

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Měření na vzduchovém trojfázovém transformátoru

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vojtěch BEHRÍK**
Osobní číslo: **E09B0216P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Měření na vzduchovém trojfázovém transformátoru**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Na vzduchovém trojfázovém transformátoru 15 kVA, 3 kV/400 V, 50 Hz:

1. Provedte měření naprázdno a nakrátko.
2. Určete parametry pro náhradní schéma transformátoru.
3. Vypočítejte účinnost a úbytek napětí při jmenovité zátěži.
4. Vyhodnoťte výsledky měření.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**


Seznam odborné literatury:

1. **Bhag S. Guru, Huseyin R. Hiziroglu: Electric machinery and transformers. New York Oxford University Press 2001**


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Jarolím**
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


Doc. Ing. Jiri Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je uvedení do problematiky transformátorů. Jsou popsány postupy při měření naprázdno a nakrátko. Tyto postupy jsou následně aplikovány při samotném měření na transformátoru a získané hodnoty jsou zpracovány. Z těchto zpracovaných hodnot jsou následně dopočteny hodnoty prvků náhradního schématu typu T-článek. Dále je určena účinnost transformátoru a úbytek napětí při jmenovitém zatížení.

Klíčová slova

trojfázový transformátor, měření nakrátko, měření naprázdno, převod

Abstract

Title: Measuring of Three-Phase Air-Cooled Transformer

The aim of this thesis is an introduction into the problematic of transformers. The procedures of no load and under load testing are described. The procedures are then applied during the transformer testing and acquired values are processed. These processes values are used to calculate the parameters for replacement scheme type T. Further, the efficiency of the transformer and the voltage decrease at nominal load are determined.

Key words

three phase transformer, short-circuit test, open-circuit test, transfer

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 6.6.2012

Vojtěch Behřík

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlovi Jarolímovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Rád bych také poděkoval doc. Ing. Bohumilu Skalovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a asistenci při měření.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 TEORIE TRANSFORMÁTORŮ	11
1.1 KONSTRUKCE TRANSFORMÁTORŮ	11
1.1.1 Magnetický obvod	11
1.1.2 Vinutí transformátoru	13
1.1.3 Chlazení transformátoru	13
1.2 PRINCIP ČINNOSTI TRANSFORMÁTORU	13
1.3 PŘEVOD TRANSFORMÁTORU	15
1.4 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU	15
1.5 FÁZOROVÝ DIAGRAM TRANSFORMÁTORU	17
1.6 ÚČINNOST TRANSFORMÁTORU	17
1.7 TROJFÁZOVÝ TRANSFORMÁTOR	17
1.8 ZAPOJENÍ TRANSFORMÁTORŮ	18
1.8.1 Zapojení do hvězdy (Y,y)	18
1.8.2 Zapojení do trojúhelníka (D,d)	19
1.8.3 Zapojení do lomené hvězdy (z)	19
1.9 HODINOVÉ ČÍSLO	20
2 MĚŘENÍ NA TRANSFORMÁTORECH - TEORETICKÝ ROZBOR	20
2.1 MĚŘENÍ NAPRÁZDNO	20
2.1.1 Postup při měření naprázdno	20
2.1.2 Vyhodnocení naměřených hodnot	21
2.2 MĚŘENÍ NAKRÁTKO	22
2.2.1 Postup při měření nakrátko	22
2.2.2 Vyhodnocení měření	22
3 MĚŘENÍ TRANSFORMÁTORU	23
3.1 MĚŘENÍ NAPRÁZDNO	23
3.2 MĚŘENÍ NAKRÁTKO	27
3.3 VÝPOČET PARAMETRŮ NÁHRADNÍHO SCHÉMATU	29
3.4 VÝPOČET ÚČINNOSTI TRANSFORMÁTORU	30
3.5 ÚBYTEK NAPĚTÍ PŘI JMENOVITÉ ZÁTĚŽI - ODPOROVÁ ZÁTĚŽ	31
4 ZÁVĚR	32
5 SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	33
6 PŘÍLOHY	1

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na princip funkce transformátorů a měření na nich.

Text je rozdělen do tří částí; první se zabývá teorií transformátorů, v druhé části jsou uvedeny postupy při měření na transformátorech. V třetí části jsou zpracovány výsledky z měření.

Seznam symbolů a zkratk

$\cos\varphi$ [-]	Účinit
η [-]	Účinnost
I_0, I_k [A]	Proud naprázdno, proud nakrátko
I, \mathbf{I} [A]	Proud, fázor proudu
k [-]	Převod
N_1, N_2 [-]	Počet závitů vinutí transformátoru
ΔP_0 [W]	Ztráty naprázdno
$\Delta P_{j0}, \Delta P_{jk}$ [W]	Joulovy ztráty naprázdno, nakrátko
ΔP_{Fe} [W]	Ztráty v železe
ΔP_k [W]	Ztráty nakrátko
ΔP_d [W]	Přídavné ztráty
P_k [W]	Příkon
R_l [Ω]	Odpor vyjadřující rezistivitu vinutí v náhradním schématu
R_{Fe} [Ω]	Fiktivní odpor magnetického obvodu
U, \mathbf{U} [V]	Napětí, fázor napětí
U_0, U_k [V]	Napětí naprázdno, napětí nakrátko
Δu [-]	Úbytek napětí v poměrných veličinách
X_μ [Ω]	Magnetizační reaktance
X_σ [Ω]	Rozptylová reaktance
Z_0, Z_k [Ω]	Impedance naprázdno, impedance nakrátko

1 Teorie transformátorů

Transformátor je elektrický netočivý stroj, který umožňuje měnit hodnoty střídavého proudu a napětí na jiné požadované hodnoty. To umožňuje přenos výkonu od zdrojů ke spotřebiteli. Transformátor je důležitým prvkem rozvodné soustavy, protože minimalizuje Joulovy ztráty vlivem přenosu elektrické energie při vysokém napětí a malém proudu. Transformátory nejsou samozřejmě využívány jen v elektrických rozvodných systémech, ale i v elektrických obvodech jako součást zdrojů elektrické energie a dalších elektrotechnických aplikacích. Tyto transformátory mají pochopitelně menší výkon ve srovnání s transformátory využívanými pro přenos elektrické energie. [1]

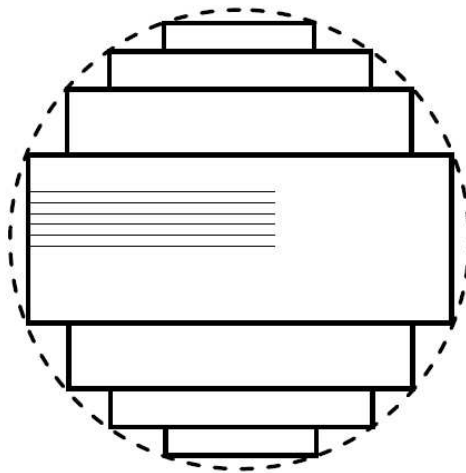
Transformátory se vyrábějí v mnoha různých provedeních co se konstrukce, počtu vinutí a fází, výkonů, proudů, napětí, a frekvence týče.

1.1 Konstrukce transformátorů

Transformátory jsou zkonstruovány ze 2 základních částí. Jednou z těchto částí je magnetický obvod, druhou částí je vinutí. Dalšími nezbytnou částí je chlazení transformátoru.

1.1.1 Magnetický obvod

Magnetický obvod je někdy nazýván feromagnetické jádro. Feromagnetické jádro je vyrobeno z navzájem izolovaných plechů. Tyto plechy jsou orientované, za tepla válcované. Ve směru válcování umožňují dosáhnout hodnoty magnetické indukce B až 1,8T ve směru vedení magnetického toku. V ideálním případě by feromagnetické jádro mělo kruhový průřez, protože by to vedlo k nižším ztrátám v mědi. V porovnání se čtvercovým průřezem by totiž byly zapotřebí kratší závity vinutí. Ve skutečnosti se magnetické jádro vyrábí tzv. odstupňováním.[1][2]



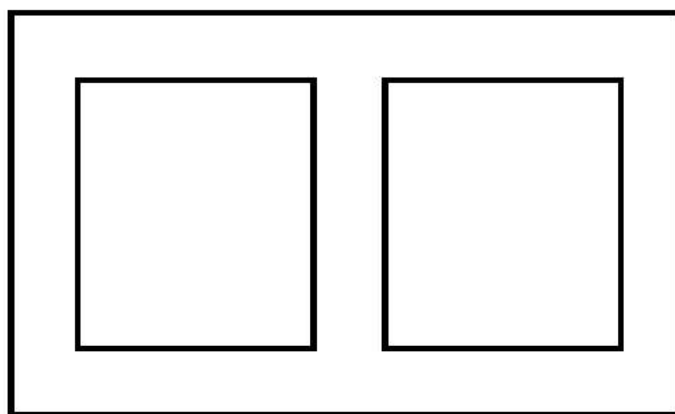
Obr. 1.1 Odstupňování magnetického jádra transformátoru [2]

1.1.1.1 Tvary magnetických obvodů

Podle tvaru magnetických obvodů transformátoru rozlišujeme transformátory jádrové a plášťové.

1.1.1.1.1 Plášťové transformátory

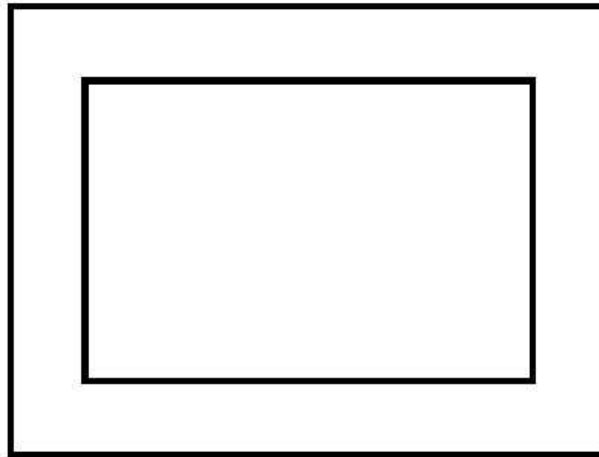
U plášťového transformátoru je vinutí navinuto na středním sloupku, jeho průřez je větší, než průřez spojek. Magnetický tok, se totiž rozděluje do těchto spojek. Výhodou tohoto provedení je jednoduché navíjení vodičů na jednu cívku, která je navinuta na středovém sloupku.[1]



Obr. 1.2 Principiální náčrt plášťového transformátoru [2]

1.1.1.1.2 Jádrové transformátory

Magnetický obvod tohoto provedení má ve všech místech stejný průřez. Magnetický tok se totiž nerozděluje do spojek ale protéká jimi celý. Ve srovnání s plášťovými transformátory má toto provedení lepší vlastnosti co se chlazení týče.[1]



Obr. 1.3 Principiální nákres jádrového transformátoru [2]

1.1.2 Vinutí transformátoru

Na výrobu vinutí transformátoru se používají měděné vodiče. Tyto vodiče mají většinou kruhový průřez. Tyto vodiče jsou izolované a jsou navinuté na izolovaných kostrách transformátorů. [2]

1.1.3 Chlazení transformátoru

V transformátorech vzniká vlivem ztrát teplo. Toto teplo je potřeba odvést. U transformátorů menších výkonů se využívá chlazení vzduchem. Transformátory větších výkonů jsou umístěné v nádobě s olejem. Tento olej plní funkci chladiva a izolačního prvku. Olej přenáší teplo od vinutí směrem k nádobě. Odtud je teplo odvedeno do okolí. Ke zlepšení účinnosti chlazení se zvětšuje plocha vyzařování (nádobu nemá hladké stěny). Dále rozlišujeme nádoby s přirozeným nebo nuceným oběhem oleje. V případě nuceného oběhu odvádíme horký olej z nádoby do chladiče a do nádoby vracíme ochlazený olej z chladiče. [1][2]

1.2 Princip činnosti transformátoru

Transformátor se skládá z uzavřeného feromagnetického jádra, na kterém jsou navinuta primární a sekundární vinutí. Feromagnetické jádro uzavírá magnetický tok mezi vinutími. Střídavý zdroj napájí primární vinutí a na sekundárním vinutí je připojena zátěž. Proudem v

primárním vinutím je vybuzen magnetický tok $\Phi_1(t)$, který se uzavírá přes feromagnetické jádro. Tento tok zabírá se sekundárním vinutím a budí v něm napětí se stejnou frekvencí jakou má zdroj připojený na primární vinutí. V případě, že je k sekundárnímu vinutí připojena zátěž, protéká jím elektrický proud. Tento proud vybudí magnetický tok $\Phi_2(t)$, který se také uzavírá přes feromagnetické jádro. Jádrem potom prochází výsledný magnetický tok $\Phi_h(t)$. [1]

Magnetický tok Φ_1 má 2 složky. Těmito složkami jsou hlavní tok Φ_{1h} a rozptylový tok $\Phi_{1\sigma}$.

$$\Phi_1(t) = \Phi_{1h}(t) + \Phi_{1\sigma}(t) \quad (1.1)$$

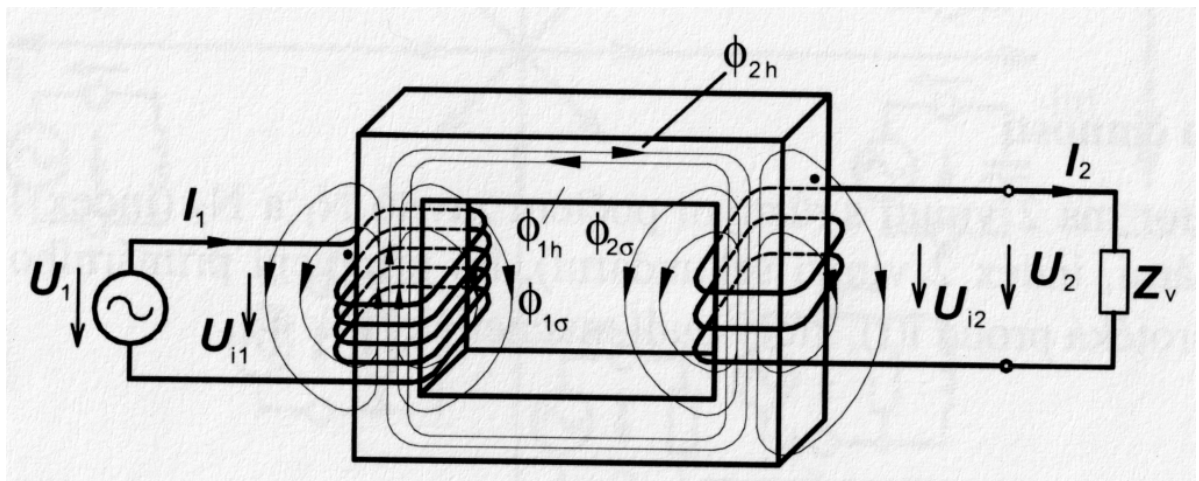
Tok Φ_{1h} se uzavírá přes feromagnetické jádro. Tok $\Phi_{1\sigma}(t)$ se nepodílí na přenosu energie, pouze se uzavírá kolem primárního vinutí. [1]

Pokud sekundárním vinutím protéká proud, je vybuzen tok $\Phi_2(t)$, pro který platí

$$\Phi_2(t) = \Phi_{2h}(t) + \Phi_{2\sigma}(t) \quad (1.2)$$

Pro celkový magnetický tok Φ_h platí

$$\Phi_h(t) = \Phi_{1h}(t) + \Phi_{2h}(t) \quad (1.3)$$



Obr. 1.4 Znáznornění 1-fázového transformátoru [1]

1.3 Převod transformátoru

Převod transformátoru je dán poměrem indukovaných napětí.

$$k = \frac{u_{i1}}{u_{i2}} \quad (1.4)$$

Indukované napětí lze určit ze vztahu

$$u_i = N \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d\psi}{dt} \quad (1.5)$$

Pro harmonický průběh magnetického toku platí

$$u_i = \frac{d}{dt}(N\Phi_m \sin \omega t) = \omega N\Phi_m \cos \omega t \quad (1.6)$$

Vztah pro převod transformátoru lze upravit do této podoby

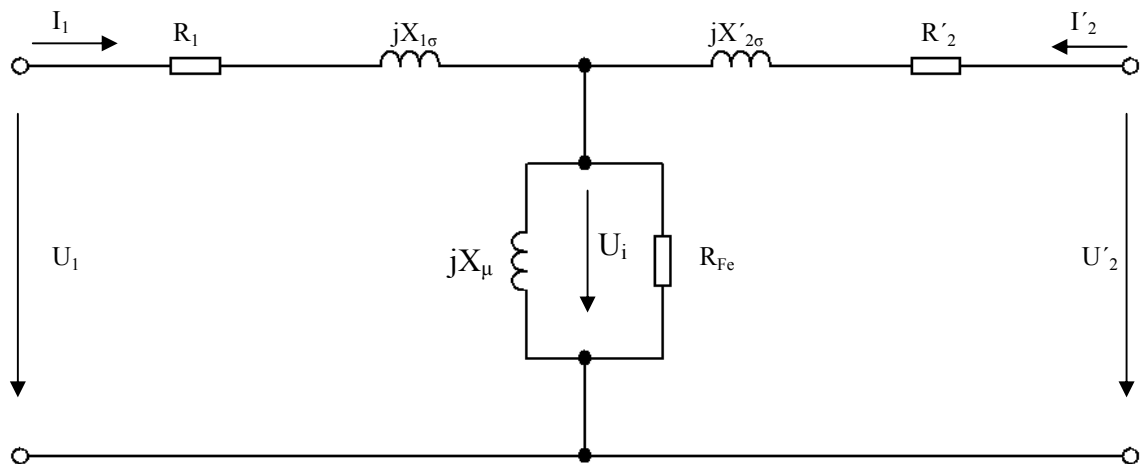
$$k = \frac{u_{i1}}{u_{i2}} = \frac{\omega N_1 \Phi_m \cos \omega t}{\omega N_2 \Phi_m \cos \omega t} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.7)$$

Převod transformátoru lze dále určit ze vztahu

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1.8)$$

1.4 Náhradní schéma transformátoru

Náhradní schéma transformátoru je složeno z pasivních obvodových prvků (rezistorů a indukčností). Vlastnosti tohoto schématu jsou v souladu s jistými zjednodušenými předpoklady. Toto schéma platí pro harmonické průběhy veličin v ustáleném stavu. Z měření naprázdno a nakrátko lze dopočítat prvky tohoto schématu.



Obr. 1.5 Náhradní schéma transformátoru

Sériový obvod ($R_1, X_{1\sigma}, R'_2, X'_{2\sigma}$) představuje primární a sekundární vinutí. Na těchto vinutích vznikají úbytky napětí.

R_1, R'_2 - činné odpory cívek primárního a sekundárního vinutí

$X_{1\sigma}, X'_{2\sigma}$ - rozptylové reaktance primárního a sekundárního vinutí

Paralelní obvod (R_{Fe}, X_{μ}) představuje magnetický obvod transformátoru.

X_{μ} - magnetizační reaktance

R_{Fe} - představuje ztráty v železe

Čárkované hodnoty jsou hodnoty sekundárního vinutí transformátoru. Tyto hodnoty jsou přepočítány k primární straně transformátoru pomocí převodu transformátoru. Toto schéma platí pro jakýkoliv technický transformátor.

Ze znalosti náhradního schématu a Kirchhoffových zákonů lze sestavit následující rovnice

$$U_1 = R_1 I_1 + jX_{1\sigma} I_1 + U_t \quad (1.9)$$

$$U'_2 = R'_2 I'_2 + jX'_{2\sigma} I'_2 + U_t \quad (1.10)$$

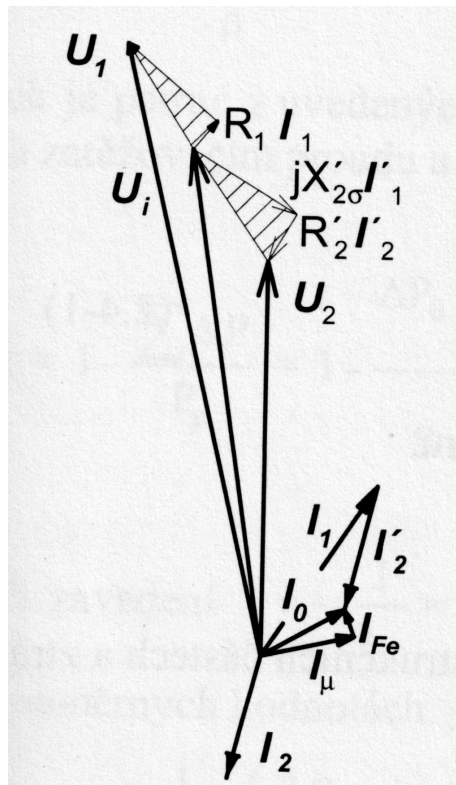
Při použití vhodných úprav lze tyto vztahy dále upravit

$$U_1 = (R_1 + jX_1) I_1 + jX_{\mu} I'_2 \quad (1.11)$$

$$U_2 = jX_{\mu} I_1 + (R'_2 + jX'_2) I'_2 \quad (1.12)$$

1.5 Fázorový diagram transformátoru

Podle náhradního schématu transformátoru lze nakreslit fázorový diagram.



Obr. 1.6 Fázorový diagram transformátoru [1]

1.6 Účinnost transformátoru

Ideální transformátoru funguje bez ztrát. Toho ale v praxi nelze nikdy docílit. Ve skutečnosti elektrické stroje, a nejen ty, pracují s účinností $\eta < 1$.

Pro výpočet účinnosti platí vztah

$$\eta = \frac{P}{P_p} = \frac{P_p - \sum \Delta P}{P_p} \quad (1.13)$$

ΔP jsou ztráty a ty dále dělíme na ztráty v železe, Joulovy ztráty ve vinutí a ztráty přídavné. Přídavné ztráty jsou způsobeny vířivými proudy v konstrukčních částech transformátorů. [1]

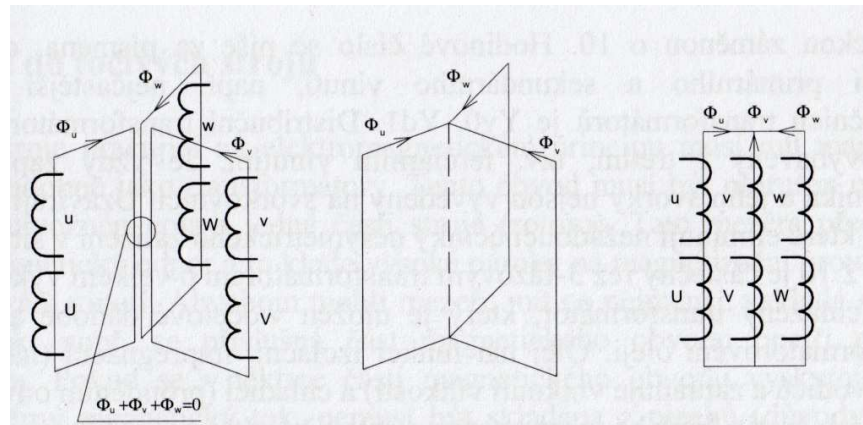
Vznik ztrát v železe a Joulových ztrát je vysvětlen v kapitole 2.

1.7 Trojfázový transformátor

Transformaci trojfázové soustavy lze v zásadě provést dvěma způsoby. První možností je pro každou fázi použít samostatný transformátor. Druhou možností je použití trojfázového

transformátoru. Použití 3 samostatných jednofázových transformátorů vede k vyšší ceně, protože je třeba použít více materiálu pro daný výkon. Výhodou je v případě poruchy nebo odstávky používání zbývajících fází.[1][3]

V praxi se častěji využívá trojfázový transformátor. Na obrázku (Obr. 1.7) je naznačen přechod od 3 jednofázových transformátorů k 1 trojfázovému transformátoru. V případě symetrie napájecího napětí je součet fázorů magnetického toku roven nule. To znamená, že lze vynechat střední sloupek jádra. Z důvodu omezení možné nesymetrie vlivem magnetických spojek, je důležité tyto spojky vytvořit co nejkratší. Jelikož postranní jádra mají magnetické spojky delší než prostřední jádro, vznikne v transformátoru jistá nesymetrie. Tato nesymetrie ovšem není důvodem k nepoužívání trojfázového transformátoru.[1][3]



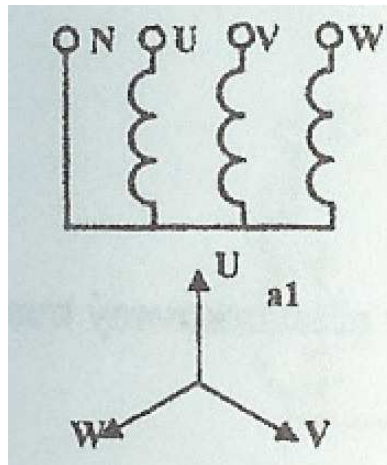
Obr. 1.7 Přechod k trojfázovému transformátoru [3]

1.8 Zapojení transformátorů

Vinutí trojfázového transformátoru může být zapojeno to trojúhelníka (D,d), hvězdy (Y,y) nebo lomené hvězdy (z). Velkými písmeny se označují vinutí velkého napětí, malými písmeny se označují vinutí malého napětí. V případě, že je vyveden středový uzel, doplňuje se označení písmenem N (v případě středového uzlu na straně nižšího napětí se doplňuje označením písmenem n). [3]

1.8.1 Zapojení do hvězdy (Y,y)

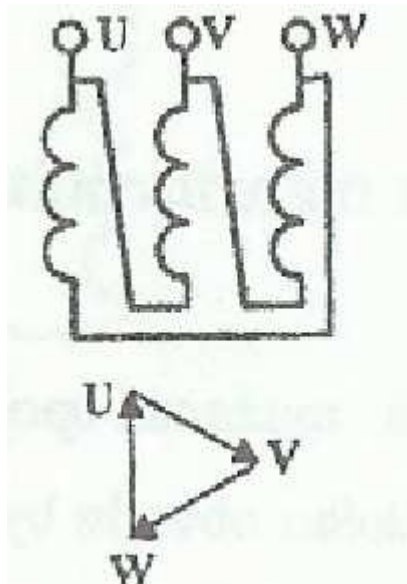
U tohoto zapojení jsou konce nebo začátky vinutí spojeny do jednoho uzlu. Tento uzel může být vyveden.



Obr. 1.8 Zapojení do hvězdy, fázorový diagram napětí[3]

1.8.2 Zapojení do trojúhelníka (D,d)

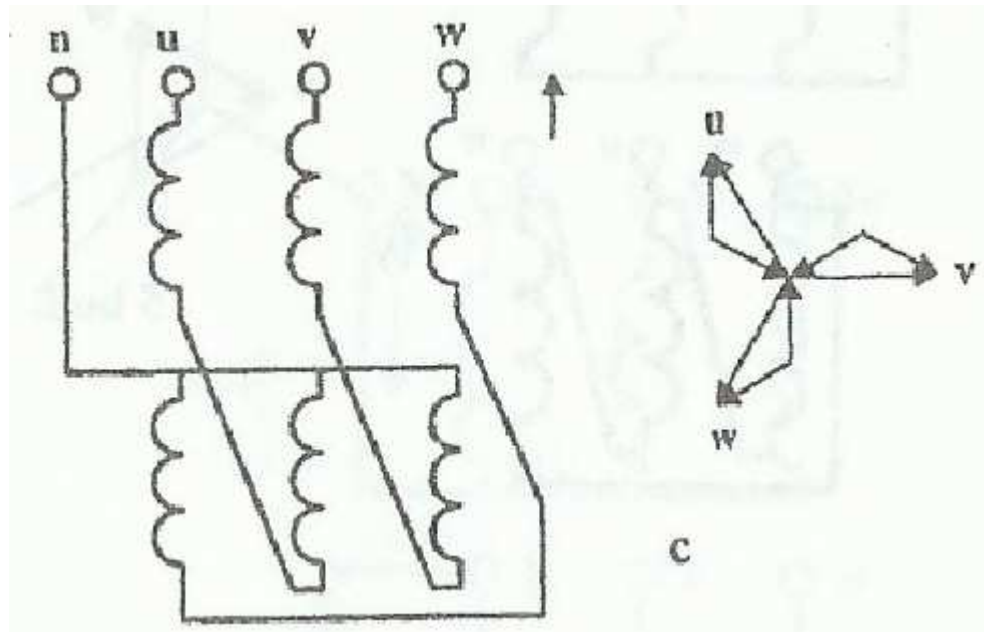
Zapojení do trojúhelníka dosáhneme tak, že konec (začátek) jedné cívky vinutí připojíme na začátek (konec) druhé cívky vinutí.



Obr. 1.9 Zapojení do trojúhelníka, fázorový diagram napětí [3]

1.8.3 Zapojení do lomené hvězdy (z)

Toto zapojení se používá jen na sekundární straně. Každá fáze se skládá ze 2 cívek navinutých na sousedních sloupcích transformátoru. „Zapojení do lomené hvězdy vznikne tak, že začátky (konce) druhých polovin cívek spojíme do uzlu a konce (začátky) spojíme se začátky (konci) prvních polovin cívek umístěných na předchozích (následujících) sloupcích.“[2]



Obr. 1.10 Zapojení do lomené hvězdy, fázorový diagram [3]

1.9 Hodinové číslo

„Je to vzájemné fázové natočení fázorů primárního a sekundárního napětí stejnojmenných fází. Měří se od strany vyššího napětí k napětí nižšímu ve smyslu sledu fází a vyjadřuje se počtem násobků 30° .“ [1] Tento údaj je štítková hodnota. V případě paralelního chodu transformátorů musí být mimo jiné zajištěno, že je u všech transformátorů stejná hodnota hodinového čísla. Kdyby tomu tak nebylo, procházely by vinutími transformátorů značné vyrovnávací proudy.

2 Měření na transformátorech - teoretický rozbor

2.1 Měření naprázdno

Při tomto měření jsou výstupní svorky rozpojené. Příkon odebíraný transformátorem je spotřebován pouze na krytí ztrát naprázdno. Z hodnot získaných při měření naprázdno lze sestavit magnetizační charakteristiku. Dále lze stanovit proud naprázdno při jmenovitém napětí. [4]

2.1.1 Postup při měření naprázdno

Transformátor je napájen střídavým napětím. Obvykle je napájen ze strany nižšího napětí. To má za následek nižší požadavky na napájecí napětí a měřicí přístroje. Maximální hodnota napájecího napětí se volí jako 1,2 násobek jmenovitého napětí. [4]

K sestrojení magnetizační charakteristiky je třeba měnit vstupní napětí. Pokud hodnoty tohoto napětí vyneseme do grafu v závislosti na vstupním proudu, získáme již zmíněnou magnetizační charakteristiku. Doporučuje se zjemnit krok v místě nasycení magnetického jádra. [4]

2.1.2 Vyhodnocení naměřených hodnot

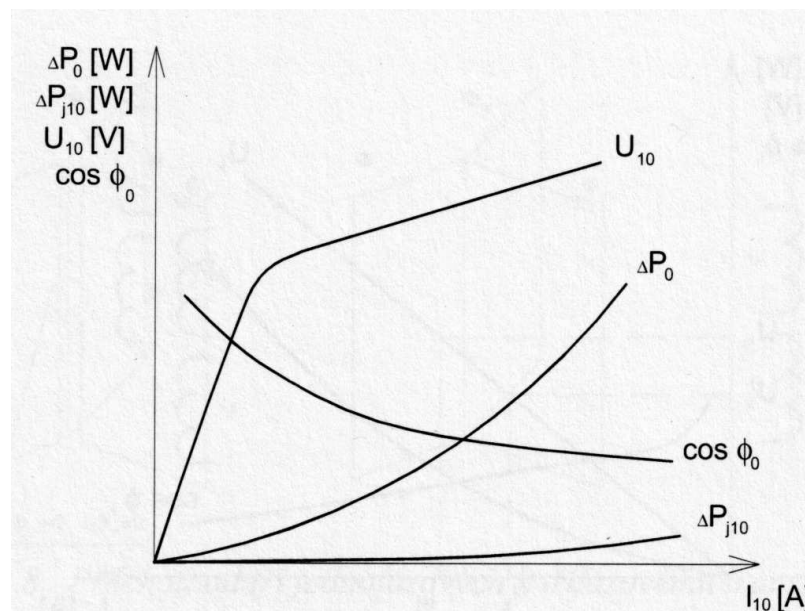
Z naměřených hodnot lze určit i účinník $\cos\varphi_0$. Účinník lze vypočítat ze vztahu:

$$\cos\varphi_0 = \frac{\Delta P_0}{\sqrt{3}U_s I_f} \quad (2.1)$$

ΔP_0 jsou již zmíněné ztráty naprázdno. Ty jsou složeny z Joulových ztrát a ztrát v železe. Joulovy ztráty jsou způsobeny průchodem elektrického proudu vinutím. Jelikož jsme schopni určit proud naprázdno, lze v případě znalosti odporu vinutí tyto ztráty určit. Joulovy ztráty jsou určeny vztahem [4]

$$\Delta P_{j0} = \frac{3}{2} R_1 I_0^2 \quad (2.2)$$

V případě, že známe celkové ztráty naprázdno a Joulovy ztráty, lze jednoduše určit ztráty v železe. Tyto ztráty se skládají ze ztrát vířivými proudy a ztrát hysterezních. Tyto ztráty dosahují vyšších hodnoty než ztráty Joulovy. [4]



Obr. 2.1 Měření naprázdno, předpokládané průběhy charakteristik [1]

Z měření naprázdno lze určit i některé parametry náhradního schématu. Těmito parametry jsou R_{Fe} a X_{μ} . Konkrétní výpočty jsou uvedeny v odstavci 3.3.

2.2 Měření nakrátko

Při tomto měření jsou výstupní svorky transformátoru propojeny bezodporovými svorkami dokrátka. $U'_2=0$ V. Jedním z cílů tohoto měření je určení tzv. napětí nakrátko U_{kn} . Je to napětí, při kterém prochází transformátorem jmenovitý proud. Další cíle tohoto měření jsou určení ztrát nakrátko, charakteristika transformátoru nakrátko, impedance nakrátko a průběh účinníku. [1][4]

2.2.1 Postup při měření nakrátko

Při tomto měření by neměl být překročen jmenovitý proud transformátoru. Proud by se měl měnit od vyšších hodnot směrem k nule. Důvodem je zvětšující se odpor vinutí vlivem oteplení vodičů. Ze stejného důvodu by mělo měření proběhnout co nejrychleji. Jelikož má charakteristika naprázdno v ideálním případě přímkový průběh, stačí provést měření pro 4 hodnoty proudu. [4]

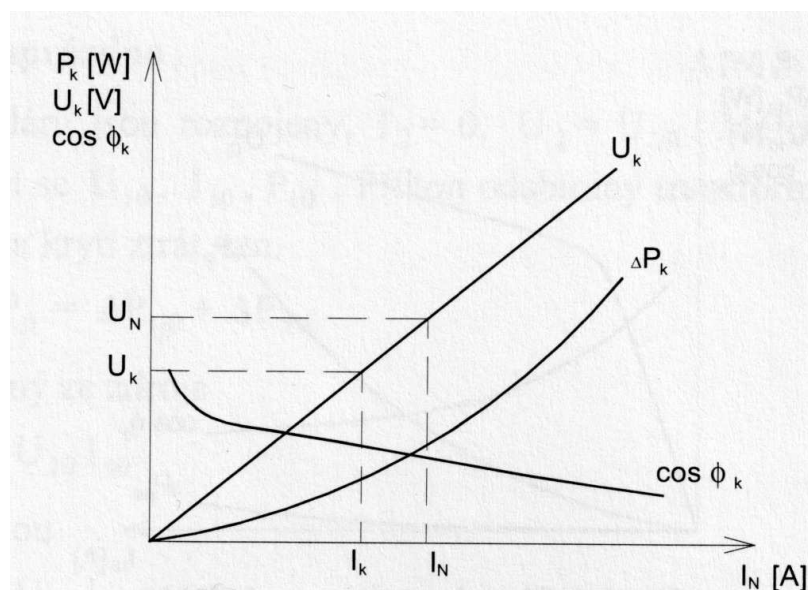
2.2.2 Vyhodnocení měření

Z naměřených hodnot lze sestavit charakteristiku nakrátko. Účinník lze dopočítat podle stejného vzorce jako v případě měření naprázdno (2.1). Jelikož při měření nakrátko nedojde k nasycení jádra, jsou ztráty v železe ΔP_{Fe} zanedbatelné. Veškeré ztráty vzniklé při měření nakrátko jsou ztráty Joulovy ΔP_{jk} a ztráty přídatné ΔP_d . [4]

Joulové ztráty získáme ze vztahu [4]

$$\Delta P_{jk} = \frac{3}{2} R_1 I_1^2 + \frac{3}{2} R_2 I_2^2 \quad (2.3)$$

Z hodnot získaných při měření nakrátko lze dopočítat zbylé prvky náhradního schématu transformátoru.



Obr. 2.2 Měření nakrátko, předpokládané průběhy charakteristik [1]

3 Měření transformátoru



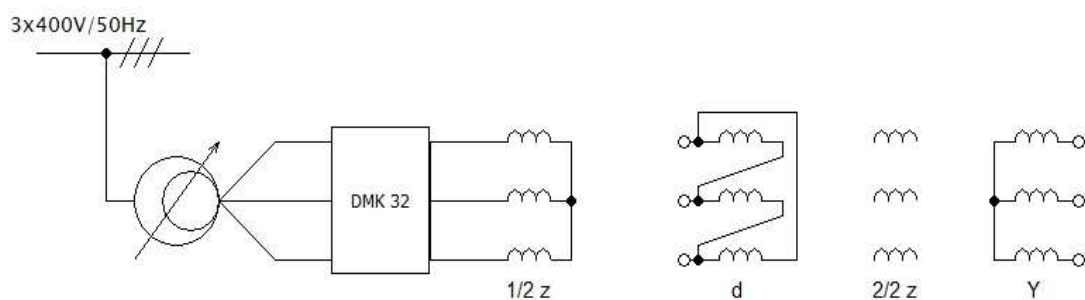
Obr. 3.1 Štítek měřeného transformátoru

Tab. 3.1 Odpor vinutí

R_d [Ω]	0,275/3
R_Y [Ω]	7,12
R_z [Ω]	0,35

3.1 Měření naprázdno

K měření naprázdno bylo použito digitálního trojfázového analyzátoru sítě DMK 32. K DMK 32 je k dispozici program. Ten zajišťuje přenos dat od přístroje k počítači. Dále umožňuje ukládání dat do textového souboru. Hodnoty uvedené v tabulce naměřených hodnot (Tab.3.2) se liší od hodnot uvedených v příloze (Příloha E) z důvodu převodu měřicího transformátoru. Při měření bylo použito zapojení znázorněné na následujícím obrázku.



Obr. 3.2 Měření naprázdno, schéma zapojení

Tab. 3.2 Měření naprázdno, naměřené a dopočítané hodnoty

U_{10} [V]	I_{10} [A]	ΔP_0 [W]	Q_0 [VAr]	$\cos\varphi_{10}$ [-]	ΔP_{j10} [W]	ΔP_{Fe} [W]
294,0	2,26	336	1092	0,29	2,681	333,319
280,0	1,92	300	876	0,32	1,935	298,065
267,0	1,64	270	702	0,36	1,412	268,588
259,0	1,48	252	606	0,38	1,150	250,850
249,3	1,34	222	522	0,38	0,943	221,057
237,3	1,18	204	432	0,42	0,731	203,269
228,3	1,04	198	360	0,48	0,568	197,432
216,3	0,94	174	306	0,49	0,464	173,536
204,7	0,82	156	240	0,54	0,353	155,647
194,3	0,74	138	210	0,55	0,287	137,713
182,7	0,66	126	168	0,60	0,229	125,771
171,7	0,6	108	144	0,61	0,189	107,811
159,3	0,54	96	114	0,64	0,153	95,847
139,7	0,48	78	84	0,67	0,121	77,879
121,7	0,4	60	54	0,71	0,084	59,916
103,0	0,34	42	36	0,69	0,061	41,939
84,3	0,28	30	18	0,73	0,041	29,959
58,3	0,16	12	6	0,74	0,013	11,987
58,3	0,16	12	6	0,74	0,013	11,987

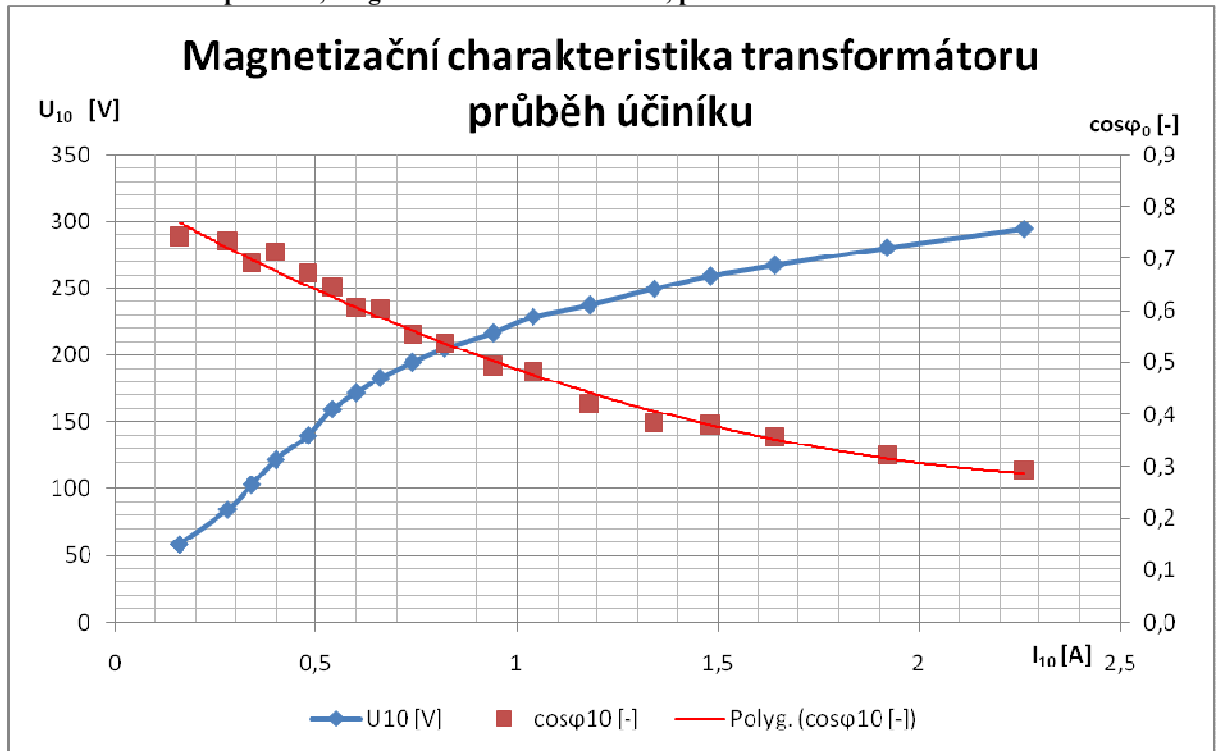
Vztahy použité při výpočtech:

$$\cos\varphi_{10} = \frac{\Delta P_0}{\sqrt{3}U_{10}I_{10}} = \frac{336}{\sqrt{3} \cdot 294 \cdot 2,26} = 0,29 \quad (3.1)$$

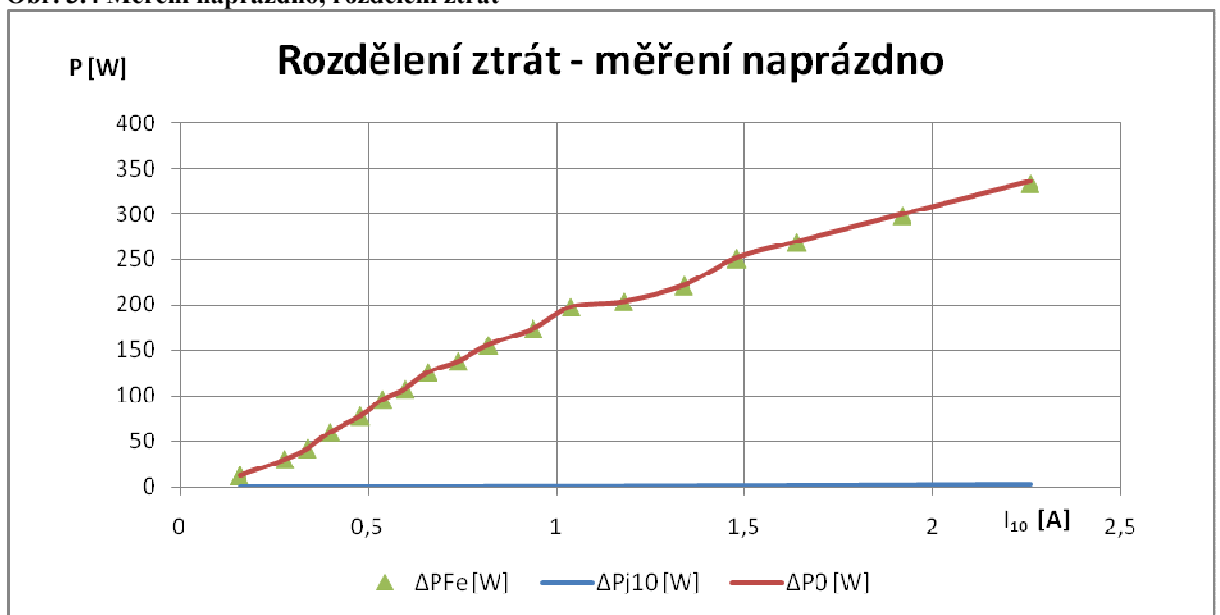
$$\Delta P_{j0} = \frac{3}{2} R_z I_0^2 = \frac{3}{2} 0,35 \cdot 2,26^2 = 2,681 \text{ W} \quad (3.2)$$

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_0 - \Delta P_{j10} = 336 - 2,681 = 333,319 \text{ W} \quad (3.3)$$

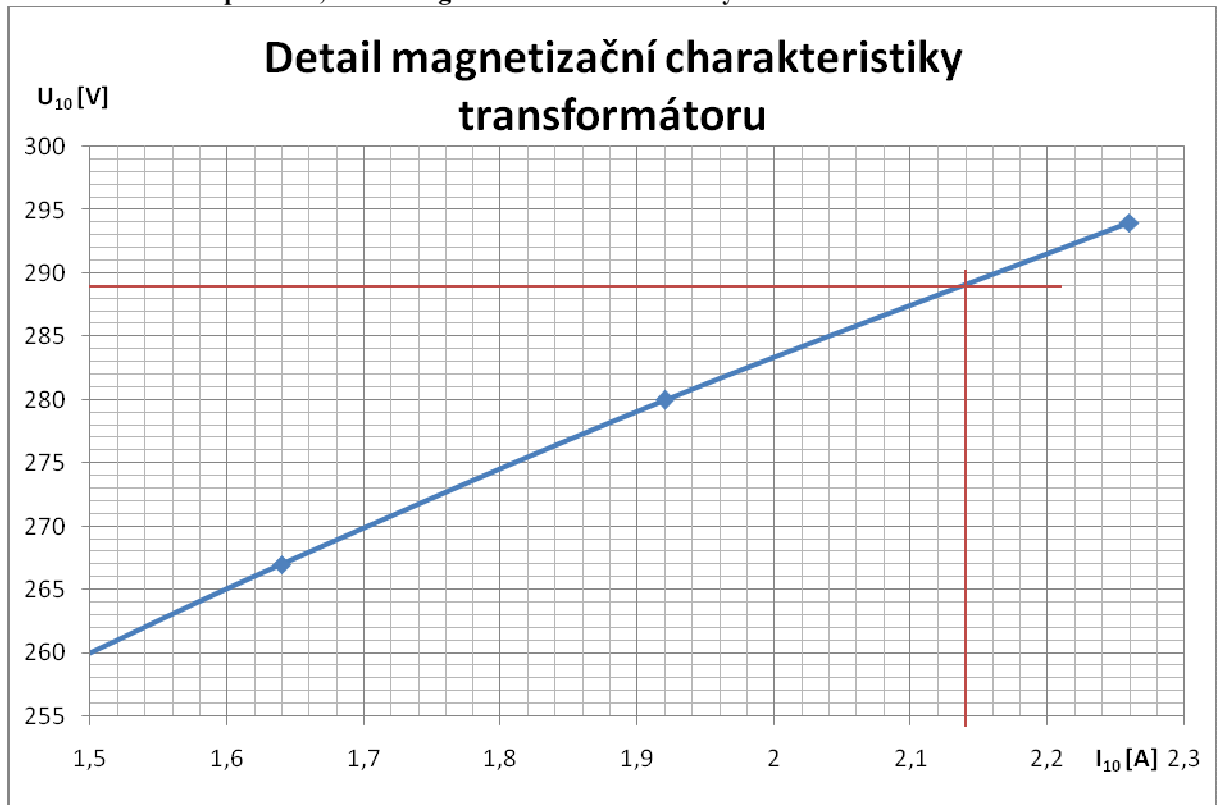
Obr. 3.3 Měření naprázdno, magnetizační charakteristika, průběh účinníku



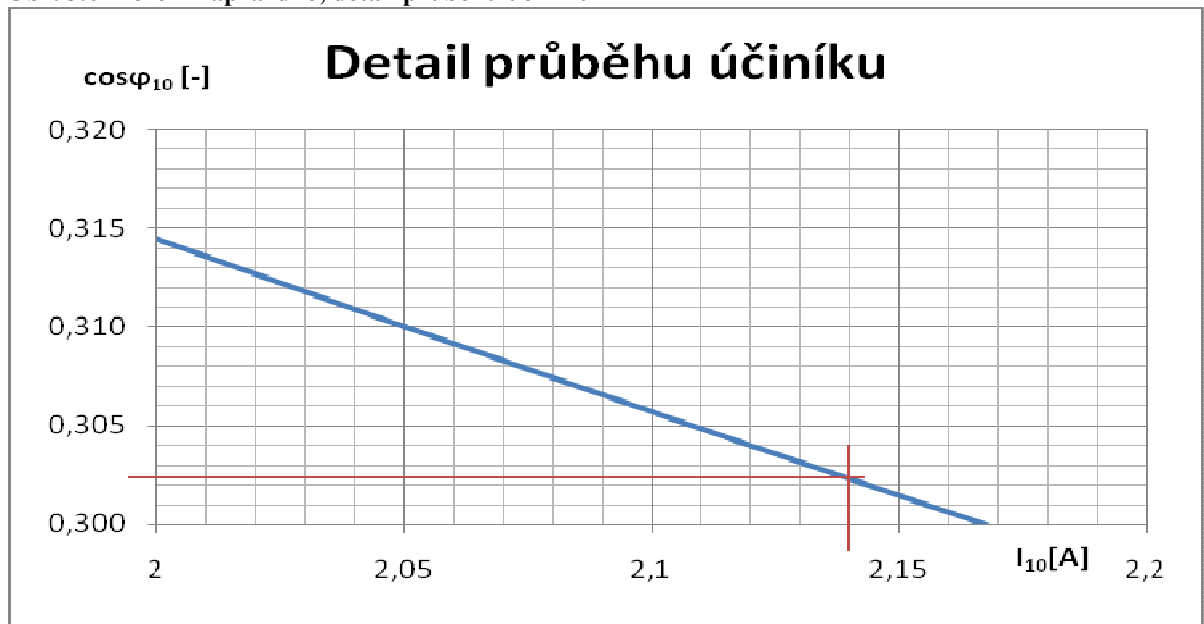
Obr. 3.4 Měření naprázdno, rozdělení ztrát



Obr. 3.5 Měření naprázdno, detail magnetizační charakteristiky



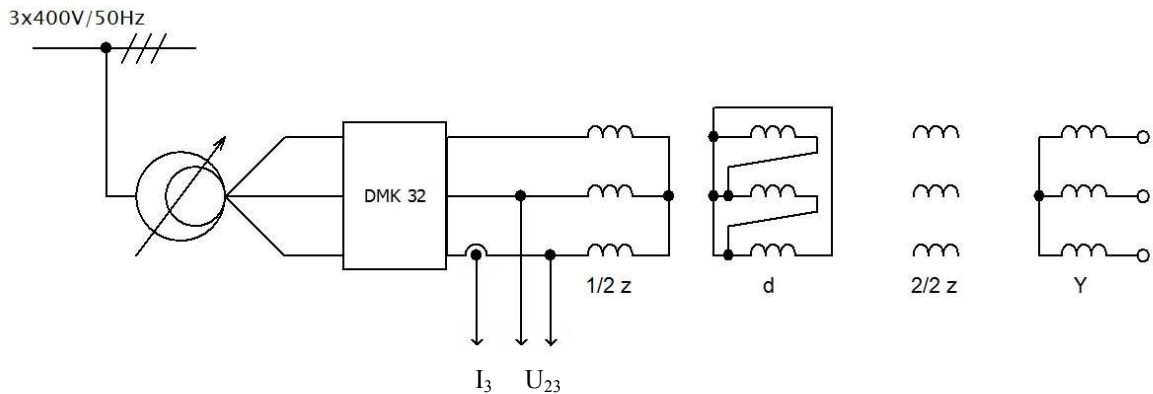
Obr. 3.6 Měření naprázdno, detail průběhu účinníku



Průběhy znázorněné na 2 předchozích grafech (Obr. 3.5, Obr. 3.6) jsou sestrojeny za účelem snazšího odečtení hodnot potřebných pro další výpočty. Těmito hodnotami jsou I_{10N} a $\cos\varphi_{10N}$.

3.2 Měření nakrátko

Původním záměrem při měření nakrátko bylo použití digitálního trojfázového analyzátoru sítě DMK 32 jako tomu bylo u měření nakrátko. Jelikož při měření vykazoval značné chyby, došlo k doplnění schématu zapojení o digitální osciloskop. Tento osciloskop umožňuje ukládání dat v takové formě, která je dále použitelná pro zpracování v PC. Tento osciloskop umožňuje také uložení naměřených průběhů ve formě obrázku.



Obr. 3.7 Měření nakrátko, schéma zapojení

Tab. 3.3 Měření nakrátko, naměřené a dopočítané hodnoty

U_{23k} [V]	I_{3k} [A]	φ_k [°]	$\cos\varphi_k$ [-]	ΔP_k [W]	ΔP_{jk} [W]	ΔP_d [W]
7,98	14,8	46	0,69	142,10	132,39	9,70
9,56	16,1	47	0,68	181,81	156,67	25,14
14,1	23,7	48	0,67	387,28	339,50	47,78
20,2	35,1	49,2	0,65	802,42	744,65	57,76

Napětí nakrátko:

$$u_{k\%} = \frac{U_{22kn}}{U_{1n}} \cdot 100 = \frac{10,3}{289} \cdot 100 = 3,56 \% \quad (3.4)$$

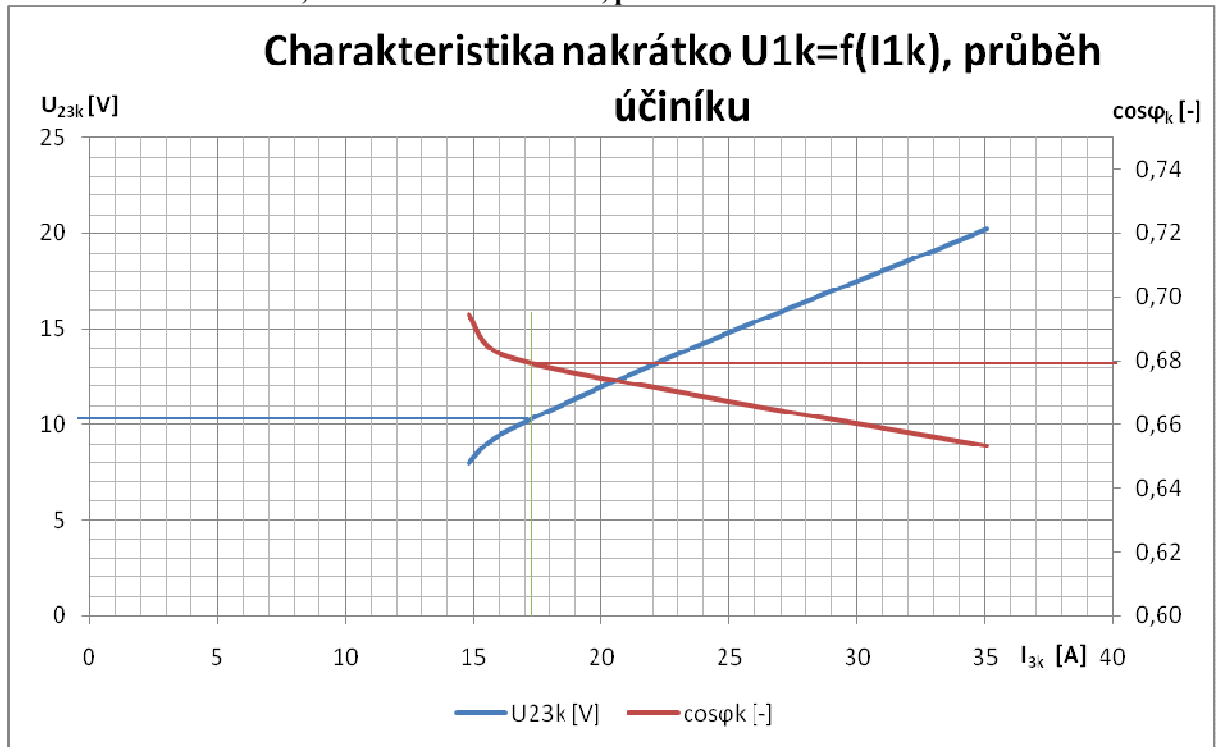
Vztahy použité při výpočtech:

$$\Delta P_k = \sqrt{3} \cdot U_{23k} \cdot I_{3k} \cdot \cos\varphi_1 = \sqrt{3} \cdot 7,98 \cdot 14,8 \cdot 0,69 = 142,1 \text{ W} \quad (3.5)$$

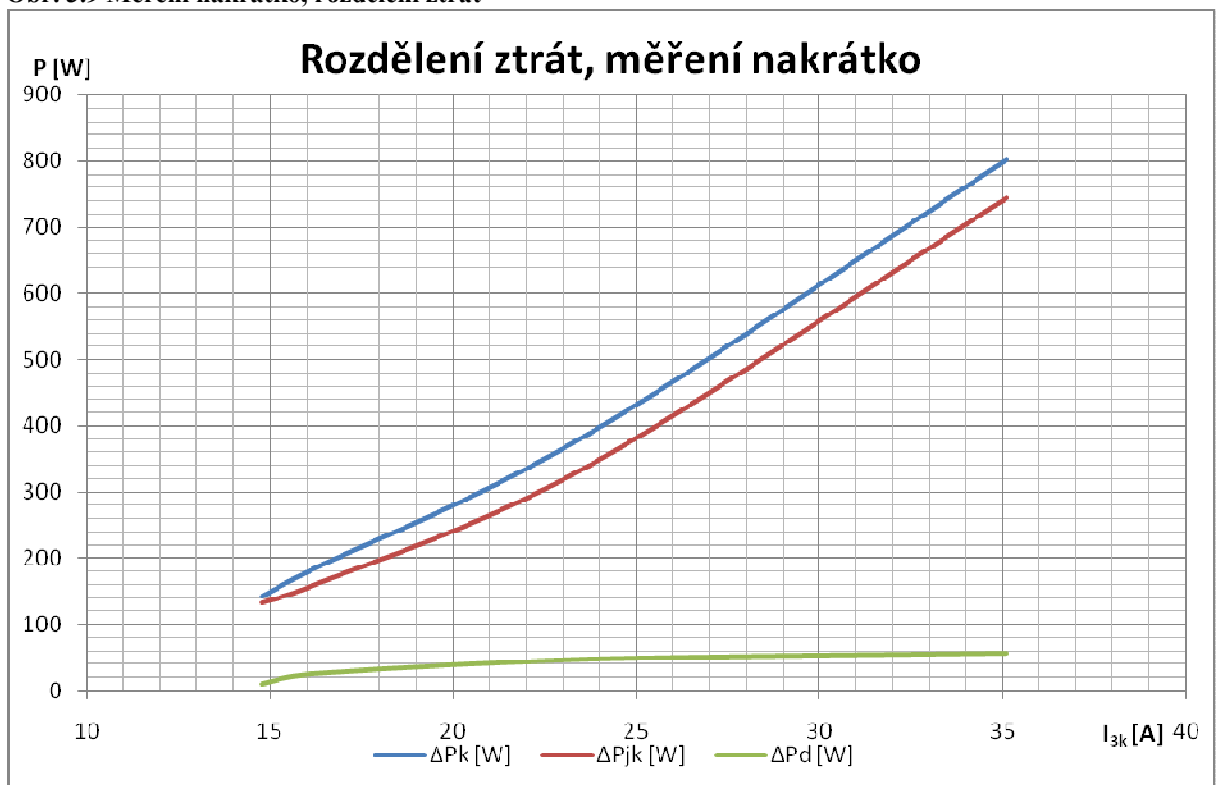
$$\begin{aligned} \Delta P_{jk} &= \frac{3}{2} R_z \cdot I_1^2 + \frac{3}{2} R_d \cdot I_2^2 = \frac{3}{2} R_z \cdot I_{2k}^2 + \frac{3}{2} R_d \cdot (k \cdot I_{2k})^2 \\ &= \frac{3}{2} \cdot 0,35 \cdot 14,8^2 + \frac{3}{2} \cdot \frac{0,275}{3} \cdot (0,76 \cdot 14,8)^2 = 132,39 \text{ W} \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\Delta P_d = \Delta P_k - \Delta P_{jk} = 142,1 - 132,39 = 9,7 \text{ W} \quad (3.7)$$

Obr. 3.8 Měření nakrátko, charakteristika nakrátko, průběh účinníku



Obr. 3.9 Měření nakrátko, rozdělení ztrát



3.3 Výpočet parametrů náhradního schématu

K určení prvků náhradního schématu použijeme hodnoty odečtené z grafů zobrazujících průběhy charakteristik při měření naprázdno a nakrátko. K určení R_{Fe} a X_{μ} je třeba znát proud naprázdno při jmenovitém napětí. Ten odečteme z obr. 3.5. Dále je třeba znát hodnotu účinníku při jmenovitém napětí. Ten odečteme z obr. 3.6.

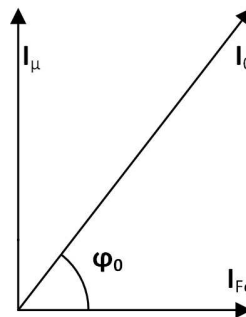
Tab. 3.4 Měření naprázdno, odečtené hodnoty

U_n	289 V
I_{10n}	2,14 A
$\cos\varphi_{10n}$	0,3042

K výpočtu zbylých prvků využijeme hodnoty odečtené z průběhů charakteristik nakrátko. Zde je třeba určit napětí nakrátko (obr. 3.8) a účinník při proudu nakrátko (obr. 3.8).

Tab. 3.5 Měření nakrátko, odečtené hodnoty

I_{3n}	17,3 A
U_{23kn}	10,3 V
$\cos\varphi_{kn}$	0,676



Obr. 3.10 Měření naprázdno, fázorový diagram proudů

$$I_{Fe} = I_{10n} \cdot \cos\varphi_{10n} = 2,14 \cdot 0,3042 = 0,65 \text{ A} \quad (3.8)$$

$$R_{Fe}^* = \frac{U_n}{I_{Fe}} = \frac{289/\sqrt{3}}{0,65} = 256 \ \Omega \quad (3.9)$$

$$R_{Fe} = \frac{R_{Fe}^*}{3} = \frac{256}{3} = 85,3 \ \Omega \quad (3.10)$$

$$I_{\mu} = I_{10n} \cdot \sin\varphi_{10n} = 2,14 \cdot 0,95 = 2,033 \text{ A} \quad (3.11)$$

$$X_{\mu} = \frac{U_n}{I_{\mu}} = \frac{289/\sqrt{3}}{2,033} = 82,1 \ \Omega \quad (3.12)$$

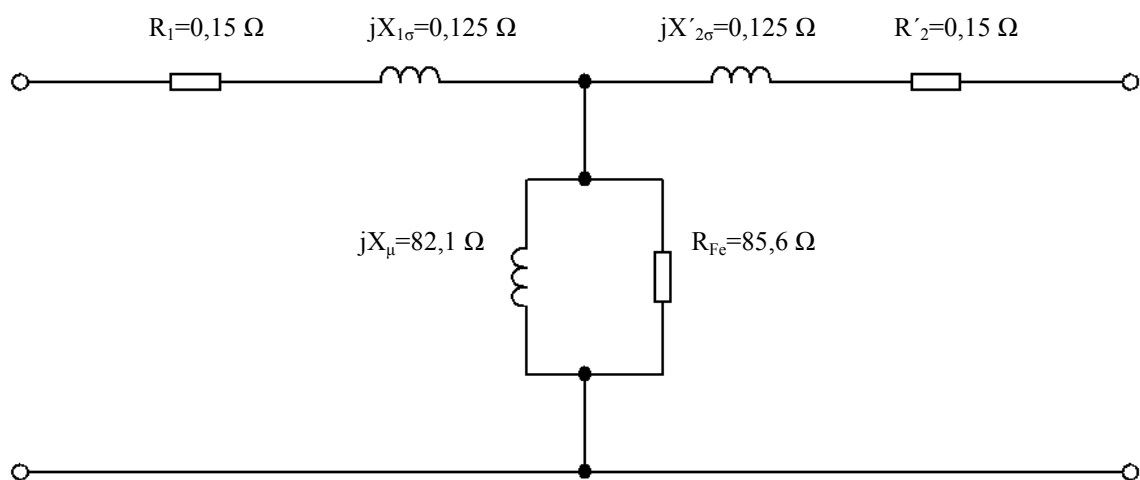
$$Z_k = \frac{U_{22kn}}{I_{3n}} = \frac{10,3/\sqrt{3}}{17,3} = 0,34 \Omega \quad (3.13)$$

$$R_k = Z_k \cdot \cos\varphi_k = 0,34 \cdot 0,675 = 0,3 \Omega \quad (3.14)$$

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_k}{2} = \frac{0,3}{2} = 0,15 \Omega \quad (3.15)$$

$$X_k = Z_k \cdot \sin\varphi_k = 0,34 \cdot 0,738 = 0,25 \Omega \quad (3.16)$$

$$X_{1\sigma} = X'_{2\sigma} = \frac{X_k}{2} = \frac{0,443}{2} = 0,125 \Omega \quad (3.17)$$



Obr. 3.11 Náhradní schéma transformátoru

3.4 Výpočet účinnosti transformátoru

$$P_p = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n = \sqrt{3} \cdot 289 \cdot 17,3 = 8659,7 \text{ W} \quad (3.18)$$

$$\Delta P_{Fen} = \Delta P_{0n} - \Delta P_{j0n} = 320 - 2,4 = 317,6 \text{ W} \quad (3.19)$$

$$\Delta P_{kn} = \sqrt{3} \cdot U_{kn} \cdot I_n \cdot \cos\varphi_{kn} = \sqrt{3} \cdot 13,2 \cdot 17,3 \cdot 0,6758 = 267,3 \text{ W} \quad (3.20)$$

$$\sum \Delta P = \Delta P_{Fen} + \Delta P_{kn} = 317,6 + 267,3 = 584,9 \text{ W} \quad (3.21)$$

$$\eta = \frac{P}{P_p} \cdot 100 = \frac{P_p - \sum \Delta P}{P_p} \cdot 100 = \frac{8659,7 - 584,9}{8659,7} \cdot 100 = 93,24 \% \quad (3.22)$$

3.5 Úbytek napětí při jmenovité zátěži - odporová zátěž

K výpočtu velikosti úbytku napětí byly použity vztahy uvedené v [5].

$$i = \frac{I_1}{I_n} = \frac{17,3}{17,3} = 1 \quad (3.23)$$

$$u = \frac{U_1}{U_{1n}} = \frac{289}{289} = 1 \quad (3.24)$$

$$Z_{1n} = \frac{U_{1n}}{I_{1n}} = \frac{289/\sqrt{3}}{17,3} = 9,65 \, \Omega \quad (3.25)$$

$$Z_{2n} = \frac{U_{2n}}{I_{2n}} = \frac{380}{22,8} = 16,666 \, \Omega \quad (3.26)$$

$$r_1 = \frac{R_{1y}}{Z_{1n}} = \frac{0,35}{9,65} = 0,0363 \quad (3.27)$$

$$r_2 = \frac{R_{1d}}{Z_{2n}} = \frac{0,275}{16,666} = 0,0055 \quad (3.28)$$

$$r_k = r_1 + r_2 = 0,0363 + 0,0055 = 0,0418 \quad (3.29)$$

$$x_1 = \frac{X_{1\sigma}}{Z_{1n}} = \frac{0,125}{9,65} = 0,013 \quad (3.30)$$

$$x_2 = \frac{X_{2\sigma}}{Z_{2n}} = \frac{0,217}{16,666} = 0,013 \quad (3.31)$$

$$x_k = x_1 + x_2 = 0,013 + 0,013 = 0,026 \quad (3.32)$$

$$\Delta u = (r_k \cos \varphi + x_k \sin \varphi) \cdot i + \frac{(x_k \cos \varphi - r_k \sin \varphi)^2}{2u_1} i^2 = 0,0418 + 0,00034 = 0,04214 \quad (3.33)$$

4 Závěr

Při vyhodnocení ztrát naprázdno a nakrátko se potvrdily předpoklady o rozdělení ztrát. Při chodu naprázdno dominovaly ztráty v železe ΔP_{Fe} . Ztráty Joulovy ΔP_{j0} jsou ve srovnání s nimi téměř zanedbatelné. Při měření nakrátko naopak dominovaly ztráty Joulovy ΔP_{jk} .

Napětí nakrátko u_k dosahuje hodnoty 3,56 %. Tento transformátor lze tedy považovat za poměrně tvrdý zdroj.

Parametry náhradního schématu transformátoru jsou zobrazeny na Obr. 3.11

Měřený transformátor dosahoval účinnosti $\eta = 93,24 \%$

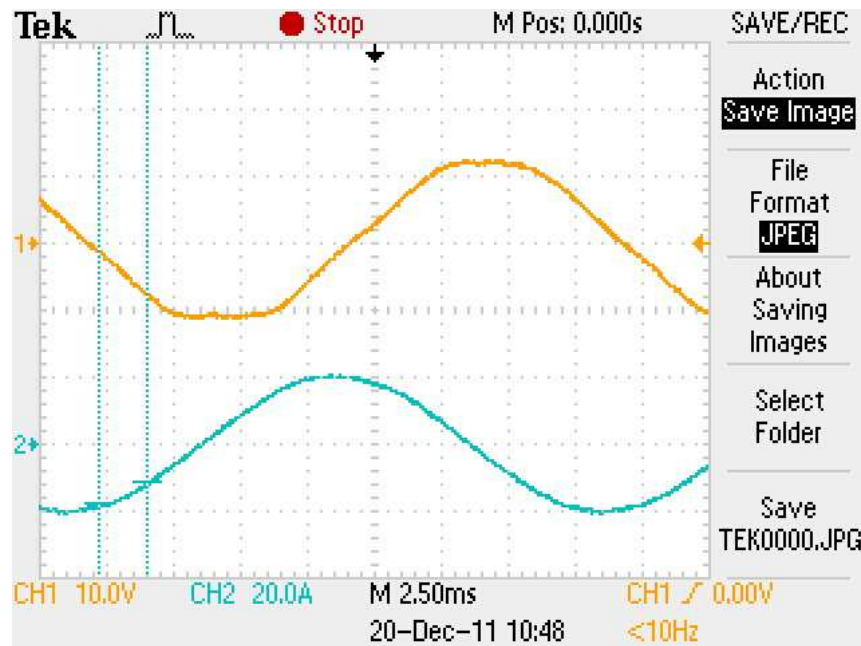
Úbytek napětí vypočítaný pro odporovou zátěž dosahuje hodnoty $\Delta u = 0,04214$. Při jmenovitém napájecím napětí $U_n = 289 \text{ V}$ to znamená úbytek napětí $\Delta U = 12,18 \text{ V}$.

5 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BARTOŠ, Václav, ČERVENÝ, Josef, HRUŠKA, Josef, KOTLANOVÁ, Anna, SKALA, Bohumil. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2011. ISBN 978-80-7043-444-4.
- [2] VAVŘIŇÁK, Petr. *Elektrické stroje a přístroje*. [online].2006. [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: http://www.sse-najizdarne.cz/dokumenty/studijni_materialy/elektricke_stroje_a_pristroje.pdf
- [3] BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 230 s. ISBN 80-7043-509-7.
- [4] BARTOŠ, Václav, SKALA, Bohumil. *Měření na elektrických strojích*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. 109 s. ISBN 80-7082-896-X.
- [5] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje I,II*. 1. vyd. Plzeň: VŠSE v Plzni, 1986. ISBN 55-061-86.

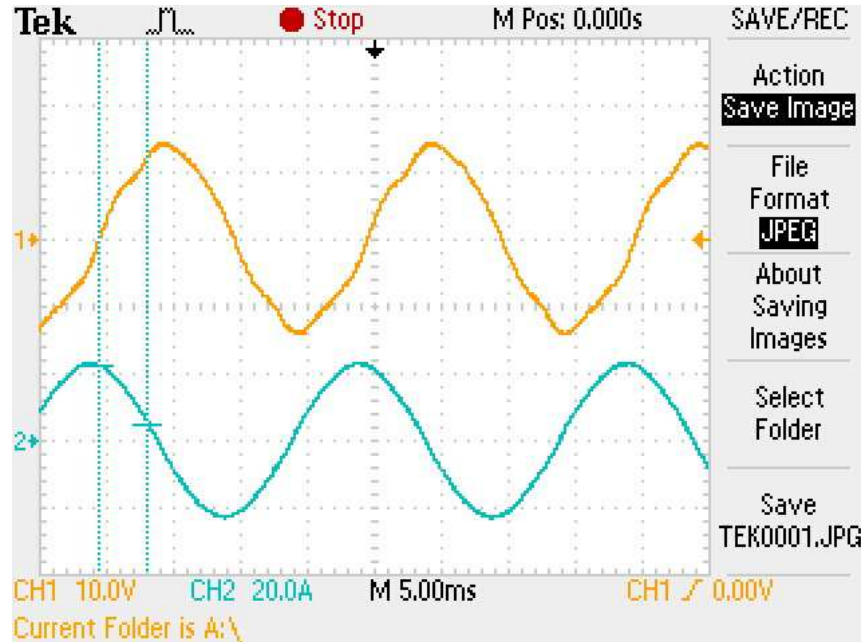
6 Přílohy

Příloha A - Měření nakrátko



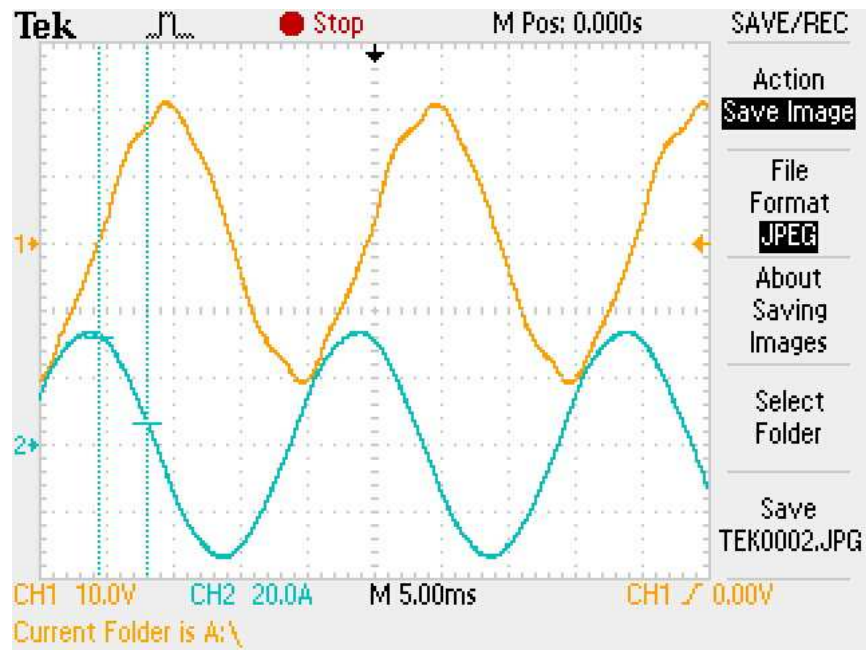
Obr. 6.1 Měření nakrátko, naměřené hodnoty

Příloha B - Měření nakrátko



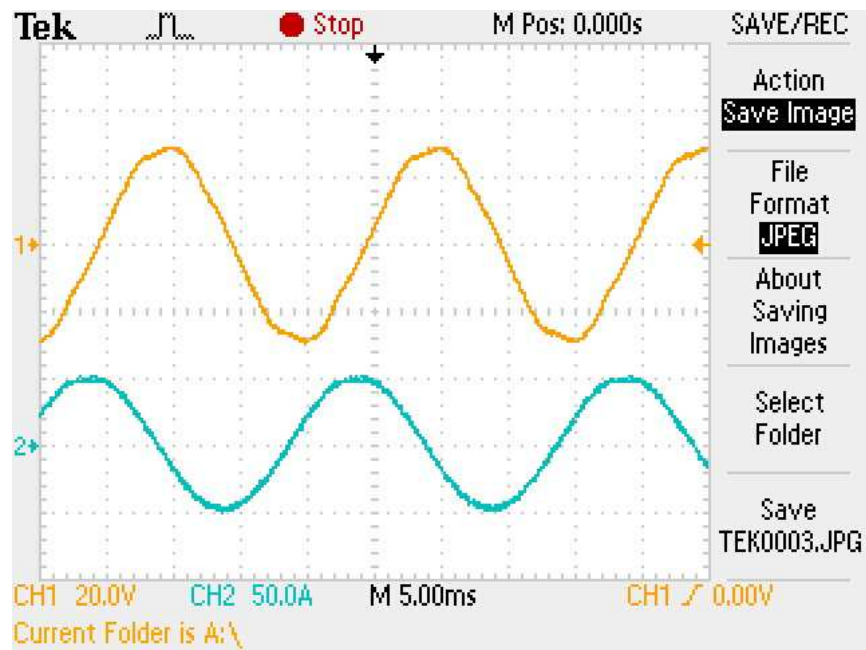
Obr. 6.2 Měření nakrátko, naměřené hodnoty

Příloha C - Měření nakrátko



Obr. 6.3 Měření nakrátko, naměřené hodnoty

Příloha D - Měření nakrátko



Obr. 6.4 Měření nakrátko, naměřené hodnoty

Příloha E - Měření naprázdno**Tab. 6.1** Měření naprázdno, naměřené hodnoty

	V L1-L2 [V]	V L2-L3 [V]	V L3-L1 [V]	A L1 [A]	A L2 [A]	A L3 [A]
1	295	295	292	0,41	0,29	0,43
2	281	281	278	0,35	0,25	0,36
3	268	268	265	0,3	0,21	0,31
4	260	260	257	0,27	0,19	0,28
5	250	250	248	0,25	0,17	0,25
6	238	238	236	0,22	0,15	0,22
7	229	229	227	0,19	0,13	0,2
8	217	217	215	0,17	0,12	0,18
9	205	205	204	0,15	0,1	0,16
10	195	195	193	0,14	0,09	0,14
11	183	183	182	0,12	0,08	0,13
12	172	172	171	0,11	0,08	0,11
13	159	160	159	0,1	0,07	0,1
14	140	140	139	0,09	0,06	0,09
15	122	122	121	0,07	0,05	0,08
16	103	103	103	0,06	0,04	0,07
17	84	85	84	0,05	0,03	0,06
18	58	59	58	0,04	0	0,04
19	58	59	58	0,04	0	0,04

Tab. 6.2 Měření naprázdno, naměřené hodnoty

	W L1 [W]	W L2 [W]	W L3 [W]	Var L1 [VAr]	Var L2 [VAr]	Var L3 [VAr]
1	32	15	9	62	47	73
2	27	14	9	50	38	58
3	24	12	9	40	30	47
4	22	11	9	34	26	41
5	19	10	8	30	22	35
6	17	9	8	25	18	29
7	16	9	8	20	15	25
8	14	8	7	16	13	22
9	12	7	7	13	10	17
10	11	6	6	12	8	15
11	9	6	6	9	6	13
12	8	5	5	7	6	11
13	7	4	5	6	5	8
14	6	3	4	5	3	6
15	4	3	3	2	2	5
16	3	2	2	1	1	4
17	2	1	2	1	0	2
18	1	0	1	0	0	1
19	1	0	1	0	0	1