.18)$$

Bohužel tento postup poskytuje nepřesné výsledky, protože magnetická indukce v celém objemu jádra není konstantní. Vnější rohy jsou výrazně odlehčeny a vnitřní rohy naopak přesyceny. Vztah v této jednoduché podobě (dosazujeme konstantní hodnotu B_m a H_m pro celé jádro) lze použít snad jen pro velmi malá sycení. Pro větší hodnoty sycení, kdy však musí být ještě magnetický obvod lineární, je výsledek od skutečnosti asi 2x větší, pro oblasti nasycení pak i vícekrát.

Nicméně vztah poskytuje správné hodnoty v případě, že hodnoty platné v daném bodě objemu jádra integrujeme pro celý objem jádra. [2]

Další varianta výpočtu pro lineární obvody je:

$$W_{mag} = \frac{1}{2} L_1 * I_{1peak}^2 (J) \quad (3.19)$$

Pokud je pracovní bod v oblasti nasycení, tak tento vztah udává značně vyšší hodnotu, než ve skutečnosti magnetická energie je.

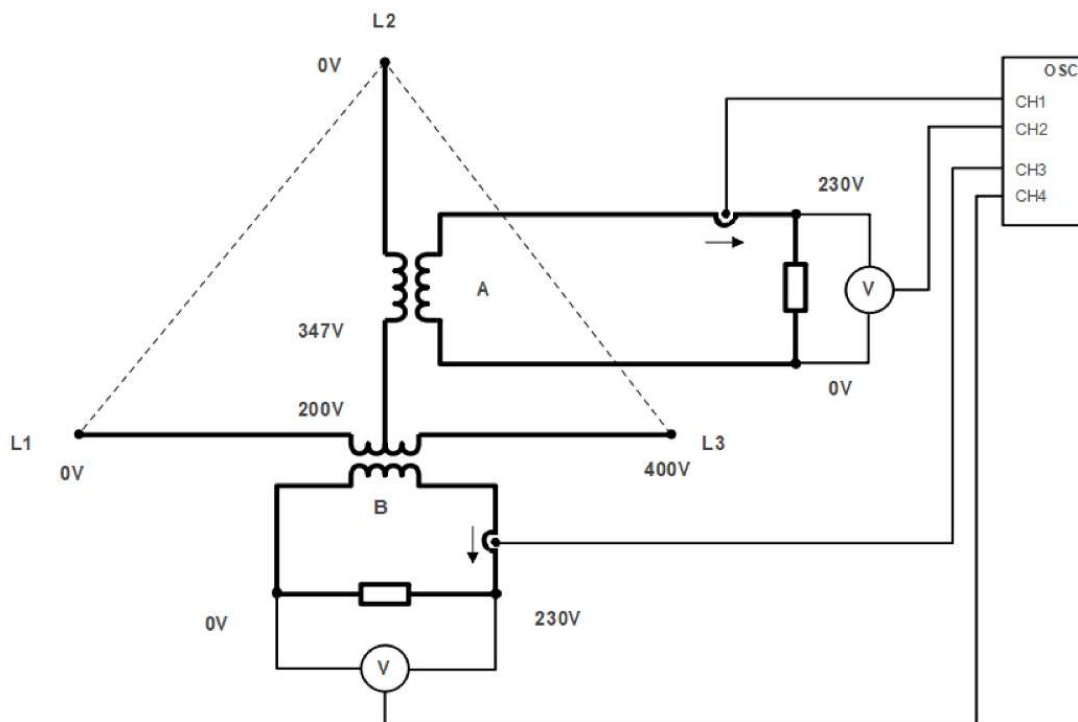
Jediný možný výpočet s vysokou přesností je určit energii integrací plochy nad magnetizační charakteristikou spřaženého toku cívky.

$$W_{mag} = \int \Psi * I_{\phi peak} * d\Psi (J) \quad (3.20)$$

Stejný postup se použije pro výpočet energie sekundární cívky. [2]

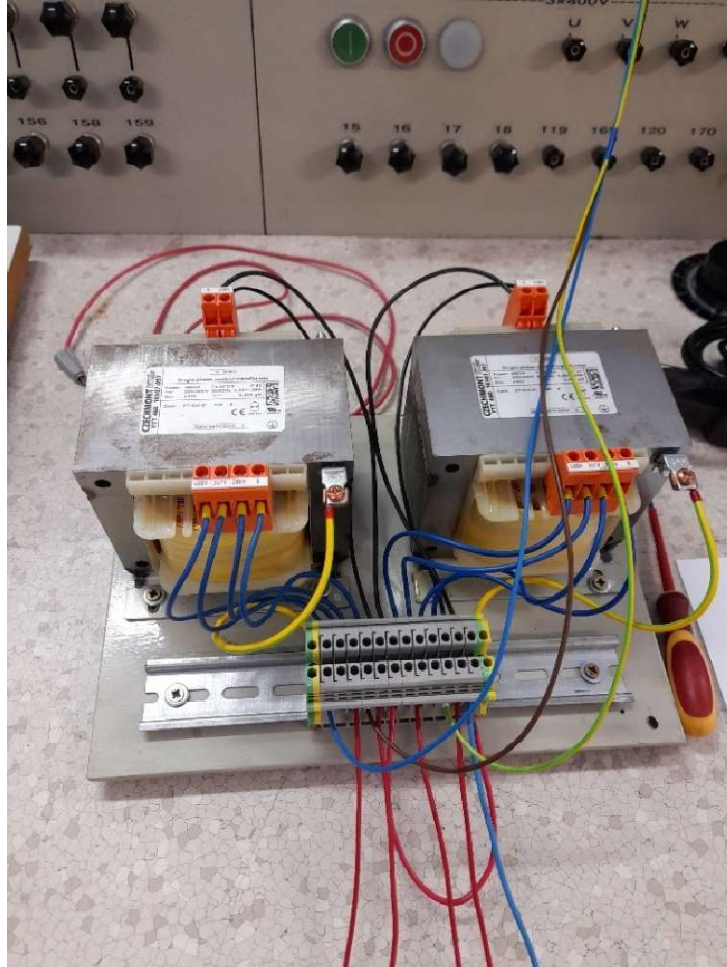
Scottův transformátor skládá ze dvou transformátorů, proto zde byly uvedeny i základní vzorce, které se vztahují na klasický transformátor.

3.2 Měření Scottova transformátoru



Obrázek č. 9 – Schéma zapojení měřících přístrojů

V Laboratoři bylo provedeno zapojení Scottova transformátoru s měřicími přístroji (obrázek č. 9). A následně bylo provedeno měření naprázdno, nakrátko a měření s odporovou a induktivní zátěží.



Obrázek č. 10 – Model Scottova transformátoru



Obrázek č. 11 – Štítkové hodnoty Scottova transformátoru

Pro laboratorní měření byly použity dva transformátory o štítkových hodnotách primárního vinutí 200//400 V., s odbočkou o hodnotě 200 V. (nebyla využita) a s odbočkou o hodnotě 347 V. Sekundárního vinutí 230 V. a výkonem 460 VA. (tabulka č. 1).

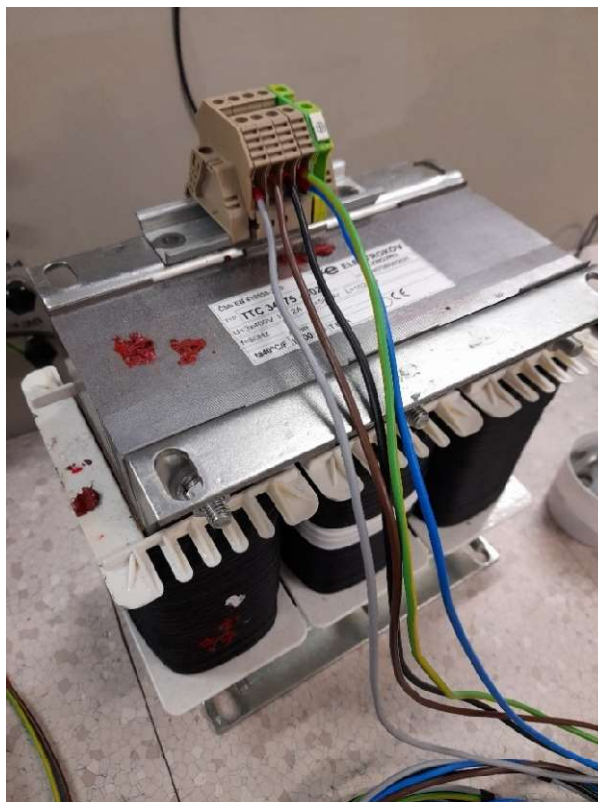
Tabulka č.1 – Štítkové hodnoty transformátorů

Výrobce	CZECHMONT			
Typ transformátoru	Jednofázový řídicí transformátor YTT			
Výrobní číslo	YTT 460 10307.097			
Rok výroby	27.10.2021			
Jmenovitý zdánlivý výkon	460 VA			
Vstupní napětí	200//400 V			
Výstupní napětí	230 V			
Vstupní napětí odbočky	0	200 V	347 V	400 V
Vstupní proud	2,52//1,26 A			
Výstupní proud	2 A			
Stupeň krytí	IP 20			
Frekvence	50/60 Hz			



Obrázek č. 12 – Odporová zátěž Scottova transformátoru

Pro odporovou zátěž byly zvoleny dvě rychlovarné konvice, každá o výkonu 2000 W. (obrázek č. 12).



Obrázek č. 13 – Indukční zátěž Scottova transformátoru

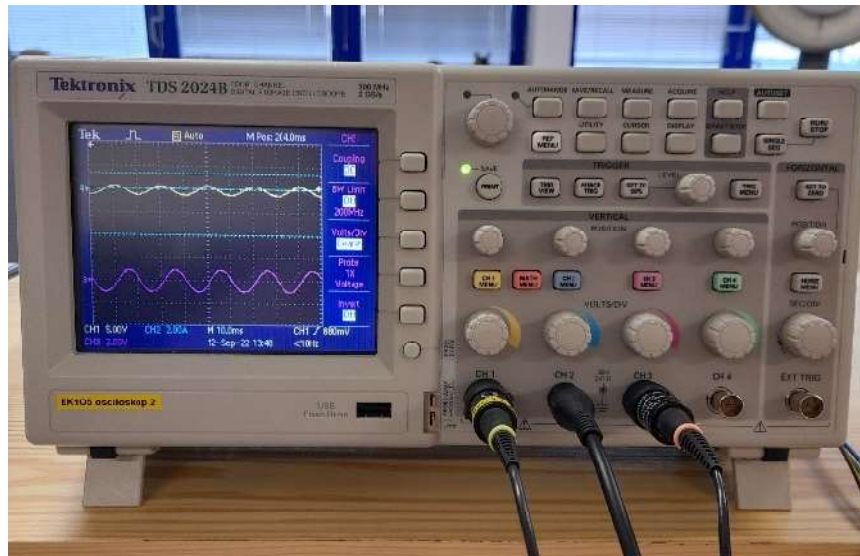
A pro zapojení indukční zátěže byla použita tlumivka (obrázek č. 13) o štitkových hodnotách napětí 3x400 V., proud 7,2 A. a indukčnosti 102 mH. (tabulka č. 2).



Obrázek č. 14 – Štitkové hodnoty Indukční zátěže

Tabulka č.2 – Štitkové hodnoty indukční zátěže

Výrobce	ELEKTROKOV
Typ	TTC 34075-0026
Výrobní číslo	45708/06/2021
Rok výroby	8.6.2021
Napětí	3x400 V
Proud	7,2 A
Jalový výkon	5 kVAr
Indukčnost	102 mH
Stupeň krytí	IP 00
Frekvence	50 Hz



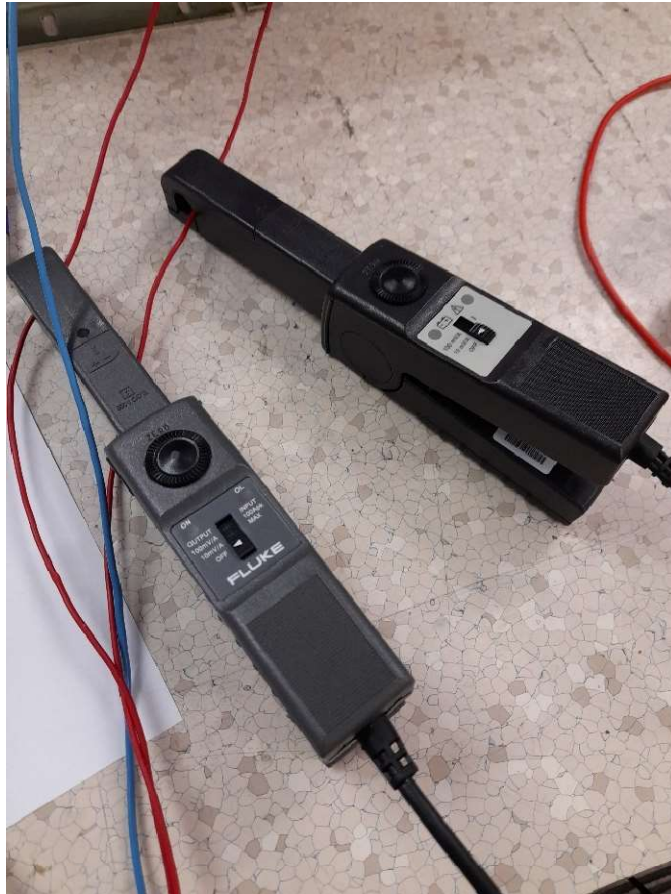
Obrázek č. 15 – Osciloskop

Pro měření napětí a proudů v 3f. síti byl použit osciloskop typ TDS 2024B od firmy Tektronix (obrázek č. 15). A pro měření napětí a proudů v třífázové síti byl použit analyzátor sítě DMK – 32 (obrázek č. 16).



Obrázek č. 16 – Analyzátor sítě DMK – 32

Pro měření proudů ve 2f. síti byly použity proudové sondy typu A622 značky Fluke (obrázek č. 17).



Obrázek č. 17 – Klešťový ampérmetry firmy Fluke

Provedené měření bylo uloženo, zpracováno a následně provedeno grafické zobrazení naměřených hodnot.

3.3 Analytický výpočet v odporové zátěži

Ověření analytického výpočtu v odporové zátěži transformátoru A a B:

Výpočet odporu 2kW konvice:

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{230^2}{2000} = 26,45 (\Omega) \quad (3.21)$$

Vypočítaným odporem konvice můžeme vypočítat proud procházející zátěží:

Abychom mohli provést porovnání s experimentálním měřením při výpočtu volíme napětíovou hladinu podle naměřených hodnot dle tabulky č.12.

$$U_a = 37,7 \text{ (V)} \quad (3.22)$$

$$U_b = 16,5 \text{ (V)} \quad (3.23)$$

$$I_a = \frac{U_a}{R} = \frac{37,7}{26,45} = 1,42 \text{ (A)} \quad (3.24)$$

$$I_b = \frac{U_b}{R} = \frac{16,5}{26,45} = 0,62 \text{ (A)} \quad (3.25)$$

U čistě odporové části je fázový posun $\varphi = 0$ a $\cos\varphi = 1$. Pak bude výpočet vypadat takto:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{37,7 * 1,42 * 1}{37,7 * 1,42} = 1 \quad (3.26)$$

Stejné výpočty byly provedeny na hladinách $U_a = 26,7 \text{ (V)}$ a $U_b = 26,6 \text{ (V)}$ dle tabulky č.13, 14. Výsledky výpočtů byly zaznamenány v tabulce č.18.

3.4 Analytický výpočet v induktivní zátěži

Ověření analytického výpočtu v induktivní zátěži transformátoru A a B.

Výpočet reaktance tlumivky při známé indukčnosti $L = 102 \text{ (mH)}$:

$$X_L = \omega L = 314,16 * 0,102 = 32,04 \text{ (\Omega)} \quad (3.27)$$

$$\omega = 2 * \pi * f = 2 * \pi * 50 = 314,16 \text{ (Rad. s}^{-1}\text{)} \quad (3.28)$$

Vypočtenou reaktancí spočítáme proud u obou transformátorů:

Abychom mohli provést porovnání s experimentálním měřením volíme napěťovou hladinu podle naměřených hodnot dle tabulky č.16 a tabulky č.17.

$$U_a = 26,8 \text{ (V)} \quad (3.29)$$

$$U_b = 26,9 \text{ (V)} \quad (3.30)$$

$$I_a = \frac{U_a}{X_L} = \frac{26,8}{32,04} = 0,83 \text{ (A)} \quad (3.31)$$

$$I_b = \frac{U_b}{X_L} = \frac{26,9}{32,04} = 0,84 \text{ (A)} \quad (3.32)$$

Účinník fázového posunu při napájení 26,8, V na transformátoru A:

$$\cos\varphi_a = \frac{P}{S} = \frac{30,5}{22,2} = 1,37 \text{ (rad)} \quad (3.33)$$

Převédeme radiány na stupně:

$$1,37 * \frac{180}{\pi} = 78,5^\circ \quad (3.34)$$

Účinník fázového posunu při napájení 26,9 V na transformátoru B:

$$\cos\varphi_b = \frac{P}{S} = \frac{31,6}{22,3} = 1,4 \text{ (rad)} \quad (3.35)$$

Převédeme radiány na stupně:

$$1,4 * \frac{180}{\pi} = 80,2^\circ \quad (3.36)$$

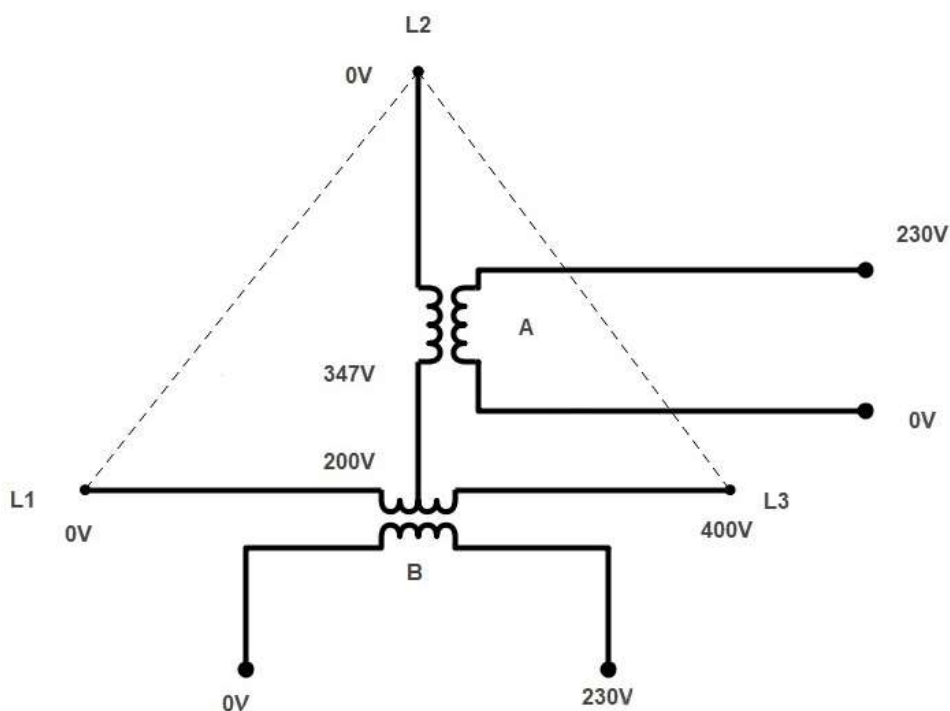
Stejné výpočty byly provedeny na hladinách $U_a = 36,1 \text{ (V)}$ a $U_b = 38,4 \text{ (V)}$ dle tabulky č.16, 17. Výsledky výpočtů byly zaznamenány v tabulce č.19.

4 Experimentální ověření měření

Experimentálním měřením bylo postupováno takto. Scottův transformátor byl zapojen dle schématu a konkrétnímu druhu měření (naprázdno, nakrátko) a typu zátěže (odporové, induktivní, kapacitní). Byla změřena a uložena data, která byla později zpracována a upravena do tabulkové podoby a následně vložena k měření příslušné zátěže. Byl vytvořen zdrojový kód v programu MATLAB na vygenerování fázorových diagramů (příloha č. 1), která byla vložena v podobě obrázku do příslušné části této diplomové práce.

4.1 Měření naprázdno

4.1.1 Třífázové měření naprázdno



Obrázek č. 18 – Schéma 3f. zapojení naprázdno

4 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ MĚŘENÍM

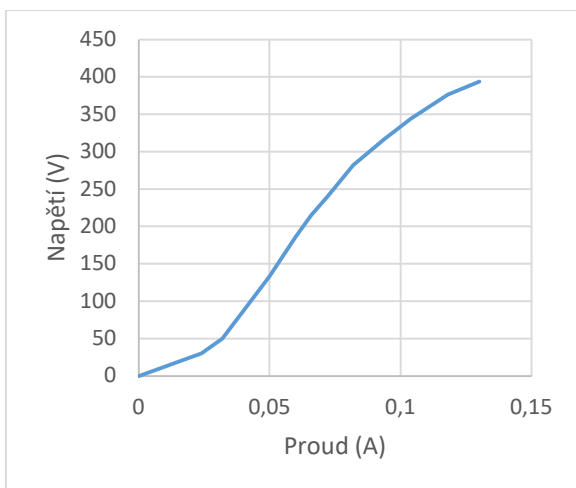
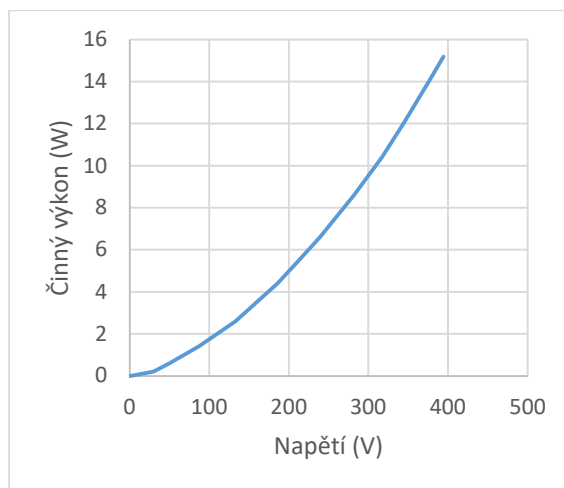
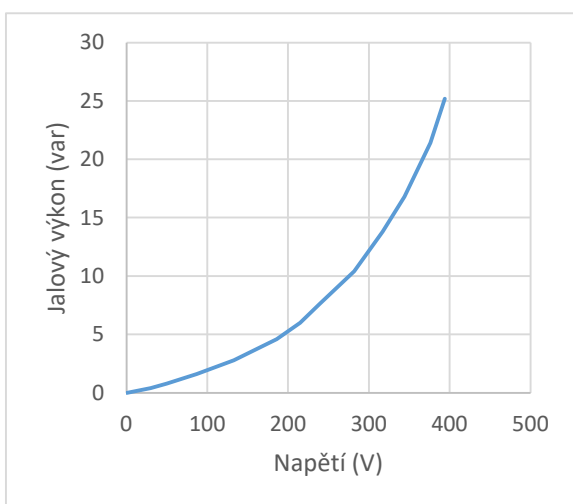
Tabulka č.3 – Naměřené hodnoty – 3f. zapojení naprázdno

U L1-L2 (V)	394	376	344	317	282	239	215	186	133	87	50	30
U L2-L3 (V)	395	377	345	319	284	241	216	188	134	88	51	30
U L1-L3 (V)	391	373	342	316	280	238	214	186	132	87	50	30
I L1 (A)	0,65	0,59	0,52	0,47	0,41	0,36	0,33	0,3	0,25	0,2	0,16	0,12
I L2 (A)	0,68	0,63	0,55	0,5	0,44	0,38	0,35	0,32	0,27	0,22	0,17	0,13
I L3 (A)	0,7	0,64	0,56	0,51	0,45	0,39	0,36	0,33	0,28	0,23	0,18	0,13
P L1 (W)	76	70	60	52	43	33	28	22	13	7	3	1
P L2 (W)	79	72	61	53	44	34	29	23	13	7	3	1
P L3 (W)	78	72	61	53	44	34	29	23	13	7	2	1
Q L1 (var)	126	107	84	69	52	38	30	23	14	8	4	2
Q L2 (var)	133	117	91	75	57	41	33	26	16	9	4	2
Q L3 (var)	138	119	93	77	59	42	35	27	17	10	5	2

Naměřené hodnoty I, P a Q bylo nutné násobit $\times 0,2$ – převodem proudových transformátorů MTP, použitých v analyzátoru DMK 32.

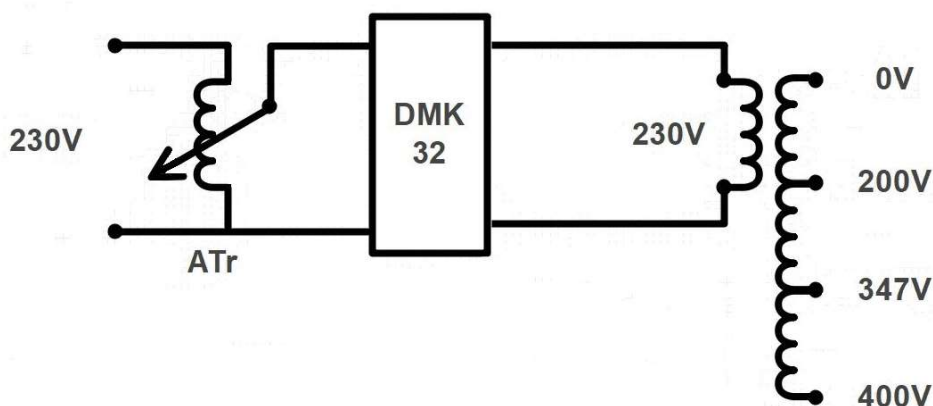
Tabulka č.4 – Násobené hodnoty – I, P a Q $\times 0,2$

U L1-L2 (V)	394	376	344	317	282	239	215	186	133	87	50	30
U L2-L3 (V)	395	377	345	319	284	241	216	188	134	88	51	30
U L1-L3 (V)	391	373	342	316	280	238	214	186	132	87	50	30
I L1 (A)	0,13	0,118	0,104	0,094	0,082	0,072	0,066	0,06	0,05	0,04	0,032	0,024
I L2 (A)	0,136	0,126	0,11	0,1	0,088	0,076	0,07	0,064	0,054	0,044	0,034	0,026
I L3 (A)	0,14	0,128	0,112	0,102	0,09	0,078	0,072	0,066	0,056	0,046	0,036	0,026
P L1 (W)	15,2	14	12	10,4	8,6	6,6	5,6	4,4	2,6	1,4	0,6	0,2
P L2 (W)	15,8	14,4	12,2	10,6	8,8	6,8	5,8	4,6	2,6	1,4	0,6	0,2
P L3 (W)	15,6	14,4	12,2	10,6	8,8	6,8	5,8	4,6	2,6	1,4	0,4	0,2
Q L1 (var)	25,2	21,4	16,8	13,8	10,4	7,6	6	4,6	2,8	1,6	0,8	0,4
Q L2 (var)	26,6	23,4	18,2	15	11,4	8,2	6,6	5,2	3,2	1,8	0,8	0,4
Q L3 (var)	27,6	23,8	18,6	15,4	11,8	8,4	7	5,4	3,4	2	1	0,4

Obrázek č. 19 – průběh závislosti $U-I$ Obrázek č. 20 – průběh závislosti $P-U$ Obrázek č. 21 – průběh závislosti $Q-U$

Zpracování průběhů závislostí byla použita fáze L1. Dle naměřených hodnot tabulky č.4 by byly závislosti na ostatních fázích obdobné.

4.1.2 Jednofázové měření naprázdno – transformátor A



Obrázek č. 22 – Schéma 1f. zapojení naprázdno

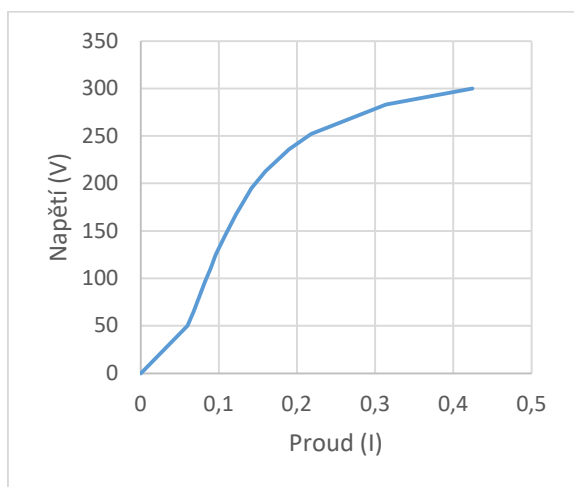
Tabulka č.5 – Naměřené hodnoty – 1f. zapojení naprázdno – transformátor A

U (V)	300	283	252	236	213	195	167	145	125	111	96	65	50
I (A)	2,12	1,57	1,09	0,95	0,8	0,71	0,61	0,54	0,48	0,45	0,41	0,34	0,3
P (W)	82	72	57	51	42	36	28	23	18	15	12	6	4
Q (var)	303	206	123	98	73	58	42	32	24	20	16	9	7

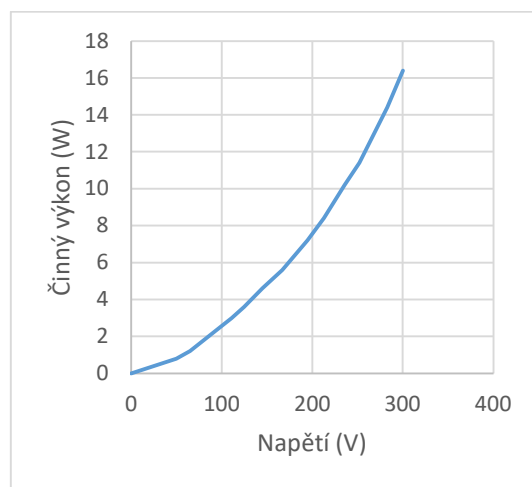
Naměřené hodnoty I, P a Q bylo nutné násobit $\times 0,2$ – převodem proudových transformátorů MTP, použitých v analyzátoru DMK 32.

Tabulka č.6 – Násobené hodnoty – I, P a Q $\times 0,2$

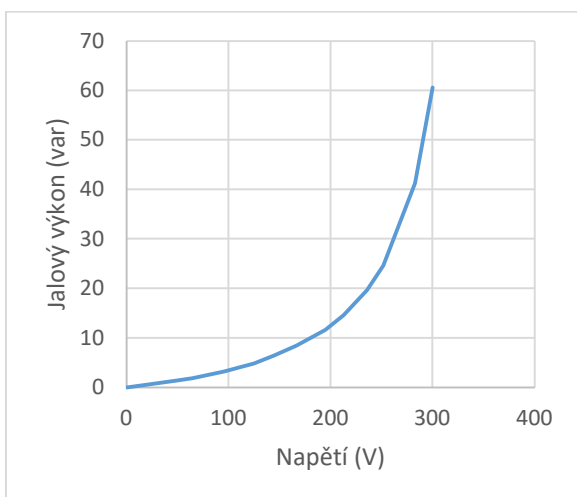
U (V)	300	283	252	236	213	195	167	145	125	111	96	65	50
I (A)	0,424	0,314	0,218	0,19	0,16	0,142	0,122	0,108	0,096	0,09	0,082	0,068	0,06
P (W)	16,4	14,4	11,4	10,2	8,4	7,2	5,6	4,6	3,6	3	2,4	1,2	0,8
Q (var)	60,6	41,2	24,6	19,6	14,6	11,6	8,4	6,4	4,8	4	3,2	1,8	1,4



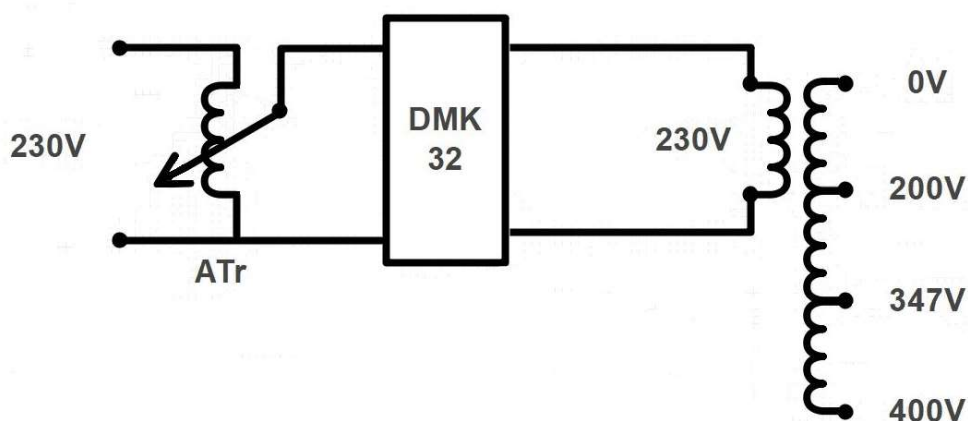
Obrázek č. 23 – průběh závislosti U–I



Obrázek č. 24 – průběh závislosti P–U

Obrázek č. 25 – průběh závislosti $Q-U$

4.1.3 Jednofázové měření naprázdno – transformátor B



Obrázek č. 26 – Schéma 1f. zapojení naprázdno

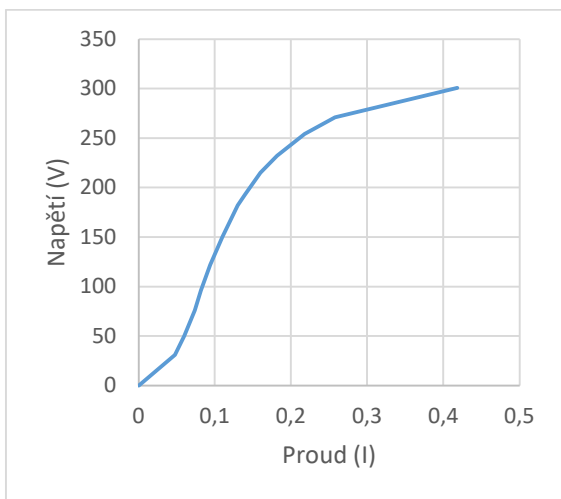
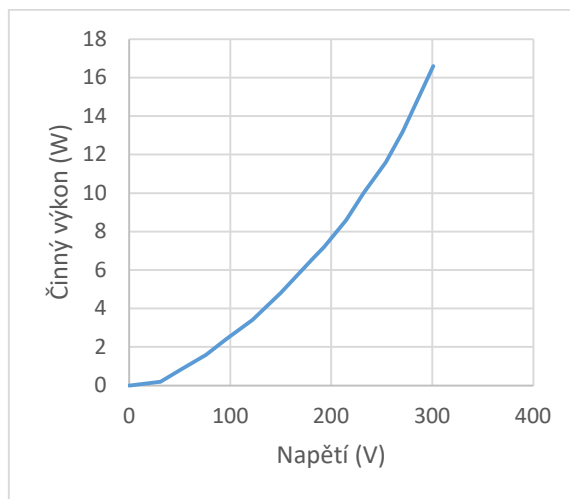
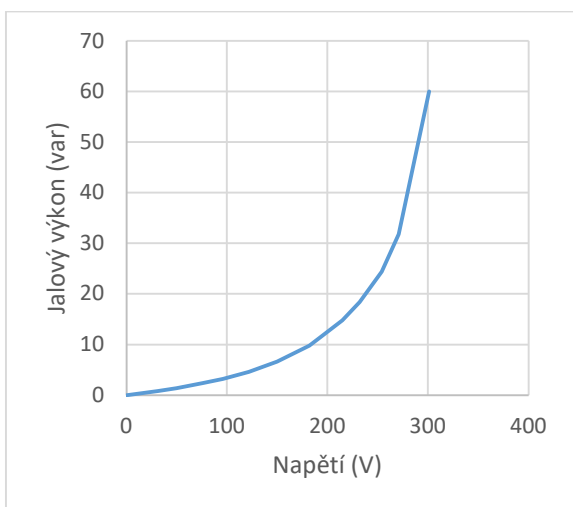
Tabulka č.7 – Naměřené hodnoty – 1f. zapojení naprázdno – transformátor B

U (V)	301	271	254	232	215	193	182	150	122	96	76	50	31
I (A)	2,09	1,29	1,09	0,91	0,8	0,7	0,65	0,55	0,47	0,41	0,37	0,3	0,24
P (W)	83	66	58	50	43	36	33	24	17	12	8	4	1
Q (var)	300	159	122	92	74	57	49	33	23	16	12	7	4

Naměřené hodnoty I , P a Q bylo nutné násobit $\times 0,2$ – převodem proudových transformátorů MTP, použitých v analyzátoru DMK 32.

Tabulka č.8 – Násobené hodnoty – I , P a $Q \times 0,2$

U (V)	301	271	254	232	215	193	182	150	122	96	76	50	31
I (A)	0,418	0,258	0,218	0,182	0,16	0,14	0,13	0,11	0,094	0,082	0,074	0,06	0,048
P (W)	16,6	13,2	11,6	10	8,6	7,2	6,6	4,8	3,4	2,4	1,6	0,8	0,2
Q (var)	60	31,8	24,4	18,4	14,8	11,4	9,8	6,6	4,6	3,2	2,4	1,4	0,8

Obrázek č. 27 – průběh závislosti $U-I$ Obrázek č. 28 – průběh závislosti $P-U$ Obrázek č. 29 – průběh závislosti $Q-U$

4.2 Vyhodnocení měření naprázdno

Naměřené hodnoty bylo nutné násobit $\times 0,2$ – převodem proudových transformátorů MTP, použitých v analyzátoru DMK 32:

$$U_0 = 236 \text{ (V)} \quad (4.1)$$

$$I_0 = 0,95 * 0,2 = 0,19 \text{ (A)} \quad (4.2)$$

$$P_0 = 51 * 0,2 = 10,2 \text{ (W)} \quad (4.3)$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U * I_0} = \frac{10,2}{236 * 0,19} = 0,227 \text{ (-)} \quad (4.4)$$

Výpočet parametrů příčné větve náhradního schéma:

$$I_{Fe} = I_0 * \cos \varphi_0 = 0,19 * 0,227 = 0,043 \text{ (A)} \quad (4.5)$$

Nyní můžeme vypočítat odpor v jádře:

$$R_{Fe} = \frac{U}{I_{Fe}} = \frac{236}{0,043} = 5488 \text{ (\Omega)} \quad (4.6)$$

Magnetizační proud:

$$I_\mu = I_0 * \sin \varphi = 0,19 * \sin(\arccos 0,227) = 0,19 * 0,97 = 0,185 \text{ (A)} \quad (4.7)$$

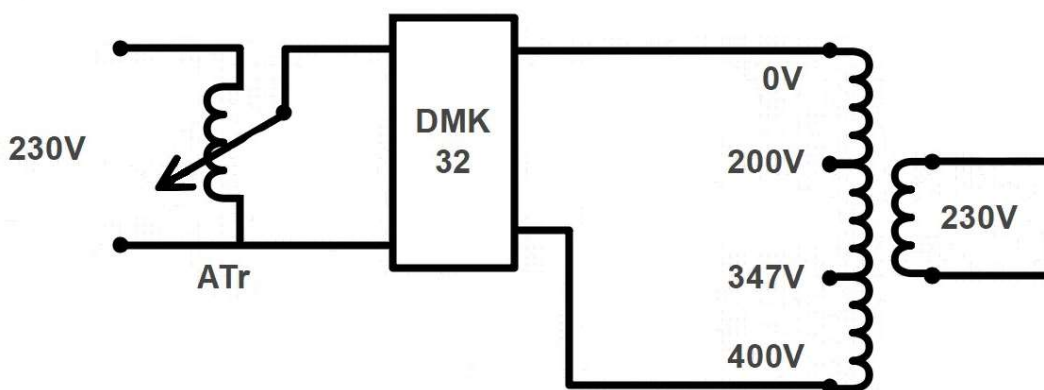
Výpočet příčné magnetizační reaktance:

$$X_\mu = \frac{U_0}{I_\mu} = \frac{236}{0,185} = 1276 \text{ (\Omega)} \quad (4.8)$$

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{\omega} = \frac{1276}{314} = 4,06 \text{ (H)} \quad (4.9)$$

4.3 Měření nakrátko

4.3.1 Jednofázové měření nakrátko



Obrázek č. 30 – Schéma 1f. zapojení nakrátko

Tabulka č.9 – Naměřené hodnoty – 1f. zapojení nakrátko

U L1-L2 (V)	16	16	16	16
I L1 (A)	5,21	5,21	5,21	5,2
I L2 (A)	5,21	5,21	5,21	5,2
P L1 (W)	49	49	49	49
Q L1 (var)	14	13	14	14

Naměřené hodnoty I, P a Q bylo nutné násobit x0,2 – převodem proudových transformátorů MTP, použitých v analyzátoru DMK 32.

Tabulka č.10 – Násobené hodnoty – I, P a Q x0,2

U L1-L2 (V)	16	16	16	16
I L1 (A)	1,042	1,042	1,042	1,04
I L2 (A)	1,042	1,042	1,042	1,04
P L1 (W)	9,8	9,8	9,8	9,8
Q L1 (var)	2,8	2,6	2,8	2,8

4.4 Vyhodnocení měření nakrátko

Naměřené hodnoty bylo nutné opět násobit $\times 0,2$ – převodem proudových transformátorů MTP, použitých v analyzátoru DMK 32:

$$U'_k = 16 \text{ (V)} \quad (4.10)$$

$$I'_k = 5,21 * 0,2 = 1,042 \text{ (A)} \quad (4.11)$$

$$\Delta P_k = 49 * 0,2 = 9,8 \text{ (W)} \quad (4.12)$$

$$\cos \varphi = \frac{\Delta P_k}{U'_k * I'_k} = \frac{9,8}{16 * 1,042} = 0,59 \text{ (-)} \quad (4.13)$$

Výpočet impedance:

Při hodnotách napětí $U_n = 400 \text{ V}$ a proudu $I_n = 1,26 \text{ A}$

$$Z_n = \frac{U_n}{I_n} = \frac{400}{1,26} = 317,4 \text{ (\Omega)} \quad (4.14)$$

Napětí nakrátko:

$$U_k = U'_k * \frac{I_n}{I'_k} = 16 * \frac{1,26}{1,042} = 19,3 \text{ (V)} \quad (4.15)$$

Procentní hodnota:

$$u_k = \frac{U_k}{U_n} * 100 = \frac{19,3}{400} * 100 = 0,048 * 100 = 4,8 \% \quad (4.16)$$

$$r_k = \frac{\Delta P_k}{S_n} * 100 = \frac{9,8}{460} * 100 = 0,0213 * 100 = 2,13 \% \quad (4.17)$$

$$x_k = \sqrt{u_k^2 - r_k^2} = \sqrt{0,048^2 - 0,0213^2} = 0,043 \text{ (-)} \quad (4.18)$$

Výpočet podélných parametrů náhradního schéma:

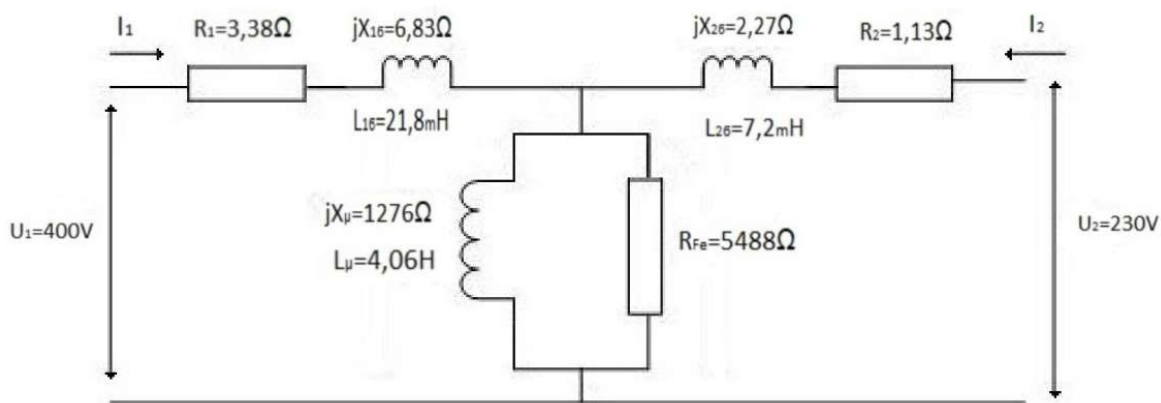
Výpočet podélné reaktance $X_{1\sigma}$:

$$X_{1\sigma} = Z_n * \frac{x_k}{2} = 317,4 * \frac{0,043}{2} = 6,82 \text{ } (\Omega) \quad (4.19)$$

Výpočet podélné reaktance $X_{2\sigma}$:

$$X_{2\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{k^2} = \frac{6,82}{\sqrt{3}^2} = 2,27 \text{ } (\Omega) \quad (4.20)$$

4.5 Náhradní schéma s parametrickými výpočty transformátoru



Obrázek č. 31 – Náhradní schéma transformátoru

$$X_{16} = Z_n \frac{x_k}{2} = 317,4 * \frac{0,043}{2} = 6,83 \text{ } (\Omega) \quad (4.21)$$

$$L_{16} = \frac{X_{16}}{\omega} = \frac{6,83}{314} = 21,8 \text{ (mH)} \quad (4.22)$$

$$X_{26}' = X_{16} \quad (4.23)$$

$$X_{26} = \frac{X_{26}'}{k^2} = \frac{6,83}{3} = 2,27 \text{ } (\Omega) \quad (4.24)$$

$$R_1 = \frac{u_k}{2} Z_n = \frac{0,0213}{2} * 317,4 = 3,38 \text{ } (\Omega) \quad (4.25)$$

$$R_2' = R_1 \quad (4.26)$$

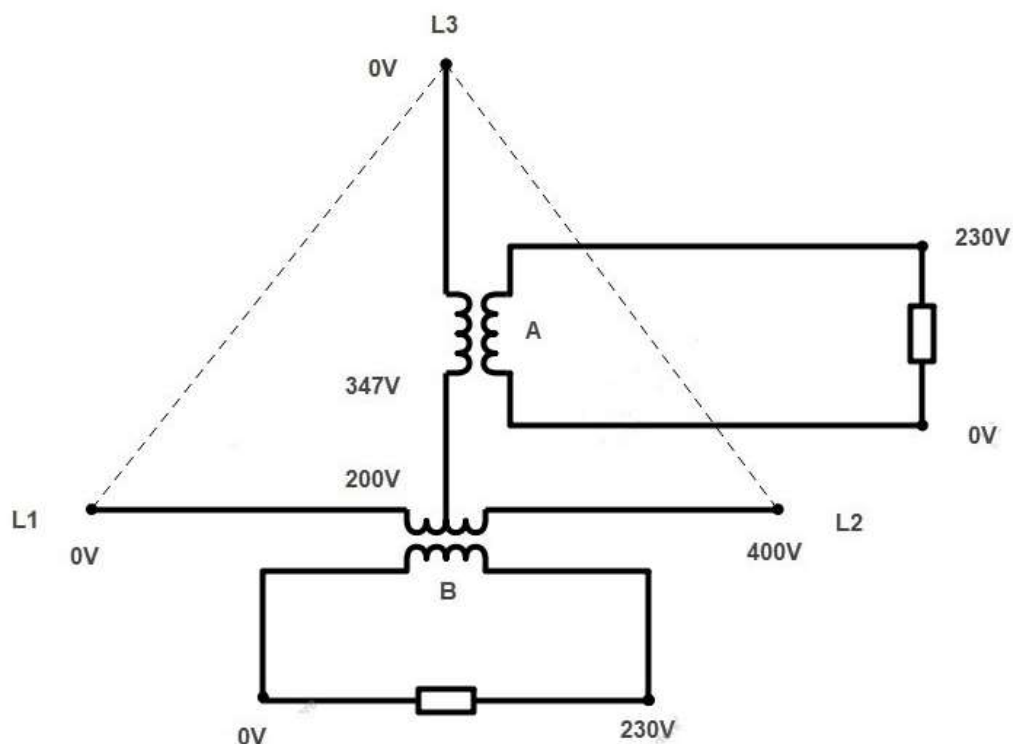
$$R_2 = \frac{R_2'}{k^2} = \frac{3,38}{3} = 1,13 \text{ } (\Omega) \quad (4.27)$$

Tabulka č.11 – Naměřené parametrické hodnoty transformátoru

U ₁	U ₂	R ₁	X ₁₆	L ₁₆	R ₂	X ₂₆	L ₂₆	R _{Fe}	X _μ	L _μ
400 V	230 V	3,38 Ω	6,83 Ω	21,8 mH	1,13 Ω	2,27 Ω	7,2 mH	5488 Ω	1276 Ω	4,06 H

4.6 Měření při odporové zátěži

4.6.1 Měření zapojení odporové zátěže transformátoru A + B

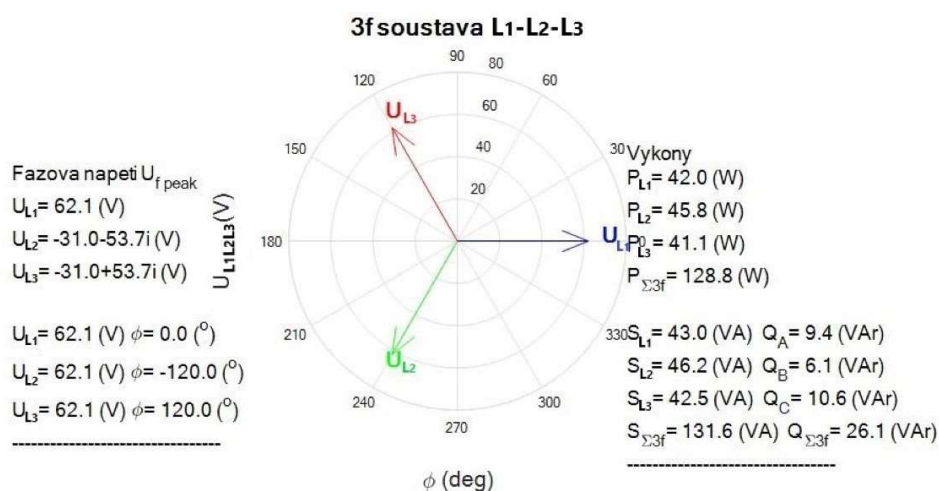


Obrázek č. 32 – Schéma zapojení – transformátor A + B

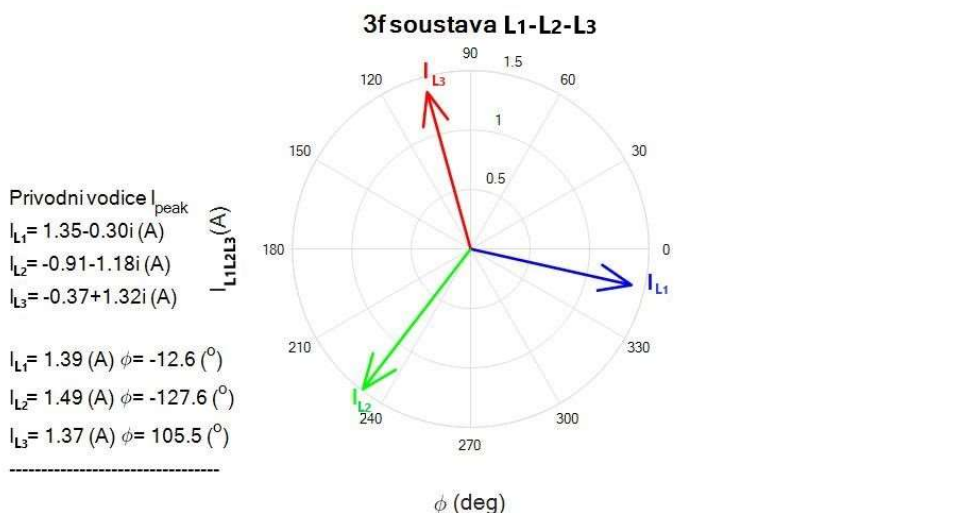
Tabulka č.12 – Naměřené hodnoty – odporová zátěž symetrická A + B

	U L1-L2 (V)	U L2-L3 (V)	U L1-L3 (V)	převodní konstanta
3f strana	42,7	43,5	44,7	0,2
	I L1 (A)	I L2 (A)	I L3 (A)	
	0,98	1,052	0,968	
	P L1 (W)	P L2 (W)	P L3 (W)	
2f strana	41,96	45,76	43,12	
	Ua (V)	Ub (V)		
	37,7	16,5		
	Ia (A)	Ib (A)		
	1,38	0,551		
	Δt (μs)	Δt (μs)		
	480	80		

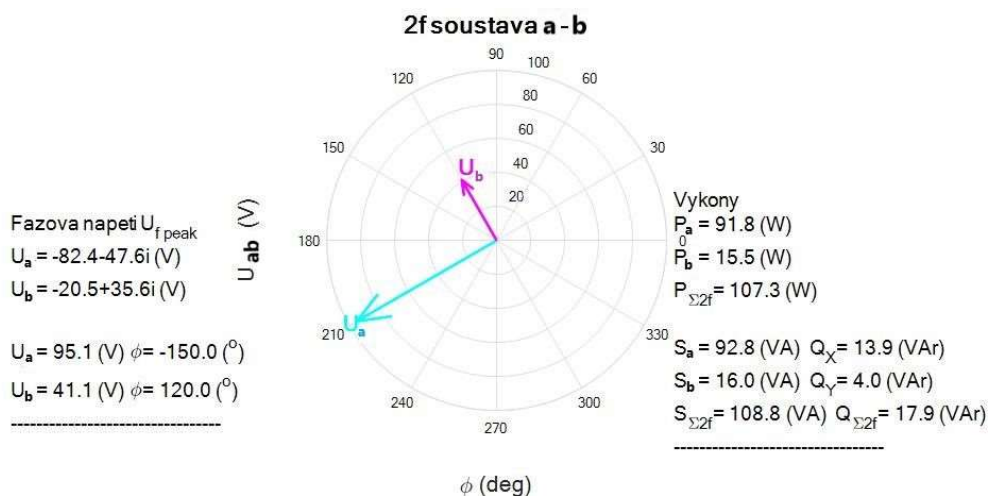
Naměřené hodnoty I a P bylo nutné násobit x0,2 – převodem proudových transformátorů MTP, použitých v analyzátoru DMK 32 a již jsou zohledněny v tabulce č.12.



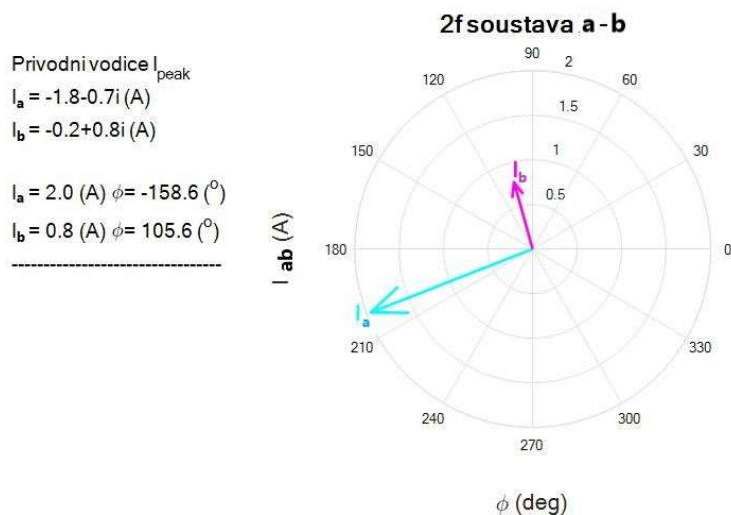
Obrázek č. 33 – Naměřené fázory 3f. soustavy A + B



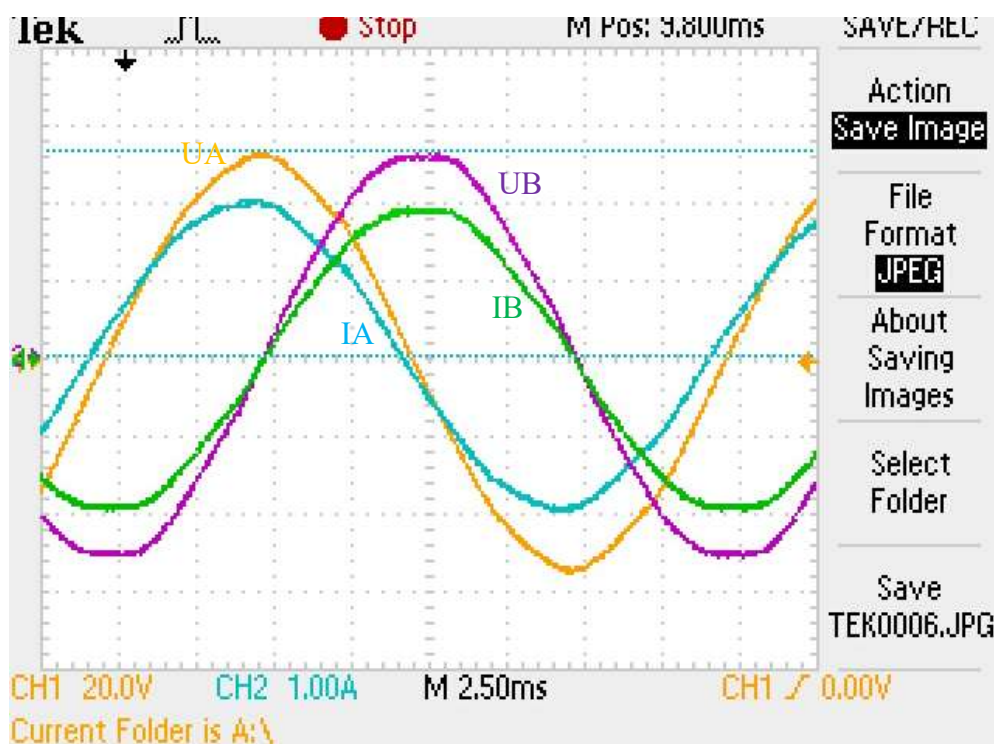
Obrázek č. 34 – Naměřené fázory 3f. soustavy A + B



Obrázek č. 35 – Naměřené fázory 2f. soustavy A + B



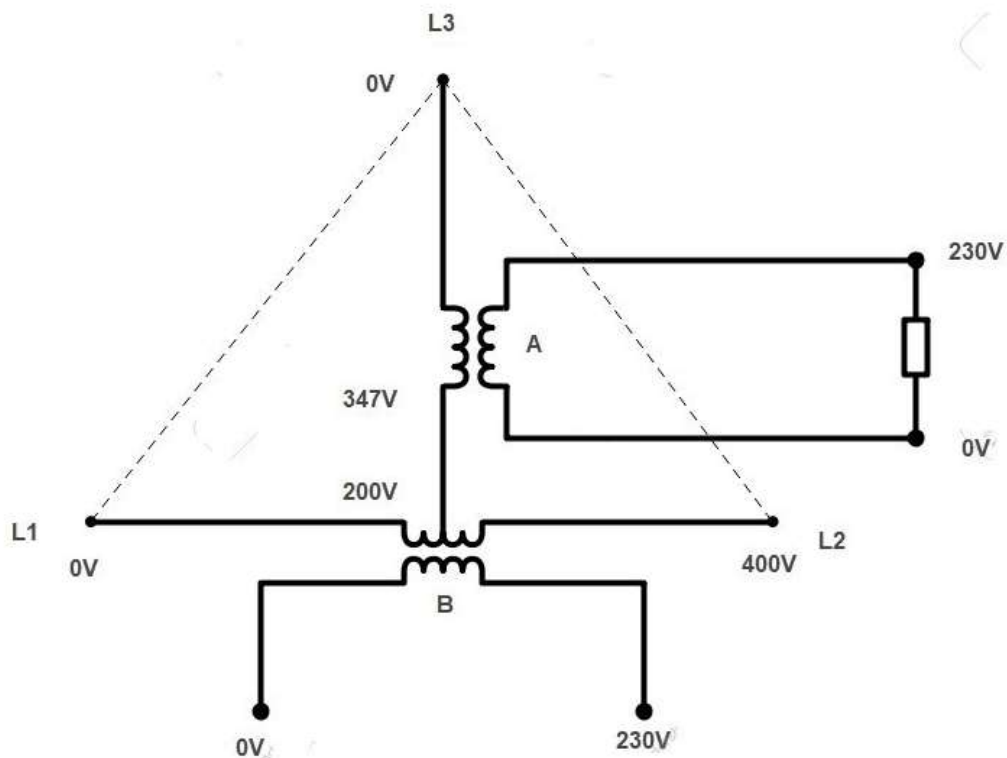
Obrázek č. 36 – Naměřené fázory 2f. soustavy A + B



Obrázek č. 37 – Průběh napětí a proudů A + B z osciloskopu

Na obrázku č. 37 je znázorněno jak výstup transformátoru A je posunut o 90 stupňů oproti výstupu transformátoru B.

4.6.2 Měření zapojení odporové zátěže transformátoru A

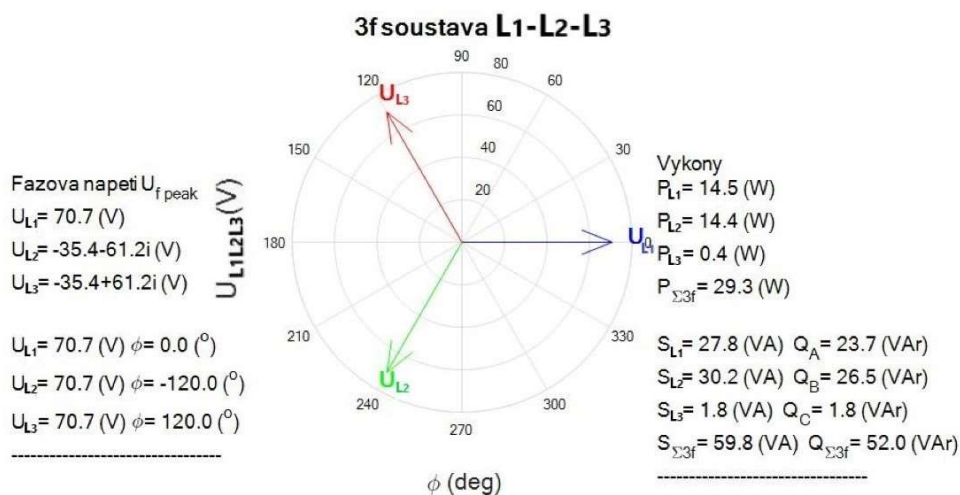


Obrázek č. 38 – Schéma zapojení – transformátor A

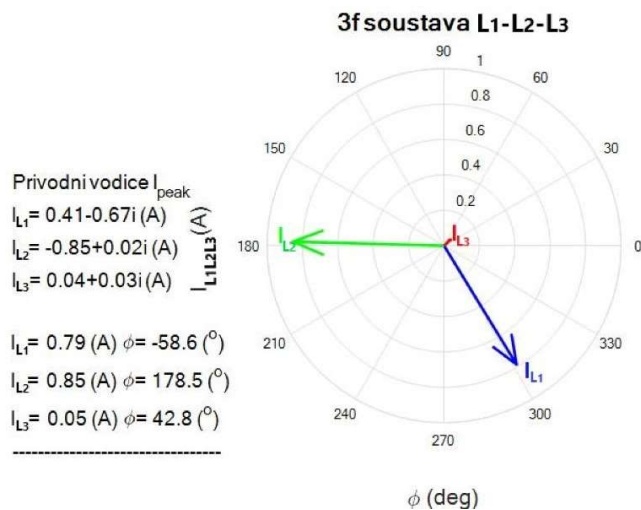
Tabulka č.13 – Naměřené hodnoty – odporová zátěž asymetrická A

	U L1-L2 (V)	U L2-L3 (V)	U L1-L3 (V)	převodní konstanta
3f strana	50	50	50	0,2
	I L1 (A)	I L2 (A)	I L3 (A)	
	0,556	0,604	0,036	
	P L1 (W)	P L2 (W)	P L3 (W)	
	14,56	14,4	0,4	
2f strana	Ua (V)	Ub (V)		
	26,7	30		
	Ia (A)	Ib (A)		
	0,97	-		
	Δt (μs)	Δt (μs)		
	720	-		

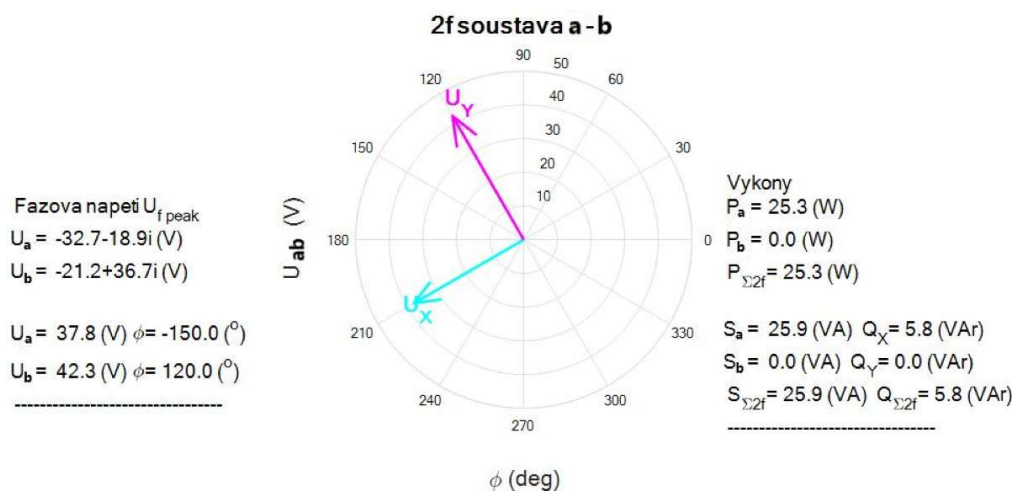
Naměřené hodnoty I a P bylo nutné násobit x0,2 – převodem proudových transformátorů MTP, použitých v analyzátoru DMK 32 a již jsou zohledněny v tabulce č.13.



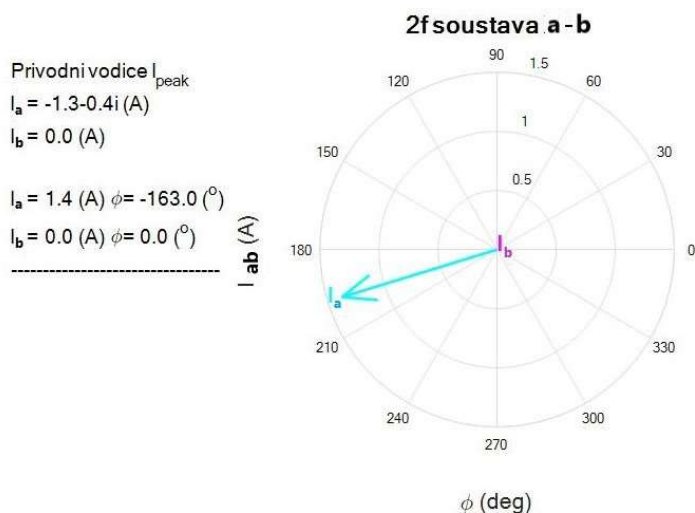
Obrázek č. 39 – Naměřené fázory 3f. soustavy A



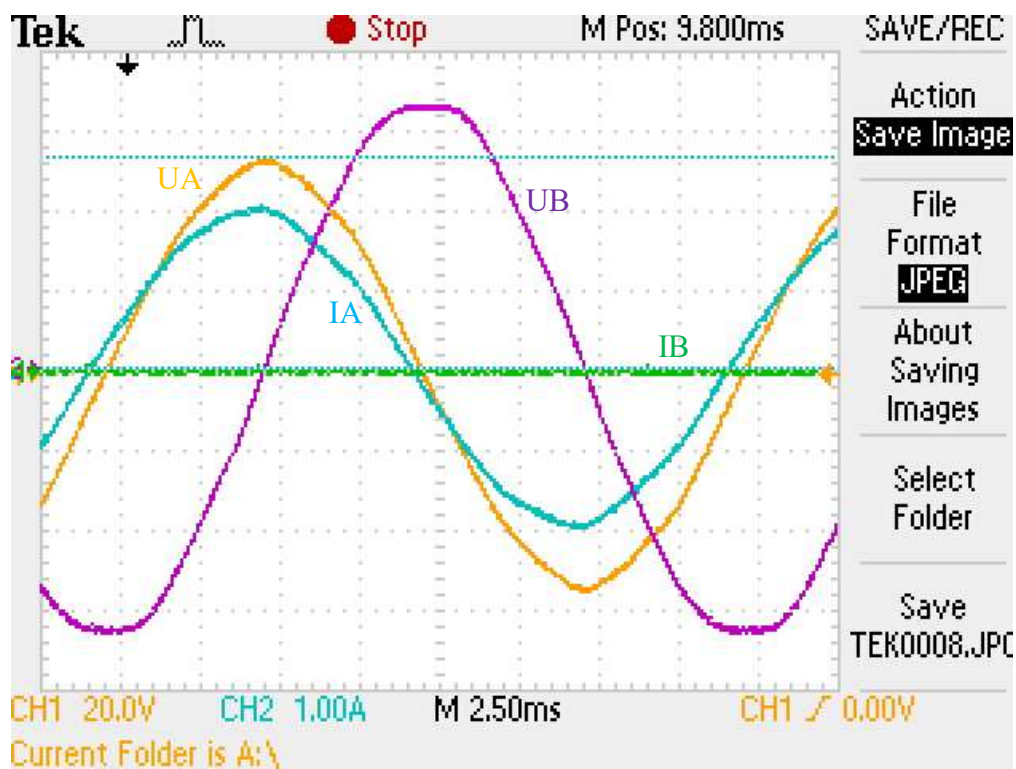
Obrázek č. 40 – Naměřené fázory 3f. soustavy A



Obrázek č. 41 – Naměřené fázory 2f. soustavy A



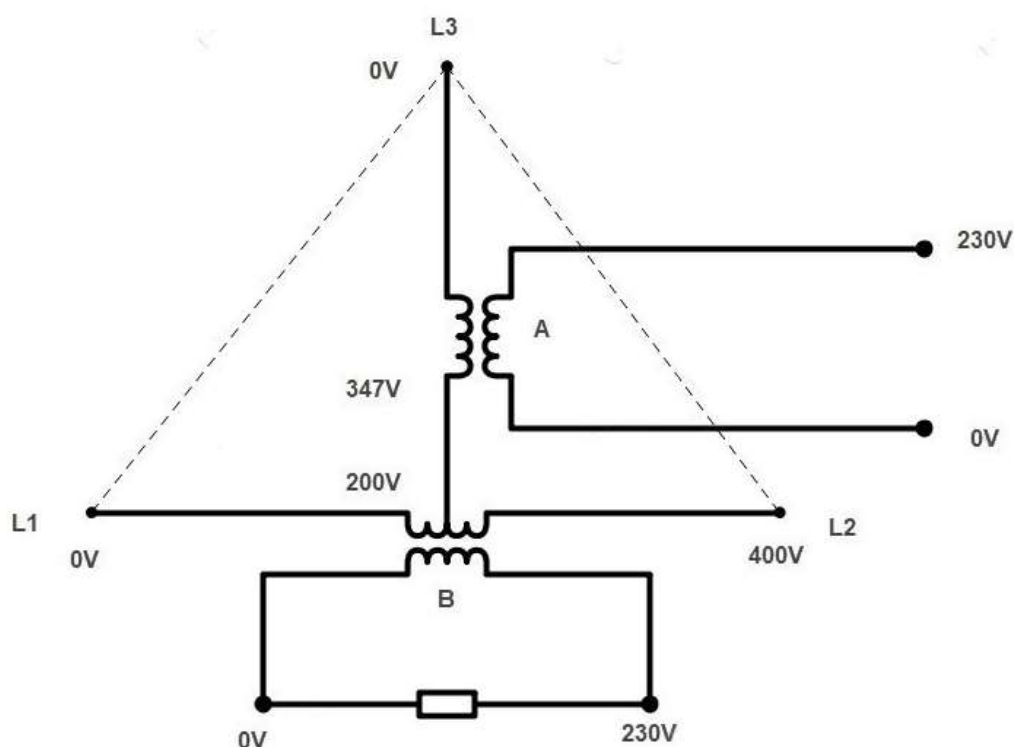
Obrázek č. 42 – Naměřené fázory 2f. soustavy A



Obrázek č. 43 – Průběh napětí a proudů A + B z osciloskopu

Na obrázku č. 43 je znázorněno mírně zvýšené napětí nezátíženého transformátoru B a proud nulový.

4.6.3 Měření zapojení odporové zátěže transformátoru B

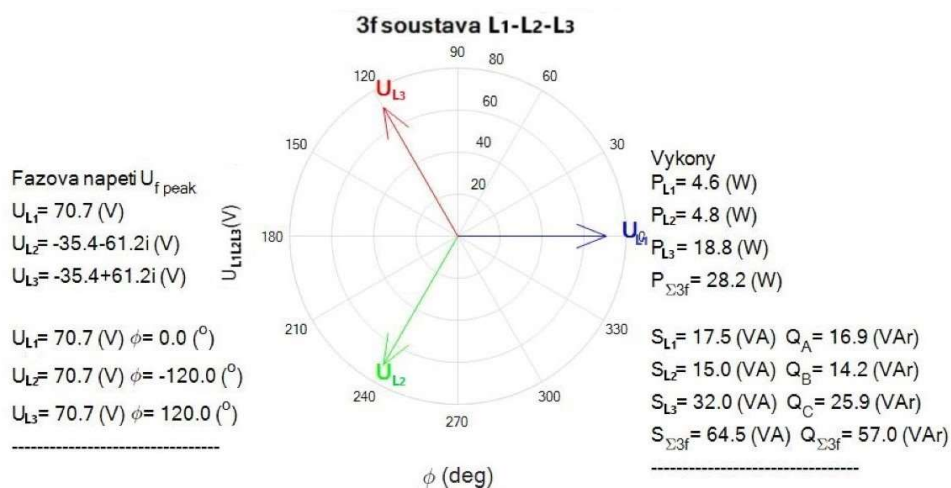


Obrázek č. 44 – Schéma zapojení – transformátor B

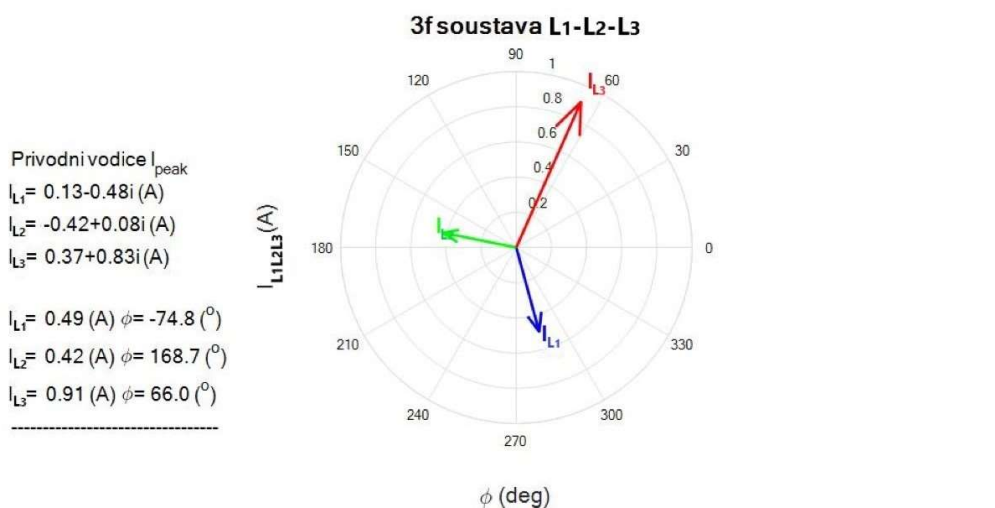
Tabulka č.14 – Naměřené hodnoty – odporová zátěž asymetrická B

	U L1-L2 (V)	U L2-L3 (V)	U L1-L3 (V)	převodní konstanta
3f strana	50	50	50	0,2
	I L1 (A)	I L2 (A)	I L3 (A)	
	0,348	0,304	0,636	
	P L1 (W)	P L2 (W)	P L3 (W)	
	4,64	4,8	18,8	
2f strana	Ua (V)	Ub (V)		
	29,6	26,6		
	Ia (A)	Ib (A)		
	-	0,97		
	Δt (μs)	Δt (μs)		
	-	400		

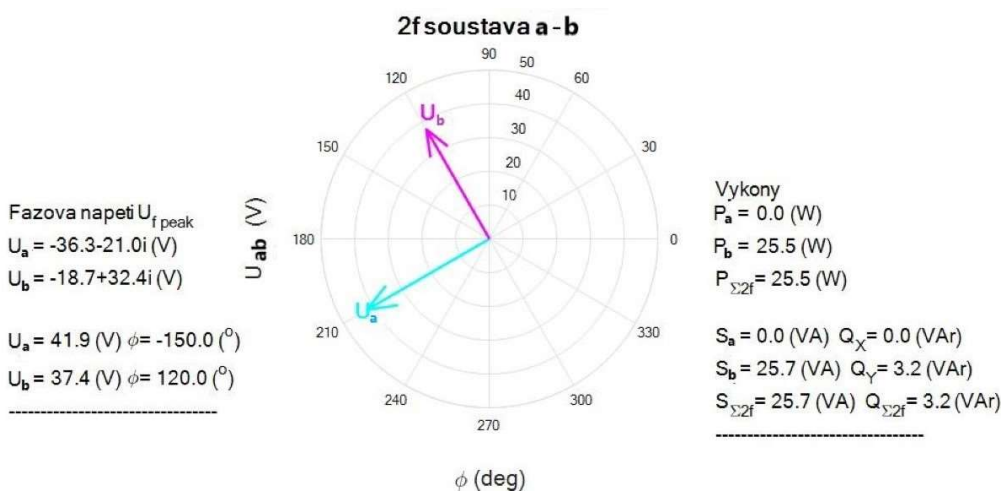
Naměřené hodnoty I a P bylo nutné násobit x0,2 – převodem proudových transformátorů MTP, použitých v analyzátoru DMK 32 a již jsou zohledněny v tabulce č.14.



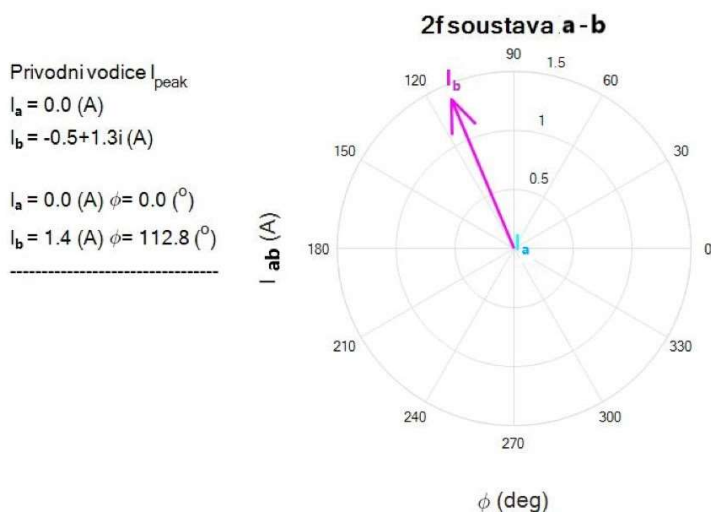
Obrázek č. 45 – Naměřené fázory 3f. soustavy B



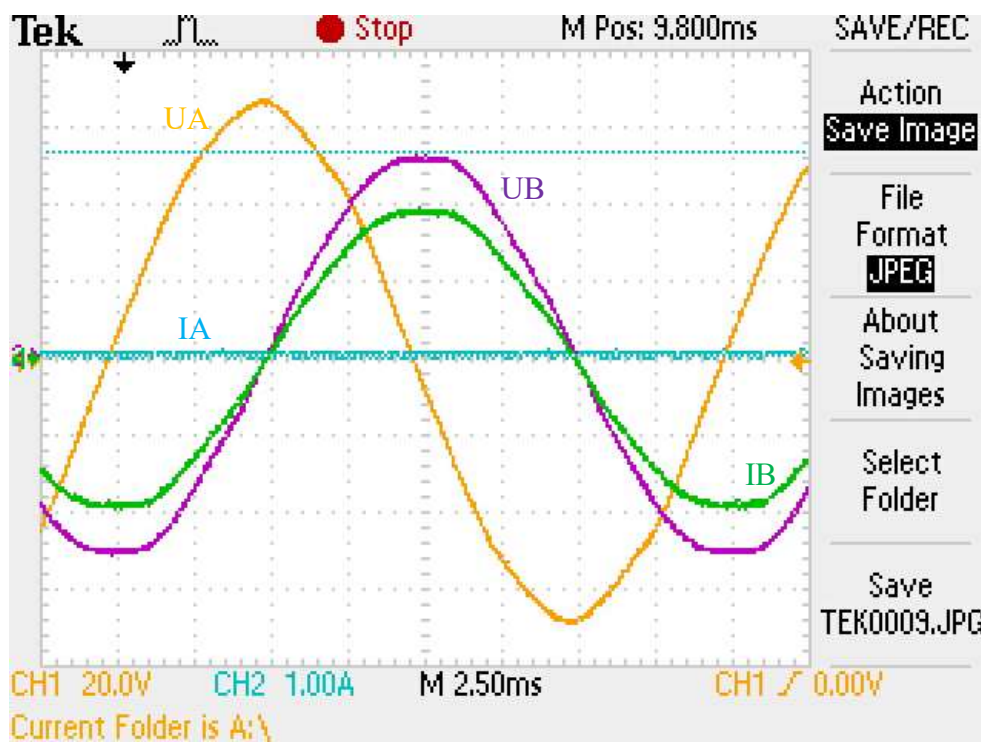
Obrázek č. 46 – Naměřené fázory 3f. soustavy B



Obrázek č. 47 – Naměřené fázory 2f. soustavy B



Obrázek č. 48 – Naměřené fázory 2f. soustavy B

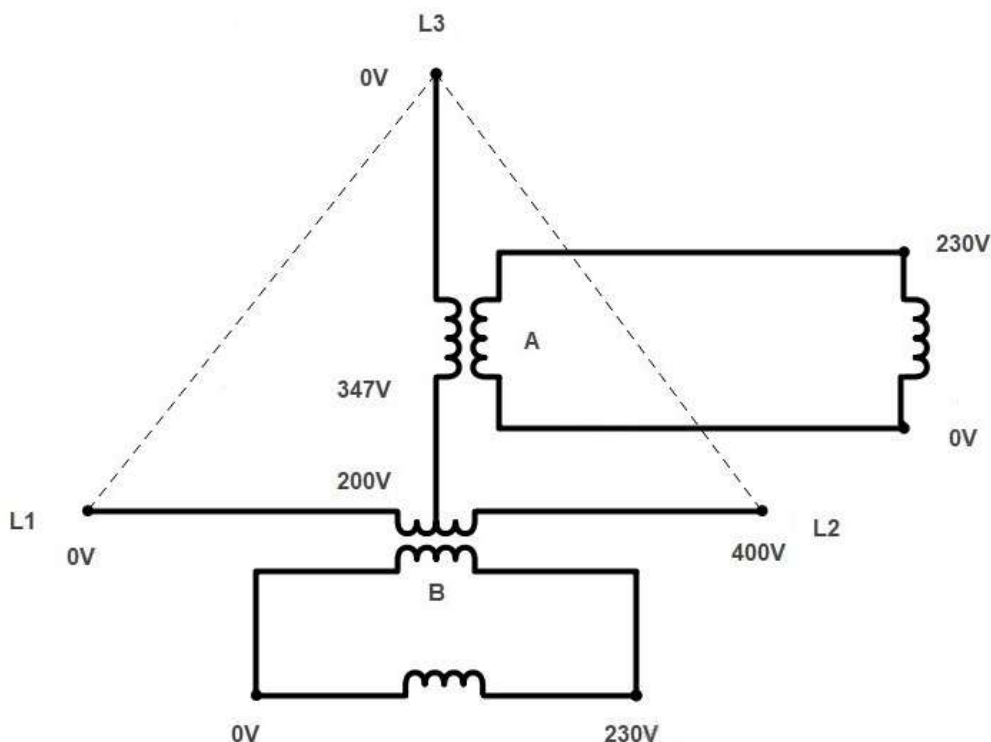


Obrázek č. 49 – Průběh napětí a proudů A + B z osciloskopu

Na obrázku č. 49 je znázorněno mírně zvýšené napětí nezatíženého transformátoru A a nulový proud.

4.7 Měření při induktivní zátěži

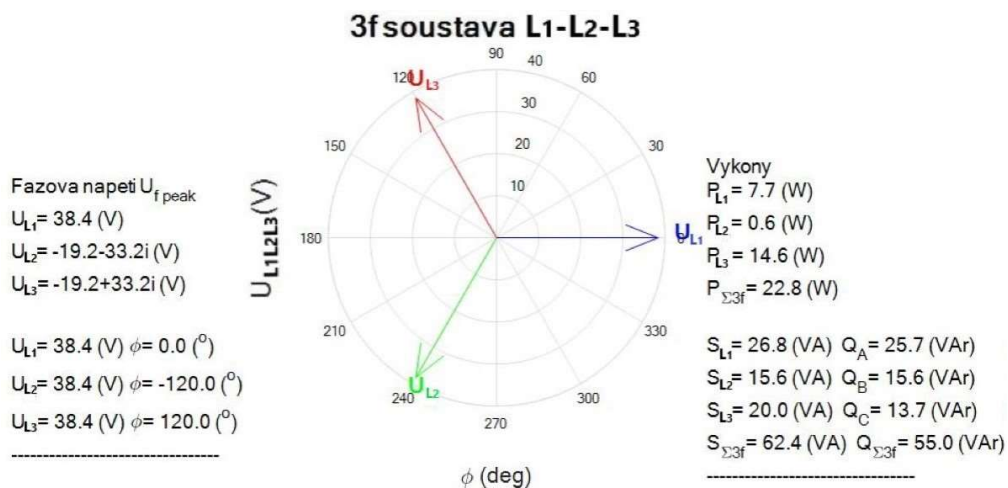
4.7.1 Měření zapojení induktivní zátěže transformátoru A + B



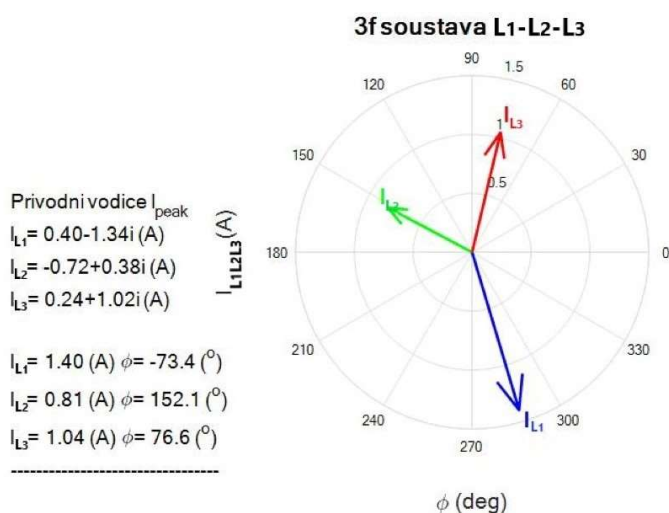
Obrázek č. 50 – Schéma zapojení – transformátor A + B

Tabulka č.15 – Naměřené hodnoty – induktivní zátěž symetrická A + B

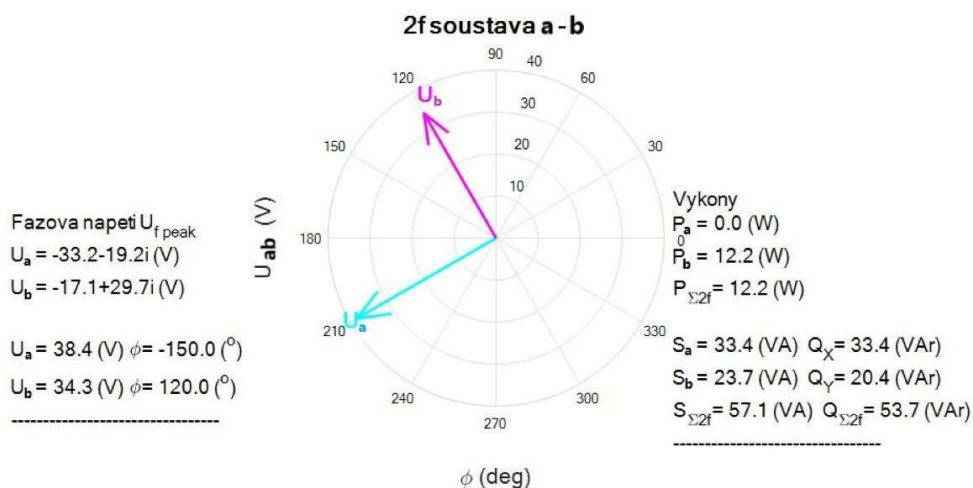
	U _{3f} L1-L2	I L1	I L2	I L3	P L1	P L2	P L3	U _a	I _a	φ _a	U _b	I _b	φ _b
Naprázdko	201	0,33	0,34	0,35	25	25	25	115			131		
Indukčnost	46,7	1,97	1,15	1,47	15,3	1,1	29,1	27,4	1,21	1,7	24,2	0,99	1,08
A + B	38,4	1,4	0,81	1,04	7,7	0,6	14,6	38,4	1,7	1,85	34,3	1,4	1,3



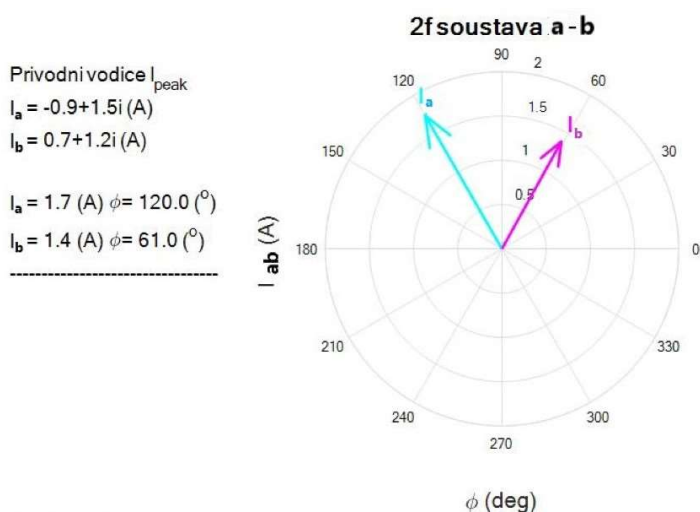
Obrázek č. 51 – Naměřené fázory 3f. soustavy A + B



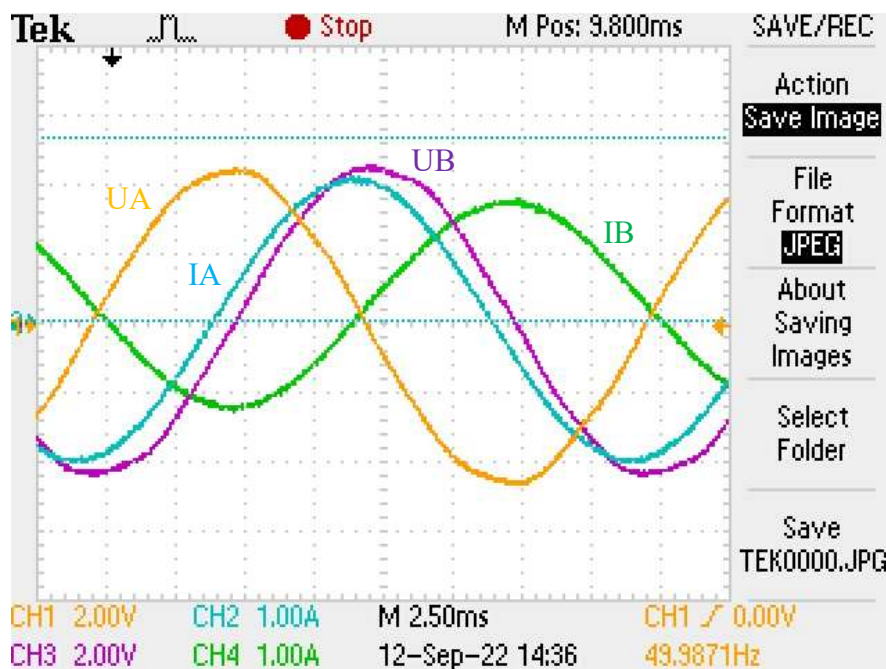
Obrázek č. 52 – Naměřené fázory 3f. soustavy A + B



Obrázek č. 53 – Naměřené fázory 2f. soustavy A + B



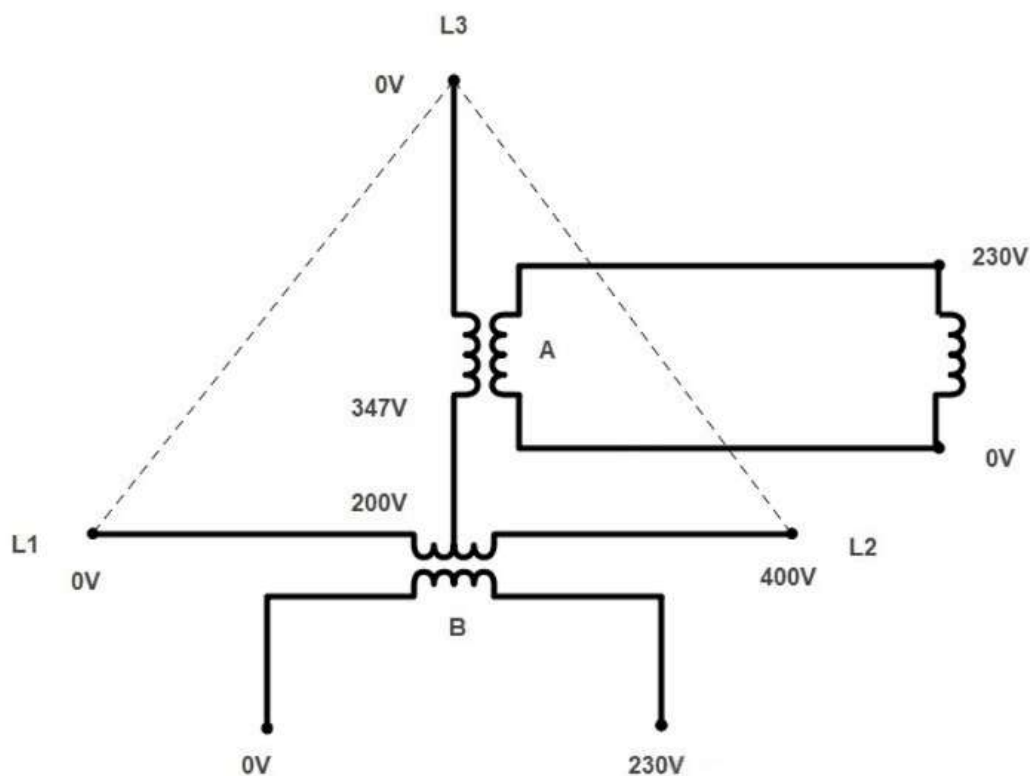
Obrázek č. 54 – Naměřené fázory 2f. soustavy A + B



Obrázek č. 55 – Průběh napětí a proudů A + B z osciloskopu

Na obrázku č. 55 je znázorněn posun proudů od napětí u obou transformátorů (A i B). To je způsobeno induktivní zátěží.

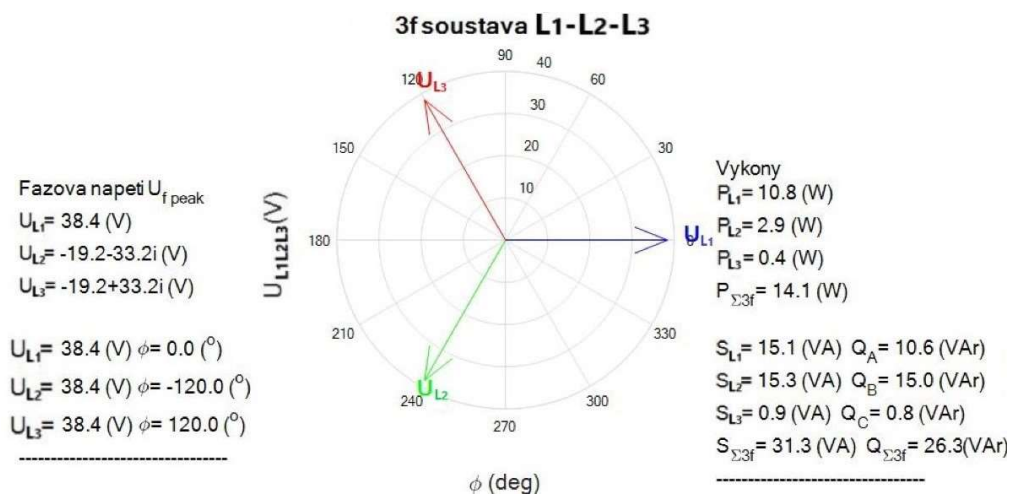
4.7.2 Měření zapojení induktivní zátěže transformátoru A



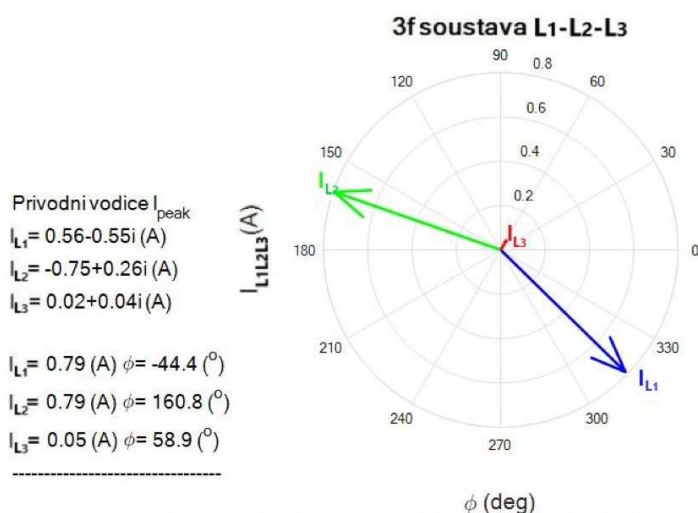
Obrázek č. 56 – Schéma zapojení – transformátor A

Tabulka č.16 – Naměřené hodnoty – induktivní zátěž symetrická A

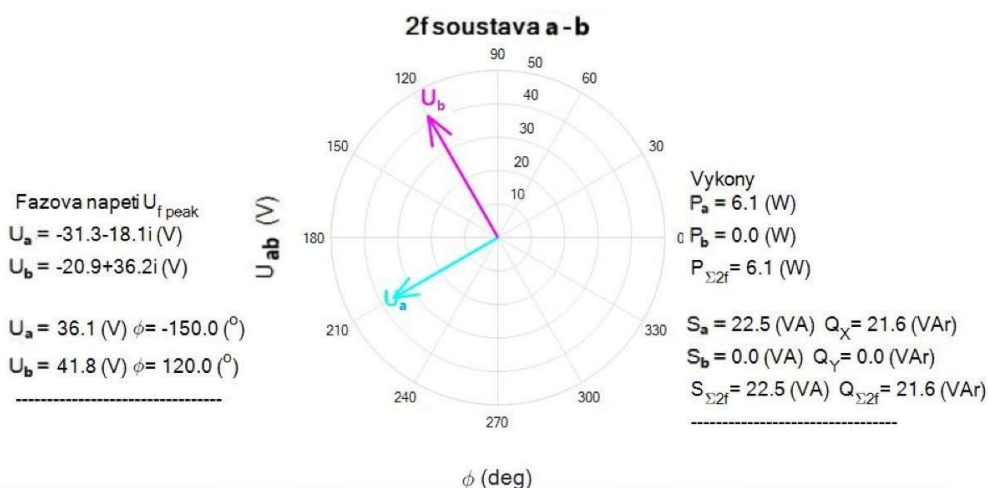
	U3f L1-L2	I L1	I L2	I L3	P L1	P L2	P L3	Ua	Ia	ϕ_a	Ub	Ib	ϕ_b
Naprázdko	201	0,33	0,34	0,35	25	25	25	115			131		
Indukčnost A	47,1	1,11	1,12	0,06	21,5	5,7	0,8	26,8	0,88	1,37	27,7	0	0
	38,4	0,79	0,79	0,05	10,8	2,9	0,4	36,1	1,2	1,3	41,8	0	0



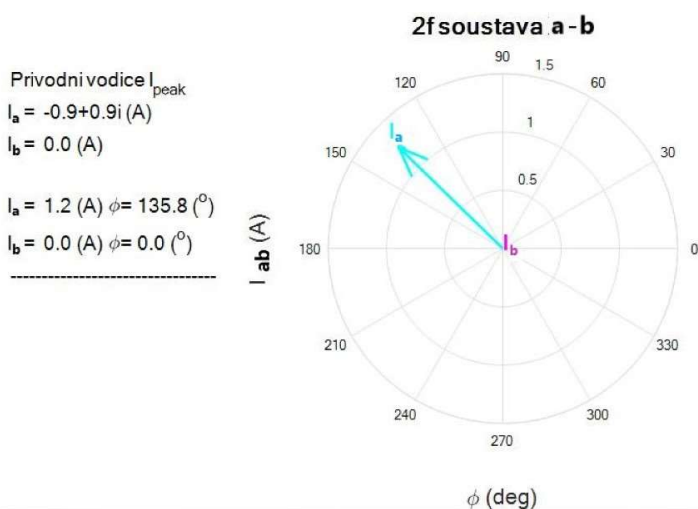
Obrázek č. 57 – Naměřené fázory 3f. soustavy A



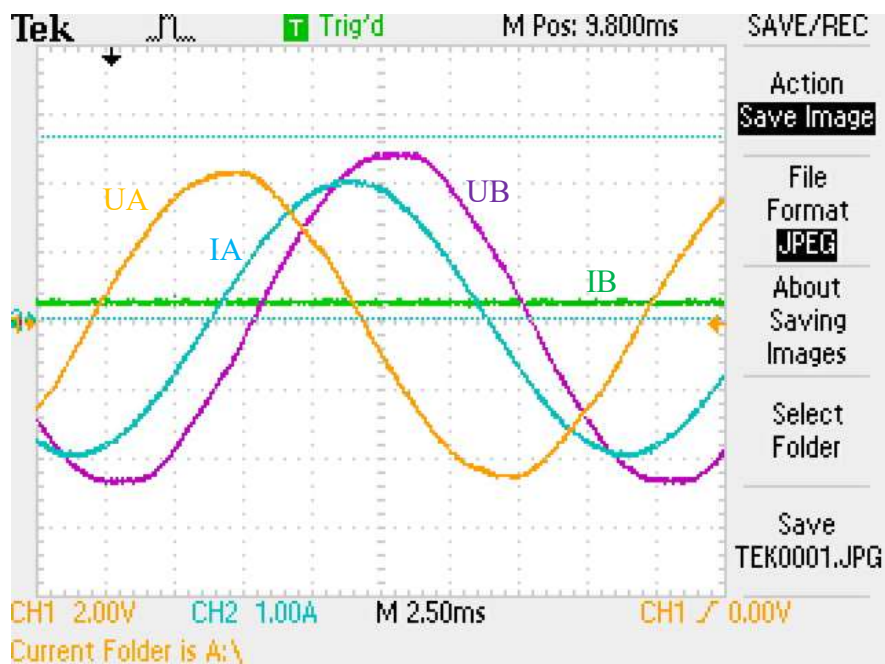
Obrázek č. 58 – Naměřené fázy 3f. soustavy A



Obrázek č. 59 – Naměřené fázy 2f. soustavy A



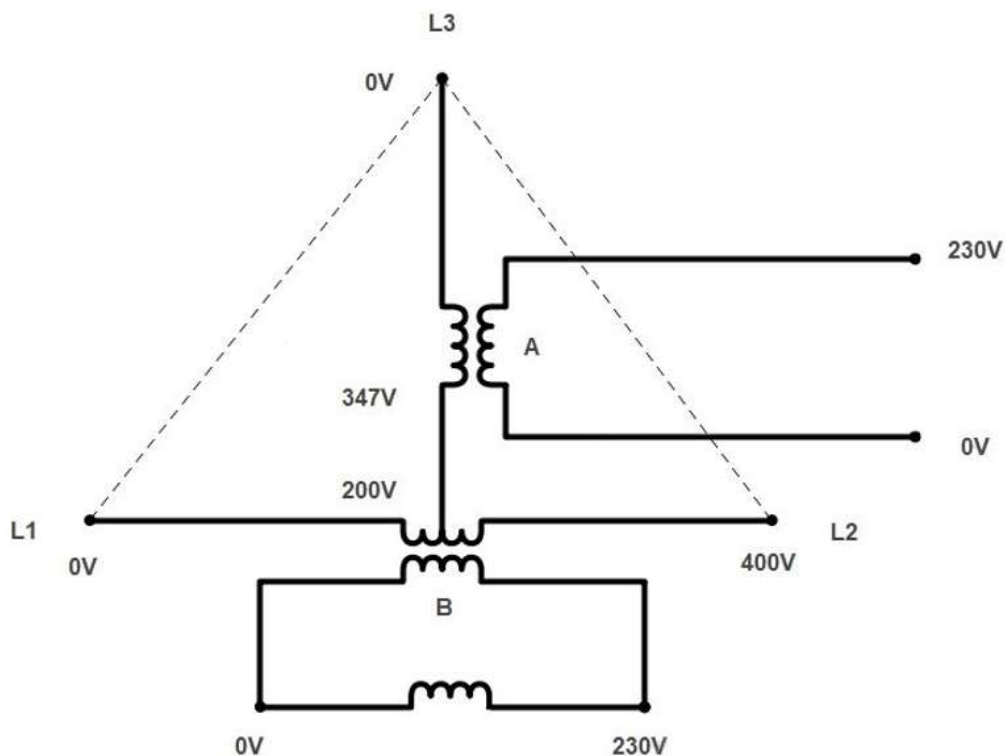
Obrázek č. 60 – Naměřené fázy 2f. soustavy A



Obrázek č. 61 – Průběh napětí a proudů A + B z osciloskopu

Na obrázku č. 61 je znázorněno na zatíženém transformátoru A induktivní zátěží, posun proudu od napětí o 90 stupňů. Transformátor B nezatížen.

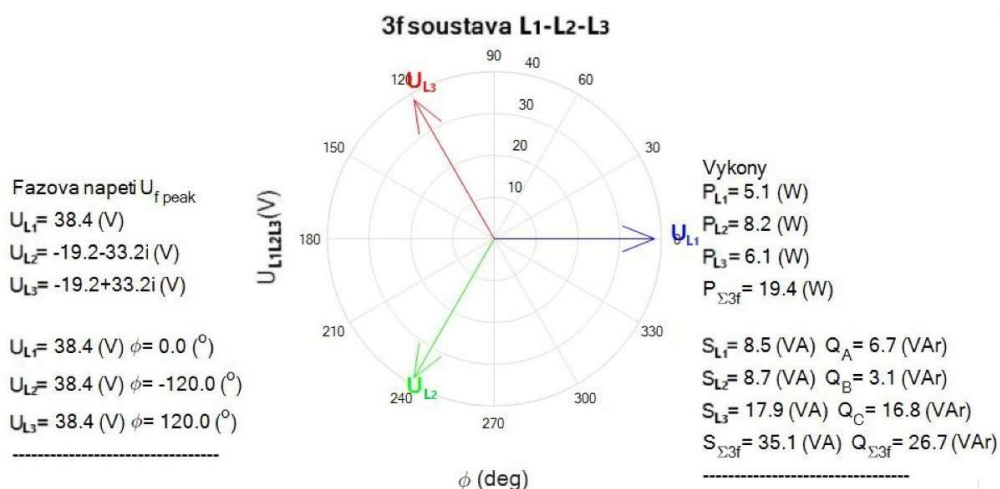
4.7.3 Měření zapojení induktivní zátěže transformátoru B



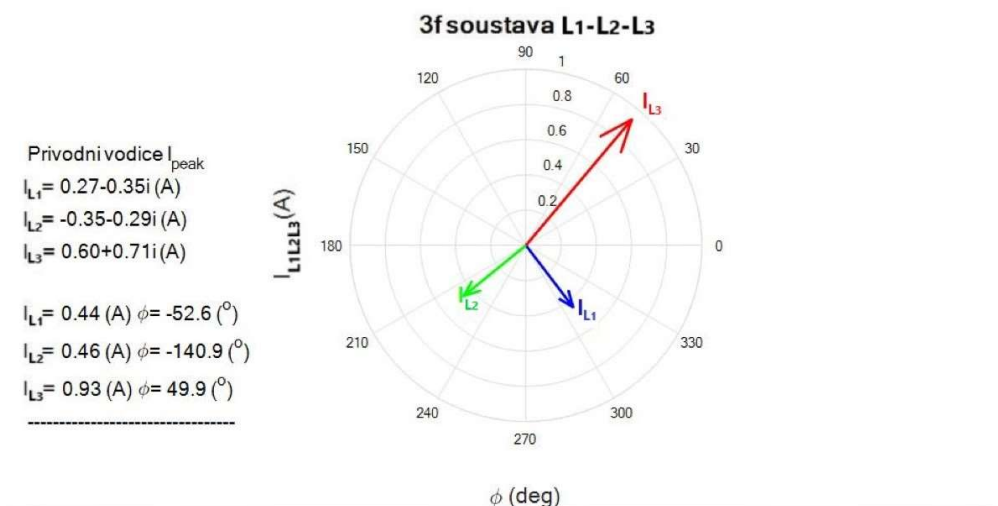
Obrázek č. 62 – Schéma zapojení – transformátor B

Tabulka č.17 – Naměřené hodnoty – induktivní zátěž symetrická B

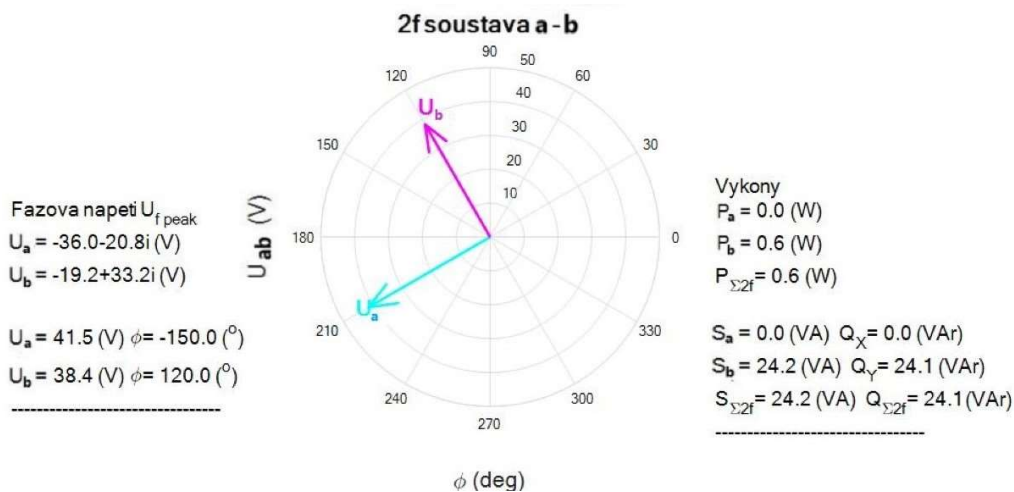
	U3f L1-L2	I L1	I L2	I L3	P L1	P L2	P L3	Ua	la	φ_a	Ub	lb	φ_b
Naprázdko	201	0,33	0,34	0,35	25	25	25	115			131		
Indukčnost B	47	0,62	0,64	1,32	10,2	16,3	12,2	29,3	0	0	26,9	0,89	1,4
	38,4	0,44	0,46	0,93	5,1	8,2	6,1	41,5	0	0	38,4	1,3	1,54



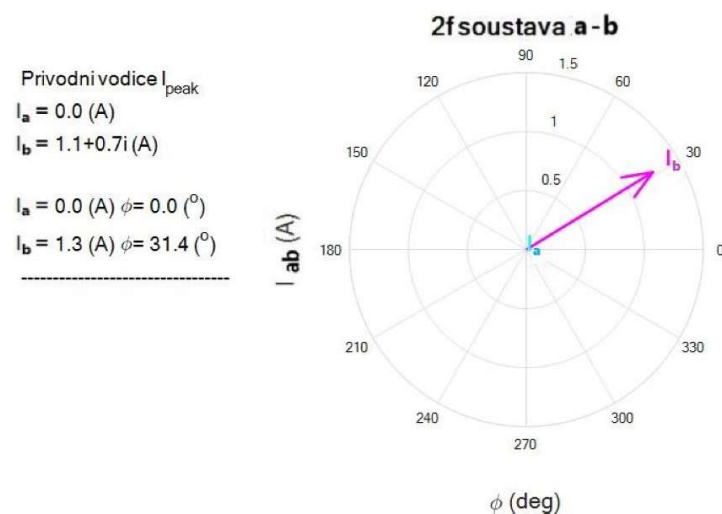
Obrázek č. 63 – Naměřené fázory 3f. soustavy B



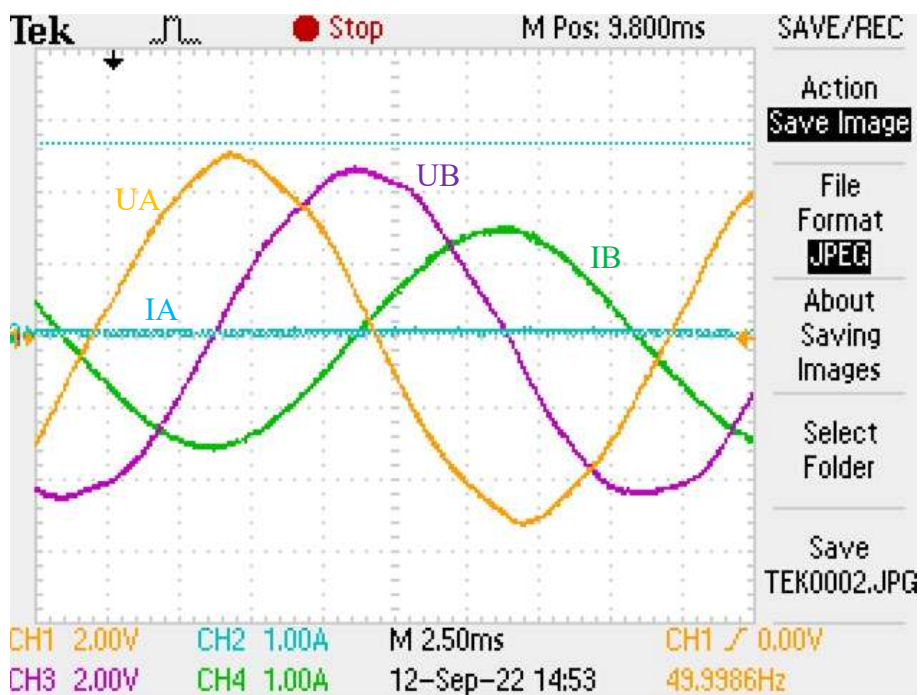
Obrázek č. 64 – Naměřené fázy 3f. soustavy B



Obrázek č. 65 – Naměřené fázy 2f. soustavy B



Obrázek č. 66 – Naměřené fázy 2f. soustavy B



Obrázek č. 67 – Průběh napětí a proudů A + B z osciloskopu

Na obrázku č. 67 je znázorněno na zatíženém transformátoru B indukční zátěží, posun proudu od napětí o 90 stupňů. Transformátor A nezatížen.

5 Shrnutí získaných poznatků

Po provedení popisu a experimentálního měření Scottova zapojení transformátorů jsme dospěli k několika závěrům.

Prvním zjištěním je prověření principu funkce, tj. transformace 3f soustavy na 2f soustavu.

Dále jsme ověřili pro různé druhy 2f zátěží rozdělení proudů a výkonů do jednotlivých fází 3f soustavy. Bylo provedeno zatížení

- Odporové
- Induktivní

Ve všech případech pak byla zátěž

- Symetrická ve fází A i B
- Nesymetrická, jen ve fází A
- Nesymetrická, jen ve fází B

Zvolené zátěže byly podpořeny analytickým výpočtem.

Výsledky analytického a experimentálního měření Scottova transformátoru měly jen mírné odchylky. Jednou z příčin může být nepřesnost měřicích přístrojů nebo nepřesný odečet, zejména fázového posuvu na osciloskopu.

Tabulka č.18 – porovnané hodnoty – odporová zátěž

Použité napětí	U_a	37,7V	26,7V
Naměřené hodnoty	I_a	1,38A	0,97A
Vypočítané hodnoty	I_a	1,42A	1,00A

Použité napětí	U_b	16,5V	26,6V
Naměřené hodnoty	I_b	0,55A	0,97A
Vypočítané hodnoty	I_b	0,62A	1,00A

Použité napěťové hladiny a naměřené hodnoty najdeme v tabulce č.12, v tabulce č.13 a v tabulce č.14.

Tabulka č.19 – porovnané hodnoty – induktivní zátěž

Použitá napětí	U_a	26,8V	36,1
Naměřené hodnoty	I_a	0,88A	1,20A
Vypočítané hodnoty	I_a	0,83A	1,12A

Použitá napětí	U_b	26,9V	38,4V
Naměřené hodnoty	I_b	0,89A	1,30A
Vypočítané hodnoty	I_b	0,83A	1,19A

Použitá napětí a naměřené hodnoty najdeme v tabulce č.16 a v tabulce č.17.

Získané výsledky ilustrují chování Scottova zapojení transformátorů pro různé druhy zatížení 2f systému a jejich vliv na zatížení jednotlivých fází systému 3f.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] IRVING GOTTLIEB. *Practical Transformer Handbook*. 1.st edition. Publisher: Newnes. 1998. ISBN 978-00-805-1456-7
- [2] VÁCLAV BARTOŠ. *Elektrické stroje*. 1.vydání. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. 2006. ISBN 978-80-7043-444-4
- [3] Scott transformer connection. [online]. ELECTRICAL ENGINEERING, 2012 [cit. 19.7.2023]. Dostupné z: <http://electrical-engineering-portal.com/scott-t-transformer-connection-overview>
- [4] Scott-T transformer. [online]. WIKIPEDIA, 2023 [cit. 19.7.2023]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Scott-T_transformer
- [5] Scott-T Connection of Transformer. [online]. ELETRICAL NOTES, 2012 [cit. 19.7.2023]. Dostupné z: <http://electricalnotes.wpcomstaging.com/2012/05/06/scott-t-connection-of-transformer/>
- [6] Scott-T transformer connection. TUTORIALS POINT, 2021 [cit. 19.7.2023]. [online]. Dostupné z: <https://www.tutorialspoint.com/what-is-scott-t-transformer-connection>
- [7] Transformace třífázové na dvoufázové. [online]. CRUSHTYMKS, [cit. 19.7.2023]. Dostupné z: <https://crushtymks.com/cs/transformers/1567-scott-t-transformer-connection-overview.html>

Přílohy

- Příloha č. 1 – Vykreslení fázorových diagramů v programu Matlab (soubor MATLAB Data (.mat))