

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Měření základních charakteristik jednofázového
transformátoru**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vilém VOPELÁK**
Osobní číslo: **E11B0093P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Měření základních charakteristik jednofázového transformátoru**
Zadávací 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 :

1. Prostudujte a popište problematiku jednofázových transformátorů včetně jejich praktického využití.
2. Uveďte, které základní charakteristiky jednofázového transformátoru se měří nedestruktivními metodami. Detailně popište jejich princip a postup měření.
3. Změřte základní charakteristiky přiděleného jednofázového transformátoru.
4. Vyhodnoťte získané výsledky.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. Faktor, Z. Transformátory a cívky. BEN-technická literatura, Praha 1999

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Roman Hamar, Ph.D.
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2014
Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2015


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá měřením základních charakteristik jednofázového transformátoru. V první části je uveden teoretický úvod spojený s jednofázovým transformátorem a je zde také uvedeno praktické využití jednofázových transformátorů. V druhé části jsou detailně popsána jednotlivá měření a jejich postupy. V poslední třetí části je zhodnocení výsledků jednotlivých měření, příklady výpočtů a grafické vyhodnocení jednotlivých základních charakteristik jednofázového transformátoru.

Klíčová slova

jednofázový transformátor, měření naprázdno, měření nakrátko, účinnost transformátoru, vinutí

Abstract

This bachelor thesis is focused on measuring of basic characteristics of single-phase transformer. Theoretical introduction and practical usage of single-phase transformer is shown in first chapter. The details of single measurement methods and process of measuring are described in second chapter. Last chapter is evaluating of measured data of every measuring method, equations and graphic evaluation of basic characteristics of single-phase transformer.

Key words

Single-phase transformer, one-circuit test, short-circuit test, efficiency of the transformer, wiring

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 8.6.2015

Vilém Vopelák

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Romanu Hamarovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	11
1 TEORETICKÝ ÚVOD	12
1.1 TRANSFORMÁTOR	12
1.2 PRINCIP ČINNOSTI TRANSFORMÁTORŮ	12
1.3 ZÁKLADNÍ ZNAČENÍ TRANSFORMÁTORŮ	13
1.4 KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ TRANSFORMÁTORU	14
1.5 PROVEDENÍ MAGNETICKÉHO OBVODU	15
1.6 PRAKTICKÉ VYUŽITÍ JEDNOFÁZOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ	17
1.7 ODVOZENÍ INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ	18
1.8 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU	19
2 MĚŘENÍ NA TRANSFORMÁTORECH	20
2.1 MĚŘENÍ NA TRANSFORMÁTORU NAPRÁZDNO	20
2.1.1 <i>Postup měření:</i>	21
2.1.2 <i>Výstupní napětí naprázdno</i>	22
2.2 MĚŘENÍ TRANSFORMÁTORU NAKRÁTKO	22
2.2.1 <i>Postup měření</i>	23
2.2.2 <i>Napětí nakrátko</i>	24
2.2.3 <i>Ztráty nakrátko</i>	25
2.3 MĚŘENÍ PŘI ZATÍŽENÍ	27
2.3.1 <i>Postup měření (zátěž reostat)</i>	27
2.3.2 <i>Výstupní napětí a výstupní proud při zatížení</i>	28
2.3.3 <i>Účinnost transformátoru</i>	29
2.4 MĚŘENÍ ODPORU VINUTÍ	29
2.5 MĚŘENÍ PŘEVODU	30
2.6 POUŽITÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE.....	31
3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ	32
3.1 MĚŘENÍ NAPRÁZDNO	32
3.2 MĚŘENÍ PŘI ZATÍŽENÍ	38
3.3 MĚŘENÍ NAKRÁTKO	43
3.4 MĚŘENÍ PŘEVODU	47
3.5 MĚŘENÍ ODPORU VINUTÍ	47
ZÁVĚR	48
LITERATURA	50
PŘÍLOHY	53

Seznam symbolů a zkratk

A_1		ampérmetr na primární straně
A_2		ampérmetr na výstupní straně
B_{max}	[T]	maximální magnetická indukce
$\cos \varphi_{1k}$		účinník nakrátko
f	[Hz]	frekvence
I_{10}	[A]	proud naprázdno
I_{1k}	[A]	proud nakrátko
I_μ	[A]	magnetizační proud
I_{Fe}	[A]	proud na pokrytí ztát v železe
I_1, I_2	[A]	proudy primárního a sekundárního vinutí
I_{1N}, I_{jm}	[A]	jmenovitý proud primárního vinutí
N		celkový počet závitů
N_1		počet závitů na primární straně vinutí
N_2		počet závitů na sekundární straně vinutí
P_1	[W]	příkon transformátoru
P_2	[W]	výkon transformátoru
P_{10}	[W]	příkon transformátoru naprázdno
ΔP_{kn}	[W]	ztráty při jmenovitém napětí
ΔP_j^ϑ	[W]	Joulovy ztráty pro teplotu vinutí
$\Delta P_j, \Delta P_{0j}$	[W]	Joulovy ztráty
ΔP_{Fe}	[W]	ztráty v železe
ΔP_{10}	[W]	ztráty naprázdno
$\Delta P_{1k}, \Delta P_k$	[W]	ztráty nakrátko
ΔP_d	[W]	přídavné ztráty
$R_1, R'_2 (R_2)$	[Ω]	odpory primárního a sekundárního vinutí
R_{Fe}	[Ω]	odpor ztrát v železe
RAT		regulační autotransformátor
S_{10}	[VA]	zdánlivý výkon
Tr		jednofázový transformátor
U_i	[V]	indukované napětí

U_{10}	[V]	napětí naprázdno
U_{1k}, u_k	[V]	napětí nakrátko
U_{1N}	[V]	jmenovité napětí
U_1, U_2	[V]	napětí na primární a sekundární straně vinutí
V_1, V_2		voltmetry na primární a sekundární straně vinutí
W_1, W_2		wattmetr na primární a sekundární straně vinutí
$X_{1\sigma}, X'_{2\sigma}$	[Ω]	rozptylové reaktance primárního a sekundárního vinutí
X_μ	[Ω]	magnetizační reaktance
Z_k	[Ω]	impedance nakrátko
η	[%]	účinnost transformátoru
Φ_h	[Wb]	hlavní magnetický tok
Φ_σ	[Wb]	rozptylový magnetický tok
Φ	[Wb]	magnetický tok
Φ_s	[Wb]	spřažený magnetický tok

Úvod

Jednofázové transformátory jsou v dnešní době jedním ze základních elektrotechnických strojů s velkým rozsahem využití v jednotlivých oborech. Transformátory jsou součástí běžného života. Setkáváme se s nimi každý den a používáme je, aniž bychom si to uvědomovali.

Tato bakalářská práce je zaměřena na měření základních charakteristik jednofázového transformátoru pro tři základní měření. Jedná se o měření naprázdno, nakrátko a měření při zatížení, kde jsem jako zátěž použil proměnný odpor neboli reostat. Dále jsem změřil ještě odpor vinutí a převod transformátoru. Elektrotechnika jde rok od roku dopředu, přístroje pro měření jsou čím dál více modernější a díky nim bylo samotné měření usnadněno.

Text je rozdělen do tří částí. V první části bakalářské práce je detailně popsán princip, konstrukční provedení, praktické využití a další základní teoretické poznatky pro jednofázové transformátory. Poté se bakalářská práce zabývá jednotlivými měřeními, kde je popsán jejich základní teoretický rozbor a postup měření. V poslední části této práce je početní i grafické zhodnocení výsledků daných měření.

Hlavním cílem této práce bylo změřeni základních charakteristik jednofázového transformátoru nedestruktivními metodami, detailní popis postupu měření a popsání principu využití jednofázových transformátorů v praxi.

1 Teoretický úvod

1.1 Transformátor

Transformátory jsou netočivé elektrické stroje, které transformují, neboli přeměňují přivedené střídavé napětí a proudy na jiné napěťové a proudové hladiny. Dá se jimi také měnit počet fází, což je nejčastěji využívané u transformátorů, které napájejí usměrňovače. Transformátory jsou převážně konstruovány pro kmitočet 50 Hz. Sestavují se také pro jiné kmitočty, což závisí na jejich použití. Jednofázové transformátory transformují převážně nižší napětí. Výkony se u nich pohybují v řádech desítek až stovek wattů. [1][2][3][4]

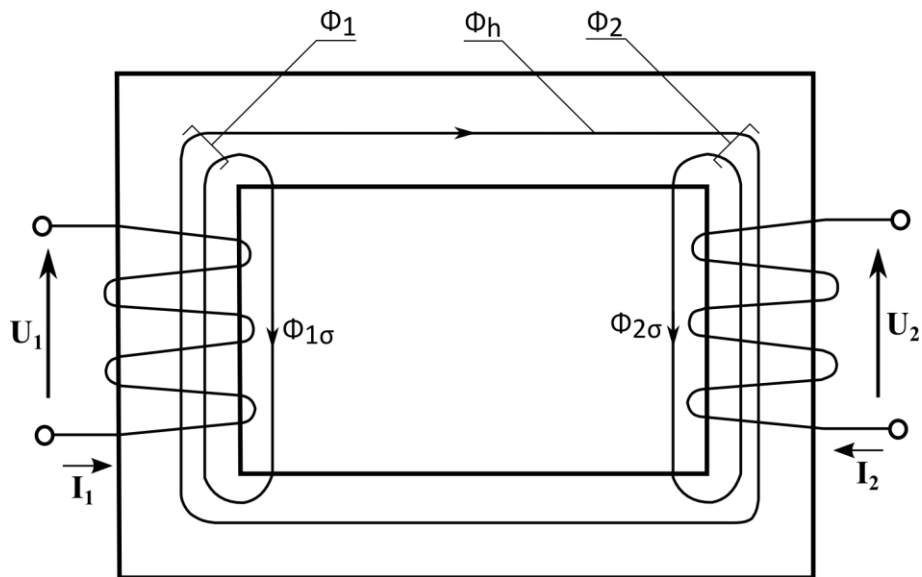
1.2 Princip činnosti transformátorů

Princip činnosti transformátoru vychází ze zákona elektromagnetické indukce. Zákon elektromagnetické indukce vysvětluje vznik elektrického napětí v uzavřeném elektrickém obvodu. Magnetický obvod je vodičem magnetického toku. Proud, který protéká vinutími, vytvoří magnetický tok Φ , jež dělíme na tok hlavní Φ_h a tok rozptylový Φ_σ . Hlavní tok je brán jako činný a dochází díky němu k transformaci. Na rozdíl od rozptylového toku prochází oběma vinutími. Rozptylový tok se nepodílí na činnosti transformátoru a prochází jen vinutím, které ho vybudilo. Pro toky, které jsou uvedeny ve schématu na *obr. 1*, platí tyto vztahy: [1] [3] [9] [17]

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

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

$$\Phi_h = \Phi_{1h} + \Phi_{2h} \quad (3)$$



Obr. 1: Princip činnosti transformátoru se schematickým znázorněním toků [3]

1.3 Základní značení transformátorů

Následující text o šítkových údajích jednofázového transformátoru je převzat z české technické normy ČSN EN 61558-1. [6]

Na štítku transformátoru musí být viditelně označeno:

a) *Jmenovité vstupní napětí transformátoru ve voltech*

- Transformátory, které mají rozsah jmenovitých hodnot, mohou pracovat bez nastavení v celém rozsahu. Musí být označeny horními a spodními hodnotami a odděleny pomlčkou, *např. 115 V – 230 V.*
- Transformátory, které mají rozdílný rozsah jmenovitých hodnot a u kterých musí být přesně nastaveny hodnoty, musí být označeny rozdílnými hodnotami a odděleny lomítkem, *např. 230 V/400 V.*

b) *Jmenovité výstupní napětí transformátoru ve voltech nebo kilovoltech*

c) *Jmenovitý výkon transformátoru ve voltampérech nebo kilovoltampérech*

- Jako doplněk k jmenovitému výkonu může být označen výstupní proud transformátoru v ampérech nebo miliampérech.

d) *Jmenovitá frekvence transformátoru v hertzech*

e) *Jmenovitý účinnost transformátoru, pouze pokud je jiný než 1 pro transformátory nad 25*

VA

1.4 Konstrukční provedení transformátoru

Mezi hlavní části transformátoru patří magnetický obvod, který je tvořený transformátorovými plechy a minimálně dvěma vinutími tzn. primární a sekundární vinutí. Mezi vedlejší části transformátoru patří konstrukční prvky sloužící ke chlazení, izolaci a dalším vlastnostem. Můžeme mezi ně řadit například chladiče, chladicí nádobu pro olej, nosné části vinutí, průchodky a další.

Vinutí je tvořeno cívkami z izolovaného vodiče. Tento izolovaný vodič musí mít odpovídající průřez. Izolačním materiálem nejčastěji bývá papír nebo sklo. U malých transformátorů se dá použít hedvábí, bavlna nebo lak. Vodič ve vinutí bývá nejčastěji z mědi, je možné použít i hliníkové vinutí, ale z důvodu zvětšení měrného odporu musíme zvětšit i průřez vodiče. Vinutí tedy bude mít větší rozměry, ale menší hmotnost.

Vinutí je uloženo na kostře transformátoru. Je tedy uloženo na magnetickém obvodu a nazýváme ho jádrem. V jádře jsou umístěny chladicí kanálky. Na jádrech je nasunuto vinutí a mají odstupňovaný průřez navržený tak, aby se co nejvíce přibližoval kruhové ploše. Jádra jsou utažena šrouby. Vodorovným částem kostry říkáme magnetické spojky transformátoru.

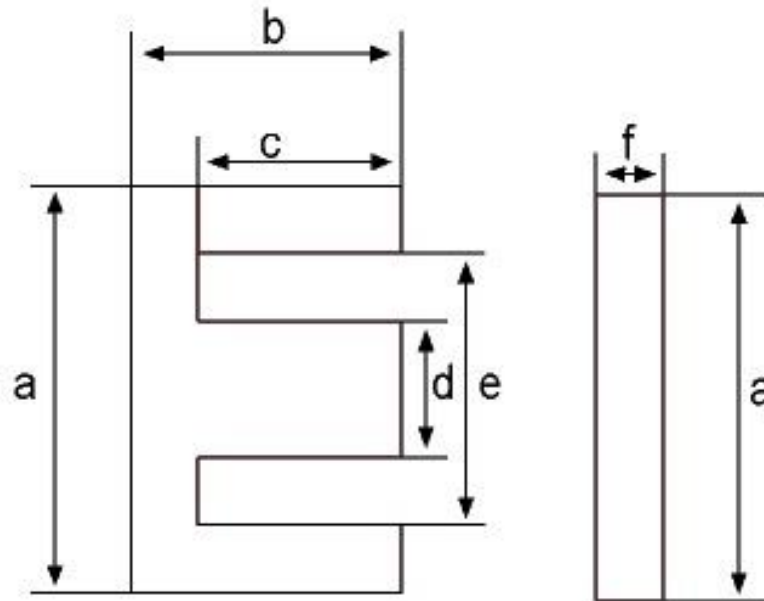
Při skládání magnetického obvodu musíme zamezit vzniku vzduchových mezer, aby se nenavýšoval odpor transformátoru. Nejčastěji používané jsou plechy válcované za studena. Tyto plechy mají při frekvenci $f = 50 \text{ Hz}$, ztráty přibližně $1,5 \text{ W/kg}$ a maximální magnetickou indukci $B_{max} = 1,8 \text{ T}$. Přestože jsou tyto plechy dražší, jsou díky svým vlastnostem ekonomicky výhodnější. [1][2][3]

Na *obr. 2* je pro příklad zobrazen tvar transformátorových plechů *El*:

a-šířka plechů (největší rozměr) a trojnásobek šířky středního sloupku **d**

d-šířka středního sloupku

Podle šířky středního sloupku můžeme odvodit další geometrické rozměry. [7]



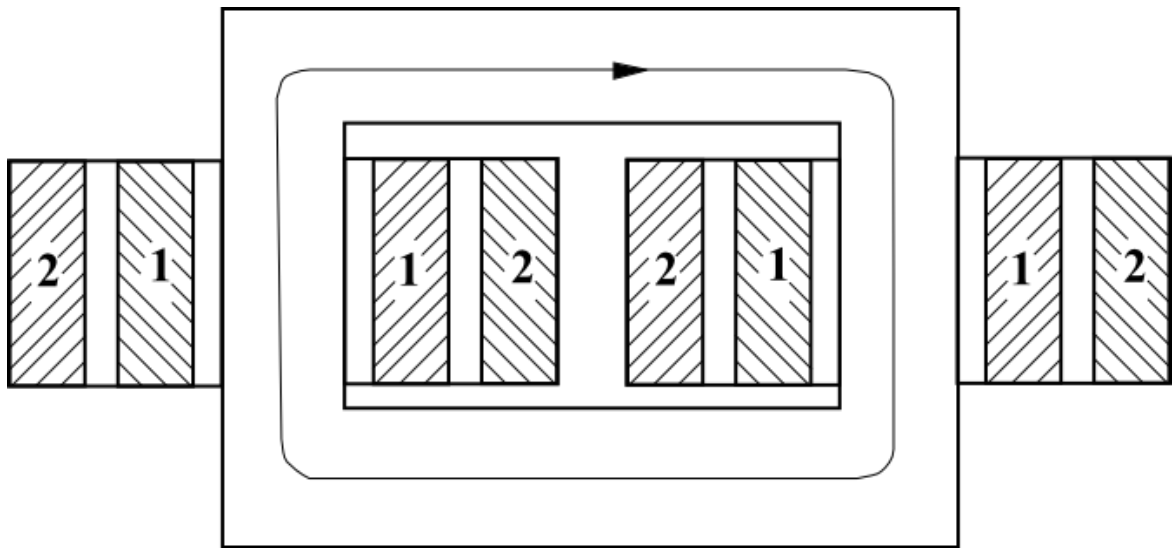
Obr. 2: Rozměry transformátorových plechů [7]

Transformátorové plechy mají většinou tloušťku 0,35 mm. Maximální tloušťka bývá 0,5 mm. Z důvodů snížení ztrát v železe jsou plechy legovány křemíkem. [1]

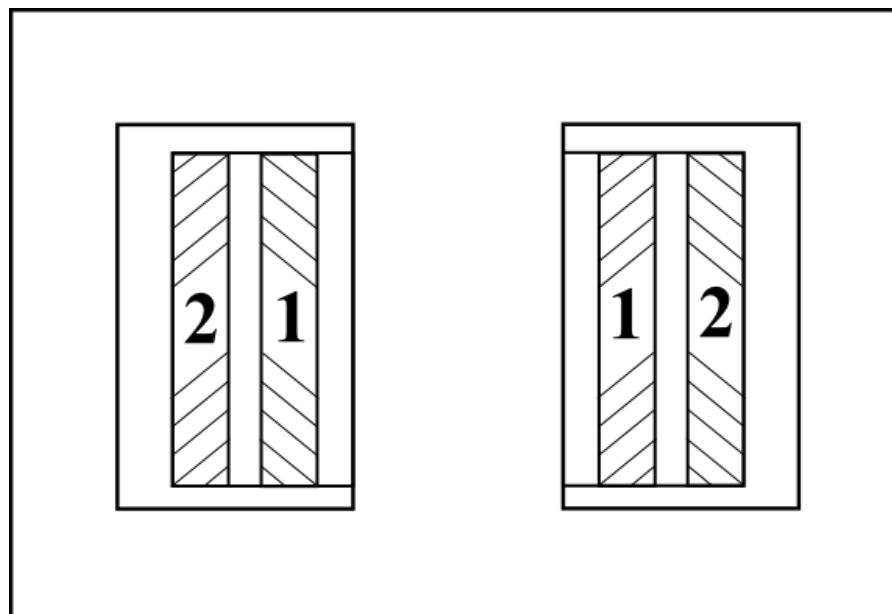
1.5 Provedení magnetického obvodu

Provedení magnetického obvodu u jednofázových transformátorů dělíme na jádrové a plášťové.

U jednofázového transformátoru jádrového typu jsou vinutí umístěna na dvou jádrech a lze je zapojit paralelně nebo sériově. Což je naznačeno na *obr. 3*. Výhodou jádrového provedení jsou lepší chladicí poměry, lehčí hmotnost. Používají se u transformátorů větších výkonů. Avšak nevýhodou jsou vyšší rozptylové toky oproti plášťovým. Plášťová provedení mají rozvětvený magnetický obvod, který částečně zakrývá vinutí. Toto provedení může mít až dvakrát větší průřez, jelikož magnetický tok, který protéká pracovní jádrem, je dvakrát větší než ve vedlejších jádrech. Plášťové provedení je zobrazeno na *obr. 4*. Výhodou je zejména souměrné rozložení magnetického toku a omezení rozptylových toků. Nevýhodou je vyšší hmotnost oproti jádrovým. S plášťovým provedením se u jednofázových transformátorů setkáváme nejčastěji. [2][3][4][5]



Obr. 3: Konstrukční schéma jednofázového jádrového transformátoru [3]



Obr. 4: Jednofázový transformátor plášťového typu [3]

1.6 Praktické využití jednofázových transformátorů

Praktické využití jednofázových transformátorů je v dnešní době rozšířené do mnoha oblastí. Používá se převážně tam, kde se potřebuje měnit hodnota proudu nebo napětí. Ve zdravotnictví se dá využít pro galvanické oddělení napájecí sítě zdravotnických přístrojů od rozvodné sítě. Dále se může použít v domácích spotřebičích a hračkách pro napájení základních obvodů.

Transformátory se dají využít pro rozvaděče, jako napájení dalších zařízení či přístrojů a oddělují části obvodu, aby se nespojily s vodiči. Pro napájení zařízení ve stíněných prostorech a pro audiotechniku se dají použít transformátory s toroidním jádrem. Dají se také použít pro napájení polovodičových měničů, které převádějí stejnosměrný proud na střídavý.

Transformátory se také používají v energetice pro rozvod a přenos elektrické energie díky jednoduché obsluze, údržbě a spolehlivosti.

Lze je použít také pro napájení osvětlení v bazénech, a také pro napájení v rozhlasových přijímačích a televizorech. Transformátory také jde použít jako příslušenství v měřicích přístrojích. Oddělovací jednofázový transformátor se dá například využít v některých zesilovačích zvuku. V neposlední řadě může být transformátor využit jako měnič napětí a proudu u nabíječek mobilních telefonů, notebooků, fotoaparátů a dalších spotřebičů.
[2][17][18][19]

1.7 Odvození indukovaného napětí

Odvození je převzato z publikace [3].

Zavedeme magnetický spřažený tok Φ_S , pro který platí:

$$\Phi_S = N \cdot \Phi \quad (4)$$

Okamžitou hodnotu napětí dané cívky můžeme napsat ve tvaru:

$$u_i(t) = \frac{d\Phi_S}{dt} = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (5)$$

Dále budu předpokládat, že se tok Φ mění s časem harmonicky, dostaneme tedy:

$$\Phi(t) = \Phi_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha) \quad (6)$$

Z tohoto vzorce dostaneme:

$$u_i(t) = \omega \cdot N \cdot \Phi_m \cdot \cos(\omega t + \alpha) = \omega \cdot N \cdot \Phi_m \cdot \sin\left(\omega t + \alpha - \frac{\pi}{2}\right) \quad (7)$$

Ze vztahu (7) platí pro efektivní hodnotu napětí U_i :

$$U_{im} = \omega \cdot N \cdot \Phi_m \quad (8)$$

Po úpravě:

$$U_i = \frac{U_{im}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \cdot N \cdot \Phi_m = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot N \cdot \Phi_m \cdot f \quad (9)$$

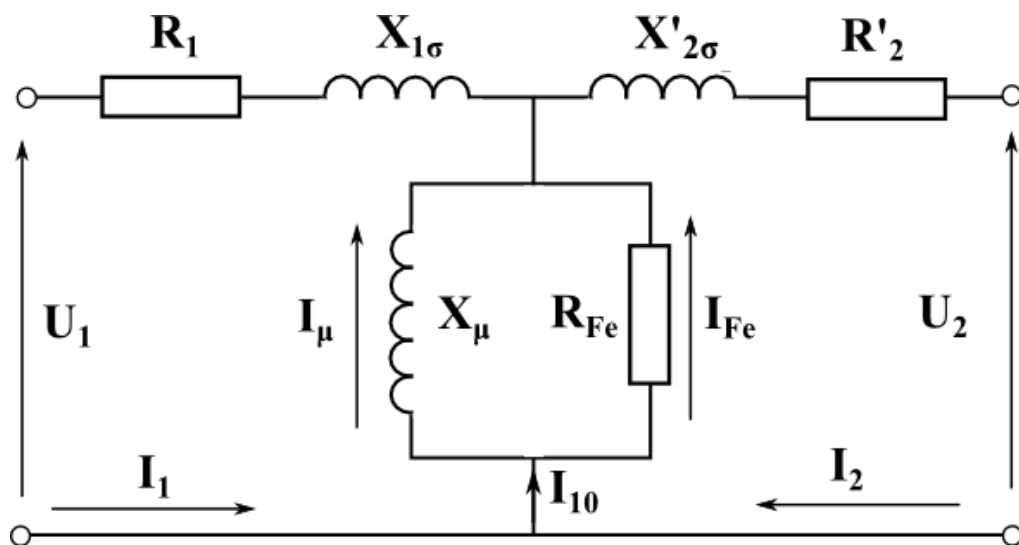
Dostáváme:

$$U_i = 4,44 \cdot N \cdot \Phi_m \cdot f \quad (10)$$

1.8 Náhradní schéma transformátoru

Na obr. 5 je zobrazeno náhradní schéma jednofázového transformátoru, které je doplněno o vedlejší obvodové prvky a vychází z ideálního transformátoru.

Paralelní obvod ve schématu představuje magnetický obvod, který na vytvoření magnetického pole a na krytí ztrát v železe spotřebuje část proudu. [3] [5]



Obr. 5: Náhradní schéma transformátoru [3]

R_1, R'_2 ... odpory primárního a sekundárního vinutí

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

X_μ ... magnetizační reaktance

R_{Fe} ... odpor ztrát v železe

I_{10} ... proud naprázdno

I_μ ... magnetizační proud

I_{Fe} ... proud pro krytí ztrát v železe

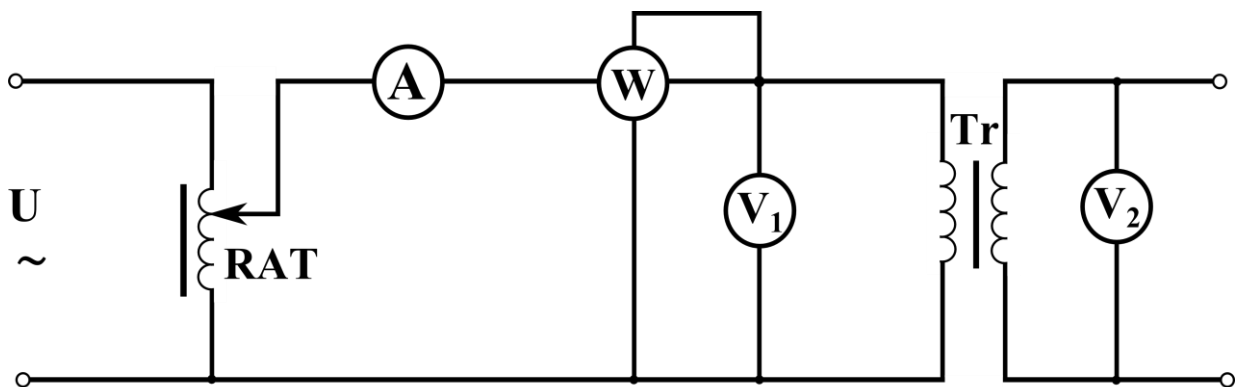
I_1, I_2 ... proudy primárního a sekundárního vinutí

U_1, U_2 ... napětí primárního a sekundárního vinutí

2 Měření na transformátorech

2.1 Měření na transformátoru naprázdno

Stav naprázdno je takový stav, kde je primární strana vinutí připojena na jmenovité napětí U_{1N} a sekundární strana je rozpojena. Výstupní proud je tedy nulový a transformátor nedodává do obvodu žádný výkon za podmínky $P_2 = 0$. Platí tedy $Z_2 = \infty \rightarrow I_2 = 0$. Dále platí rovnost vstupního proudu s proudem naprázdno $I_1 = I_{10}$. Při tomto měření transformátor odebírá ze sítě příkon, který pokryje ztráty naprázdno. Měření, by mělo být provedeno při sinusové křivce vstupního napětí transformátoru a jmenovitém kmitočtu. K vinutí na výstupu je připojen pouze jeden voltmetr V_2 , který měří výstupní napětí na transformátoru označené jako U_2 . Toto je vidět na obr. 6, kde je zobrazeno schéma, podle kterého měření provádím. Při tomto měření budu tedy zjišťovat proud naprázdno I_{10} , napětí naprázdno U_{10} a příkon P_{10} naprázdno. [2][3][4][10]



Obr. 6: Schéma měření jednofázové transformátoru naprázdno [8][14]

Příkon transformátoru, který se rovná Joulovým ztrátám ΔP_{0j} a je způsoben proudem naprázdno I_{10} a ztrátami v železe ΔP_{Fe} .

Pro ztráty naprázdno tedy platí: [4]

$$\Delta P_{10} = \Delta P_{0j} + \Delta P_{Fe} \quad (11)$$

Joulový ztráty tedy spočtu ze vztahu:

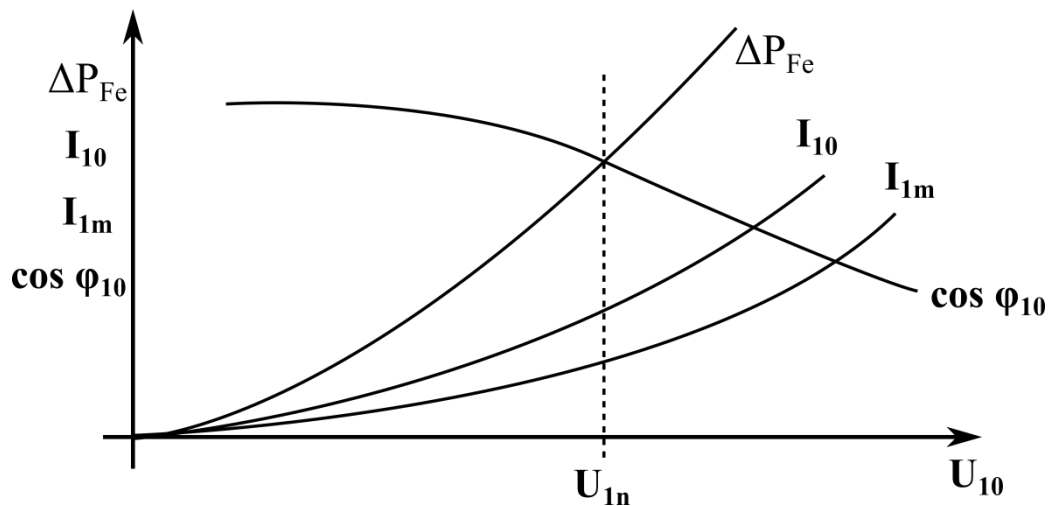
$$\Delta P_{0j} = R_1 \cdot I_{10}^2 \quad (12)$$

Ztráty v železe ΔP_{Fe} ze vztahu:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{10} - R_1 \cdot I_{10}^2. \quad (13)$$

S_{10} je zdánlivý příkon naprázdno, udává se VA a spočítá ze vztahu: [10]

$$S_{10} = U_{10} \cdot I_{10} \quad (14)$$



Obr. 7: Charakteristiky pro měření naprázdno [11]

2.1.1 Postup měření:

Při postupu měření při zatížení jsem čerpal z těchto zdrojů. [8][10]

- 1) Obvod zapojím dle schématu, které je na obr. 6.
- 2) Plynule budu nastavovat hodnoty napětí U_{10} až do hodnoty U_{1N} .
- 3) V primárním obvodu, kde je zapojený wattmetr, měřím příkon naprázdno P_{10} , ampérmetrem A_1 měřím proud naprázdno I_{10} a voltmetrem V_1 napětí naprázdno U_{10} .
- 4) Spočtu zdánlivý příkon naprázdno S_{10} ze vztahu (14) a účinník naprázdno $\cos \varphi_{10}$ ze vztahu:

$$\cos \varphi_{10} = \frac{P_{10}}{U_{10} \cdot I_{10}} = \frac{P_{10}}{S_{10}} \quad (15)$$

- 5) Z voltmetru V_2 zapíši do tabulky hodnoty U_{20} v sekundárním obvodu a ze vztahu pro převod (viz 2.5) zjistím hodnotu převodu transformátoru p .
- 6) Magnetizační proud spočítám ze vztahu:

$$I_{1m} = I_{10} \cdot \sin \varphi_{10} \quad (16)$$

- 7) Grafy budou sestrojeny dle obr. 7.
- 8) Vyhodnocení výsledků viz Závěr.

2.1.2 Výstupní napětí naprázdno

Následující text o výstupním napětí naprázdno jednofázového transformátoru je převzat z české technické normy ČSN EN 61558-1. [6]

U transformátorů s vestavěným usměrňovačem se výstupní napětí měří na obou stranách usměrňovače, jestliže jsou připojeny ke svorkám nebo k ukončením. Měření se provádí na vstupních svorkách usměrňovače, pokud jsou přístupné uživateli. Výstupní napětí se měří na svorkách obvodu pomocí voltmetru udávajícího střední hodnotu, pokud efektivní hodnota není zvlášť udána. [6]

2.2 Měření transformátoru nakrátko

Při měření jednofázového transformátoru nakrátko je sekundární vinutí spojeno bezimpedanční spojkou, díky které je výstupní napětí nulové a platí $Z_2 = 0 \rightarrow U_2 = 0$. Vstupní napětí U_1 na primárním vinutí při jmenovitém kmitočtu se postupně zvyšuje, až do hodnoty, kdy se bude proud ve vinutí rovnat proudu jmenovitému $I_1 = I_{1N}$. [10]

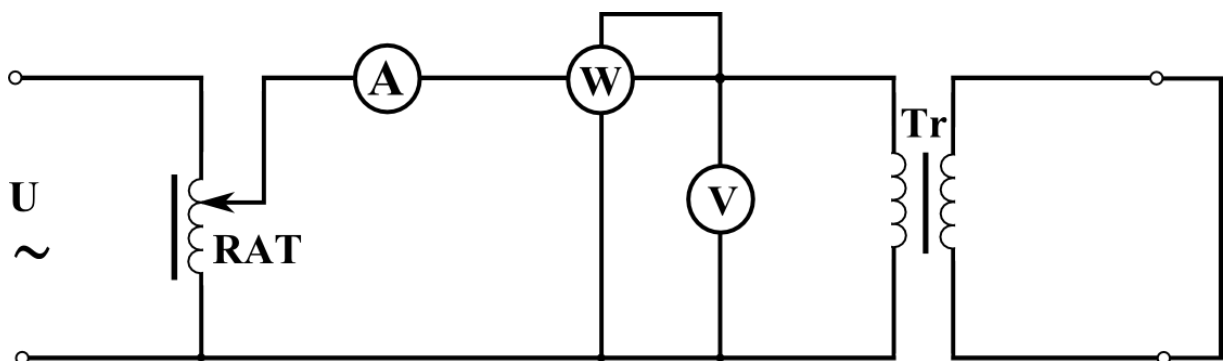
Jmenovitý proud spočítám jako poměr zdánlivého výkonu a jmenovitého napětí ze vztahu (17). Hodnotu zdánlivého výkonu a jmenovitého napětí zjistím ze štítku transformátoru. (viz obr. 26) [22]

Dostanu tedy:

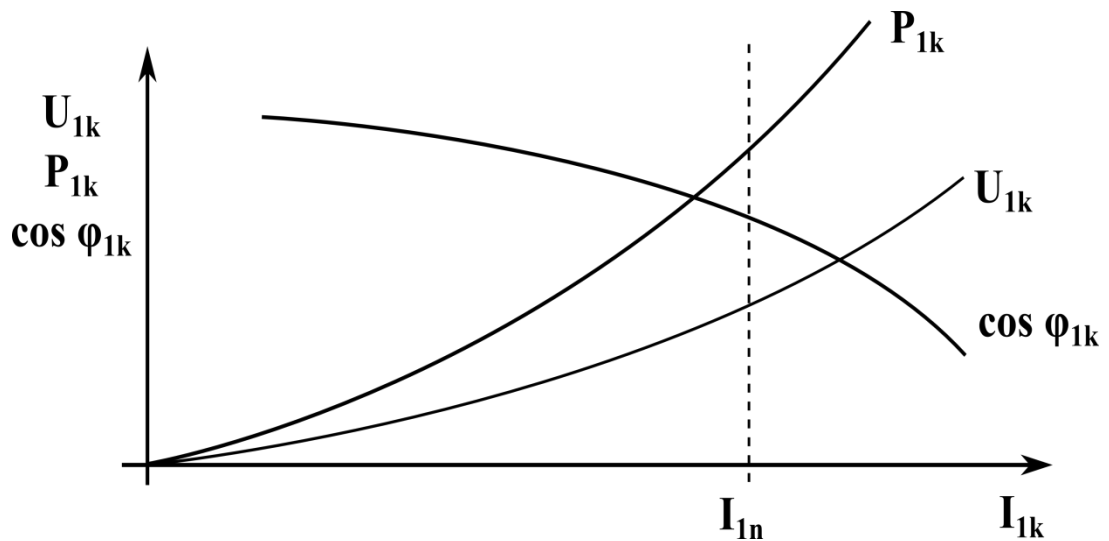
$$I_{jm} = \frac{S}{U} = \frac{1000}{220} = 4,545 \text{ A} \quad [22] \quad (17)$$

Z měření transformátoru nakrátko určím charakteristiku nakrátko $I_{1k} = f(U_{1k})$, průběh účinníku $\cos \varphi_{1k}$, průběh ztrát nakrátko ΔP_{1k} a napětí nakrátko U_{1k} . [4][8][10]

Měření provádíme dle schématu na obr. 8.



Obr. 8: Schéma pro měření jednofázového transformátoru nakrátko [8][14]



Obr. 9: Průběh charakteristik při měření nakrátko [12]

Měření musíme provádět co nejrychleji, jelikož oběma vinutími protékají až jmenovité proudy a zvyšováním teploty se mění odpor. Transformátor se tím pádem zahřívá. [4]

2.2.1 Postup měření

Při postupu měření při zatížení jsem čerpal z těchto zdrojů. [8][10]

- 1) Měřicí přístroje A_1 , V_1 , W_1 zapojím dle schématu, které je zobrazeno na obr. 8.
- 2) Transformátor připojuji jen při malém napětí, jinak by došlo vlivem nárůstu ztrát k zahřívání a zničení transformátoru.
- 3) Velmi opatrně zvyšuji napájecí napětí U_1 z hodnoty na voltmetru V_1 až na hodnotu kdy $I_1 = I_{1N}$.
- 4) Proud I_1 nastavuji až do hodnoty jmenovitého proudu I_{1N} .
- 5) Souběžně měřím napětí na primární straně vinutí U_{1K} a ztráty P_{1K} .
- 6) Z naměřených hodnot dopočítám účinník nakrátko:

$$\cos \varphi_{1k} = \frac{P_{1k}}{U_{1k} \cdot I_{1k}} \quad (18)$$

- 7) Naměřené hodnoty se vynesou do grafu podle obr. 9.
- 8) Vyhodnocení výsledků viz Závěr.

2.2.2 Napětí nakrátko

Napětí nakrátko je hodnota při chodu nakrátko, kdy oběma vinutími protékají jmenovité proudy.

Platí:

$$U_k = \frac{I_n}{I'_k} \cdot U'_k \quad (19)$$

Poměrná hodnota napětí nakrátko je:

$$u_k = \frac{U_k}{U_n} = \frac{I_n}{U'_k} \cdot \frac{U'_k}{U_n} = \frac{Z_k}{Z_n} = z_k \quad (20)$$

Anebo můžeme napětí nakrátko vyjádřit také v procentech:

$$u_{k\%} = \frac{U_k}{U_n} \cdot 100 = \frac{Z_k}{Z_n} \cdot 100 = z_k \quad (21)$$

Hodnota napětí nakrátko vyjádřená v procentech, je rovna poměrné hodnotě impedance nakrátko.[4][10]

Následující text o výstupním napětí nakrátko jednofázového transformátoru je převzat z české technické normy ČSN EN 61558-1. [6]

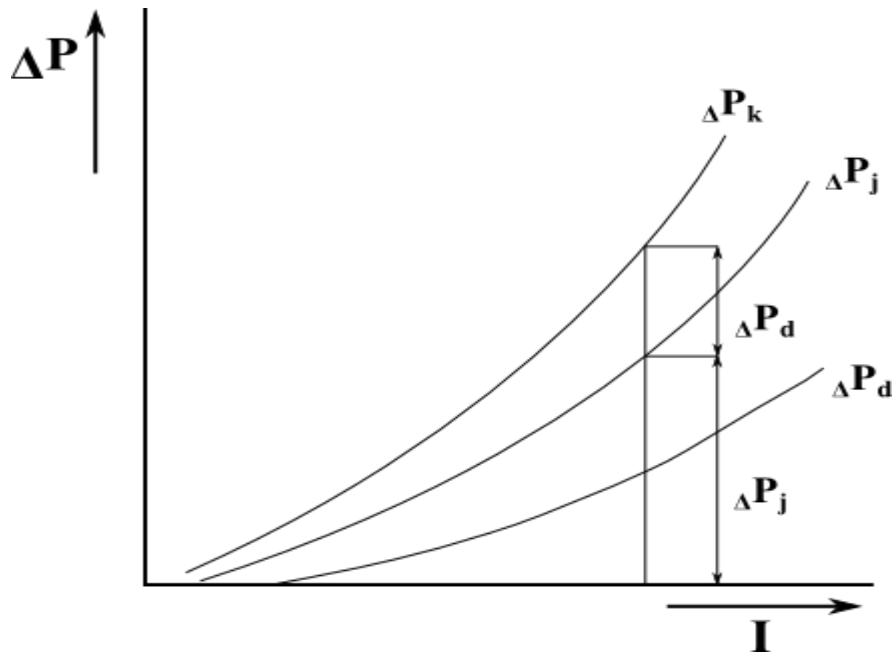
Pokud je vyznačeno napětí nakrátko, změřené napětí nakrátko se nesmí lišit o více než 20 % hodnoty vypočítané z tohoto značení.

Kontroluje se měřením napětí nakrátko, přičemž teplota transformátoru před zkouškou se rovná teplotě okolí. [6]

2.2.3 Ztráty nakrátko

Tyto ztráty tvoří dvě složky ztrát. Jsou to ztráty Joulovy ΔP_j a přídavné ztráty ΔP_d . Průběh ztrát nakrátko je přibližně úměrný čtverci proudu a je zobrazen na obr. 10. Při jmenovitém napětí budou ztráty: [4]

$$\Delta P_{kn} = \Delta P'_k \cdot \left(\frac{I_n}{I'_k}\right)^2 \quad (22)$$



Obr. 10: Průběh ztrát nakrátko [4]

Ztráty nakrátko budou tedy:

$$\Delta P_k = \Delta P_j + \Delta P_d \quad (23)$$

Joulové ztráty můžeme určit ze vztahu:

$$\Delta P_j = (R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2) \quad (24)$$

R_1 a R_2 jsou odpory, které měříme mezi svorkami transformátoru, při teplotě, která je potřebná pro měření nakrátko. Pomocí převodu ze vztahu (36) můžeme poté určit proud v zkratovaném vinutí:

$$I_2 = p \cdot I_1 \quad (25)$$

Po přepočtu sekundární hodnoty na primární hodnoty, můžeme Joulové ztráty určit pomocí proudu na primární straně vinutí. Dostaneme hodnotu odporu, proudu a Joulových ztrát: [4]

$$R'_2 = R_2 \cdot p^2 \quad (26)$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{p} = I_1 \quad (27)$$

$$\Delta P_j = (R_1 + R'_2) \cdot I_1^2 \quad (28)$$

Na *obrázku 10* je vidět, že pokud vyneseme ztráty nakrátko ΔP_k a ztráty Joulovy ΔP_j v závislosti na proudu, budou jejich rozdílem ztráty přídavné ΔP_d .

Graf bude platit pro teplotu vinutí ϑ' , pro kterou bylo měření prováděno. Na *obr. 11* je vidět průběh ztrát nakrátko pro provozní teplotu při zatížení. S vyšší teplotou poroste odpor a díky zvýšení odporu se zvýší i Joulovy ztráty ze vztahu: [4]

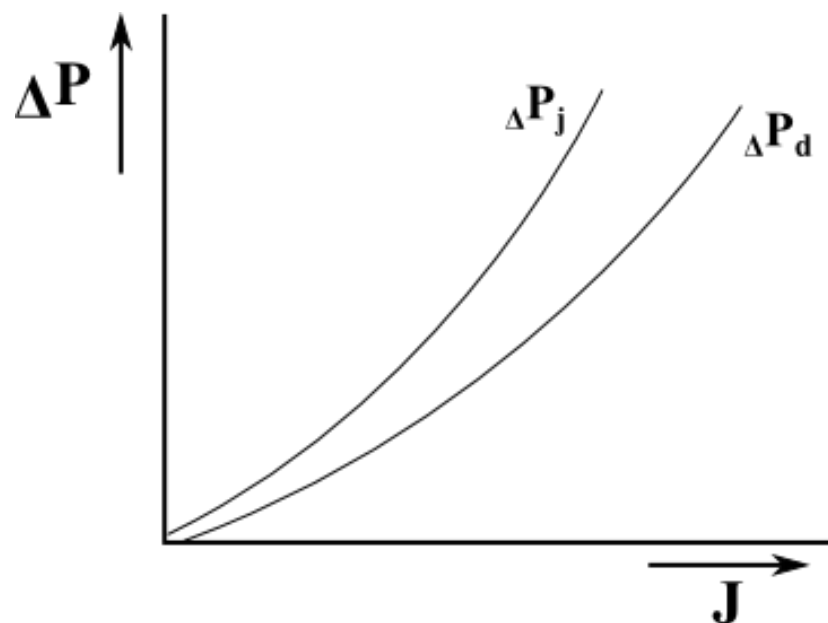
$$\Delta P_j^{\vartheta} = \Delta P_j^{\vartheta'} \cdot \frac{\vartheta + 235}{\vartheta' + 235} \quad (29)$$

Přídavné ztráty jsou dány ze vztahu:

$$\Delta P_d = \frac{U^2}{R} \quad (30)$$

S rostoucí teplotou přídavné ztráty klesají, dostaneme tedy vztah:

$$\Delta P_d^{\vartheta} = \Delta P_d^{\vartheta'} \cdot \frac{\vartheta' + 235}{\vartheta + 235} \quad (31)$$



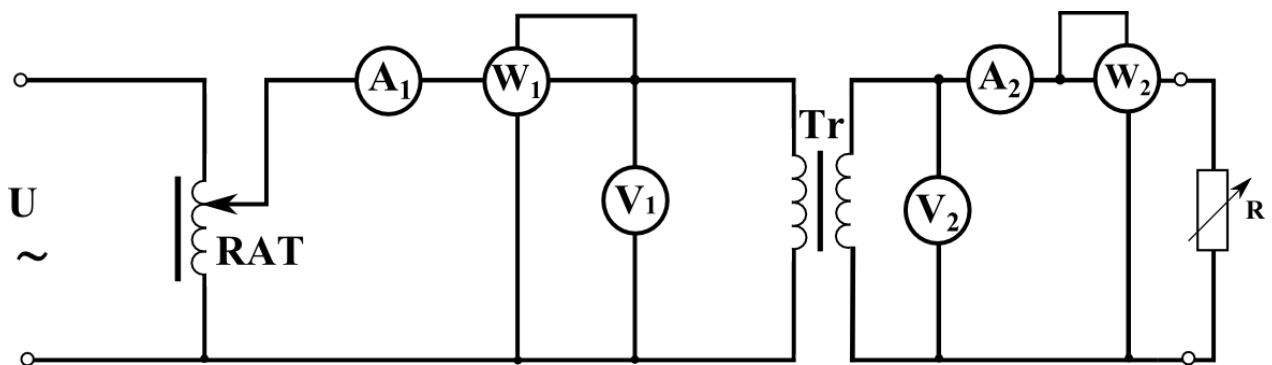
Obr. 11: Průběh ztrát pro provozní teplotu [4]

2.3 Měření při zatížení

Dá se říci, že jsou to všechny ostatní stavy kromě měření transformátoru naprázdno a nakrátko, které jsou výše zmíněné. Měříme závislosti $U_2 = f(I_2)$, $P_2 = f(I_2)$, $\eta = f(I_2)$, $\cos \varphi_1 = f(I_2)$.

Měření při zatížení je specifické tím, že se mění vstupní proud a výstupní napětí se změnou zatížení tzn. se změnou výstupního proudu a impedance. Většinou však předpokládáme, že máme vstupní napětí zadané a nemění se. [2][8][9][10]

Ve schématu měření na *obr. 12* je použit jako zátěž proměnný rezistor neboli reostat.



Obr. 12: Schéma pro měření jednofázového transformátoru při zatížení [8][14]

2.3.1 Postup měření (zátěž reostat)

Při postupu měření při zatížení jsem čerpal z těchto zdrojů. [8][10]

- 1) Nejdříve zapojím obvod dle schématu na *obr. 12*.
- 2) Na začátku provádím měření na konstantní hodnotě U_{1N} a při odpojené zátěži.
- 3) Postupně měním hodnotu proměnného rezistoru z plného zatížení k nižšímu a tím měním i zatěžovací proud, kde nesmíme překročit 1,2 násobek jmenovitého proudu I_{2N} .
- 4) Údaje naměřené na přístrojích zapisuji do tabulky. (viz *Tab. 3*)
- 5) Účinník dopočítám ze vztahu:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 \cdot I_1} \quad (32)$$

- 6) Grafy sestrojím dle závislostí. Průběh účinnosti by mě odpovídat *obr. č. 13*.
- 7) Vyhodnocení výsledků viz *Závěr*.

2.3.2 Výstupní napětí a výstupní proud při zatížení

Následující text o výstupním proudu a napětí při jednofázového transformátoru je převzat z české technické normy ČSN EN 61558-1. [6]

Za předpokladu, že je transformátor připojen ke jmenovitému vstupnímu napětí transformátoru o jmenovitém kmitočtu transformátoru a je zatížen impedancí, která odpovídá jmenovitému výkonu transformátoru při jmenovitém výstupním napětí transformátoru. U střídavého proudu při jmenovitém účinníku transformátoru se nesmí výstupní napětí od jmenovité hodnoty lišit o více než:

- a) 10 % výstupního napětí u transformátorů bezpodmínečně odolných proti zkratu s jedním jmenovitým výstupním napětím.
- b) 10 % nejvyššího výstupního napětí u transformátorů bezpodmínečně odolných proti zkratu s více než jedním jmenovitým výstupním napětím.
- c) 15 % jiných výstupních napětí u transformátorů bezpodmínečně odolných proti zkratu s více než jedním jmenovitým výstupním napětím.
- d) 5 % výstupních napětí u ostatních transformátorů.

Pokud máme transformátor s usměřňovačem, jsou výše uvedené hodnoty zvýšeny o 5 %.

Kontroluje se měřením výstupního napětí po dosažení ustáleného stavu, přičemž je transformátor připojen na jmenovité vstupní napětí transformátoru, při jmenovitém kmitočtu transformátoru a zatížení impedance odpovídající jmenovitému výkonu transformátoru při jmenovitém výstupním napětí transformátoru a jmenovitém účinníku transformátoru. U transformátorů s vestavěným usměřňovačem se výstupní napětí měří na svorkách stejnosměrného obvodu pomocí voltmetru udávajícího střední hodnotu, pokud efektivní hodnota není zvlášť udána.

U transformátorů s více než jedním jmenovitým vstupním napětím transformátoru platí požadavek pro každé ze jmenovitých vstupních napětí transformátoru.

U transformátoru s vícenásobnými výstupními vinutími se zátěž přikládá k vícenásobným částem současně, pokud není stanoveno jinak.

Pokud je u transformátorů vyznačen jmenovitý výkon transformátoru, jmenovité výstupní napětí transformátoru, jmenovitý proud transformátoru a jmenovitý účinník transformátoru, musí být tyto hodnoty navzájem v souladu.

Jestliže není na transformátoru stanoven jmenovitý výstupní proud transformátoru, může být vypočítán ze jmenovitého výkonu transformátoru a jmenovitého výstupního napětí transformátoru pro účely tohoto určení.

Kontrolu provádíme výpočtem. [6]

2.3.3 Účinnost transformátoru

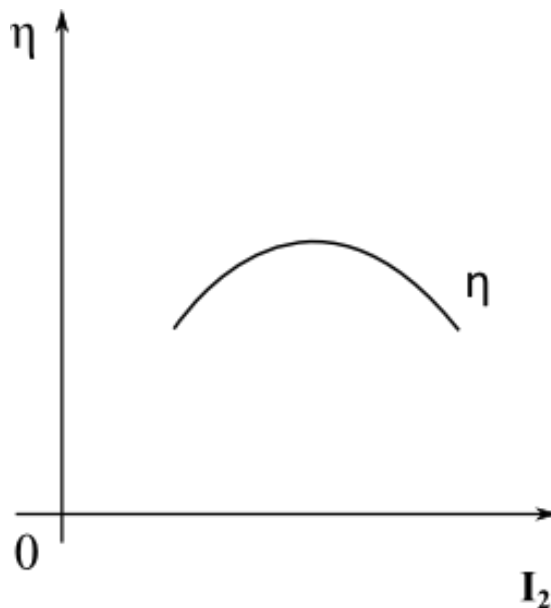
Poměr účinnosti je dán poměrem činného výkonu P_2 a příkonu P_1 . Dostaneme tedy vztah pro účinnost:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (33)$$

Účinnost je bezrozměrná jednotka, ale dá se vyjádřit i v procentech a to ze vztahu:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \quad (34)$$

Výsledkem tedy bude procentuální hodnota účinnosti. Na *obr. 13* je zobrazena závislost účinnosti na sekundárním proudu. [8]



Obr. 13: Závislost účinnosti na sekundárním proudu [13]

2.4 Měření odporu vinutí

Odpory na primární a sekundární straně se měří mezi síťovými svorkami daného jednofázového transformátoru, přičemž měření se provádí za studena. Odpor fází je nutné znát při řešení ztrát ve vinutí. Odpor vinutí budeme měřit digitálním měřicím přístrojem, v našem případě multimetrem. [15][16]

2.5 Měření převodu

Převod je definován jako poměr indukovaných napětí a je roven poměru počtu závitů primárního a sekundárního vinutí:

$$p = \frac{N_1}{N_2} \quad (35)$$

Při chodu naprázdno se svorkové napětí příliš neliší od napětí indukovaného, lze převod určit jako poměr svorkových napětí na primární a sekundární straně při chodu naprázdno.

Měření se provede při napájení se značně sníženým napětím ze strany nižšího napětí. Snížení napětí používáme kvůli bezpečnosti a také z důvodu, že převod bývá definován pro nenasycený stav.

Měření se většinou provádí minimálně pro tři různé hodnoty napájecího napětí. Výsledkem je střední hodnota ze tří sdružených napětí: [4][8]

$$p = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} \quad (36)$$

Pokud je převod p větší než jedna, jedná se o snižovací transformátor. Snižovací transformátor má na sekundární straně nižší napětí než na straně primární.

Pokud je převod p menší než jedna, jedná se o zvyšovací transformátor. Zvyšovací transformátor má na sekundární straně vyšší napětí než na straně primární.[23]

2.6 Použité měřicí přístroje

Parametry klešťových multimetrů a multimetru METEX jsem zjistil z internetových zdrojů. [20][21]

K měření na jednofázovém transformátoru jsem použil tyto měřicí přístroje:

Tab. 1 Použité měřicí přístroje, jejich označení, parametry a výrobce

přístroj	označení ve schématu	parametry	výrobce
Jednofázový transformátor JBD202	TR	$U_1 = 220\text{ V}$ $U_2 = 24\text{ V}$ S=1000 VA	Křižík-Prešov
Regulační autotransformátor 1780	RAT	U=130-250-380/0-380 V I=2,5 A S=950 VA	Křižík Praha-Smíchov
Klešťový multimetr F 09	A_1, V_1, W_1	Kalibrace: ISO/DKD I=0-400 A U=0-600 V f=10 Hz-19,99 kHz přesnost: $\pm 1\%$	Chauvin Arnoux
Klešťový multimetr F205	A_2, V_2, W_2	AC I=0,15-600 A AC U=0,15-1000 V DC I=0,1-900 A DC U=0,1-1000 V f=5 Hz-20 kHz přesnost: $\pm 1\%$	Chauvin Arnoux
Multimetr M 3850		Zdířka 20 A: DC/AC I do 20 A Zdířka mA: DC/AC I do 400 mA U do 500V	Metex
reostat	R	4, 5 A 25 Ω	Metra-Blansko

3 Výsledky měření

3.1 Měření naprázdno

Následující tabulka, příklady výpočtů a výsledné grafy jsou zhotoveny podle postupu měření z kapitoly 2.1.1. Hodnoty jsem začal zaznamenávat až od 30,01 V, protože předtím přístroje žádné hodnoty nezobrazovaly.

Tab. 2 Výsledky naměřené a vypočítané při měření naprázdno

$U_{20}[V]$	$U_{10}[V]$	$I_{10}[A]$	$P_{10}[W]$	$S_{10}[VA]$	$\cos \varphi_{10}$	$\sin \varphi_{10}$	$\Delta P_{Fe}[W]$	$I_{1m}[A]$
1,14	10,13	-	-	-	-	-	-	-
2,27	20,04	-	-	-	-	-	-	-
3,39	30,01	-	-	-	-	-	-	-
4,53	40,1	0,15	1	6,02	0,166	0,986	0,958	0,148
5,66	50,2	0,15	1	7,53	0,133	0,991	0,958	0,149
6,8	60	0,16	2	9,6	0,208	0,978	1,954	0,156
7,94	70	0,17	3	11,9	0,252	0,968	2,948	0,165
9,05	80	0,18	4	14,4	0,278	0,961	3,942	0,173
10,20	90	0,18	5	16,2	0,309	0,951	4,942	0,171
11,30	100	0,18	6	18	0,333	0,942	5,942	0,170
12,45	110	0,19	7	20,9	0,335	0,942	6,935	0,179
13,57	120	0,20	8	24	0,333	0,942	7,928	0,188
14,70	130	0,21	9	27,3	0,330	0,944	8,921	0,198
15,83	140	0,23	10	32,2	0,311	0,950	9,905	0,220
16,98	150,1	0,24	12	36,02	0,333	0,942	11,896	0,226
18,08	160	0,26	15	41,6	0,361	0,932	14,878	0,242
19,25	170,2	0,30	18	51,06	0,353	0,936	17,838	0,281
20,32	180	0,32	20	57,6	0,347	0,938	19,816	0,300
21,47	190	0,37	22	70,3	0,313	0,950	21,754	0,352
22,61	200	0,42	24	84	0,286	0,958	23,682	0,402
23,75	210	0,46	27	96,6	0,280	0,960	26,619	0,442
24,88	220,1	0,53	30	116,65	0,257	0,966	29,494	0,512
25,62	226,4	0,60	32	135,84	0,236	0,972	31,352	0,582

Příklady výpočtu pro měření naprázdno:

Výpočet ztrát v železe ze vztahu (13):

$$\Delta P_{Fe} = P_{10} - R_1 \cdot I_{10}^2 = 1 - 1,8 \cdot 0,15^2 = 0,958 \text{ W}$$

Výpočet příkonu naprázdno ze vztahu (14):

$$S_{10} = U_{10} \cdot I_{10} = 40,1 \cdot 0,15 = 6,02 \text{ VA}$$

Výpočet účinníku naprázdno ze vztahu (15):

$$\cos \varphi_{10} = \frac{P_{10}}{U_{10} \cdot I_{10}} = \frac{1}{40,1 \cdot 0,15} = 0,166$$

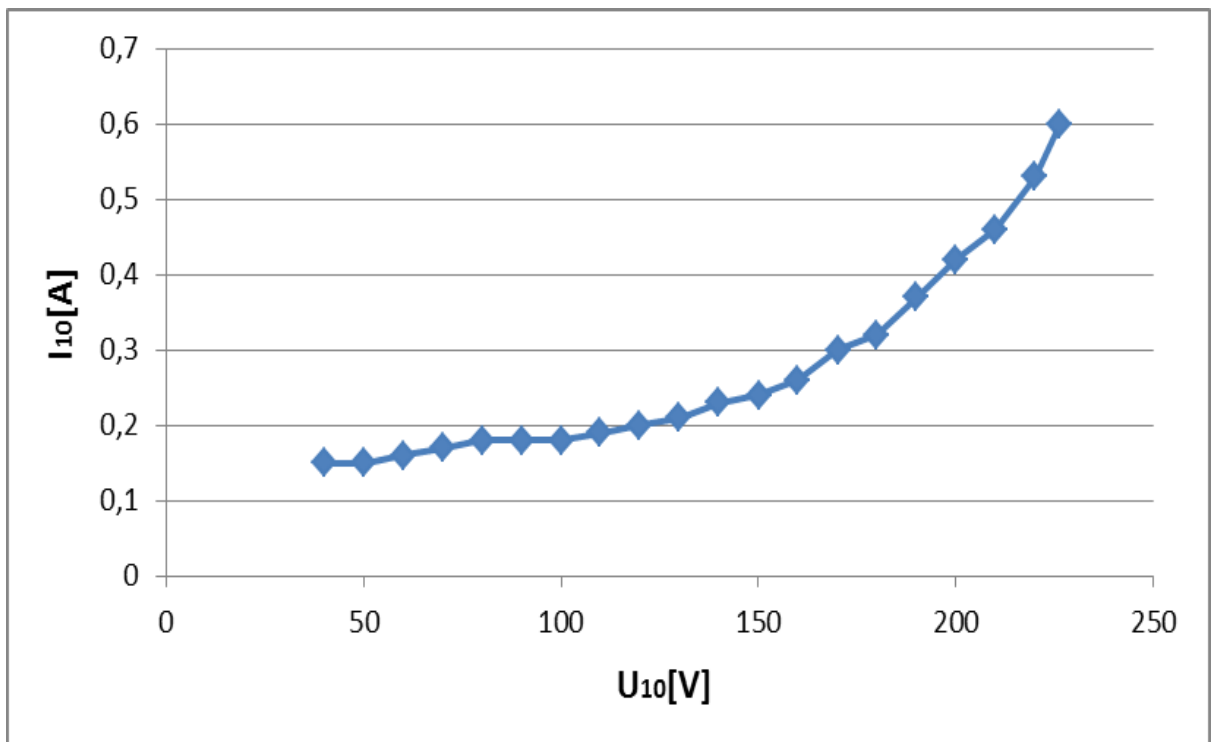
Výpočet přepočtené hodnoty účinníku pro výpočet magnetizačního proudu:

$$\sin \varphi_{10} \rightarrow \cos^{-1} 0,166 = 80,44 \rightarrow \sin 80,44 = 0,986$$

Výpočet magnetizačního proudu ze vztahu (16):

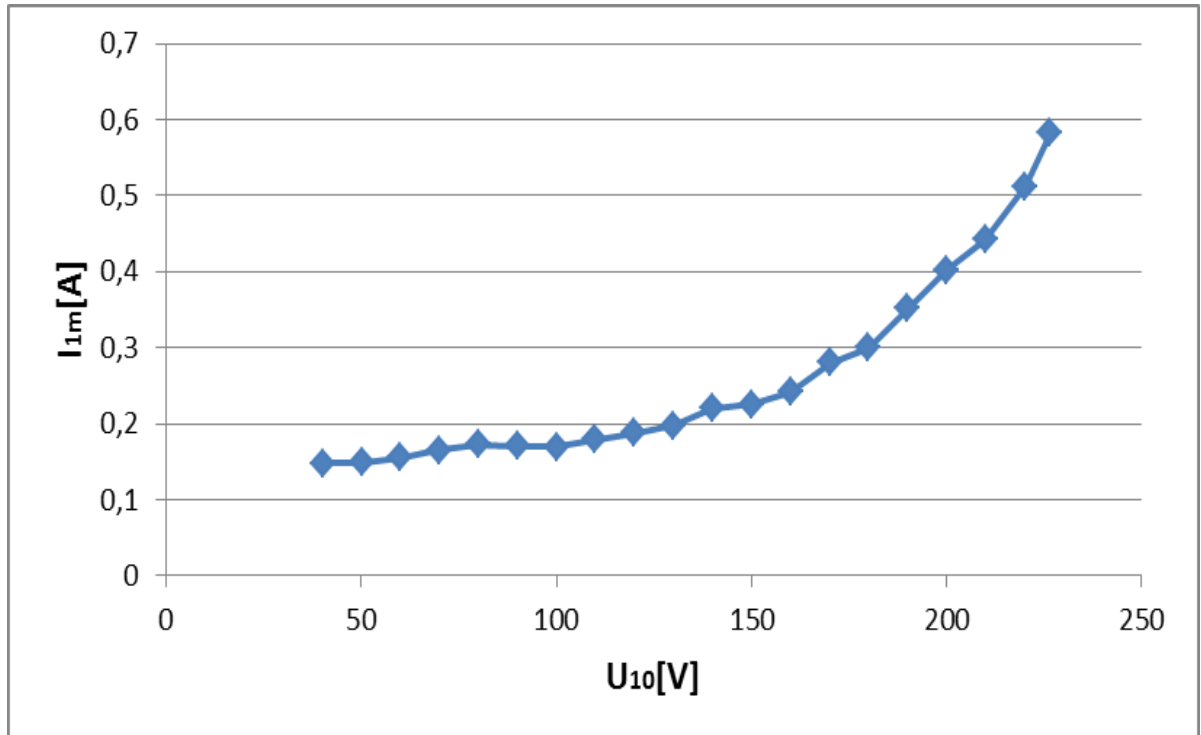
$$I_{1m} = I_{10} \cdot \sin \varphi_{10} = 0,15 \cdot 0,986 = 0,148 \text{ A}$$

Na *obr. 14* je zobrazena závislost proudu naprázdno na napětí naprázdno ($I_{10} = f(U_{10})$). Z obrázku je vidět, že se zvyšujícím se napětím naprázdno pozvolna stoupá proud naprázdno. Proud naprázdno I_{10} jsem dle *tabulky 2* naměřil od 0,15 A až do 0,6 A. Napětí naprázdno U_{10} jsem změřil od 10,13 V až do 226,4 V. V grafu je napětí zobrazeno až od hodnoty 30,01 V, protože předtím nebylo na měřicích přístrojích u ostatních veličin nic zobrazeno.



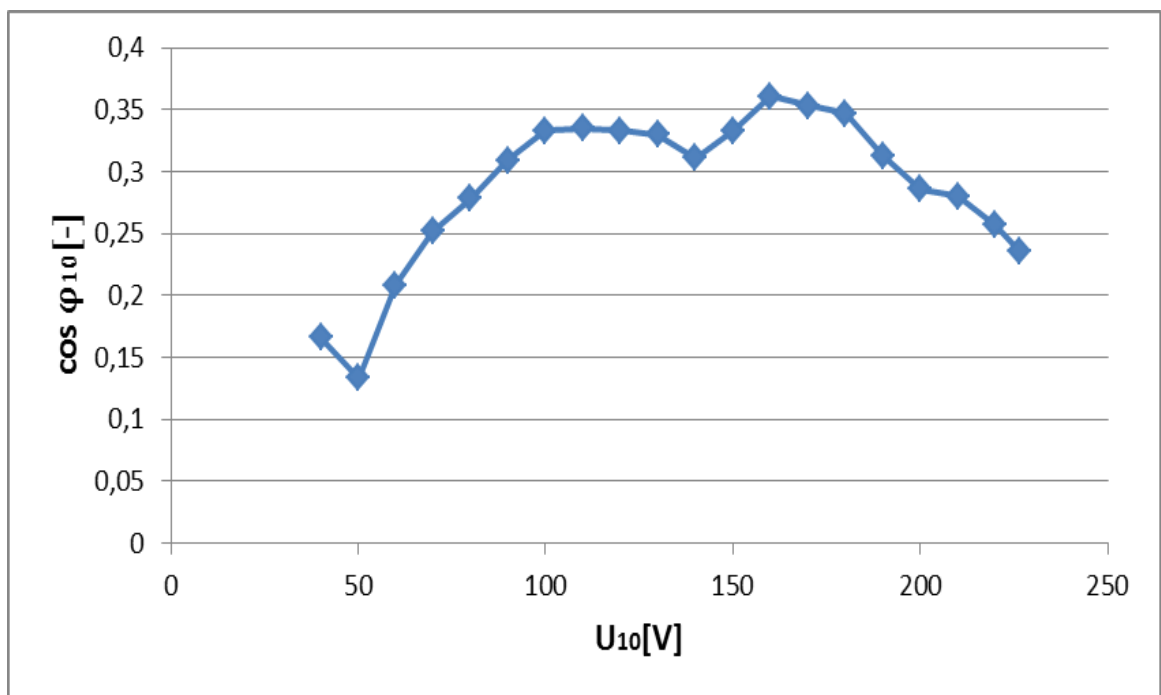
Obr. 14: Závislost proudu naprázdno na napětí naprázdno

Na obr. 15 je zobrazena závislost magnetizačního proudu na napětí naprázdno ($I_{1m} = f(U_{10})$). Z obrázku je vidět, že se zvyšujícím se napětím naprázdno pozvolna stoupá magnetizační proud. Magnetizační proud I_{1m} jsem dle tabulky 2 vypočítal ze vztahu (16) v rozmezí od 0,148 A až do 0,582 A. Napětí naprázdno U_{10} jsem změřil od 10,13 V až do 226,4 V. V grafu je napětí zobrazeno až od hodnoty 30,01 V, protože předtím nebylo na měřicích přístrojích u ostatních veličin nic zobrazeno.



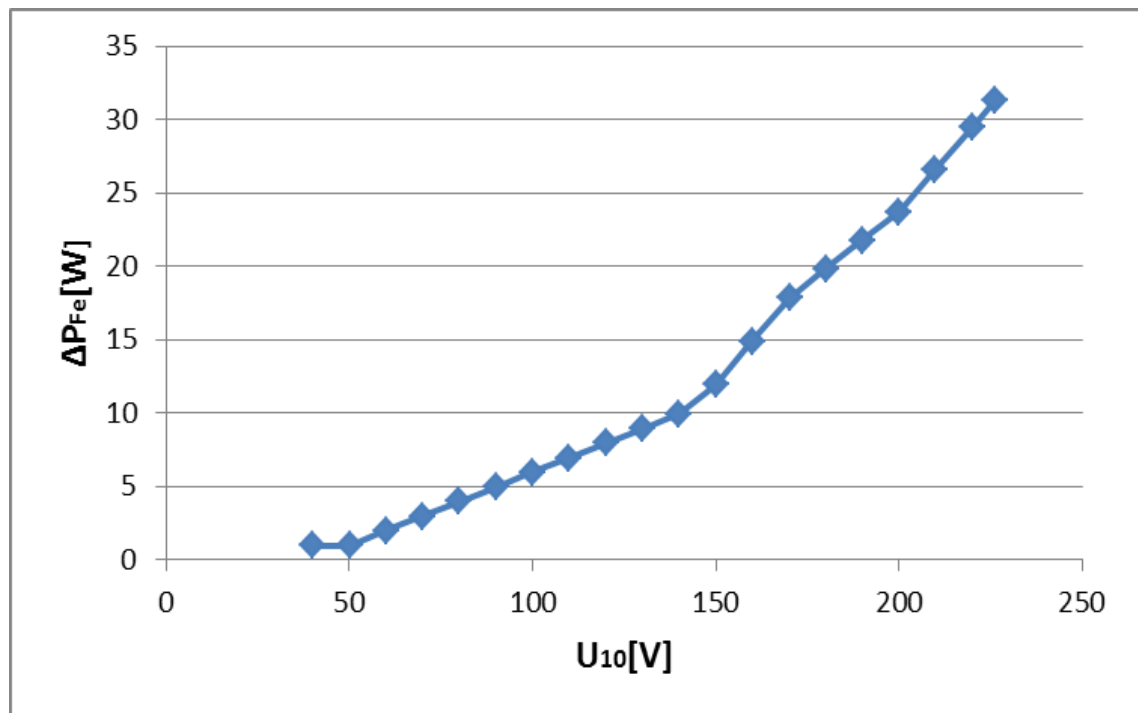
Obr. 15: Závislost magnetizačního proudu na napětí naprázdno

Na *obr. 16* je zobrazena závislost účinníku naprázdno na napětí naprázdno ($\cos \varphi_{10} = f(U_{10})$). Z obrázku je vidět, že se zvyšujícím se napětím naprázdno účinník naprázdno v první polovině měření stoupá a v druhé části klesá. Toto připisuji obtížnému odečítání hodnot z měřicího přístroje, na kterém hodnoty přeskakovaly, a nezůstala jedna stálá. Účinník naprázdno $\cos \varphi_{10}$ jsem dle *tabulky 2* vypočítal ze vztahu (15) od 0,166 až do 0,361. Napětí naprázdno U_{10} jsem změřil od 10,13 V až do 226,4 V. V grafu je napětí zobrazeno až od hodnoty 30,01 V, protože předtím nebylo na měřicích přístrojích u ostatních veličin nic zobrazeno.



Obr. 16: Závislost účinníku naprázdno na napětí naprázdno

Na *obr. 17* je zobrazena závislost ztrát v železe na napětí naprázdno ($\Delta P_{Fe} = f(U_{10})$). Z obrázku je vidět, že když se zvyšuje napětí naprázdno, tak ztráty v železe stoupají. Ztráty v železe ΔP_{Fe} jsem dle *tabulky 2* vypočítal ze vztahu (13) v rozmezí od 0,958 W až do 31,352 W. Napětí naprázdno U_{10} jsem změřil od 10,13 V až do 226,4 V. V grafu je napětí zobrazeno až od hodnoty 30,01 V, protože předtím nebylo na měřicích přístrojích u ostatních veličin nic zobrazeno.



Obr. 17: Závislost ztrát v železe na napětí naprázdno

3.2 Měření při zatížení

Následující tabulka, příklady výpočtů a výsledné grafy jsou zhotoveny podle postupu měření z kapitoly 2.3.1.

Tab. 3 Výsledky naměřené a vypočítané pro měření při zatížení

$I_2 [A]$	$I_1 [A]$	$U_1 [V]$	$U_2 [V]$	$P_1 [W]$	$P_2 [W]$	$\cos \varphi_1$	$\eta [\%]$
0,83	0,6	220	24,8	55	20	0,417	36,36
1	0,6	220	24,8	58	24	0,439	41,38
1,2	0,61	220	24,8	63	29	0,469	46,03
1,4	0,62	220	24,8	72	34	0,528	47,22
1,6	0,63	220	24,8	75	39	0,514	52
1,8	0,64	220	24,8	79	44	0,561	55,70
2	0,65	220	24,8	85	49	0,594	57,65
2,2	0,66	220	24,8	90	54	0,620	60
2,4	0,68	220	24,8	95	59	0,635	62,11
2,6	0,70	220	24,8	99	63	0,643	63,64
2,8	0,72	220	24,8	105	69	0,663	65,71
3,04	0,73	220	24,73	107	74	0,666	66,36
3,21	0,76	220	24,73	115	80	0,688	67,83
3,41	0,78	220	24,73	121	84	0,705	69,42
3,61	0,80	220	24,71	125	89	0,710	71,2
3,82	0,81	220	24,69	131	94	0,735	71,76
4,01	0,83	220	24,69	135	98	0,739	72,59

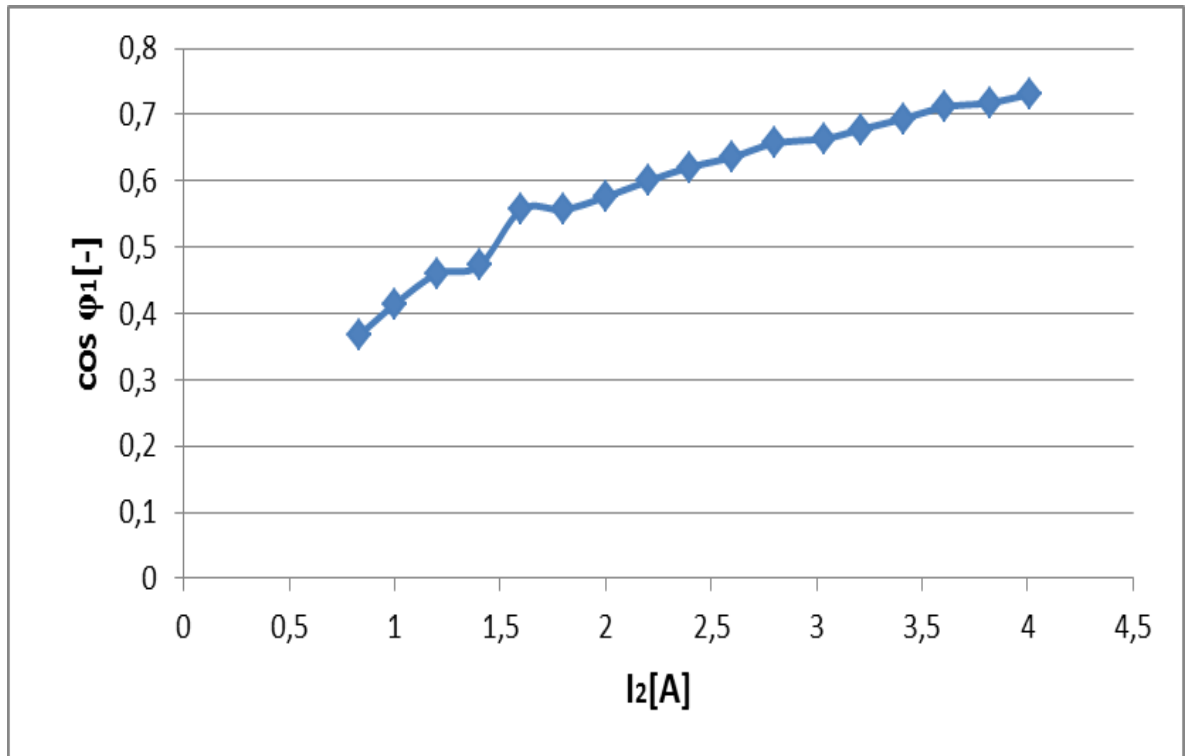
Výpočet účinnosti ze vztahu (34):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{55}{20} \cdot 100 = 36,36 \%$$

Výpočet účinníku ze vztahu (32):

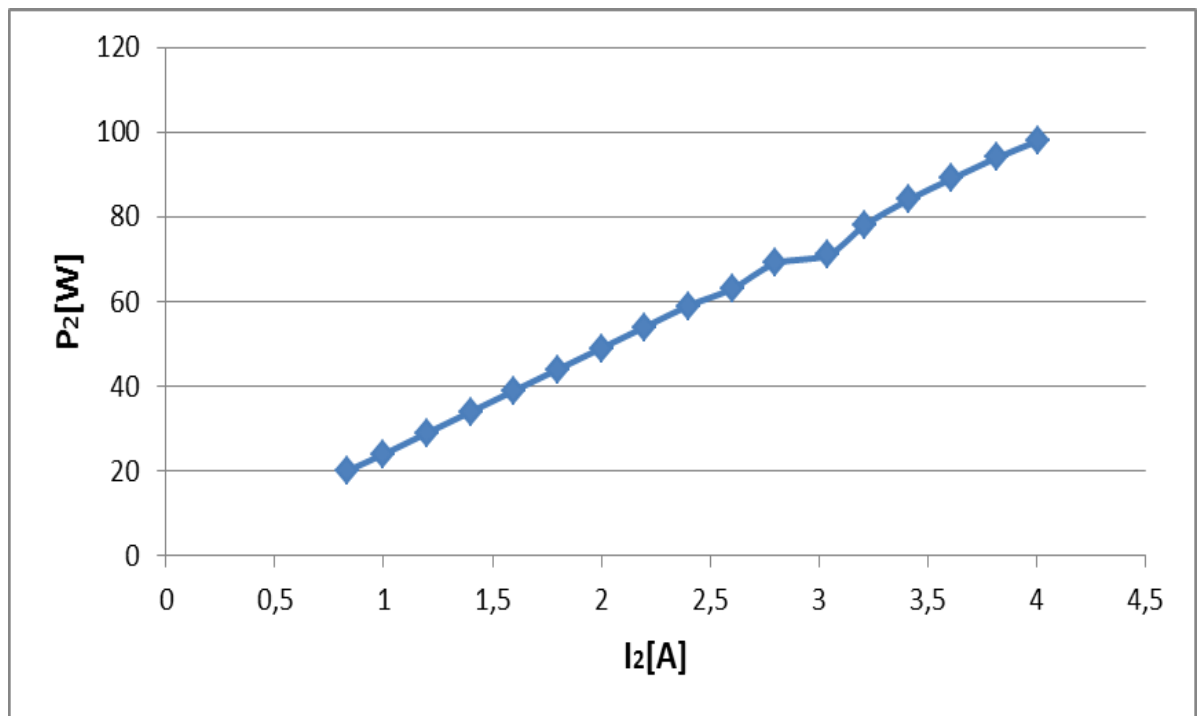
$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 \cdot I_1} = \frac{55}{0,6 \cdot 220} = 0,417$$

Na obr. 18 je zobrazena závislost účinníku při zatížení na sekundárním proudu ($\cos \varphi_1 = f(I_2)$). Z obrázku je vidět, že pokud se zvyšuje sekundární proud, tak účinník při zatížení stoupá. Účinník při zatížení $\cos \varphi_1$ jsem dle tabulky 3 vypočítal ze vztahu (32) v rozmezí od 0,417 až do 0,739. Sekundární proud I_2 jsem nastavoval v rozmezí od 0,83 A až do 4,01 A.



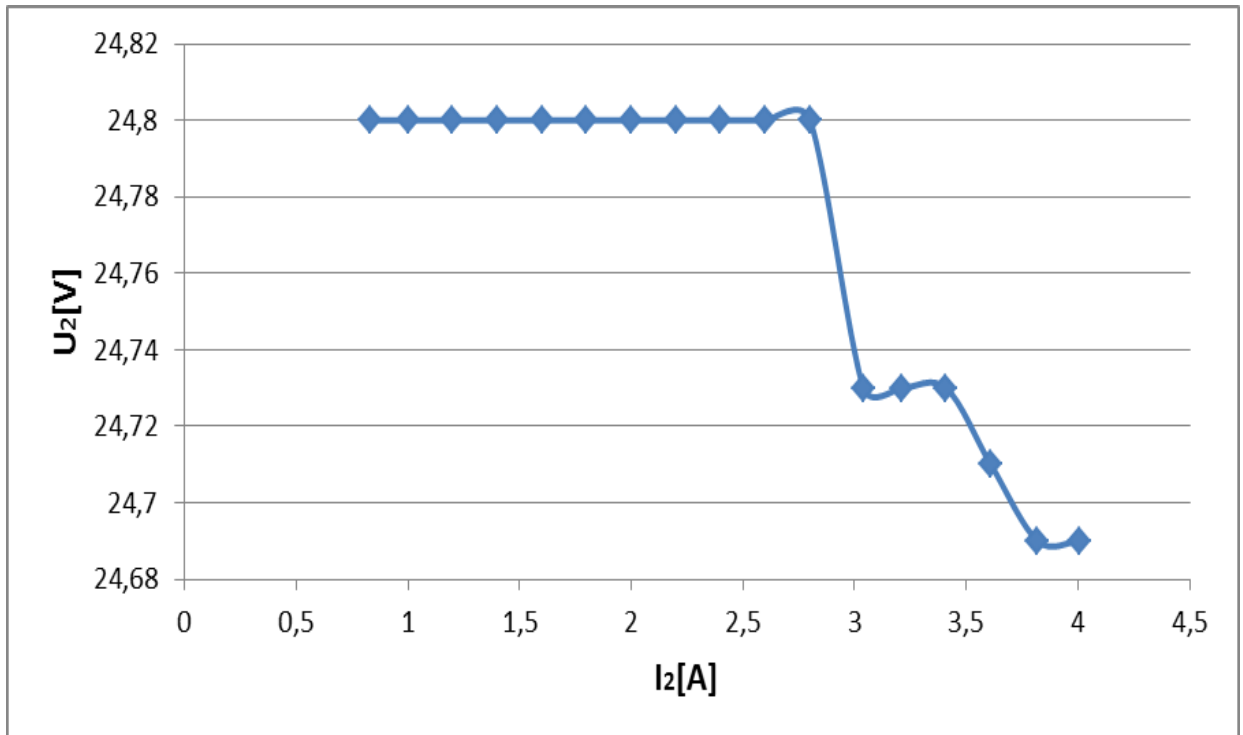
Obr. 18: Závislost účinníku při zatížení na sekundárním proudu

Na *obr. 19* je zobrazena závislost činného výkonu na sekundárním proudu ($P_2 = f(I_2)$). Z obrázku je vidět, že pokud se zvyšuje sekundární proud, tak výkon na sekundární straně strmě stoupá. Činný výkon P_2 jsem dle *tabulky 3* naměřil v rozmezí od 20 W až do 98 W. Sekundární proud I_2 jsem nastavoval v rozmezí od 0,83 A až do 4,01 A.



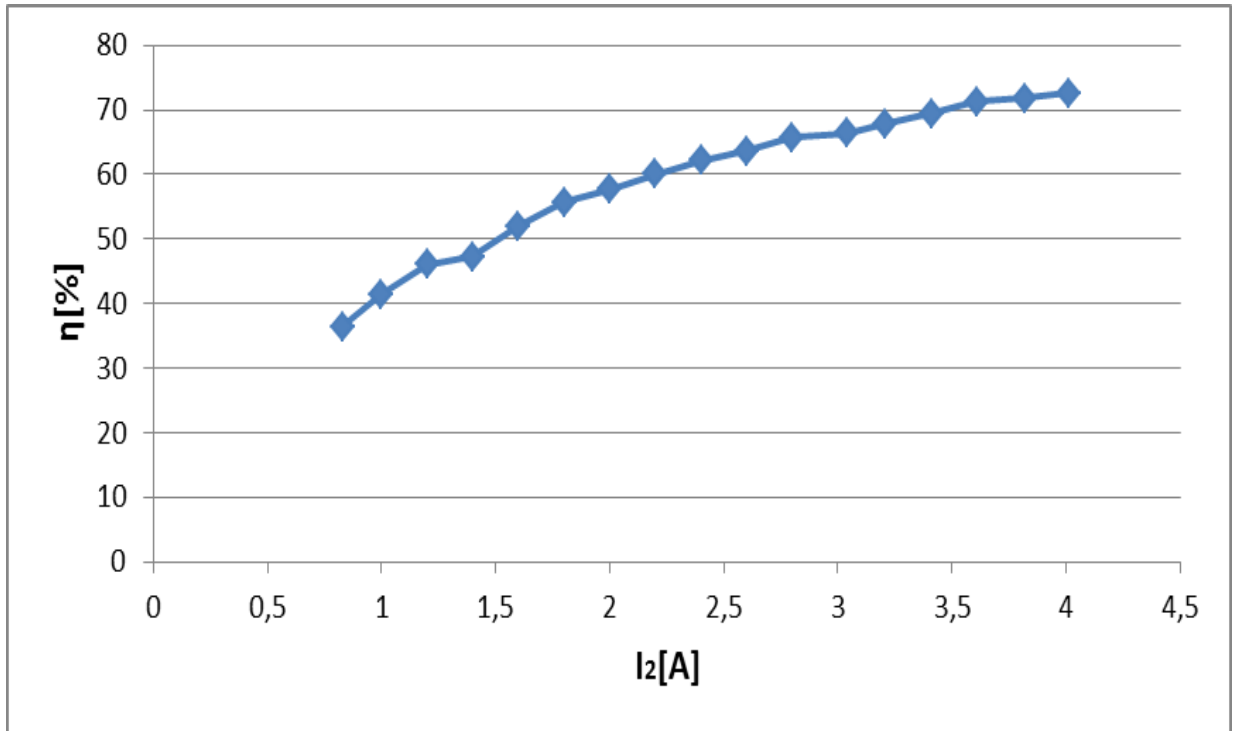
Obr. 19: Závislost činného výkonu při zatížení na sekundárním proudu

Na *obr. 20* je zobrazena závislost sekundárního napětí na sekundárním proudu ($U_2 = f(I_2)$). Z obrázku je vidět, že pokud se zvyšuje sekundární proud, tak napětí na sekundární straně klesá. Napětí na sekundární straně U_2 se jen nepatrně snížilo dle *tabulky 3* z 24,8 V na 24,69 V. Sekundární proud I_2 jsem nastavoval v rozmezí od 0,83 A až do 4,01 A.



Obr. 20: Závislost sekundárního napětí při zatížení na sekundárním proudu

Na *obr. 21* je zobrazena závislost účinnosti na sekundárním proudu ($\eta = f(I_2)$). Z obrázku je vidět, že pokud se zvyšuje sekundární proud, tak účinnost stoupá. Účinnost η se dle *tabulky 3* pohybovala v rozmezí od 36,36 % až do 72,59 %. Sekundární proud I_2 jsem nastavoval v rozmezí od 0,83 A až do 4,01 A.



Obr. 21: Závislost účinnosti na sekundárním proudu

3.3 Měření nakrátko

Následující tabulka, příklady výpočtů a výsledné grafy jsou zhotoveny podle postupu měření z kapitoly 2.2.1.

Tab. 4 Výsledky naměřené a vypočítané při měření nakrátko

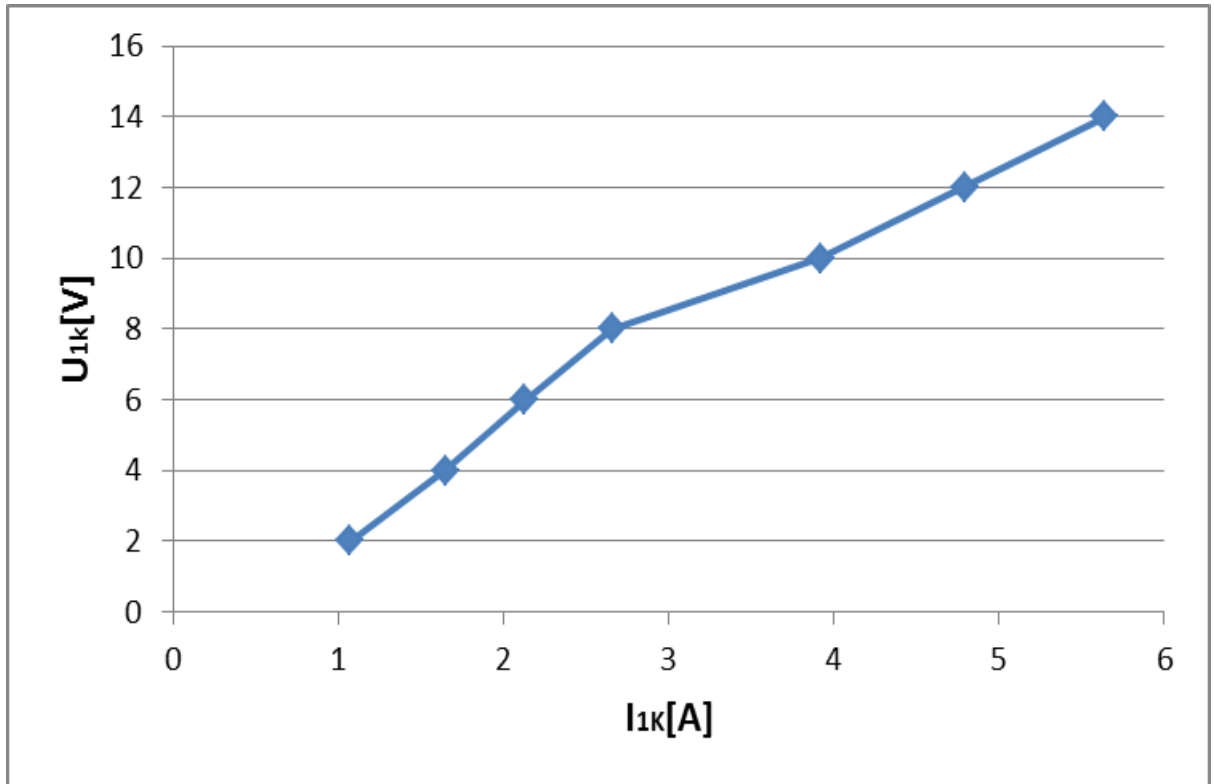
$I_{1k} [A]$	$U_{1k} [V]$	$\Delta P_{1k} [W]$	$\cos \varphi_{1k}$
1,07	2	2	0,934
1,65	4	6	0,909
2,13	6	17	0,938
2,66	8	21	0,987
3,92	10	37	0,943
4,79	12	54	0,939
5,64	14	75	0,950

Příklady výpočtu pro měření nakrátko:

Výpočet účinníku nakrátko ze vztahu (18):

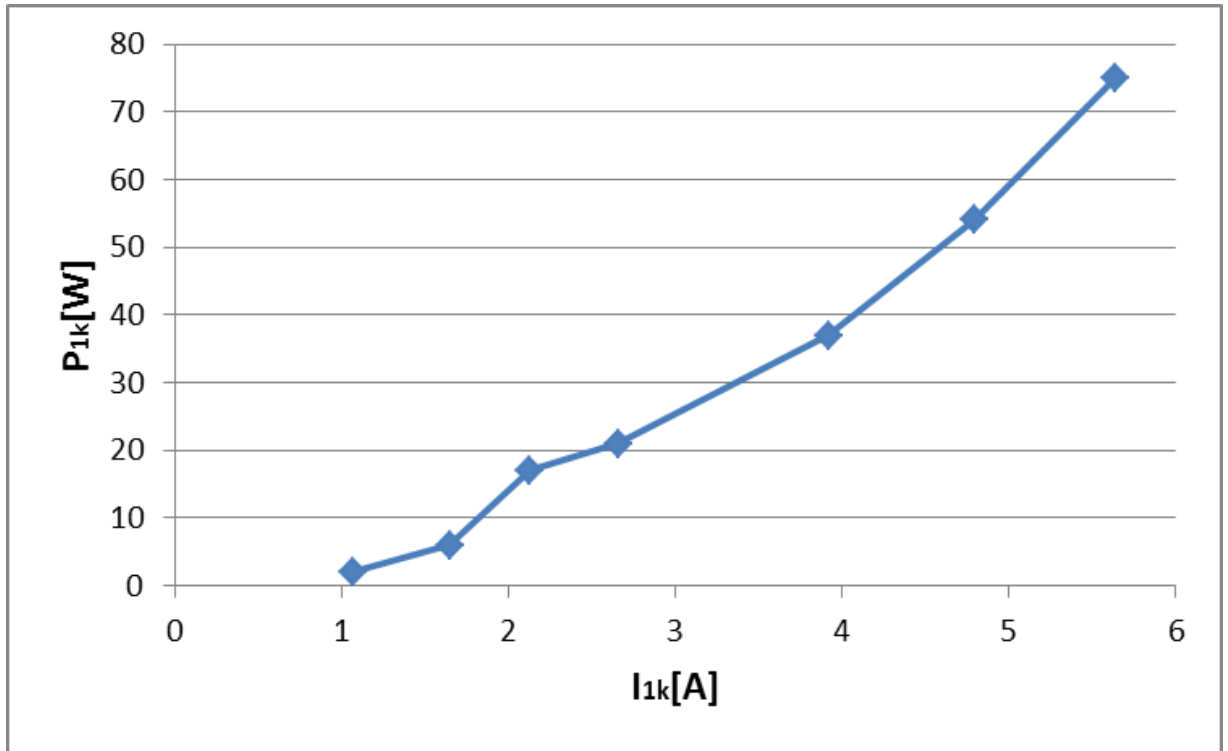
$$\cos \varphi_{1k} = \frac{P_{1k}}{U_{1k} \cdot I_{1k}} = \frac{2}{2 \cdot 1,07} = 0,934$$

Na *obr. 22* je zobrazena závislost napětí nakrátko na proudu nakrátko ($U_{1k} = f(I_{1k})$). Z obrázku je vidět, že pokud se zvyšuje proud nakrátko, tak napětí nakrátko strmě stoupá. Napětí nakrátko jsem dle *tabulky 4* nastavoval v rozmezí od 2 V až do 14 V. Proud nakrátko I_{1k} jsem změřil v rozmezí od 1,07 A až do 5,64 A.



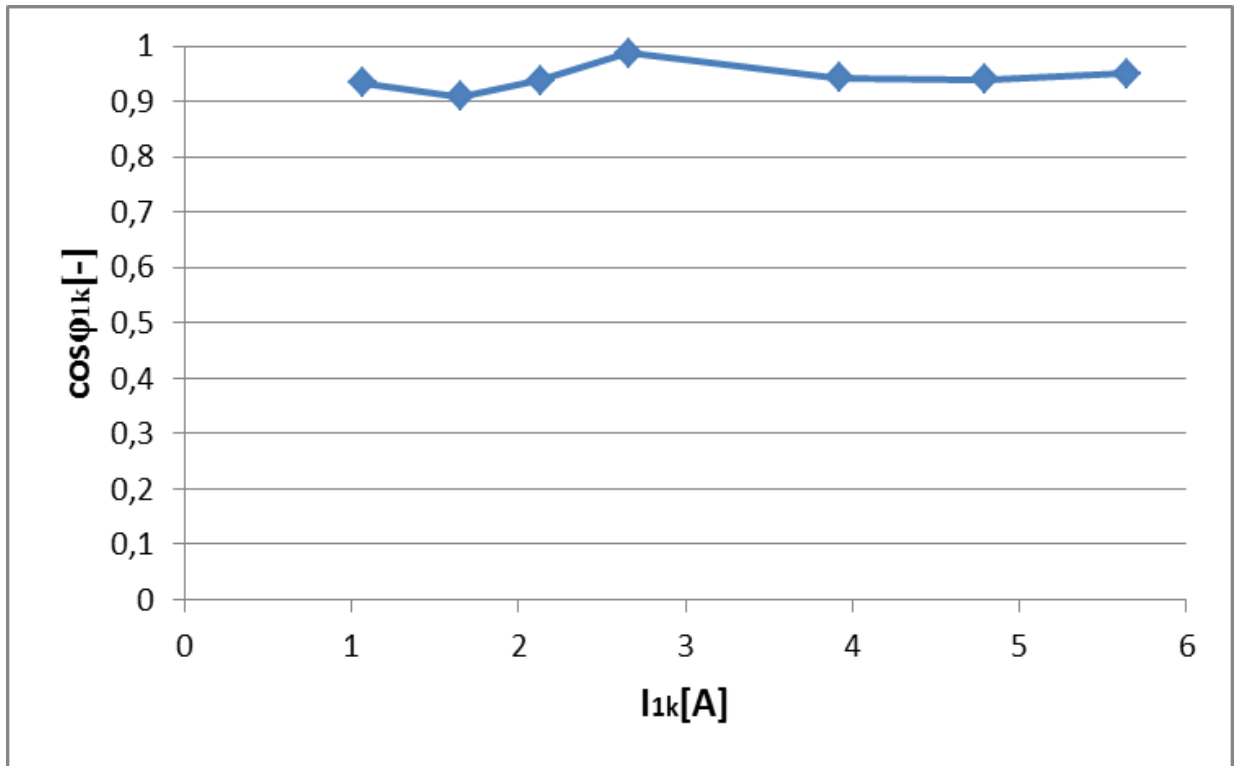
Obr. 22: Závislost napětí nakrátko na proudu nakrátko

Na obr. 23 je zobrazena závislost ztrát nakrátko na proudu nakrátko ($P_{1k} = f(I_{1k})$). Z obrázku je vidět, že pokud se zvyšuje proud nakrátko, tak ztráty nakrátko stoupají. Ztráty nakrátko jsem dle tabulky 4 naměřil v rozmezí od 2 W až do 75 W. Proud nakrátko I_{1k} jsem naměřil v rozmezí od 1,07 A až do 5,64 A.



Obr. 23: Závislost ztrát nakrátko na proudu nakrátko

Na *obr. 24* je zobrazena závislost účinníku nakrátko na proudu nakrátko ($\cos \varphi_{1k} = f(I_{1k})$). Z obrázku je vidět, že se zvyšujícím se proudem nakrátko účinník nakrátko pozvolna klesá. Účinník nakrátko $\cos \varphi_{1k}$ jsem dle *tabulky 4* vypočítal ze vztahu (18) v rozmezí 0,987 až do 0,909. Proud nakrátko I_{1k} jsem naměřil v rozmezí od 1,07 A až do 5,64 A.



Obr. 24: Závislost účinníku nakrátko na proudu nakrátko

3.4 Měření převodu

Následující tabulka a příklady výpočtu jsou zhotoveny podle kapitoly 2.4.

Tab. 5 Naměřené a vypočítané hodnoty pro převod z měření naprázdno

U_{20} [V]	U_{10} [V]	p [-]	$p_{stř}$ [-]
4,53	40,1	8,85	8,84
5,66	50,2	8,87	
6,8	60	8,82	
7,94	70	8,82	
9,05	80	8,84	
10,20	90	8,82	
11,30	100	8,85	
12,45	110	8,84	
13,57	120	8,84	
14,70	130	8,84	
15,83	140	8,84	
16,98	150,1	8,84	
18,08	160	8,85	
19,25	170,2	8,84	
20,32	180	8,86	
21,47	190	8,85	
22,61	200	8,85	
23,75	210	8,84	
24,88	220,1	8,85	
25,62	226,4	8,84	

Příklad výpočtu pro měření převodu ze vztahu (36) :

$$p = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{40,1}{4,53} = 8,85$$

3.5 Měření odporu vinutí

Měření jsem prováděl multimetrem METEX M 3850, který jsem připojil na primární stranu jednofázového transformátoru, kde jsem naměřil odpor 1,8 Ω a na sekundární stranu, kde byl naměřen odpor 1,2 Ω .

Závěr

V této bakalářské práci bylo představeno měření základních charakteristik jednofázového transformátoru. V teoretické části bylo vysvětleno, co to vůbec transformátor je, jaký je princip jeho činnosti, základní značení jednofázových transformátorů, provedení magnetického obvodu, náhradní schéma jednofázového transformátoru, odvození indukovaného napětí a v posledním bodě teoretické části je nastíněno praktické využití jednofázových transformátorů. V druhé části bakalářské práce byla detailně popsána základní měření na jednofázovém transformátoru a některá teoretická doplnění daných měření. Jsou zde popsána měření naprázdno, měření při zatížení, měření nakrátko, měření odporu vinutí a měření převodu. V poslední části jsou vyhodnoceny výsledky naměřených hodnot, dopočítány naměřené veličiny a v grafech zobrazeny základní charakteristiky jednofázového transformátoru.

Hlavním cílem bylo změřit základní charakteristiky pomocí nedestruktivních měřicích metod, což se podle porovnání výsledků s teoretickými předpoklady v zásadě podařilo. Při měření jednofázového transformátoru naprázdno jsem se bohužel, kvůli kolísání napětí na transformátoru, nedostal na maximální jmenovité napětí 230 V, ale pouze na napětí 226,4 V. Zjišťoval jsem závislosti proudu naprázdno, magnetizačního proudu, účinku naprázdno a ztrát v železe na napětí naprázdno.

Z grafů pro měření naprázdno (viz 3.1) je vidět, že s narůstajícím napětím vzrůstá jak magnetizační proud, tak proud naprázdno. Vzhledem ke zvýšení ztrát v železe se zvyšuje i odpor jednofázového transformátoru. Účinek naprázdno by měl podle teoretických předpokladů klesat se vzrůstajícím napětím naprázdno, to se projevuje až v druhé polovině měření. Nesrovnalost připisuji složitějšímu odečítání hodnot z měřicího přístroje, jelikož hodnoty stále přeskakovaly a nezůstala zobrazena jedna výsledná.

Pro převod jsem z naměřených hodnot (viz 3.4) spočítal, že střední hodnota je 8,84. Jedná se tedy o snižovací transformátor, který se vyznačuje převodem větším než jedna a má na sekundární straně nižší napětí než na straně primární.

Dále jsem prováděl měření při zatížení (viz 3.2), kde jsem jako zátěž použil proměnný odpor neboli reostat. V tomto měření bylo nejdůležitější spočítat z naměřených hodnot účinnost transformátoru. Účinnost se v měření pohybovala od hodnoty 36,36 % až do hodnoty 72,59 %. Z ekonomických důvodů se transformátory v energetice nenavrhují na maximální účinnost při 100 % zatížení, jelikož se předpokládá, že nebude transformátor během provozu plně zatížen. Z tohoto důvodu se navrhuje účinnost kolem 75 %. Což se z výsledků také

potvrdilo. Účinník i činný výkon v závislosti na sekundárním proudu stoupají, toto se také logicky projevuje i na hodnotách účinnosti. Sekundární napětí, které se mění jen velmi málo, se sekundárním proudem klesá.

V měření odporu vinutí (viz 3.5), které jsem prováděl na primární i sekundární straně transformátoru multimetrem, jsem zjistil, že na primární straně byl zjištěn odpor $1,8 \Omega$ a na sekundární straně $1,2 \Omega$. Na tyto hodnoty má vliv stárnutí transformátoru.

Při posledním měření nakrátko (viz 3.3) jsem musel postupovat velmi rychle, jelikož se transformátor spolu s regulačním transformátorem razantně zahřívaly. Měření jsem prováděl do hodnoty jmenovitého proudu primárního vinutí. Pro přidělený transformátor jsem spočítal hodnotu jmenovitého proudu $4,545 \text{ A}$. Jakmile jsem tuto hodnotu lehce překročil, musel jsem měření ukončit, aby nedošlo ke zničení transformátoru a ostatních přístrojů. Ztráty i napětí nakrátko vzrůstají v závislosti na proudu nakrátko. Účinník nakrátko by měl oproti tomu klesat, ale jak je vidět z grafu v některých částech měření se tak neděje. To bylo způsobeno nepřesným odečítáním hodnot z měřicího přístroje, kde hodnoty přeskakovaly a z důvodu zahřívání přístrojů jsem je musel odečítat velmi rychle.

Literatura

- [1] BAŠTA, Jan, Imrich MAYER a Jaroslav CHLÁDEK. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1968, 582 s. Řada elektrotechnické literatury.
- [2] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1982, 728 s. ISBN elektrické stroje.
- [3] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje I, II*. 1. vyd. Plzeň: Vysoká škola strojní a elektrotechnická, 1986, 240 s.
- [4] BARTOŠ, Václav. *Teorie a měření elektrických strojů*. 3. vyd. Plzeň: Vysoká škola strojní a elektrotechnická, 1984, 153 s.
- [5] KONÍČEK, Václav. VOŠ A SPŠE FRANTIŠKA KŘÍŽÍKA. *Elektrické stroje* [online]. 2008 [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: <http://www.vosaspsekrizik.cz/cs/download/studium/sps/el-stroje-a-pristroje/transformatory.pdf>
- [6] ČSN EN 61558-1, Bezpečnost výkonových transformátorů, napájecích zdrojů a podobně-Část 1: Všeobecné požadavky a zkoušky, 1999
- [7] WIKIPEDIA. *Trafoplech* [online]. 2010, 5. 1. 2015 [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Trafoplech>
- [8] KOLÁŘ, Václav a Vítězslav STÝSKALA. KATEDRA ELEKTROTECHNIKY, FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY, VŠB - TU OSTRAVA. *Měření na jednofázovém transformátoru: Návod do měření* [online]. 1997, leden 2011 [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: http://feil.vsb.cz/kat420/vyuka/elektrotechnika/navody/LU_trafo.pdf
- [9] WIKIPEDIA. *Zákon elektromagnetické indukce* [online]. [2005?], 27. 2. 2015 [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Z%C3%A1kon_elektromagnetick%C3%A9_indukce
- [10] MLČÁK, Tomáš a Václav VRÁNA. KATEDRA OBECNÉ ELEKTROTECHNIKY FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY, VŠB - TU OSTRAVA. 9. *Transformátory* [online]. 2006 [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: http://feil.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FMMI/Prednasky/9_trafa_sylab_bc_06.pdf
- [11] ŽATKOVIČ, Alexander. *Meranie parametrov transformátora pri chode naprázdno* [online]. [199-],[200-][cit. 2015-06-01]. Dostupné z: <http://alzat.spseke.sk/skola/datel/trafo/Naprazdno.htm>

- [12] ŽATKOVIČ, Alexander. *Meranie parametrov transformátora v zapojení nakrátko* [online]. [199-],[200-] [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: <http://alzat.spseke.sk/skola/datel/trafo/Nakratko.htm>
- [13] KOUTNÝ, Jaroslav a Ivo VLK. VYŠŠÍ ODBORNÁ ŠKOLA A STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA ELEKTROTECHNICKÁ, OLOMOUC 2009. *Elektronika I učebnice: TVOŘENO V RÁMCI PROJEKTU: DIGITÁLNÍ ŠKOLA: ICT VE VÝUCE TECHNICKÝCH PŘEDMĚTŮ, REG. Č. CZ.1.07/1.1.04/01.0137* [online]. 2009 [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: <http://eluc.cz/verejne/lekce/565>
- [14] *Jednfaz.htm* [online]. [199-],[200-] [cit. 2015 -06-01]. Dostupné z: ftp://www.kovoslužba.cz/pub/skola/cvutfel!/old/14zse/Jednofazovy%20transformator_soubory/jednfaz.h
- [15] WIKIPEDIA. *Elektrický odpor* [online]. [200-] [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrický%20odpor><http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrický%20odpor>
- [16] STÝSKALA, Vítězslav. KATEDRA ELEKTROTECHNIKY, FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY, VŠB - TU OSTRAVA. 8. *Transformátory* [online]. 1998 [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/sylab_TRANS1_bc%20FS.pdf
- [17] WIKIPEDIA. *Transformátor* [online]. [200-] [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Transformátor>
- [18] ELEKTROKOV, A. S. ZNOJMO. *Řešení pro bazénové osvětlení* [online]. [199-] [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: <http://www.elektrokov.cz/cs/reseni-pro-bazenove-osvetleni>
- [19] ELEKTROKOV, A. S. ZNOJMO. *Řešení pro rozvaděče* [online]. [199-] [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: <http://www.elektrokov.cz/cs/reseni-pro-rozvadec>
- [20] PROFIELEKRONIKA.CZ. *Proudové kleště Chauvin Arnoux F09 AC/DC* [online]. [199-][200-] [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: <http://www.profielektronika.cz/proudove-kleste-chauvin-arnoux-f09-ac-dc/id/50-135302/>
- [21] CONRAD ELECTRONIC ČESKÁ REPUBLIKA, S.R.O. *Klešťový multimetr Chauvin Arnoux F205, AC/DC* [online]. 2015 [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: <http://www.conrad.cz/klestovy-multimetr-chauvin-arnoux-f205-ac-dc.k102537>

- [22] BOHDAL, Josef. *ICT-EM1-1/14 Měření elektrických veličin: Měření na transformátorech* [online]. 2012 [cit. 2015-06-07]. Dostupné z: http://dumy.osehl.cz/subdom/dumy/vytvorene_materialy/32/16.sada/VY_32_I_NOVACE ICT-EM1-1_14.pdf
- [23] AKHMADISHINA, Alina. VUT BRNO, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ , SYSTÉM Ů A ROBOTIKY. *PREDIKCE VÝVOJE DIAGNOSTICKÝCH VELIČIN* [online]. 2012 [cit. 2015-06-08]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53114

Přílohy

Na obrázku 25 je zobrazeno měření při zatížení pro jednofázový transformátor, při kterém bylo prvotním cílem zjistit účinnost transformátoru. Na obrázku 26 je zobrazen štítek transformátoru. Na posledních dvou obrazcích (obr. 27 a obr. 28) je zobrazena primární a sekundární strana jednofázového transformátoru.



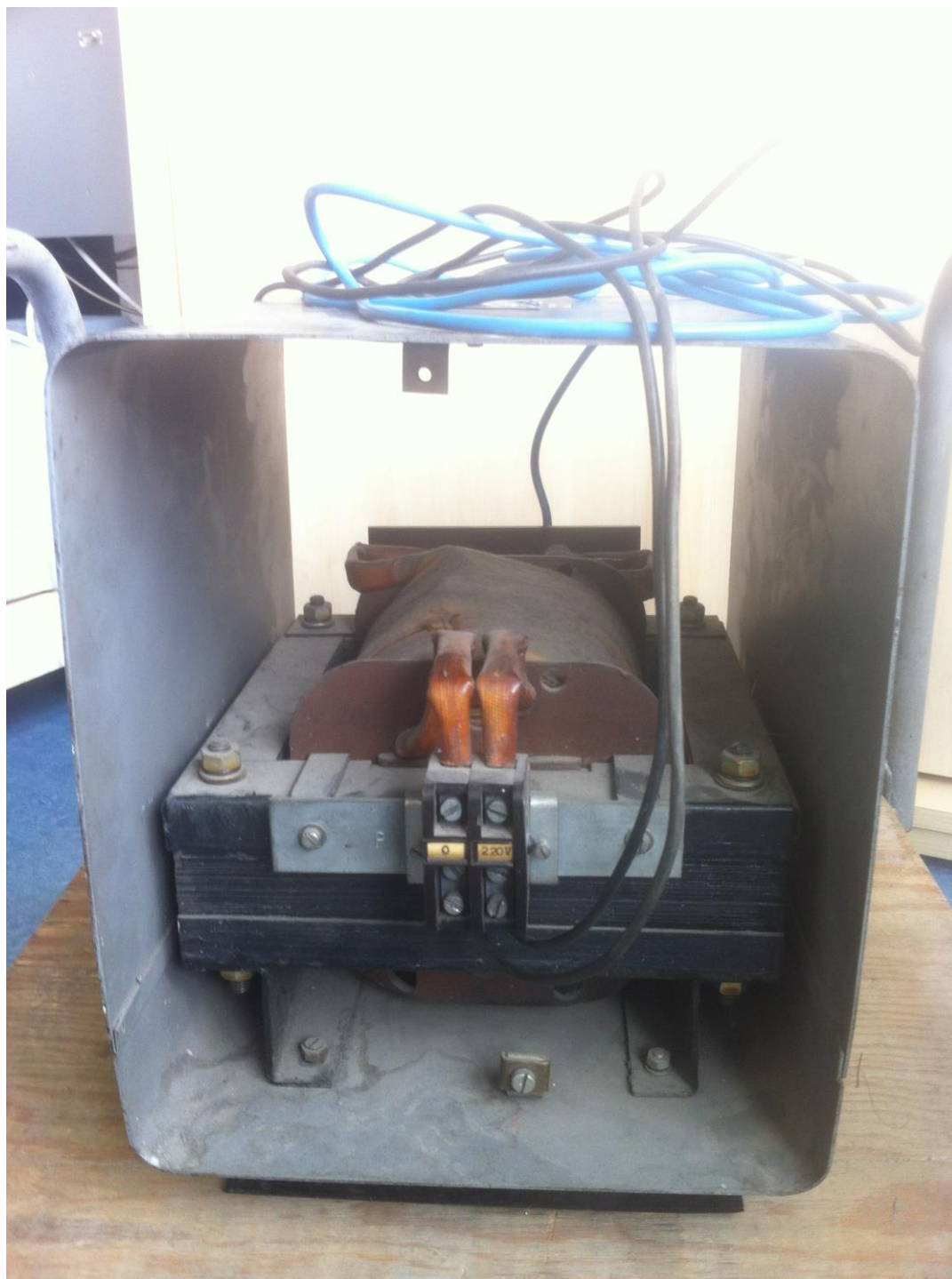
Obr. 25: Zapojení pro měření při zatížení



Obr. 26: Štítek transformátoru



Obr. 27: Sekundární strana vinutí jednofázového transformátoru



Obr. 28: Primární strana vinutí jednofázového transformátoru