

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Předprovozní měření transformátorů - uvedení nového  
měřicího standu do provozu**

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

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin MAŠKA**  
Osobní číslo: **E12B0416P**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Předprovozní měření transformátorů - uvedení nového měřicího standu do provozu**  
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 :

1. Seznamte se se zkouškami dle ČSN prováděnými na transformátorech před uvedením do provozu.
2. Proveďte diagnostiku dvou vybraných transformátorů, s ohledem na počet vinutí, zapojení vinutí, mezní zatížení, atd.
3. Proveďte měření na transformátorech a zhodnoťte možnost jejich uvedení do výuky.
4. Z měření vyhodnoťte parametry náhradního schématu daných transformátorů.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Bartoš, Václav a Skala, Bohumil. Měření na elektrických strojích. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. 109 s. ISBN 80-7082-896-X.
2. Bašta, Jan. Měření na elektrických strojích. 2, Měření na transformátorech. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1959. 247 s.
3. Normy ČSN, internet.

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Roman Pechánek, Ph.D.**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2014

Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2015

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



  
Prof. Ing. Václav Kús, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce pojednává o předprovozních měřeních na transformátorech, které mají být znovu zavedeny do provozu nebo výuky. Na transformátorech se dle ČSN EN 60076 má provádět diagnostika a měření, zjištění vnitřních zapojení vinutí, určení jmenovitých štítkových hodnot transformátorů, měření ztrát nakrátko a naprázdno, proudů naprázdno a napětí nakrátko. Z naměřených hodnot budou vypočteny náhradní parametry transformátorů. Na závěr práce bude provedeno vyhodnocení, jestli je možné uvedení nových standů do provozu nebo výuky.

## **Klíčová slova**

Transformátor, ČSN EN 60076, uvedení do provozu, diagnostika, měření, parametry náhradního schématu transformátoru, měření ztrát naprázdno a proudu naprázdno, měření ztrát nakrátko a napětí nakrátko, měření odporu vinutí stejnosměrným proudem ...

## **Abstract**

This bachelor thesis discusses pre-operational measurement on the transformers. Those transformers might be stated as suitable for operation or education purposes according to standard ČSN EN 60076. Our transformers has to perform diagnostics and measurements according to ČSN EN 60076 such as detection winding connection of transformer, detection nominal values of transformer, open-circuit test, short-circuit test. Evaluation of the replacement parameters of the transformers from the measured values will be made. In the conclusion, the evaluation will be carried out if it possible to operate the transformers for operation or teaching.

## **Keywords**

Transformer, ČSN EN 60076, to be used working, diagnostics, measurement, values of equivalent circuit, (open-circuit test) no-load losses and open-circuit input current, (short-circuit test) short-circuit losses and short-circuit input voltage, winding resistance.

## Prohlášení

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.

.....

podpis

V Plzni dne 8.6.2015

Martin Maška

## **Poděkování**

Poděkování za pomoc a podporu těmto osobám: rodiče, Vilém Šlapák, Jana Mašková, Ing. Michal Švandrlík, Ing. Roman Pechánek, Ph.D..

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 ČSN NORMY</b> .....	<b>11</b>
1.1 ČSN EN 60076-1 ÚVOD .....	11
1.2 ČSN EN 60076-3 IZOLAČNÍ HLADINY, DIELEKTRICKÉ ZKOUŠKY A VNĚJŠÍ VZDUŠNÉ VZDÁLENOSTI .....	14
1.3 ČSN EN 60076-4 PRŮVODCE ZKOUŠKAMI ATMOSFÉRICKÝMI A SPÍNACÍMI IMPULZY NAPĚTÍ – VÝKONOVÉ TRANSFORMÁTORY A TLUMIVKY .....	16
1.4 ČSN EN 60076-5 ZKRATOVÁ ODOLNOST .....	16
1.5 ČSN EN 60076-10 STANOVENÍ HLADINY HLUKU .....	16
1.6 ČSN EN 60076-11 SUCHÉ TRANSFORMÁTORY .....	17
1.7 ČSN EN 60076-12 SMĚRNICE PRO ZATĚŽOVÁNÍ SUCHÝCH VÝKONNOSTNÍCH TRANSFORMÁTORŮ .....	21
1.8 ČSN 35 1086 METODY MAGNETICKÝCH ZKOUŠEK A MĚŘENÍ ODPORU VINUTÍ STEJNOSMĚRNÝM PROUDEM .....	23
<b>2 PROVEĎTE DIAGNOSTIKU DVOU VYBRANÝCH TRANSFORMÁTORŮ, S OHLEDEM NA POČET VINUTÍ, ZAPOJENÍ VYNUTÍ, MEZNÍ ZATÍŽENÍ ATD...</b> .....	<b>26</b>
2.1 DIAGNOSTIKA TRANSFORMÁTORU .....	26
2.2 DIAGNOSTIKA PRVNÍHO TRANSFORMÁTORU .....	26
2.3 DIAGNOSTIKA DRUHÉHO TRANSFORMÁTORU .....	29
<b>3 PROVEĎTE MĚŘENÍ NA TRANSFORMÁTORECH A ZHODNOŤTE MOŽNOSTI JEJICH UVEDENÍ DO VÝUKY</b> .....	<b>32</b>
3.1 MĚŘENÍ PROUDU NAPRÁZDNO, ZTRÁT NAPRÁZDNO A PŘEVODU NA PRVNÍM TRANSFORMÁTORU .....	32
3.2 MĚŘENÍ NAPĚTÍ NAKRÁTKO A ZTRÁT NAKRÁTKO NA PRVNÍM TRANSFORMÁTORU .....	38
3.3 MĚŘENÍ PROUDU NAPRÁZDNO, ZTRÁT NAPRÁZDNO A PŘEVODU NA DRUHÉM TRANSFORMÁTORU .....	41
3.4 MĚŘENÍ NAPĚTÍ NAKRÁTKO A ZTRÁT NAKRÁTKO NA DRUHÉM TRANSFORMÁTORU .....	44
3.5 VYHODNOCENÍ .....	47
<b>4 Z MĚŘENÍ VYHODNOŤTE PARAMETRY NÁHRADNÍCH SCHÉMÁTŮ DANÝCH TRANSFORMÁTORŮ</b> .....	<b>48</b>
4.1 VYHODNOCENÍ PARAMETRŮ PRVNÍHO TRANSFORMÁTORU .....	51
4.2 VYHODNOCENÍ PARAMETRŮ DRUHÉHO TRANSFORMÁTORU .....	53
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>54</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>57</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>
<b>PŘÍLOHA A - DIAGNOSTIKA - MĚŘENÍ ODPORU VINUTÍ - IEC 60076-11 - MĚŘENÍ ODPORU VINUTÍ STEJNOSMĚRNÝM PROUDEM</b> .....	<b>1</b>
<b>PŘÍLOHA B - MĚŘENÍ NA PRVNÍM TRANSFORMÁTORU</b> .....	<b>5</b>
<b>PŘÍLOHA C - MĚŘENÍ NA DRUHÉM TRANSFORMÁTORU</b> .....	<b>8</b>



## Seznam symbolů a zkratk

ČSN.....	Česká státní norma
EN .....	Evropská norma
$U_N$ .....	Jmenovité napětí
$U_{ave}$ .....	Měřené napětí
$U_f$ .....	Fázové napětí
$I_n$ .....	Jmenovitý proud
$I_{ave}$ .....	Měřený proud
$k$ .....	Počet fází
$f$ .....	Frekvence
$B$ .....	Elektrická indukce
$\Phi$ .....	Magnetický tok
$P$ .....	Činný výkon
$S$ .....	Zdánlivý výkon
$Q$ .....	Jalový výkon
$\cos \varphi$ .....	Účinník
$R_{Fe}$ .....	Odpor představující ztráty v železe
$X_\mu$ .....	Magnetizační reaktance
$X_k$ .....	Reaktance nakrátko
$u_{k\%}$ .....	Procentní napětí nakrátko vyjádřené z jmenovitého napětí
$i_{o\%}$ .....	Proud naprázdno vyjádřený v procentech
$Z_k$ .....	Impedance naprázdno
$X_{\delta 1}$ .....	Rozptylová reaktance primárního vinutí
$X_{\delta 2}$ .....	Rozptylová reaktance sekundárního vinutí
$I_{1KN}$ .....	Převrácená hodnota procentního napětí

## Úvod

Náplň práce je zaměřena na dva vyřazené transformátory, které by mohly být ještě prospěšné pro výuku. Aby mohly být zařazeny do výuky, musí obstát ve zkouškách vyplývajících z norem ČSN EN 60076. Pokud obstojí ve zkouškách, lze je využít jako pomůcky pro výuku. Práce je rozdělena do čtyř částí.

První část práce je věnována seznámení se s normou ČSN EN 60076. Z této normy vyplývají předpisy na zkoušky pro transformátory. Hlavní důraz je kladen na předpisy a zkoušky pro suché transformátory.

Druhá část je věnována diagnostice transformátorů. Je třeba zjistit štítkové jmenovité hodnoty transformátorů. Pokud některý transformátor nebude mít k dispozici štítky, budou se muset pomocí výpočtu z plochy magnetického obvodu dopočítat jmenovité parametry transformátoru. Z měření naprázdno se zjistí převod vinutí. Podle měření odporu vinutí stejnosměrným proudem dle ČSN EN 60076-11 se zjistí odpor vinutí transformátoru. Dále s pomocí hodnot naměřených digitálním multimetrem se sestaví schéma zapojení vinutí transformátoru.

Třetí část práce je věnována dalším měřením podle ČSN EN 60076-11, měření ztrát naprázdno a nakrátko, proudů naprázdno a napětí nakrátko. Naměřené hodnoty se vynesou do grafů.

Ve čtvrté části se u prvního transformátoru vychází ve výpočtech z aproximovaných hodnot. U druhého transformátoru se vychází ze skutečně naměřených hodnot. Z těchto hodnot jsou vypočteny parametry náhradních schémat transformátorů, dále se určí ztráty v železe, rozptyly vinutí a poměrné veličiny.

V závěru je stanoveno, jestli jsou transformátory schopné být znovu zavedeny do provozu nebo výuky.

# 1 ČSN normy

Normy byly získané na stránkách [www.csnonline.unmz.cz](http://www.csnonline.unmz.cz). Vybrané normy se věnují transformátorů a jejich zkouškám.

- ČSN EN 60076-1 Úvod
- ČSN EN 60076-3 Izolační hladiny, dielektrické zkoušky a vnější vzdušné vzdálenosti
- ČSN EN 60076-4 Průvodce zkouškami atmosférickými a spínacími impulzy napětí – Výkonových transformátorů a tlumivek
- ČSN EN 60076-5 Zkratová odolnost
- ČSN EN 60076-10 Stanovení hladiny hluku
- ČSN EN 60076-11 Suché transformátory
- ČSN EN 60076-12 Směrnice pro zatěžování suchých výkonnostních transformátorů
- ČSN 35 1086 Metody elektromagnetických zkoušek a měření odporu vinutí stejnosměrným proudem.

V těchto normách je popsáno, které zkoušky se musejí na transformátorech udělat a v jakých mezních hodnotách se musíme držet, aby transformátory danou zkouškou prošly.

## 1.1 ČSN EN 60076-1 Úvod

Úvodní norma definuje výrazy, postupy měření, průběhy napětí a proudu, které jsou dále používány v dalších částech normy. Ukázka některých definic, které budu dále používat:

- Kusová zkouška – Jedná se o zkoušku, která je prováděna na každém kusu vyrobeného transformátoru.
- Typová zkouška – Je prováděná na typové řadě výrobku, při zásadní změně výrobního procesu nebo materiálu, na novém typu produktu nebo při převedení výroby jinému výrobcí. A opakuje se při předem stanoveném počtu vyrobených kusů (např. po každém 1000. kusu), nebo po uplynutí stanovené doby (např. 10 let).
- Zvláštní zkouška – Jde o zkoušku, kterou si vyžádal provozovatel stroje, ale normami není tato zkouška předepsaná.
- Provozní zkouška – Jedná se o zkoušku, která se provádí při provozním zatížením. Určuje provozuschopnost stroje, nebo stupeň znehodnocování (opotřebování nebo zjištění případné prognózy poruchy než nastane) stroje a vývoje sledování vlastností. Jde většinou o off/on-line diagnostiku transformátorů.

Dále obsahuje definice slov jako je například: autotransformátor, transformátor ponořený do kapaliny, suchý transformátor, svorka N, a dál.

#### **Výrobní kusové zkoušky :**

- Měření odporu vinutí
- Měření převodu napětí a kontrola fázového natočení
- Měření impedance nakrátko a ztrát nakrátko
- Měření ztrát naprázdno a proudu naprázdno
- Výrobní kusové dielektrické zkoušky
- Zkoušky přepínačů odboček při zatížení, kde je to vhodné

- Tlaková zkouška prosakování (zkouška těsnosti) pro transformátory ponořené do kapaliny
- Zkouška těsnosti a tlakové zkoušky nádoby pro transformátory plněné plynem (IEC 60076-15)
- Kontrola převodu a polaritý vestavěných transformátorů proudu
- Kontrola izolace jádra a kostry transformátorů ponořených do kapaliny s izolací jádra nebo kostry

**Zvláštní zkoušky :**

- Dielektrická zvláštní zkouška (IEC 60076-3)
- Měření oteplení hot-stop vinutí
- Stanovení kapacity mezi vinutí a zemí a mezi vinutími
- Měření ztrátového činitele ( $\tan \delta$ ) a kapacity izolačního systému
- Stanovení přenosových charakteristik přechodových napětí (IEC 60076-3)
- Měření nulové složky impedance( $i$ ) na trojfázových transformátorech
- Zkouška zkratové odolnosti (IEC 60076-5)
- Měření DC izolačního odporu každého vinutí proti zemi a mezi vinutími
- Zkouška na vakuové odchylky u transformátorů ponořených do kapalin

## 1.2 ČSN EN 60076-3 Izolační hladiny, dielektrické zkoušky a vnější vzdušné vzdálenosti

Zde se dozvíme o dielektrických zkouškách, které simulují na transformátoru venkovní působení přírody (bouřky) a nebo poruchy (přeskoky napětí přes vzduchovou mezeru). Zkoušky nám řeknou, jestli je transformátor a jeho dielektrikum s vinutími na tyto podmínky konstruován. Průběhy napětí jsou přesně definovány pro danou zkoušku.

### Zkoušky :

- Zkouška plnou vlnou atmosférického impulzu pro fázové svorky (LI). Zde se testuje odolnost transformátoru, výdrž působením rychlých přepětí s vysokou kmitočtovou složkou (dle definice normy IEC 60060-1), které je typické pro atmosférické výboje. Jde o vysokofrekvenční nehomogenní namáhání fázových svorek, které je rozdílné oproti namáhání střídavým napětím. Zkouška je úspěšná pokud nejsou naměřeny rozdíly mezi průběhy napětí a proudů přechodových jevů naměřených při referenčních impulzech a plném zkušebním napětím.
- Zkouška useknutým atmosférickým impulzem pro fázové svorky (LIC). Je podobná předchozí zkoušce, ale zde vlnu usekneme, abychom dosáhli vyšších kmitočtových složek. Tento případ také nastává v provozu transformátoru. Též testuje odolnost transformátoru proti vysokofrekvenčním jevům.
- Zkouška atmosférickým impulzem na svorce N (LIN). Na svorku N přivedeme impulzní napětí a ostatní fázové svorky jsou uzemněny. Úspěšnost zkoušky má stejné podmínky jak u zkoušky LI.
- Zkouška spínacím impulzem na fázové svorce (SI). Jde o simulaci v provozu při spínacích operacích. Zkoušíme vždy jednu fázi transformátoru, tak že na zkoušenou fázi přivedeme časově pomalu rostoucí přechodové napětí a ostatní svorky uzemníme. Zkoušíme výdržnou pevnost a pevnost mezi fázemi při spínacích impulzech fázové svorky

- Zkouška přiloženým napětím (AV). Ověří pevnost při střídavém napětí na fázích a nulových svorkách. Napětí je přivedeno na všechny svorky vinutí. Pokud nedojde k náhlému poklesu napětí nebo-li průrazu, zkouška je úspěšná.
- Zkouška fázové svorky výdržným střídavým napětím (LTAC). Ověřuje pevnost při AC napětí na fáze vůči zemi. Napětí se objeví na jedné nebo více fázových svorkách. Lze zkoušet výstupy s redukovanou izolací na dané napěťové hladině. Kříterium pro úspěšnost je stejné jako u zkoušky AV.
- Výdržná zkouška indukovaným napětím (IVW). Zjišťuje pevnost mezi zemí a ostatním vinutím při působení střídavého napětí. Napětí se objeví na všech fázových svorkách, ale ne na svorce N. Požaduje se stejné kříterium úspěšnosti jako je u AV.
- Zkouška indukovaným napětím s měřením částečných výbojů (IVPD). Testuje částečné výboje při napodobení provozu transformátoru. Částečné výboje jsou nežádoucí takže se je snažíme co nejvíce potlačit. Měří se zapalovací a zhášecí napětí a jakékoliv významnější aktivity částečných výbojů, které pomůžou při vyhodnocování výsledku zkoušky. Úspěšnost je dána dosažením uspokojivých výsledků zadaných kupujícím.
- Zkouška izolace pomocné elektrické kabeláže (AuxW). Testuje jestli pomocné kabeláže nejsou spojeny s vinutím. Úspěšnost je dána pokud nedojde k průrazu nebo-li splnění podmínek jako je u AV.
- Impulzy atmosférického přepětí přivedené současně na dvě nebo více svorek (LIMT), zde se zkouší zda transformátoru vydrží zvýšené vnitřní napětí, stává se při namáhání dvou a nebo více svorek při atmosférickém impulsu. Zkouška se provádí jen pro některé typy transformátorů. Úspěšnost je dána na domluvě mezi výrobcem a zákazníkem.

Dále se musí dbát na to, jestli má transformátor možnost přepínat vinutí do více než jedné konfigurace pro provoz. Musí být zkoušeno v každé konfiguraci, pokud není stanoveno jinak.

### 1.3 ČSN EN 60076-4 Průvodce zkouškami atmosférickými a spínacími impulzy napětí – Výkonové Transformátory a tlumivky

Jako v normě ČSN EN 60076-3 se tato norma zabývá zkouškami působení atmosférických a spínacích impulzů. Testuje se dielektrikum, jestli se dokáže vypořádat s vnějšími veličinami (příroda - bouřky, atmosférické výboje) a nebo vnitřními (přepětové impulzy v sítí).

#### Zkoušky :

- Zkouška atmosférickým impulzem
- Zkouška spínacím impulzem

Definice tvaru impulzu a zapojení je dána IEC 60076-3 a odchylky IEC 60060-1. Úspěšnost těchto zkoušek je dána porovnáním průběhů, jestli splňují požadavky kupujícího. Pokud ano, jsou zkoušky úspěšné. Názorné příklady průběhu měření podle zmiňované normy jsou uvedeny na straně 35 a dál.

### 1.4 ČSN EN 60076-5 Zkratová odolnost

Tato norma klade důraz na konstrukci transformátoru, která ho má připravit na tepelné a dynamické účinky vnějších zkratů. Musí být navržena tak, aby případné podmínky za provozu vydržela. Tepelná zkratová odolnost se prokazuje výpočtem. Odolnost vůči dynamickým účinkům zkratu se prokazuje buď zkouškou a nebo je výrobce může prokázat výpočtem a konstrukcí, se zdůvodnění, proč takto postupoval. Zkouška se provádí na novém transformátoru připraveném do provozu. Transformátor musí mít za sebou výrobní kusové zkoušky. Transformátor je testován do hodnoty proudu  $i$ .

Pokud se jedná o jednofázové (tři zkoušky)/třífázové (devět zkoušek neboli 3x vinutí) transformátory třídy I, II a III jsou speciálně popsány postupy prováděných zkoušek.

### 1.5 ČSN EN 60076-10 Stanovení hladiny hluku

Zde se v normě dočteme o stanovení hladiny hluku transformátoru, jedná se buď o typovou zkoušku pro transformátory s jmenovitým napětím nad 72,5 kV a nebo o zvláštní



zkoušku pokud výrobce u transformátoru uvádí hladinu hluku. Norma uvádí, kde a jak mají být umístěny mikrofony a způsob zatížení transformátoru, aby vyhodnocené výsledky byly co nejvíce vypovídající o skutečném provozu transformátoru. Ke stanovení hladiny se u transformátoru musí změřit hladina akustického tlaku a intenzita v dB. Dále se dočteme o směrnici úzkopásmového měření a kmitočtových analýz metodou reálného času a metodou FFT. Nejdůležitější u stanovení hladiny hluku je, aby se přesně a konkrétně domluvili mezi sebou prodávající a nakupující v následujících bodech (citovaných přímo z normy IEC 60076-10):

- Zaručená hladina akustického tlaku nebo výkonu
- Volba zkušební metody (akustického tlaku a nebo akustické intenzity)
- Přípustné změny od požadavků IEC 60076-10 (tak jako použití rozdílné vzdálenosti měření ke kompenzaci částečného hluku použitím krytu nebo zvuku nepropouštějícím stíněním)
- Podmínky zatížení (např. zkušební napětí nebo účinník)
- Přítomnost pomocných zařízení, jako například chladiče, čerpadla a ventilátory
- Typ regulace napětí, konstantní nebo proměnný tok

Provozní podmínky na místě instalace (nepovinné, ale doporučuje se, aby provozovatel informoval výrobce o všech podmínkách na místě instalace, které by mohly ovlivnit velikost hluku vytvářeného transformátorem, zvláště pokud jde o přítomnost harmonických a stejnosměrných složek v síti).

## 1.6 ČSN EN 60076-11 Suché transformátory

Nejdůležitější norma pro suché transformátory, podle které budu provádět měření. Dočteme se zde o elektromagnetické kompatibilitě (EMC), odbočkách, zapojení, zkratové odolnosti, jmenovitých údajích transformátoru uvedených na štítcích, které mají být připevněny na transformátoru a ochranném krytu. Dále se pak dočteme o mezním oteplení

a izolačních hladinách. A to nejdůležitější o zkouškách, které se provádějí na transformátorech.

- Měření odporu vinutí, jedná se o výrobní kusovou zkoušku. Zkouška je popsána v normě IEC 60067-1.
- Měření převodu a kontrola vektorů.
- Měření napětí a ztrát nakrátko, jedná se o výrobní kusovou zkoušku. Zkouška je popsána v normě IEC 60067-1.
- Měření ztrát a proudu naprázdno, jedná se o výrobní kusovou zkoušku. Zkouška je popsána v normě IEC 60067-1.
- Zkouška přiloženým výdržným napětím, jedná se o výrobní kusovou zkoušku. Zkouška je popsána v normě IEC 60067-3.
- Zkouška indukovaným výdržným napětím, jde o výrobní kusovou zkoušku. Zkouška je popsána v normě IEC 60067-3.
- Zkouška atmosférickým impulzem, jde o typovou zkoušku. Zkouška je popsána v normě IEC 60067-3. Testuje se elektrická pevnost mezi:

1. jednotlivými vinutími navzájem;
2. vinutím a uzemněním části transformátoru (kostra, nádoba ...);
3. závity, vrstvami a cívkami každého vinutí.

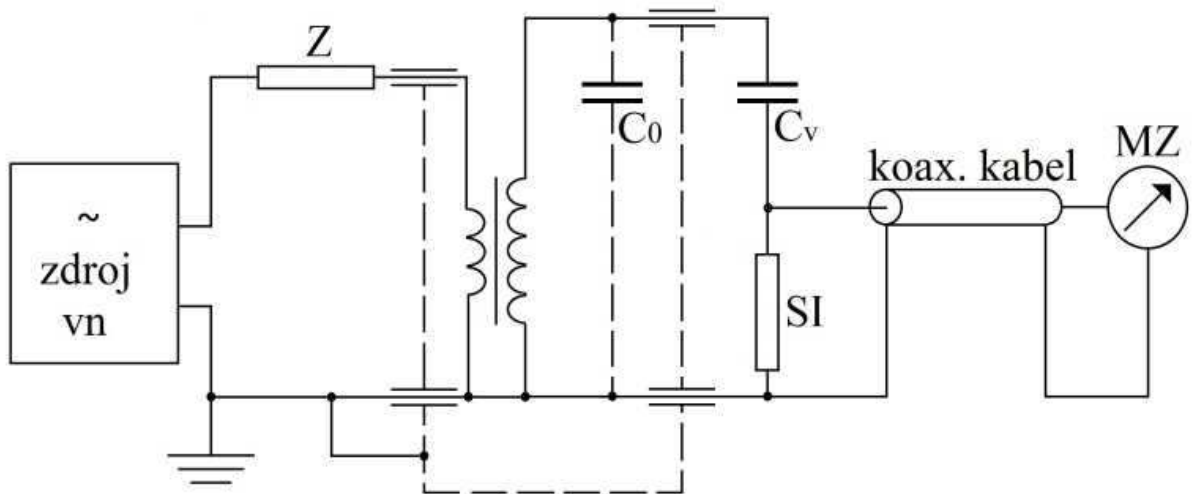
Zkušební napětí se volí podle druhu sítě a zařízení, na které bude transformátor připojený. Zkušební napětí jsou uvedena v tabulce 1. Platí pro vnitřní zapojení transformátoru hvězda a nebo trojúhelník s izolovaným nulovým bodem.

Tabulka 1: Zkušební napětí vinutí transformátoru s plnou izolací

Jmenovité napětí [kV]	Největší dovolené pracovní napětí [kV]	Přiložené zkušební napětí s kmitočtem 50Hz [kV]	Indukované zkušební napětí mezi svorkami [kV]	Rázové zkušební napětí [kV]
do 1	do 1,1	3	2	-
6	7,2	22	12	60
10	12	28	20	75
22	25	50	44	150
35	38,5	75	70	190
110	123	230	220	550
220	245	460	440	1050

U transformátoru, kde se nevyskytuje vyšší přepětí, a nebo mají dostatečnou účinnou ochranu proti přepětí, lze použít zkušební napětí se sníženou hladinou.

Měření částečných výbojů. Jedná se o výrobní kusovou zkoušku a zvláštní zkoušku. Částečné výboje v transformátoru vznikají nejčastěji na defektních místech vzniklých při výrobě nebo technologických krocích. Díky jejich měření lze odhalit poruchy ještě dříve, než skutečně nastanou a způsobí škody. Zejména se sledují v závitech jednotlivých cívek. K měření částečných výbojů se používá galvanická metoda měření. Zapojení je vidět na obrázku 1.



Obrázek 1 Galvanická metoda snímání napěťových impulzů

Kde  $C_0$  je kapacita zkoušeného objektu,  $C_v$  je kapacita průchodky,  $SI$  je impedance měřicího obvodu a  $Z$  je filtr.

Díky této metodě se dá lokalizovat místo případné poruchy. Poruchu tak lze dříve opravit než vůbec nastane. Měření se provádí minimálně na třech napěťových hladinách: napětí nižší než je jmenovité napětí, dále na jmenovitém napětí a pak při 1,1 násobku jmenovitého napětí. Zjišťuje se zapalovací a zhášecí napětí částečných výbojů. Cíl měření je určení místa částečných výbojů. Při jednom místě výskytu lze místo přesně určit díky měření, ale pokud míst je více je to buď obtížné a nebo nemožné. Popřípadě lze použít metodu akustické emise částečných výbojů v olejových transformátorech.

Oteplovací zkouška. Jde o typovou zkoušku. Zkouška je popsána v normě IEC 60067-2. Transformátor musí být kompletně sestavený. Části, které nemají vliv na tepelný režim transformátoru, nemusejí být namontované. Princip této zkoušky zjišťuje, jak se oteplí transformátor při jmenovitém zatížení. Zjistí se, jestli se některé místa tepelně nenamáhají přes stanovenou mez a jestli chlazení, které bylo k danému transformátoru navrženo, je dostačující. Zkouška se provádí buď:

- Metodou přímého zatížení
- Metodou vzájemného zatížení

V této zkoušce se určuje střední oteplení vinutí, oteplení povrchu magnetického obvodu u suchých transformátorů. Dále se zjišťuje střední oteplení vinutí, oteplení horní vrstvy oleje, střední oteplení oleje, oteplení konstrukčních prvků a oteplení magnetického obvodu u olejových transformátorů.

- Měření hladiny hluku je zvláštní zkouška. Zkouška je popsána v normě IEC 60067-10.
- Zkratová zkouška je zvláštní zkouška. Zkouška je popsána v normě IEC 60067-5.
- Zkouška pro třídu prostředí je zvláštní zkouška. Transformátor musí být kompletně sestavený. U transformátoru se stanoví jedna z následujících tříd prostředí:

1. E1, určuje se zkouškou kondenzace.
2. E2, zahrnuje zkoušku E1 plus zkoušku na proniknutí vlhkosti.

- Klimatická zkouška, jde o zvláštní zkoušku. Zde najdeme zkoušku tepelným šokem, která stanoví vhodnost transformátoru pro klimatické třídy.
  1. Třída C1, provádí se s kompletně odstrojeným transformátorem, pokud má nějaké krytí.
  2. Třída C2 je skoro stejná jako C1, ale liší se v tom, že transformátor podrobíme zkoušce tepelného šoku už při teplotě  $(-25\pm 3)$  °C, jinak vše zůstává stejné.
- Zkouška hořlavosti, jde o zvláštní zkoušku. Zde se dočteme o kontrole emise korozivních a škodlivých plynů.
  1. Zkouška hořlavosti pro transformátory třídy F1. Transformátor musí být zkompletován bez ochranného krytu a musí obsahovat cívky vysokého a nízkého napětí, sloupek jádra a izolační komponenty.

### 1.7 ČSN EN 60076-12 Směrnice pro zatěžování suchých výkonnostních transformátorů

Tato norma popisuje, co způsobuje krátkodobé a dlouhodobé přetěžování transformátoru nad štítkové jmenovité hodnoty.

Účinky a nebezpečí krátkodobého nouzového zatížení. Jde o proud, který je maximálně 1,5 násobek jmenovitého proudu. Na toto krátkodobé zatížení lze transformátor přizpůsobit, za dohody výrobce s kupujícím. Přináší rizika, které zkracují životnost a bezpečnost transformátoru.

#### Například:

- Kritické mechanické namáhání v důsledku zvýšené teploty, která může dosáhnout nepřijatelné hladiny způsobující trhliny v izolaci transformátoru zalitého v pryskyřici.
- Mechanické poškození ve vinutí v důsledku krátkodobých a opakovaných proudů přesahující jmenovitý proud.

- Mechanické poškození ve vinutí v důsledku krátkodobých a opakovaných proudů kombinovaných s okolní teplotou vyšší než stanovenou.
- Zhoršení mechanických vlastností, při vyšší teplotě by mohlo snížit zkratovou odolnost.
- Snížení dielektrické pevnosti v důsledku zvýšené teploty.

Účinky dlouhodobého nouzového zatížení, přináší následující problémy. Kumulativní tepelné zhoršení mechanických a dielektrických vlastností, zkrácení životnosti transformátoru, hlavně pokud je vystavený síťovým zkratům. Ostatní izolační materiály, jako jsou například konstrukční části vodiče, doplácí též na zvýšenou teplotou tak, že se projevuje rychlejší stárnutí materiálu. Výpočty rychlosti stárnutí a zkrácení životnosti jsou dány na úvahách o zatížení. Nesmí se také zapomínat na Arrheniův vztah, který stanoví závislost rychlosti stárnutí izolace v závislosti na měnící se teplotě. Arrheniův vztah obsahuje dvě konstanty, které jsou definovány pro určité třídy dielektrik, více v tabulce 2.

Tabulka 2 Konstanty pro životností vztahy

Teplota izolačního systému (teplotní třída)	konstanta Arrheniova zákona		jmenovitá teplota hot-stop vinutí
	a	b	
°C	h	K	°C
105 (A)	3,10E-14	15900	95
120 (E)	5,48E-15	17212	110
130 (B)	1,72E-15	18115	120
155 (F)	9,60E-17	20475	145
180 (H)	5,35E-18	22797	170
200	5,31E-19	25086	190
220	5,26E-20	27285	210

Dále se zabývá rychlostí stárnutí a teplotou hot-stop, většinou se určují pomocí výpočtu.

Tabulka 3 Maximální teplota hot-stop vinutí

Teplota izolačního systému (IEC 60076-11) °C	maximální teplota hot-stop vinutí °C
105 (A)	130
120 (E)	145
130 (B)	155
155 (F)	180
180 (H)	205
200	225
220	245

### 1.8 ČSN 35 1086 Metody magnetických zkoušek a měření odporu vinutí stejnosměrným proudem

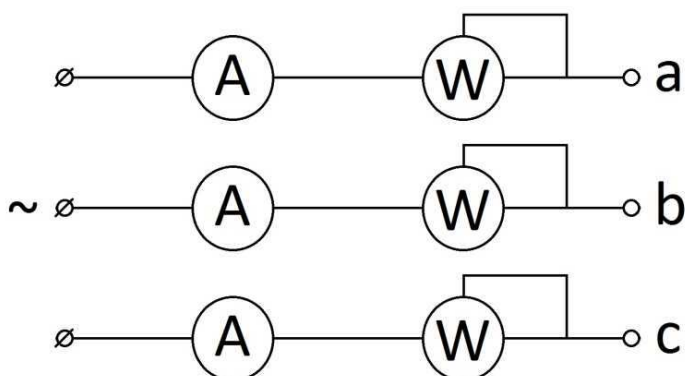
V této normě se dočteme o postupu pro měření převodu napětí naprázdno, o kontrole skupiny spojení a natočení fází. Natočení fází se kontroluje jednou z následujících metod:

- Přímá metoda
- Metoda dvou voltmetrů
- Můstková metoda
- Metoda stejnosměrného proudu

Při zkoušení transformátorů se třemi vinutími se kontrolují obě skupiny spojení. Při zkoušení transformátoru s více vinutími se kontrolují skupiny spojení jednoho vinutí vzhledem k ostatním.

- Měření odporů vinutí stejnosměrným proudem se měří můstkem a nebo metodou úbytku napětí. Odpor se musí měřit na všech odbočkách vinutí a ve všech polohách přepínače odboček, maximální proud při měření nesmí být větší jak 0,2 násobek jmenovitého proudu a nesmí trvat déle než 60 sekund. Musí se také zaznamenat teplota vinutí transformátoru.
- Měření ztrát naprázdno a proudu naprázdno pro trojfázový transformátor.

Transformátor se napájí jmenovitým napětím jmenovitého kmitočtu prakticky sinusového tvaru.



Obrázek 2 Zapojení pro měření ztrát naprázdno/nakrátko transformátoru

- Měření ztrát nakrátko a napětí nakrátko na tří fázovém transformátoru.
- Měření nulové složky reaktance se měří na plně smontovaném transformátoru při jmenovitém kmitočtu mezi spojenými fázovými svorkami vinutí, zapojených do hvězdy a nebo lomené hvězdy s vyvedenou svorkou uzlu. Změří se reaktance  $Z_0$ .

$$Z_0 = 3 \frac{U}{I}$$

Kde  $U$  je přiváděné napětí ve V a  $I$  naměřená hodnota proudu v A.

V případě vinutí zapojených do trojúhelníka, musí být při měření reaktance nulové složky provedeny do trojúhelníka.

Norma obsahuje další, ale v této době už neplatné normy ČSN 35 10XX a ČSN 35 11YY, které jsou nahrazeny normami výše zmiňované ČSN EN 60076, jako jsou:

#### XX:

- 80 - Základní zkoušky elektromagnetických strojů netočivých (IEC 60076-11)
- 83 - Zkratové zkoušky transformátoru (IEC 60076-5)



- 84 - Rázové zkoušky transformátoru (IEC 60076-4)

**YY:**

- 00 - Výkonové transformátory (IEC 60076-1)
- 03 - Výkonové transformátory. Názvy a definice. (IEC 60076-1)

## **2 Proved'te diagnostiku dvou vybraných transformátorů, s ohledem na počet vinutí, zapojení vnutí, mezní zatížení atd...**

### **2.1 Diagnostika transformátoru**

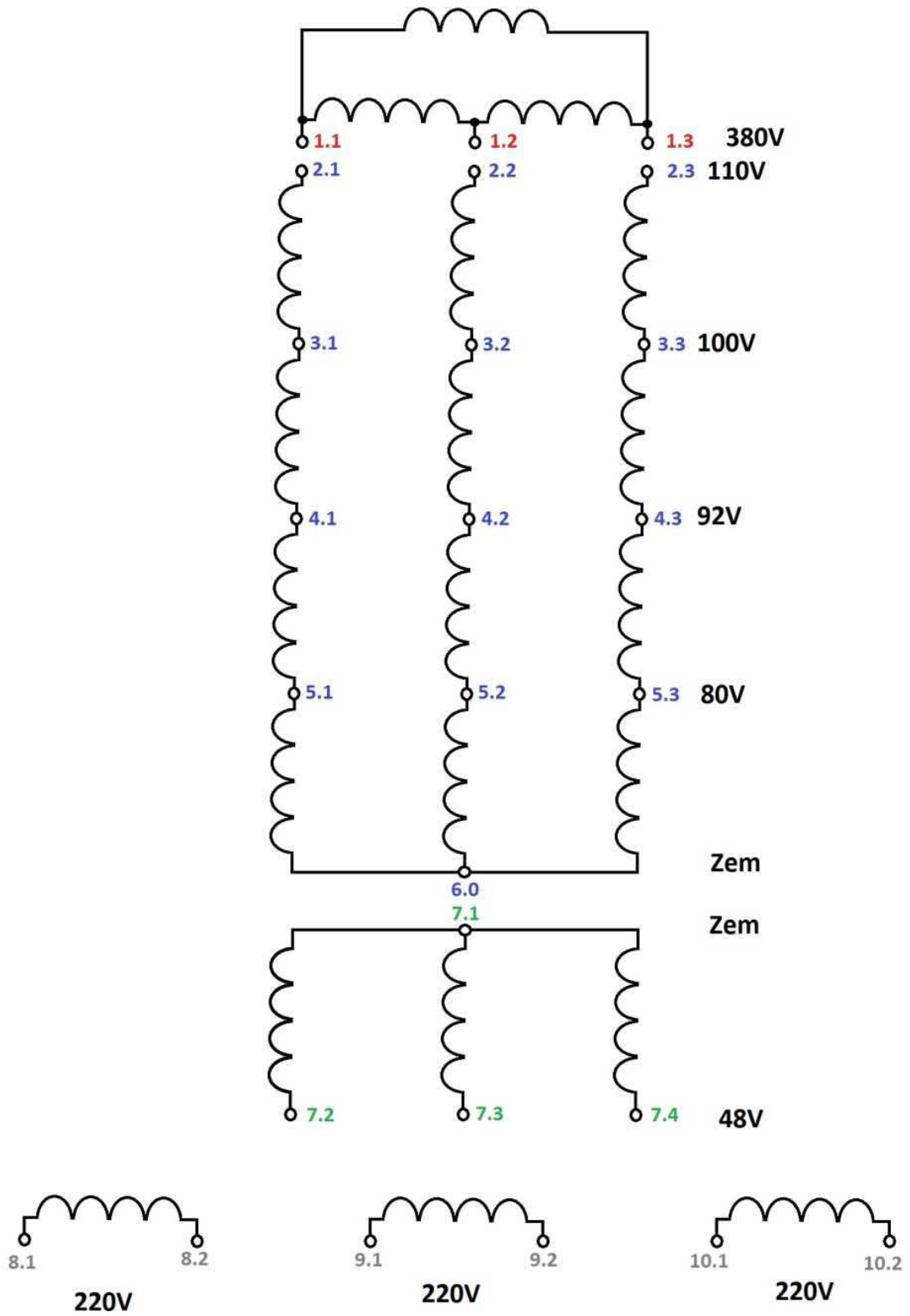
Slovo diagnostika má základ v řeckém slově *diagnosis* a znamená to rozpoznání, určení. Odtud je odvozeno určení slova diagnostika, která představuje význam - určení stavu. Budu se zabývat diagnostikou elektrotechnickou.

V následujícím kapitole budu určovat zapojení vnutí a odpor vinutí dle normy IEC 60076-11.

### **2.2 Diagnostika prvního transformátoru**

V prvním kroku nalezení štítku, na kterém bylo uvedeno následující: vstupní napětí je 380V v zapojení do trojúhelníku. Výstup je hvězda s několika odbočkami pro napětí 48/80/92/100/110 a 220 V. Zdánlivý výkon transformátoru je 12 000 VA.

Další krok: zjištění způsobu zapojení vinutí (pomocí digitálního multimetru UNI-T UT39A „prozvonění“ vinutí) a jejich odporu (zvolená metoda měření odporu vinutí stejnosměrným proudem z IEC 60076-11). Díky „prozvonění“ vinutí bylo ověřeno vnitřní zapojení vinutí, schéma zapojení je vidět na obrázku 3.



Obrázek 3 Diagnostika - Schéma zapojení vinutí u prvního transformátoru

Při měření odporů vinutí jsem naměřil toto:

Tabulka 4 Odporů vstupního vinutí (trojúhelník na 380 V)

svorky	1.1	1.2	1.3	Odpor vinutí [ $\Omega$ ]
Proud [A]	1,00			11,55
Napětí [V]	11,55			
Proud [A]		1,00		11,55
Napětí [V]		11,55		
Proud [A]	1,00			11,55
Napětí [V]	11,55			

Tabulka 5 Odporů vinutí výstupní hvězdy s odbočkami na 80/92/100 a 110 V vůči svorce 6.0

Svorka	Proud [A]	Napětí [V]	Odpor vinutí [ $\Omega$ ]
2.1	1	11,53	11,53
2.2	1	11,51	11,51
2.3	1	11,51	11,51
3.1	1	11,50	11,50
3.2	1	11,50	11,50
3.3	1	11,50	11,50
4.1	1	11,49	11,49
4.2	1	11,49	11,49
4.3	1	11,49	11,49
5.1	1	11,48	11,48
5.2	1	11,48	11,48
5.3	1	11,48	11,48

Tabulka 6 Odporů vinutí výstupní hvězdy na 48 V vůči svorce 7.1

Svorka	Proud [A]	Napětí [V]	Odpor vinutí [ $\Omega$ ]
7.2	1	11,56	11,56
7.3	1	11,54	11,54
7.4	1	11,54	11,54

Tabulka 7 Odporů výstupního vinutí na 220 V

svorky	8.1	8.2	Odpor vinutí [ $\Omega$ ]
Proud [A]	1		11,54
Napětí [V]	11,54		

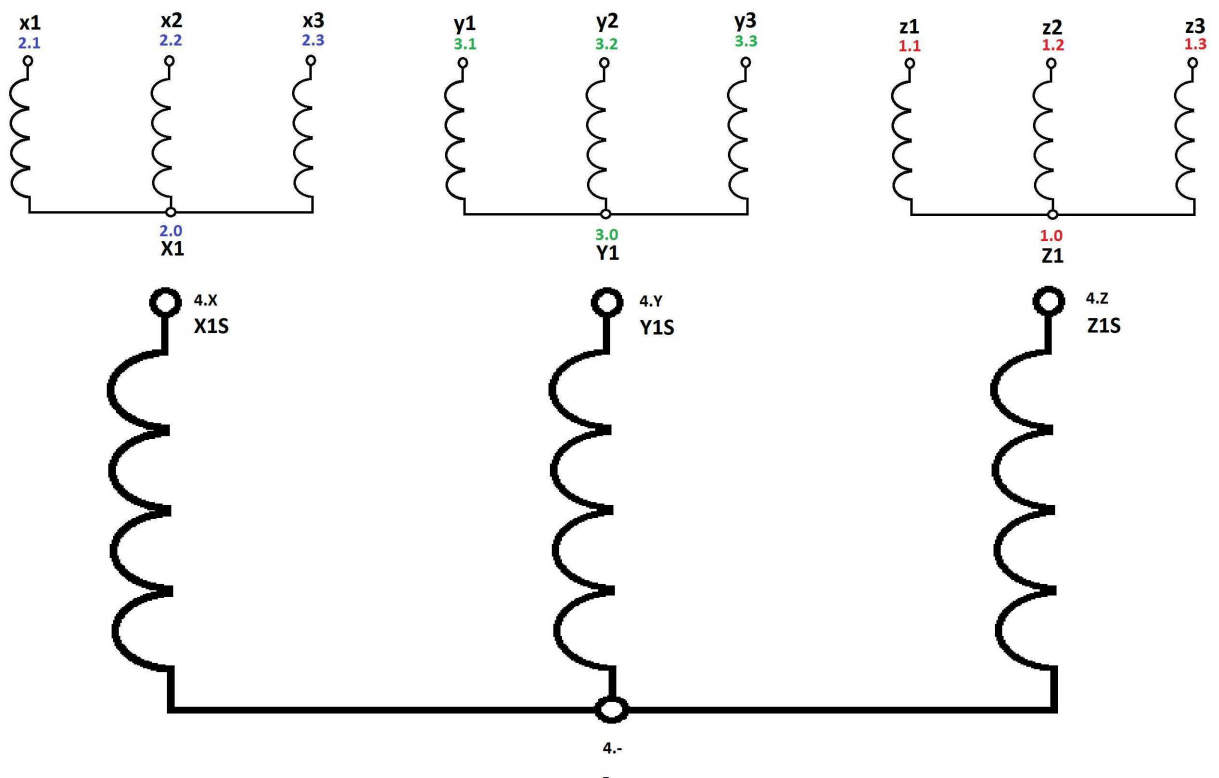
svorky	9.1	9.2	Odpor vinutí [ $\Omega$ ]
Proud [A]	1		11,53
Napětí [V]	11,53		

svorky	10.1	10.2	Odpor vinutí [ $\Omega$ ]
Proud [A]	1		11,53
Napětí [V]	11,53		

Další naměřené hodnoty vinutí jsou v příloze A. Baterie naprázdno měla napětí 11.91 V a na konci měření měla napětí 11,82 V. Teplota v místnosti byla 25 Celsia. Jmenovitý proud prvního transformátoru pro 230 V je  $I_N = \frac{S}{3 \cdot U_f} = \frac{12000}{3 \cdot 230} = 17,39$  A. Plocha magnetického sloupku je  $S_{fe} = 8 \cdot 8 = 64 \text{ cm}^2$ , tuto hodnotu budu potřebovat jako pomocnou hodnotu pro diagnostiku druhého transformátoru.

### 2.3 Diagnostika druhého transformátoru

Transformátor nemá na sobě žádný štítek. Takže se prověřovalo vnitřní zapojení vinutí a odpory vinutí, postupoval jsem stejně jako u prvního transformátoru. Vnitřní zapojení transformátoru je vidět na obrázku 4.



Obrázek 4 Diagnostika - Schéma zapojení vinutí u druhého transformátoru

Dále odpory vinutí.

Tabulka 8 Odpory vinutí vstupní hvězdy svorce 4.-

Svorka	Proud [A]	Napětí [V]	Odpor vinutí [ $\Omega$ ]
4.X	1	11,46	11,46
4.Y	1	11,46	11,46
4.Z	1	11,46	11,46

Tabulka 9 Odpory vinutí vstupní hvězdy svorce 1.0

Svorka	Proud [A]	Napětí [V]	Odpor vinutí [ $\Omega$ ]
1.1	1	11,33	11,33
1.2	1	11,32	11,32
1.3	1	11,32	11,32

Tabulka 10 Odpory vinutí vstupní hvězdy svorce 2.0

Svorka	Proud [A]	Napětí [V]	Odpor vinutí [ $\Omega$ ]
2.1	1	11,33	11,33
2.2	1	11,35	11,35
2.3	1	11,35	11,35

Tabulka 11 Odpory vinutí vstupní hvězdy svorce 3.0

Svorka	Proud [A]	Napětí [V]	Odpor vinutí [ $\Omega$ ]
3.1	1	11,34	11,34
3.2	1	11,38	11,38
3.3	1	11,35	11,35

Použijí se dál matematické vztahy pro určení parametru transformátoru:

$$S = 3 * U_f * I_f \quad [VA, V, A] \quad (1)$$

$$S_{fe} = C \sqrt{\frac{S}{k * f}} * 10^{-4} \quad [m^2, VA, Hz] \quad (2)$$

Kde rovnici 2 upravíme do tvaru.

$$S_{fe} = 14 * 6 = 84 \text{ cm}^2$$

$$S = \left( \frac{S_{fe}}{C * 10^{-4}} \right)^2 * k * f \quad [m^2, VA, Hz]$$

Po dosazení do rovnice a zvolení konstant  $C = 7$  (6 až 8 pro vzduchové chlazení) a  $k = 3$  (počet fází).

$$S = \left( \frac{84 * 10^{-4}}{7 * 10^{-4}} \right)^2 * 3 * 50 = 16537,5 VA$$

Zdánlivý výkon zaokrouhlím na  $S = 16500 VA$ . Proud nakrátko dopočítám pomocí vztahu (1).

$$I_f = \frac{S}{3 * U_f} = \frac{16500}{3 * 230} = 23,9 A$$

Dále vypočítám indukci a magnetický tok podle vztahů.

$$B = 1,1 + 0,14 \log(S) [T, VA] \quad (3)$$

$$\Phi = B * S_{fe} [Wb, T, m^2] \quad (4)$$

Po dosazení do vztahů 3 a 4 dostáváme tyto hodnoty:

$$B = 1,1 + 0,14 \log(84 * 10^{-4}) = 0,8093 T$$

$$\Phi = 0,8093 * 84 * 10^{-4} = 6,47 * 10^{-4} Wb$$

Takže druhému transformátoru jsem diagnostikoval jeho jmenovité parametry takto, jmenovitý fázový proud  $I_N = 23,9 A$ , při zvolených konstantách  $C = 7$  a  $k = 3$  a  $S = 6537,5 VA \doteq 16500 VA$ .

Zvolení konstanty  $C$  jsem provedl následujícími kroky. Porovnal jsem hodnoty vůči prvnímu transformátoru. Provedl jsem stejný výpočet jako u druhého transformátoru, při známé ploše magnetického obvodu a zdánlivého výkonu.

$$S_{fe} = 8 * 8 = 64 cm^2$$

Dosadím do vztahu 2 hodnoty prvního transformátoru a získám.

$$S = \left( \frac{64 * 10^{-4}}{7 * 10^{-4}} \right)^2 * 3 * 50 = 12 538 VA \doteq 12 000 VA$$

Konstantu  $k$  nechám na hodnotě 3. Konstantu  $C$  zvolíme tak, aby výsledek byl co nejbližší hodnotě 12000 VA. Takže  $C = 7$ .

### **3 Proved'te měření na transformátorech a zhodno'te možnosti jejich uvedení do výuky**

Zde se budu zabývat měřením transformátorů, proudů nakrátko a ztrát naprázdno podle ČSN IEC 60076-11 a dále měřením napětí nakrátko a ztrát nakrátko podle normy ČSN IEC 60076-11. Nakonec uvedu výpočet parametrů transformátorů v náhradních schématech transformátorů.

#### **3.1 Měření proudu naprázdno, ztrát naprázdno a převodu na prvním transformátoru**

První se bude měřit podle ČSN IEC 60076-11 proud a ztráty na naprázdno na prvním transformátoru. Na vstupu se snímalo napětí a proud zařízením Hioki 3166. Na výstupu se snímalo napětí na jednotlivých odbočkách pomocí digitálních multimetrů UNI-T UT39A (na 220 V odbočce) a UNI-T UT58C (na 100 V odbočce) a dále na dvou digitálních multimetrech DMK 32 napětí na odbočkách 48/80/92 a 110 V.





Obrázek 5 Hioki 3166 měřilo všechny vstupní veličiny na transformátoru

Tabulka naměřených hodnot je v příloze B. Zde jsou uvedeny jen grafy z měření.



Obrázek 6 Měřící zařízení na výstupu transformátoru. Vlevo nahoře UNI-T UT39A, vpravo nahoře UNI-T UT58C a pod nimi dva DMK 32

Převod transformátoru je vidět v tabulce 12. Transformátor byl napájen 400/230 V.

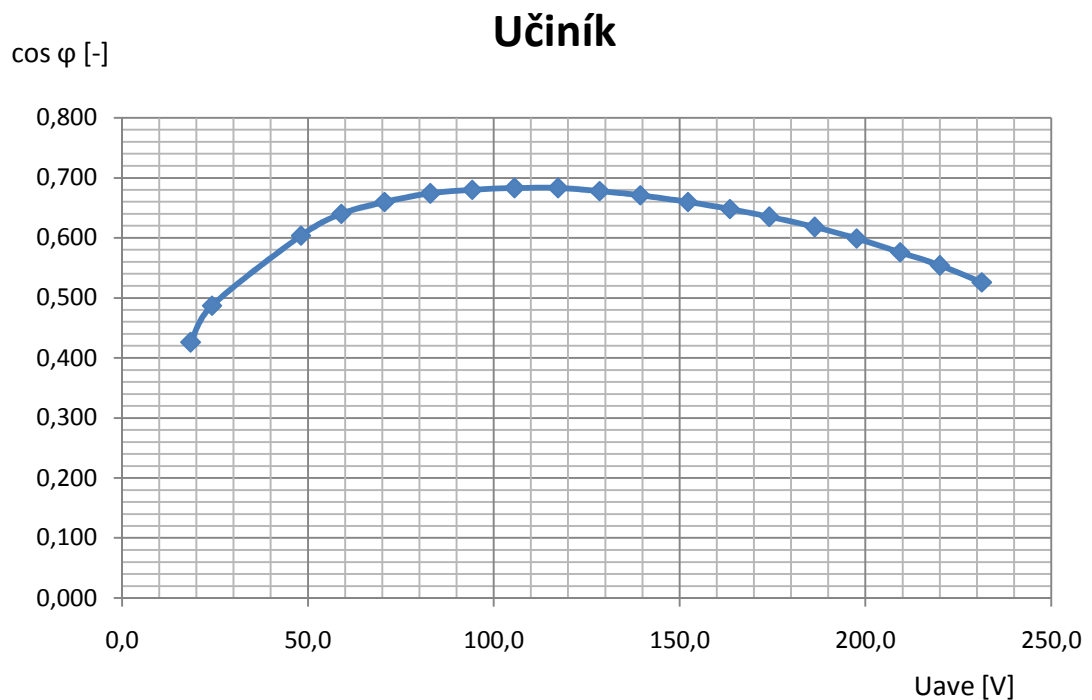
Tabulka 12 Převod transformátoru

Výstup	Naměřená hodnota [V]	Un [V]	Převod [-]
48V	59,6	231,3	3,88
80V	91,5	231,3	2,53
92V	105,1	231,3	2,20
100V	115,7	231,3	2,00
110V	126,8	231,3	1,82
220V	434,7	231,3	0,53

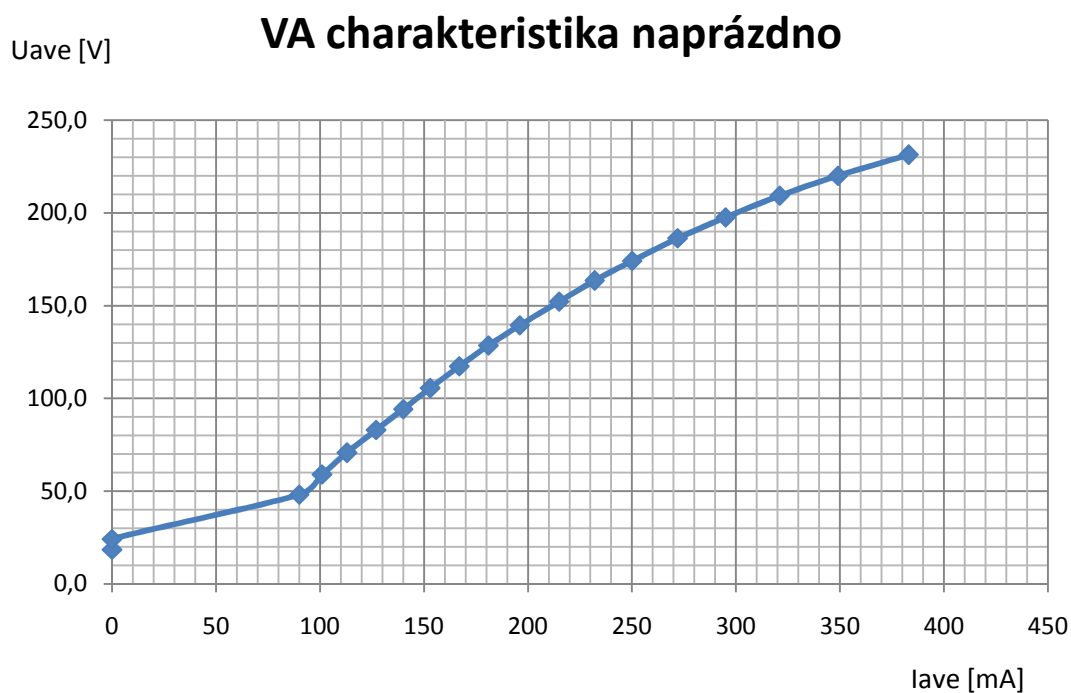
Výpočet převodu podle vztahu.

$$P_U = \frac{U_N}{U_{48V}} = \frac{231,3}{59,6} = 3,88 \quad (5)$$

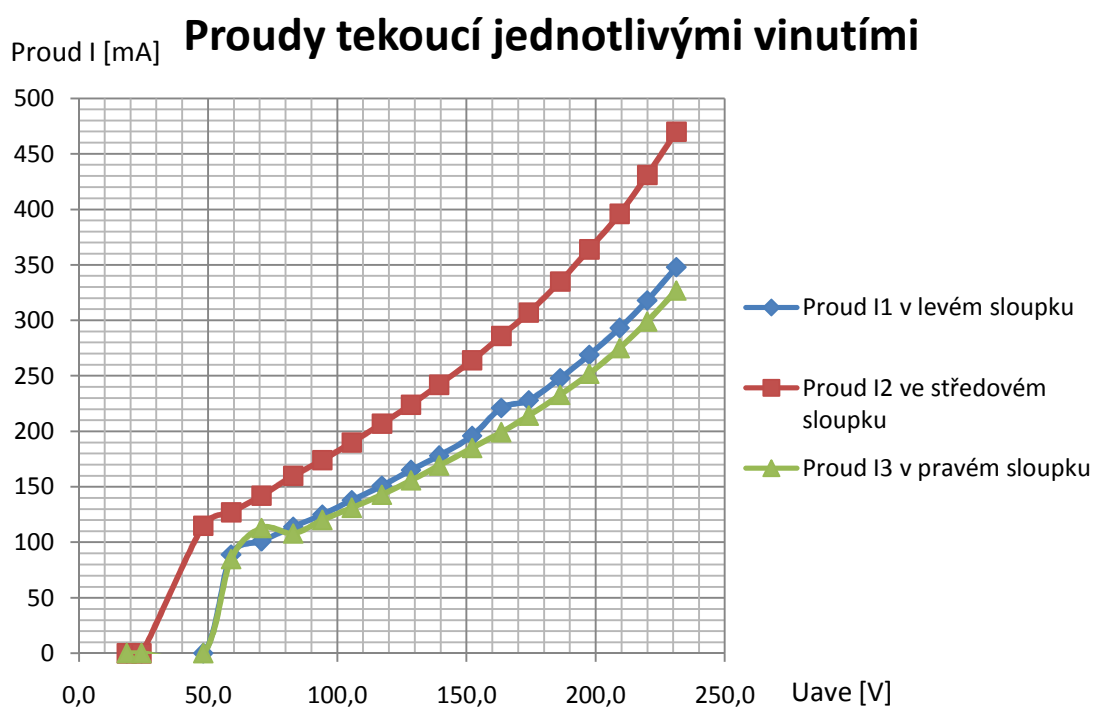
Zde jsem zjistil převod jednotlivých odboček. Na napětových výstupech 48/80/92/100 a 110V je napětí, které jsem očekával. Je o něco vyšší, než by mělo být, ale to je způsobeno díky chodu naprázdno. Ale výstup, který je označen jako výstup na 220 V, je ve skutečnosti výstupem pro 400 V sdruženého napětí a ne fázového napětí.



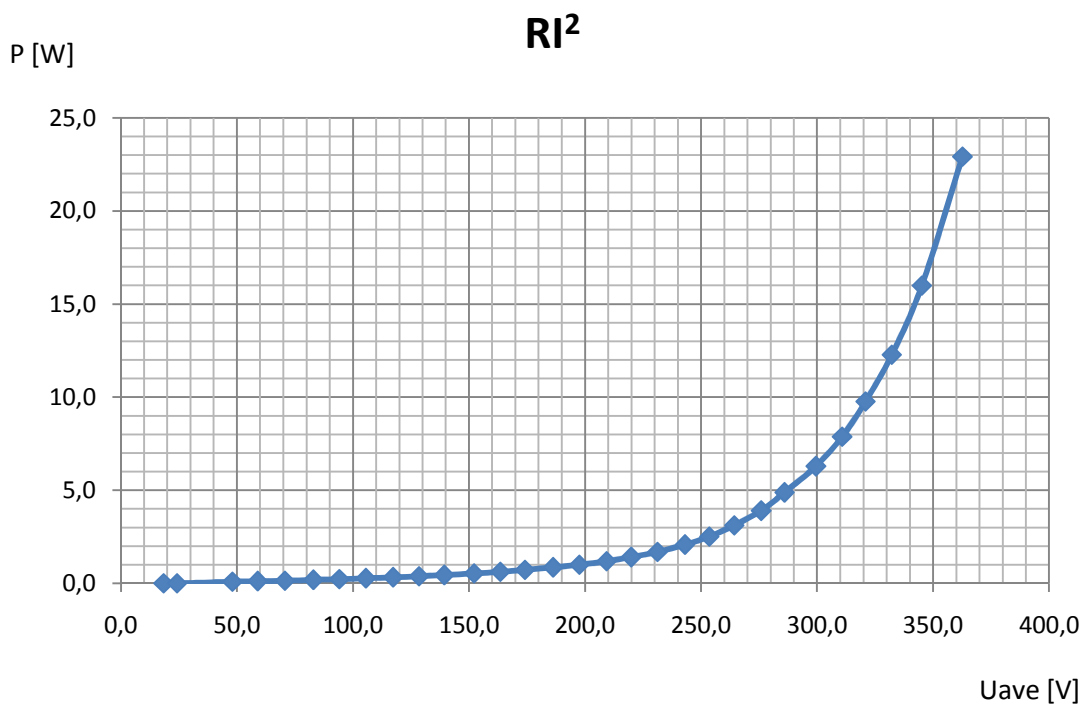
Obrázek 7 Účíník prvního transformátoru při chodu naprázdno



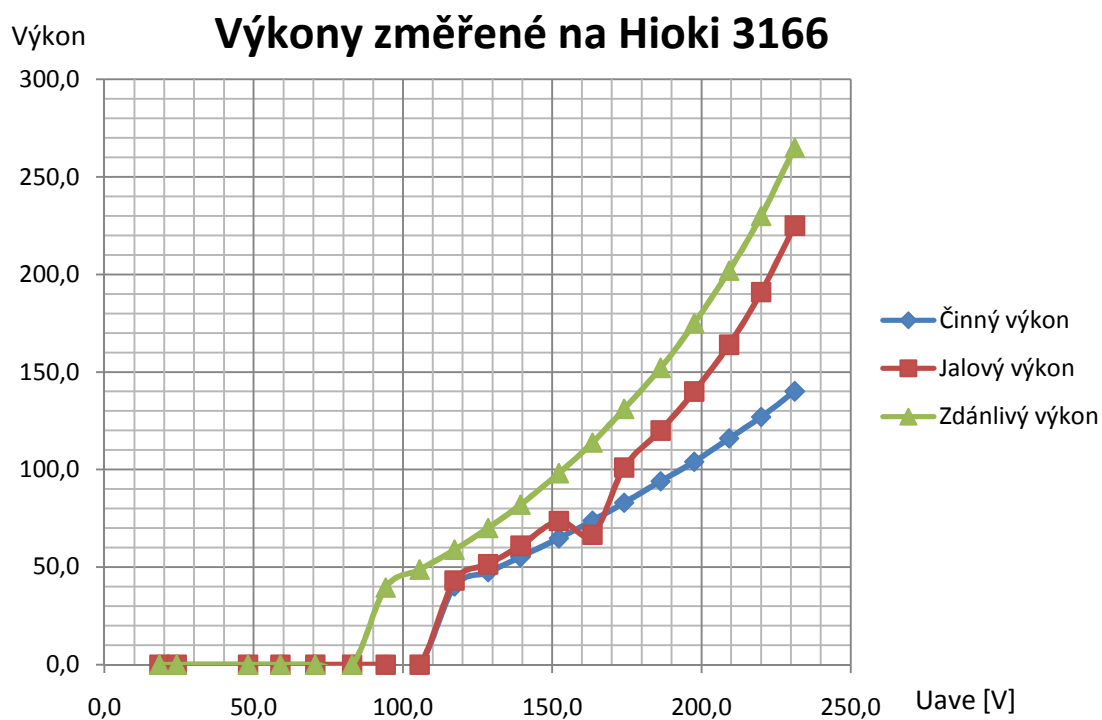
Obrázek 8 VA charakteristika prvního transformátoru naprázdno



Obrázek 9 Proudy tekoucí jednotlivými vinutími prvního transformátoru naprázdno



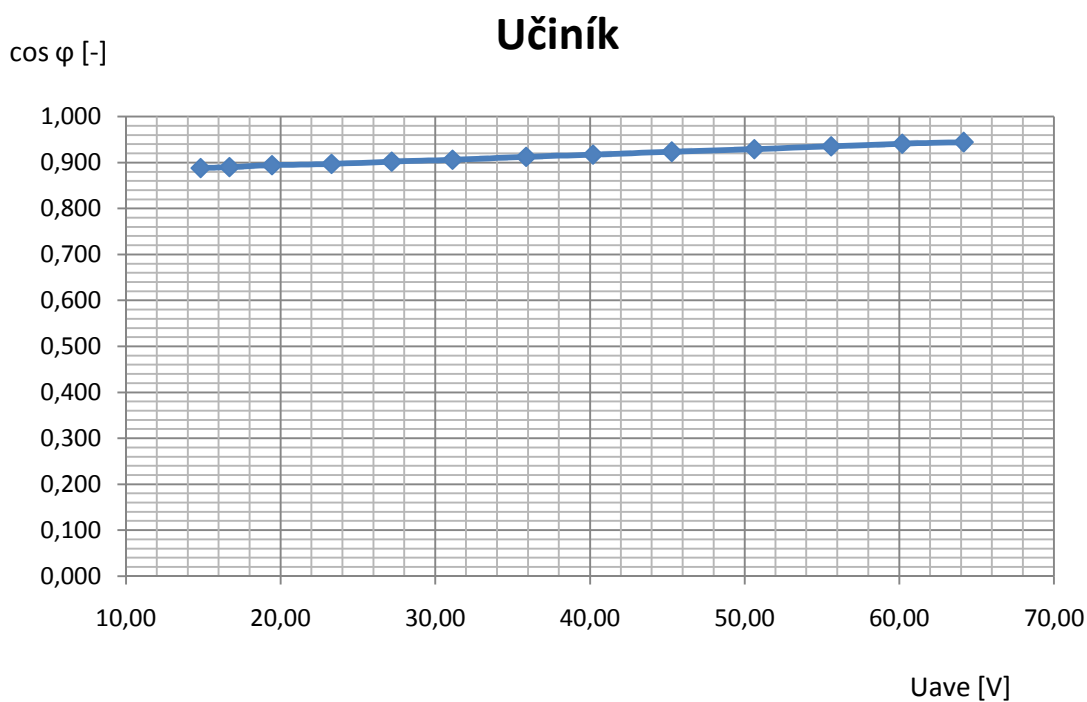
Obrázek 10 Jauleovy ztráty naprázdno prvního transformátoru



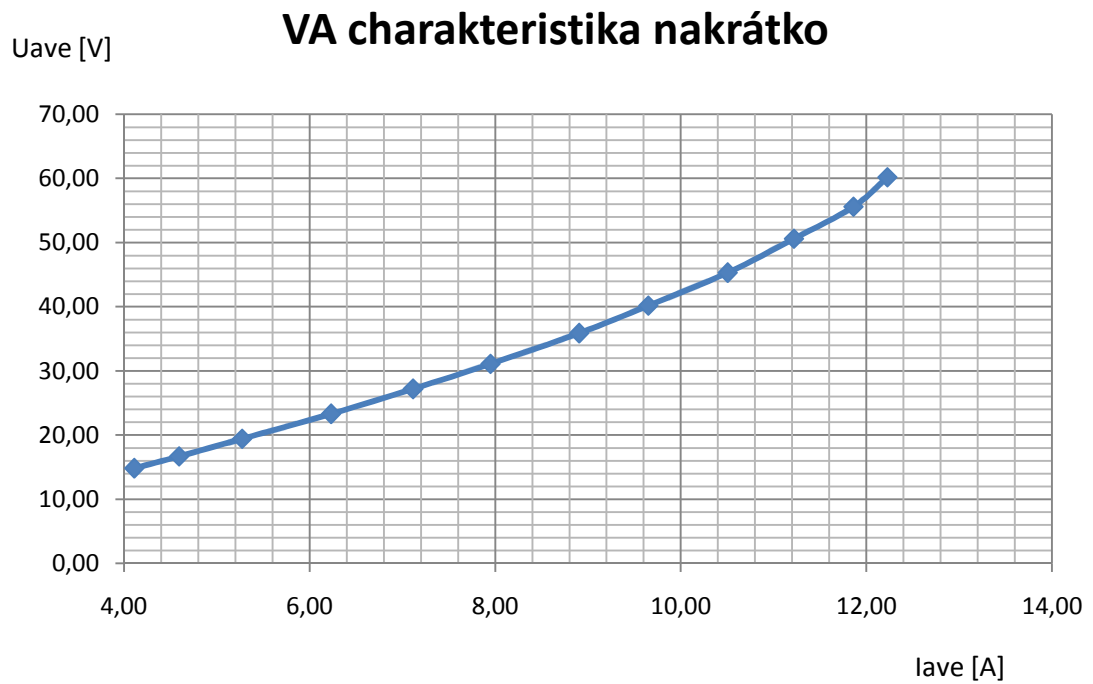
Obrázek 11 Výkony prvního transformátoru naprázdno - činný, jalový a zdánlivý

### 3.2 Měření napětí nakrátko a ztrát nakrátko na prvním transformátoru

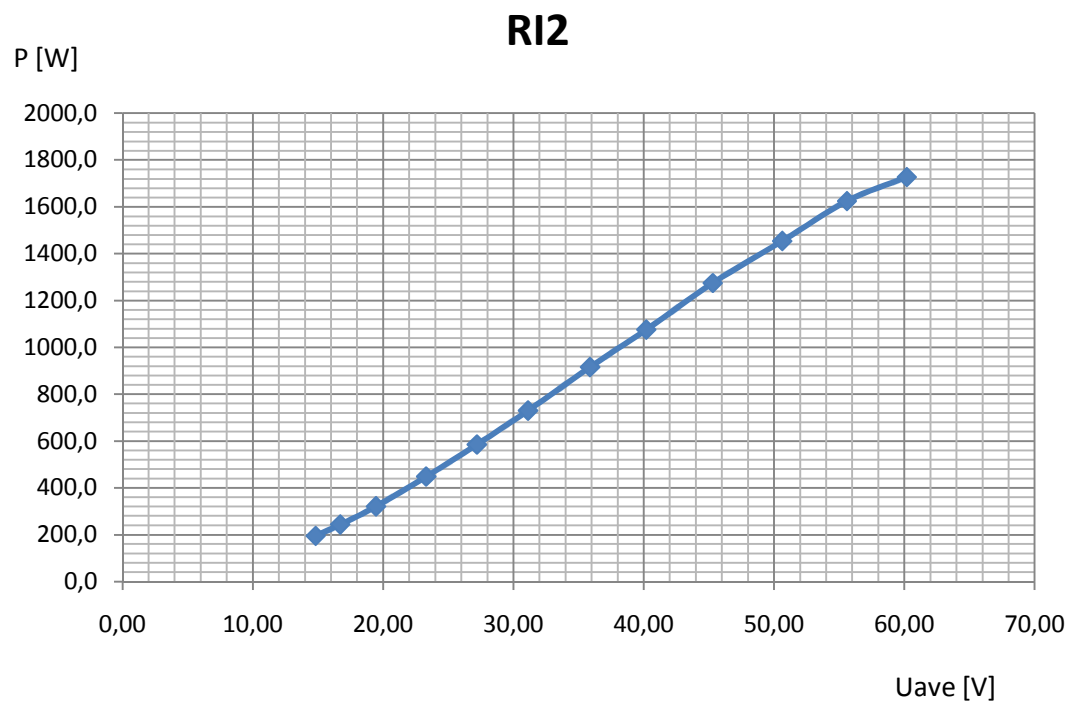
Dále jsem měřil podle ČSN IEC 60076-11 napětí a ztráty nakrátko. Na vstupu bylo použito zařízení Hioki 3166. Tabulka naměřených hodnot se nachází v příloze B. Obslužný pult T108 dokázal dodat nejmenší napětí 14,8 V. Od této hodnoty jsem začal měřit. Transformátor se při proudu  $I_{ave} = 12,75 \text{ A}$  začal značně přehřívat a měření jsem raději ukončil. V měřeních až na jmenovitý proud  $I_N = 17,39 \text{ A}$  jsem dále již nepokračoval.



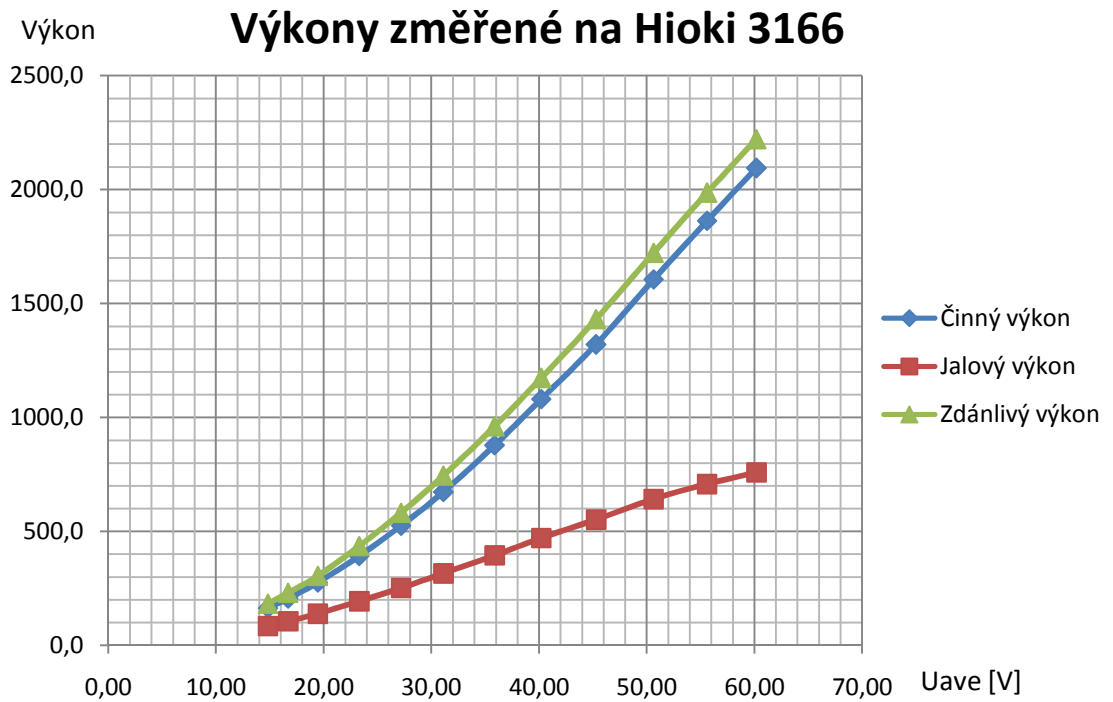
Obrázek 12 Účíník prvního transformátoru nakrátko



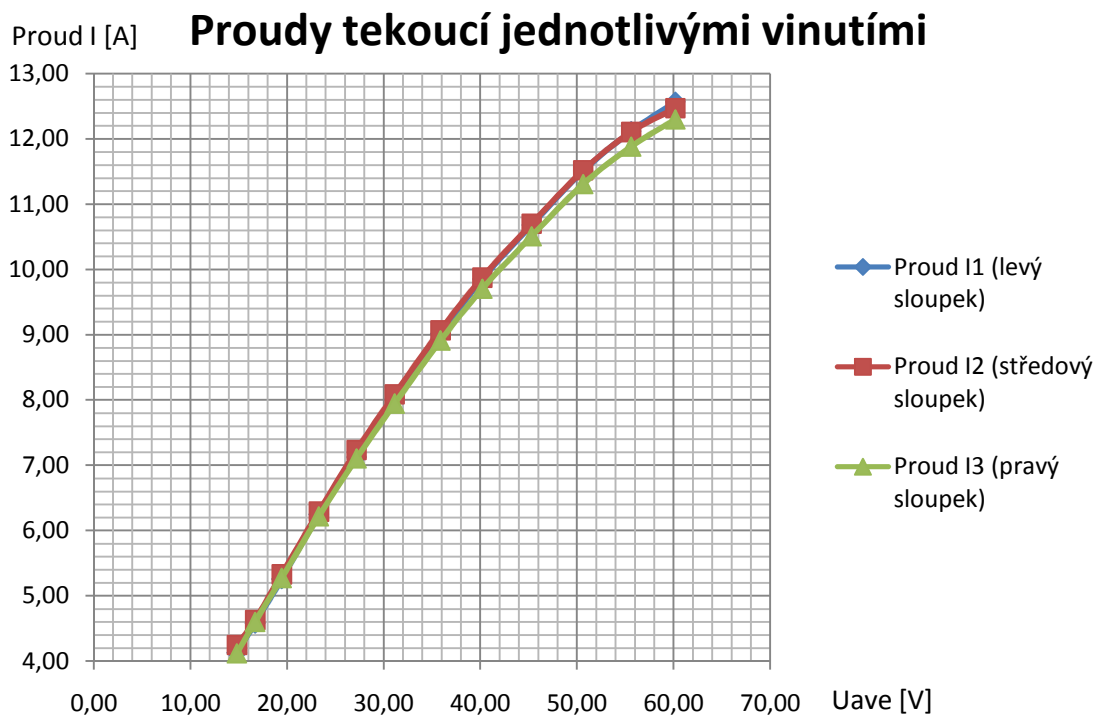
Obrázek 13 VA charakteristika prvního transformátoru nakrátko



Obrázek 14 Jauleovy ztráty prvního transformátoru nakrátko



Obrázek 15 Výkony prvního transformátoru nakrátko - činný, jalový a zdánlivý



Obrázek 16 Proudy tekoucí jednotlivými vinutími prvního transformátoru nakrátko



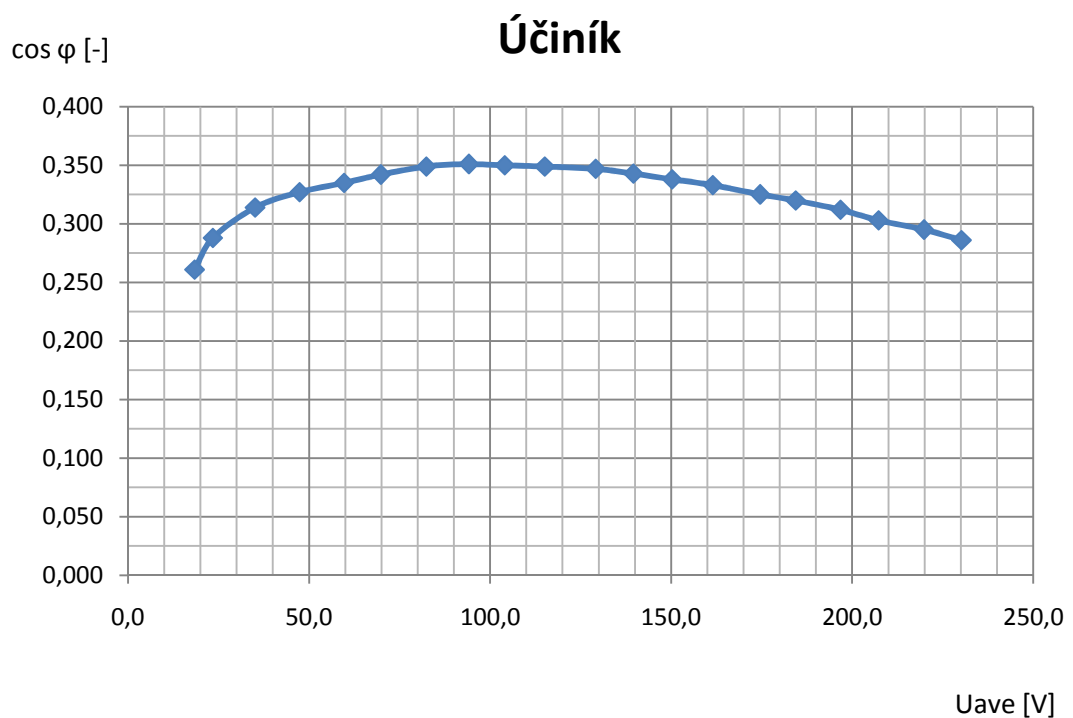
### 3.3 Měření proudu naprázdno, ztrát naprázdno a převodu na druhém transformátoru

Tabulka naměřených hodnot je v příloze B, zde jsou uvedeny jen grafy. Měření se provádělo se stejnými měřicími přístroji jako na prvním transformátoru a též se postupovalo podle stejné metody měření.

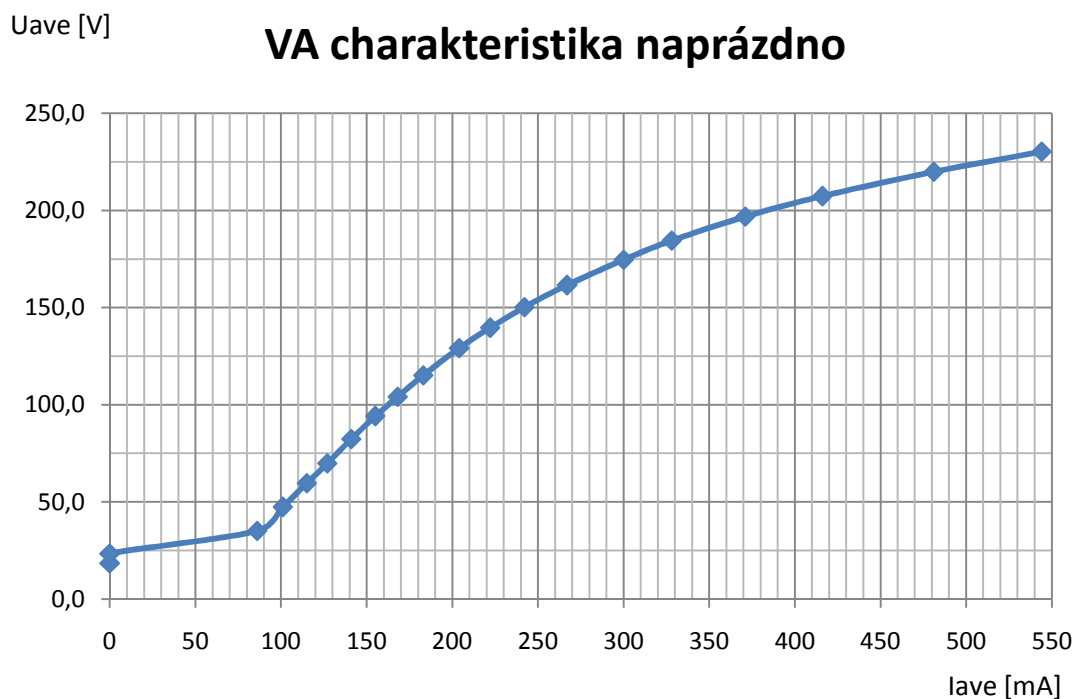
Tabulka 13 Měření převodu druhého transformátoru při napájení sdruženým napětím 400 V

Výstup	Naměřená hodnota [V]	U <sub>ave</sub> [V]	Převod [-]
z1	303,1	230,2	0,76
z2	273,7	230,2	0,84
z3	246	230,2	0,94

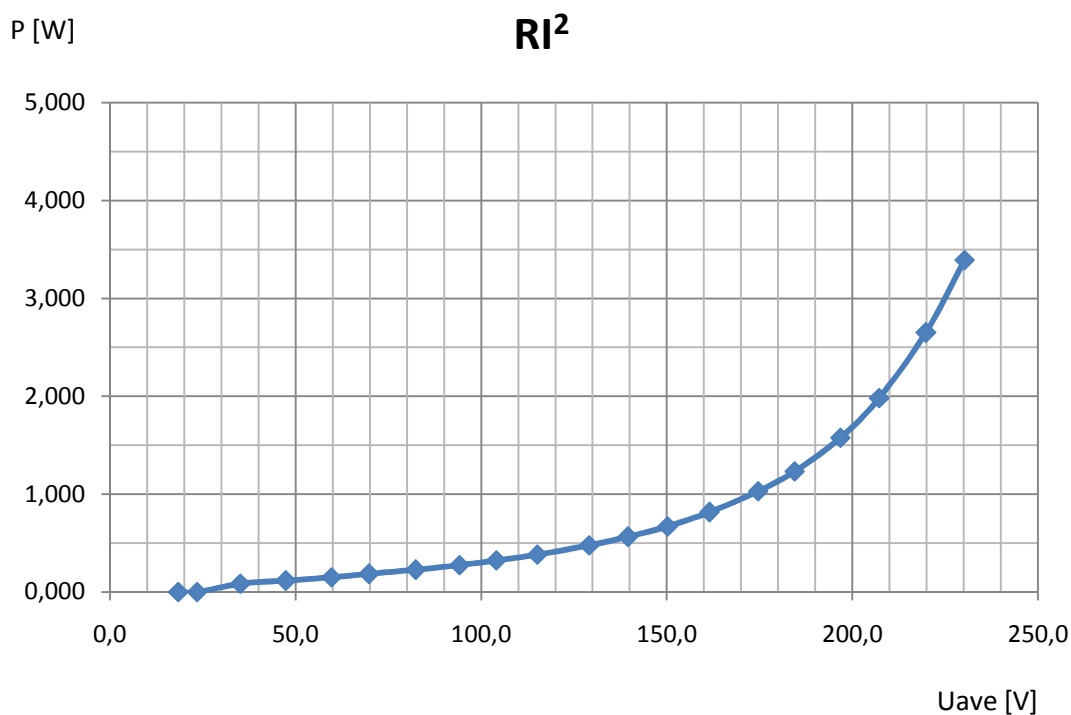
Hodnoty jsou vypočítané pomocí vztahu (5).



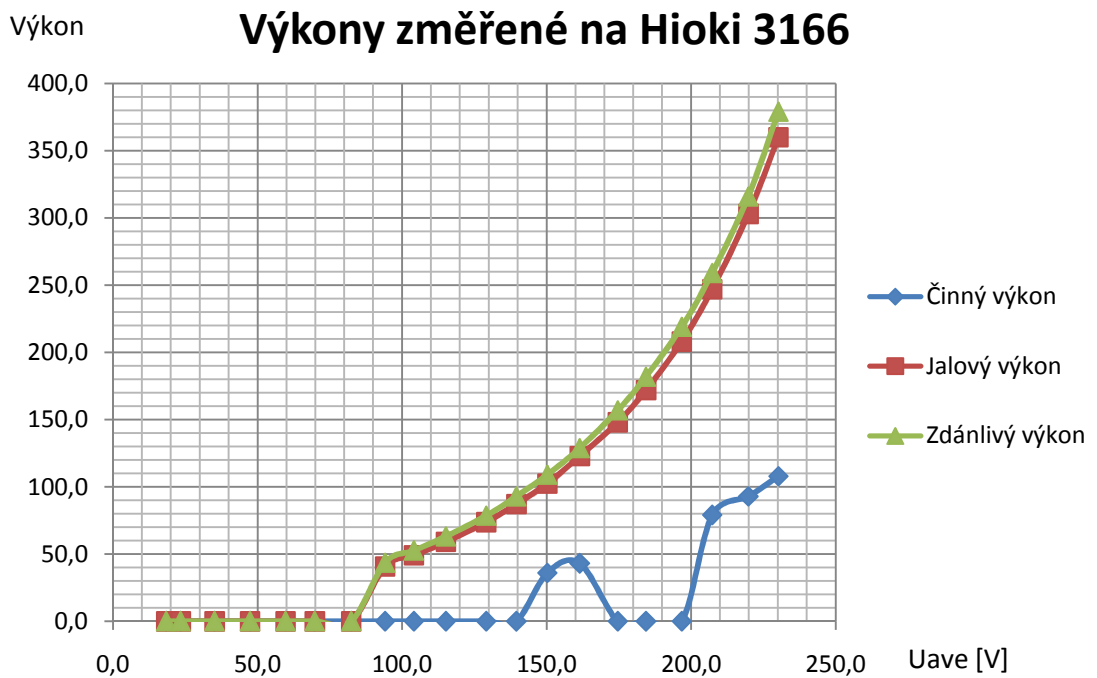
Obrázek 17 Účinník druhého transformátoru naprázdno



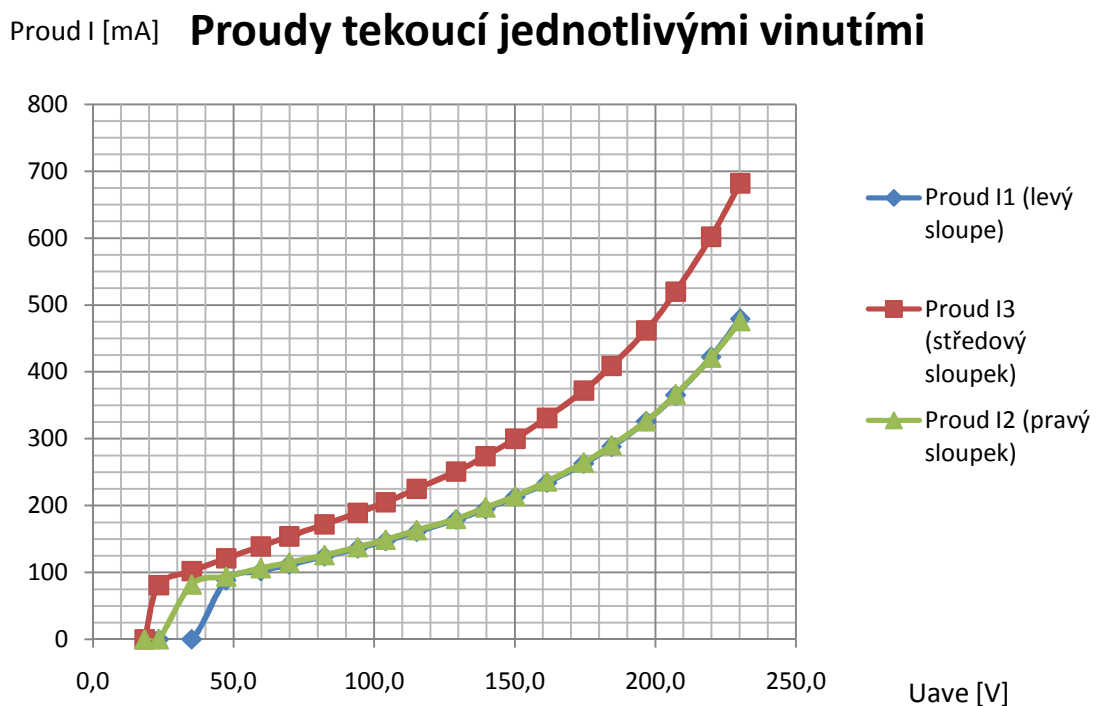
Obrázek 18 VA charakteristika druhého transformátoru naprázdno



Obrázek 19 Jouleovy ztráty druhého transformátoru naprázdno



Obrázek 20 Výkony druhého transformátoru naprázdno - činný, jalový a zdánlivý

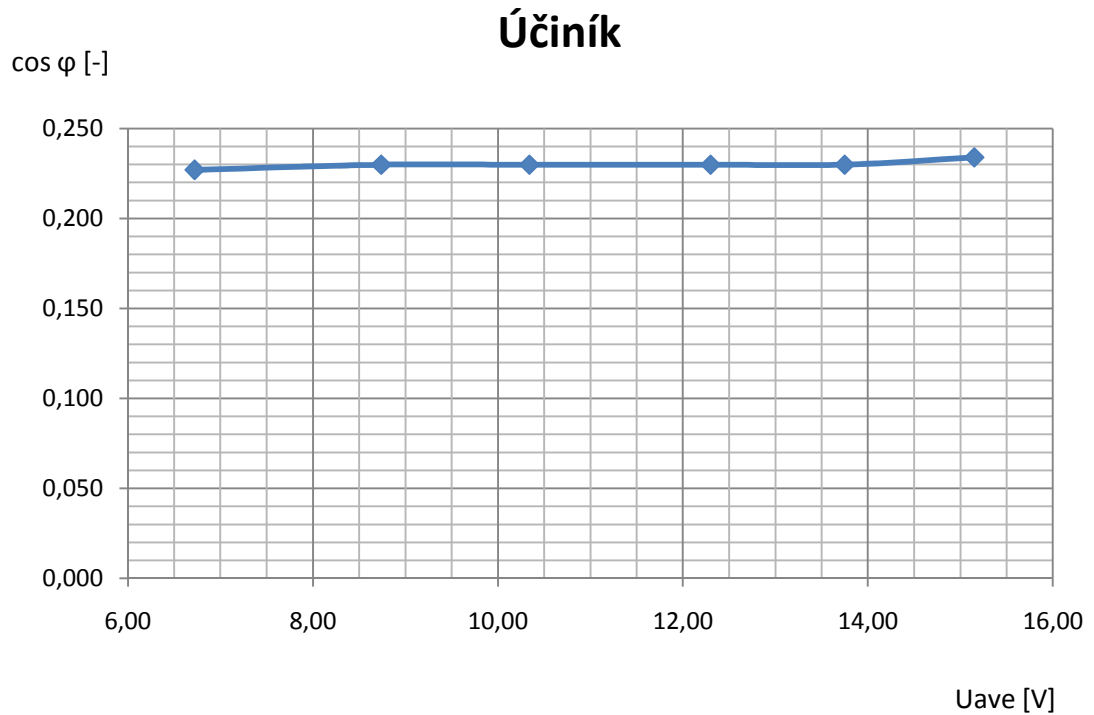


Obrázek 21 Proudy tekoucí jednotlivými vinutími druhého transformátoru naprázdno

Propad činného výkonu, na hodnotu 0 W při hodnotách napětí 175 V až 197 V, je způsoben změnou rozsahu měřicího přístroje a přesnosti Hioki 3166.

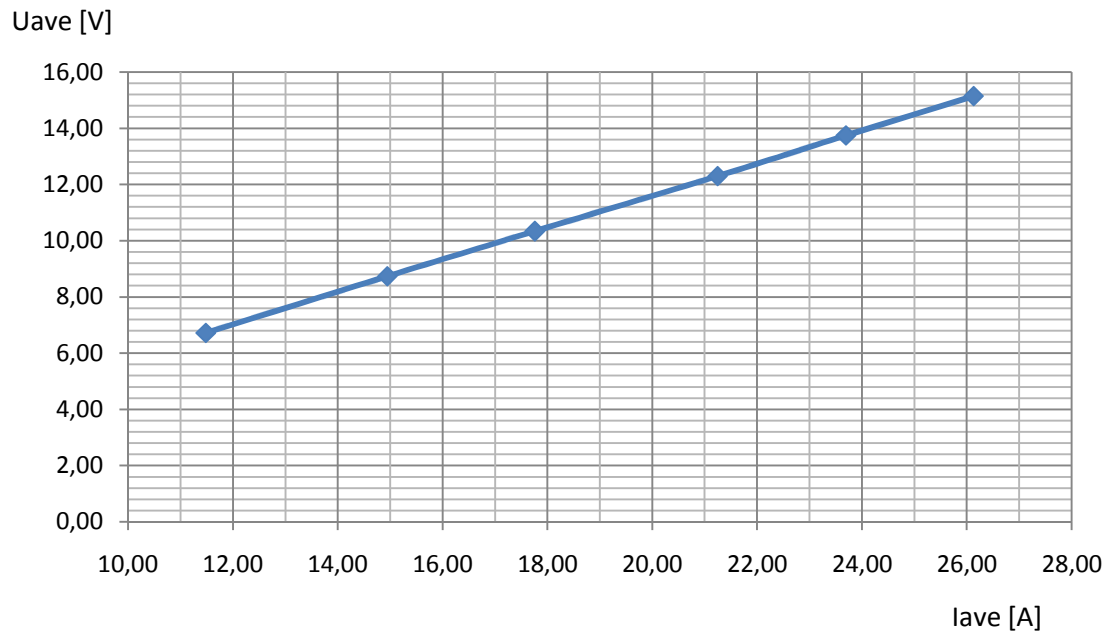
### 3.4 Měření napětí nakrátko a ztrát nakrátko na druhém transformátoru

Provádělo se na stejných přístrojích a metodou jako u prvního transformátoru, tabulku naměřených hodnot naleznete v příloze C.



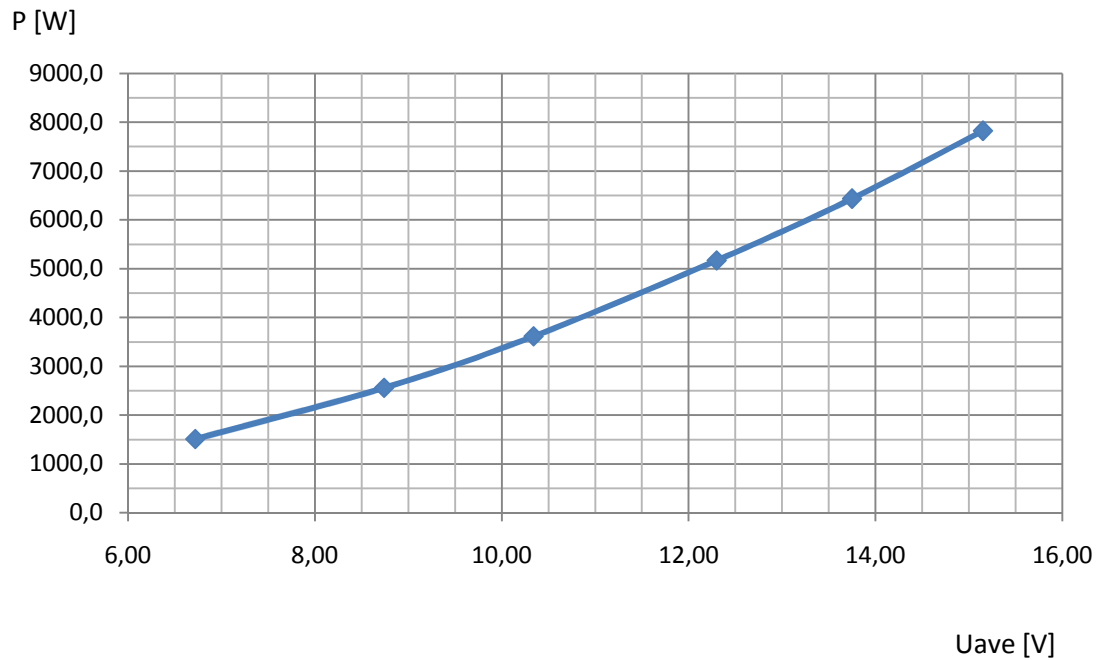
Obrázek 22 Účíník druhého transformátoru nakrátko

## AV charakteristika nakrátko

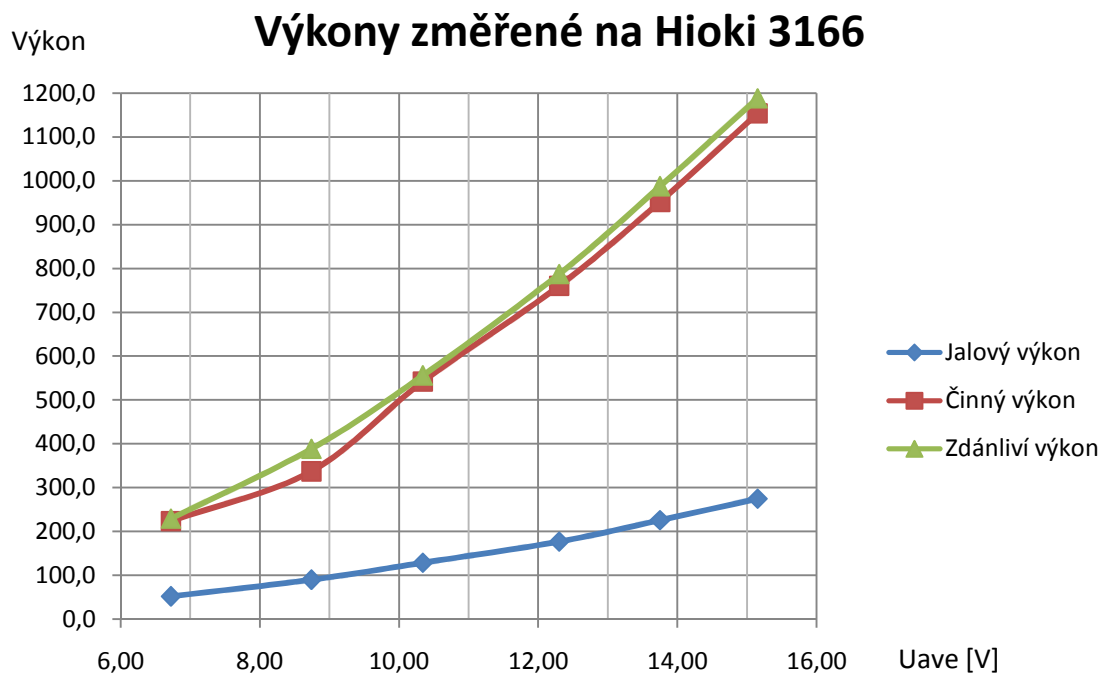


Obrázek 23 VA charakteristika druhého transformátoru nakrátko

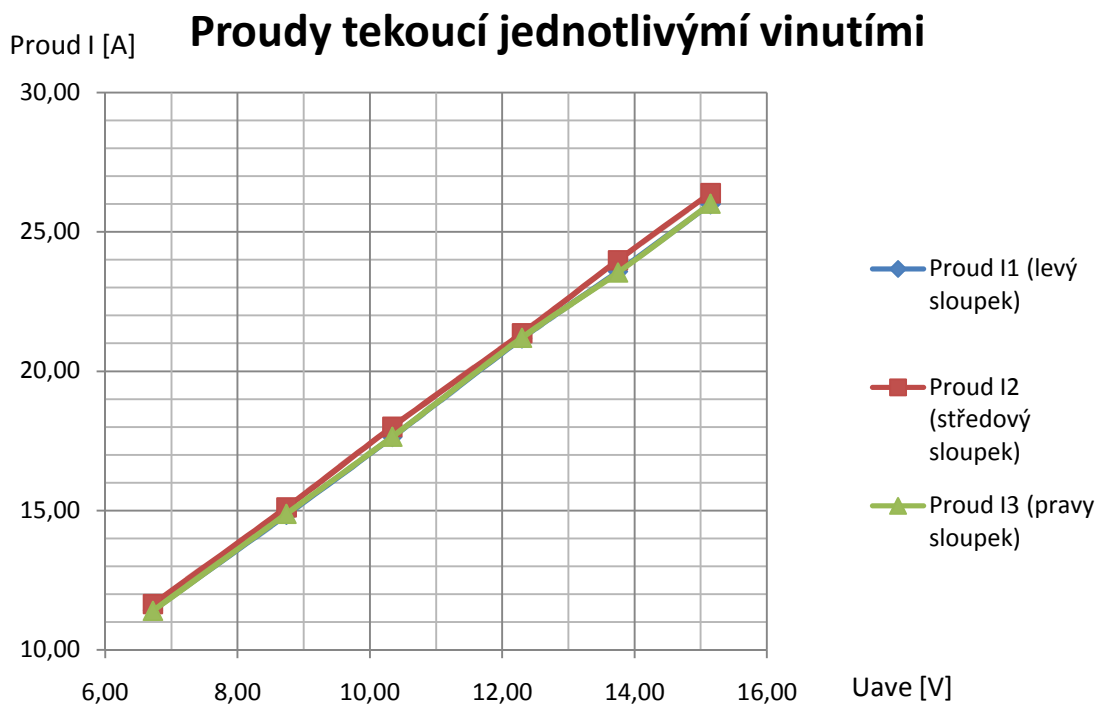
## $RI^2$



Obrázek 24 Jauleovy ztráty druhého transformátoru nakrátko



Obrázek 25 Výkony druhého transformátoru nakrátko - činný, jalový a zdánlivý



Obrázek 26 Proudy tekoucí jednotlivými vinutími druhého transformátoru nakrátko

Na druhém transformátoru jsem při měření nakrátko neměl žádný problém dosáhnout jmenovitého proudu tak jak se mi stalo při měření u prvního transformátoru.

### 3.5 Vyhodnocení

Vyhodnocení prvního a druhého transformátoru z provedených měření.

První transformátor při měření naprázdno prokázal funkčnost při napětí 400/230 V. Takže transformátor bez problému vydrží provozní napětí 380/220 V. Během měření nakrátko při naměřeném proudu  $I_1 = 12,75 A$  se začal značně přehřívat. Transformátor by měl snést jmenovitý proud  $I_N = 17,39 A$ , ale to se nestalo. Při zdánlivém výkonu  $S = 2430 VA$  a činném výkonu  $P = 2294 W$  se nedokázal dostatečně chladit.



Obrázek 27 Foto prvního transformátoru při měření

Druhý transformátor při měření naprázdno též vydržel použité napětí 400/230 V. Při měření nakrátko bylo dosaženo vypočítaného jmenovitého proudu  $I_N = 23,9 A$ . Tento transformátor měl zdánlivý výkon  $S = 1188 VA$  a činný výkon  $P = 1154 W$ .

### Závěr vyhodnocení.

První transformátor lze zařadit do výuky, ale pouze s následujícím omezením při měřeních: při použití vstupního napětí 380/220 V je nutno omezit maximální tekoucí vstupní proud na 10 A!

Druhý transformátor lze zařadit do výuky bez omezení. Vstupní napětí 380/220 V a jmenovitý proud do 24 A.

## 4 Z měření vyhodnotěte parametry náhradních schématů daných transformátorů

V této kapitole se budu zabývat výpočty prvků z náhradního schématu zapojení transformátoru. Výpočty budu provádět z naměřených hodnot a referenční hodnoty si určím pro napětí 400/230 V. Použiji pro výpočet následující vztahy:

Impedance transformátoru naprázdno

$$Z_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}} [\Omega] \quad (6)$$

Účinitk naprázdno

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{10}}{\sqrt{3} * U_{1N} * I_{10}} [-] \quad (7)$$

Odpor železa představující ztráty magnetizační a vířivé v chodu naprázdno

$$R_{Fe} = \frac{Z_0}{\cos \varphi_0} [\Omega] \quad (8)$$

Magnetizační reaktance

$$X_\mu = \frac{Z_0}{\sin \varphi_0} [\Omega] \quad (9)$$



Proud naprázdno vyjádřený v procentním zastoupení proudu jmenovitého

$$i_{0\%} = \frac{I_{10}}{I_{1N}} * 100\% [-] \quad (10)$$

Tyto vztahy uplatním pro změřené hodnoty naprázdno. Následující vztahy uplatním na změřené hodnoty nakrátko, abych mohl vypočítat hodnoty parametrů do náhradního schématu transformátoru.

Impedance transformátoru nakrátko

$$Z_k = \frac{U_{1k}}{I_{1k}} [\Omega] \quad (11)$$

Účinit nakrátko

$$\cos \varphi_k = \frac{P_{1k}}{\sqrt{3} * U_{1k} * I_{1N}} [-] \quad (12)$$

Reaktance nakrátko

$$X_k = Z_k * \sin \varphi_k [\Omega] \quad (13)$$

Rozptylová reaktance primárního vinutí

$$X_{\sigma 1} = \frac{X_k}{2} [\Omega] \quad (14)$$

Rozptylovou reaktanci sekundárního vinutí vypočteme pomocí těchto vztahů

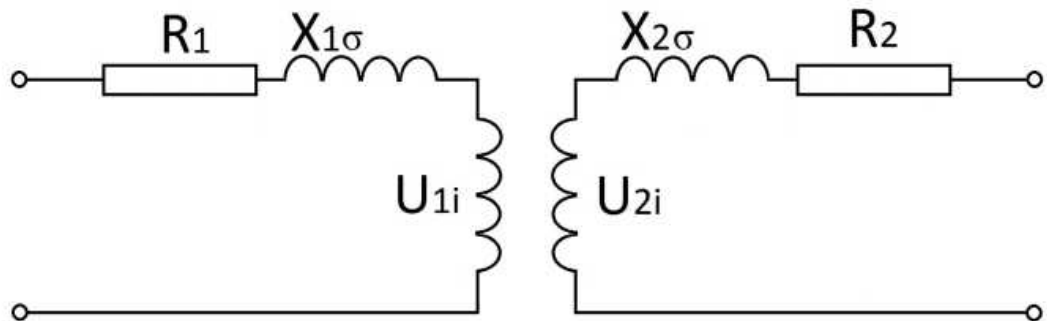
$$X_{\sigma 1} = X_{\sigma 2'} [\Omega] \quad (15)$$

$$X_{\sigma 2} = \frac{X_{\sigma 2'}}{P_U^2} [\Omega] \quad (16)$$

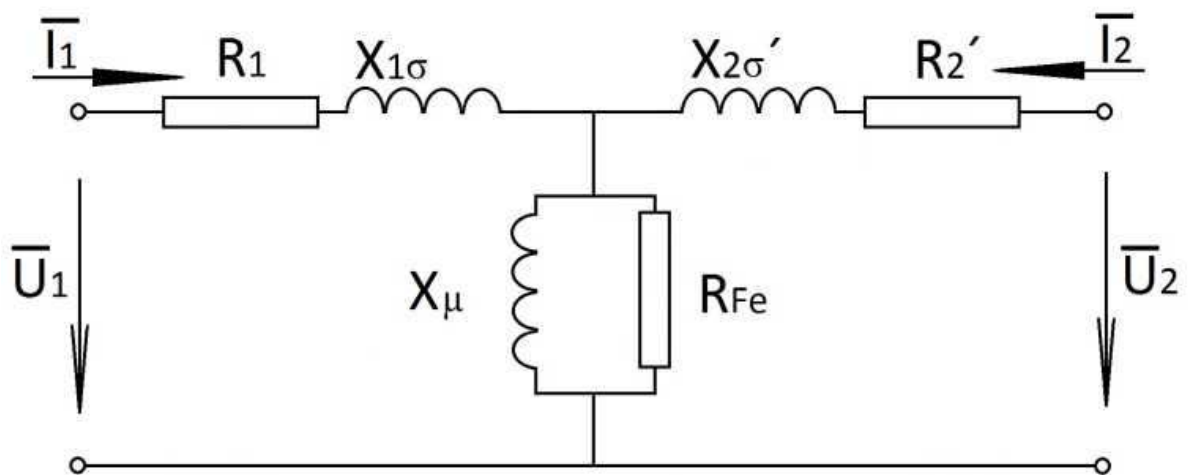
Procentní napětí nakrátko vyjádřené z jmenovitého napětí

$$u_{k\%} = \frac{U_{1k}}{U_{1N}} * 100\% [-] \quad (17)$$

Výše vyjmenované vztahy uplatním pro výpočet hodnot prvků v náhradním schématu transformátoru.



Obrázek 28 Vnitřní znázornění transformátoru



Obrázek 29 Náhradní schéma transformátoru

#### 4.1 Vyhodnocení parametrů prvního transformátoru

Měření naprázdno, zde použijí vztahy 6 až 10.

$$Z_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}} = \frac{231,3}{0,383} = 603,91 \Omega \quad (6)$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{10}}{\sqrt{3} * U_{1N} * I_{10}} = \frac{140}{\sqrt{3} * 213,3 * 0,383} = 0,912 \quad (7)$$

$$R_{Fe} = \frac{Z_0}{\cos \varphi_0} = \frac{603,91}{0,912} = 661,77 \Omega \quad (8)$$

$$X_\mu = \frac{Z_0}{\sin \varphi_0} = \frac{603,91}{0,409} = 1475,61 \Omega \quad (9)$$

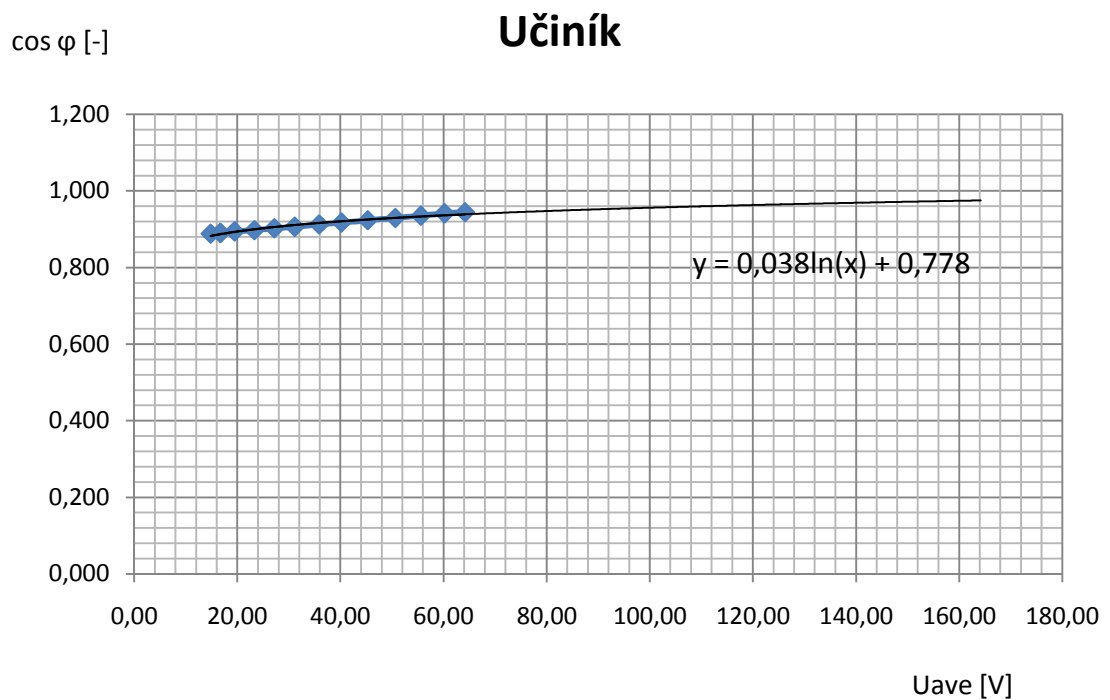
$$i_{0\%} = \frac{I_{10}}{I_{1N}} * 100\% = \frac{0,383}{18,18} * 100\% = 2,106 \quad (10)$$

Měření nakrátko, zde použijí vztahy 11 až 18. Výpočet je uvedený pro odbočku 48 V.  $U_{1k}$  je určeno v příloze B.

$$Z_k = \frac{U_{1k}}{I_{1k}} = \frac{83,77}{18,18} = 4,81 \Omega \quad (11)$$

$$\cos \varphi_k = \frac{P_{1k}}{\sqrt{3} * U_{1k} * I_{1N}} = 0,966 \quad (12)$$

Hodnotu  $\cos \varphi_k = 0,966$  jsem zvolil podle proložení logaritmické funkce průběhu v grafu účinníku.



Obrázek 30 Účíník proložený logaritmickou funkcí, pro zjištění účíníku pro napětí 143,5 V

Přímka regrese má tvar  $\cos \varphi_k = 0,038 \ln(U_{1k}) + 0,778 = 0,038 \ln(143,5) + 0,778 = 0,966$ .

$$X_k = Z_k * \sin \varphi_k = 4,81 * 0,239 = 1,24 \Omega \quad (13)$$

$$X_{\sigma 1} = \frac{X_k}{2} = \frac{1,24}{2} = 0,622 \Omega \quad (14)$$

$$X_{\sigma 1} = X_{\sigma 2'} = 0,622 \Omega \quad (15)$$

$$X_{\sigma 2} = \frac{X_{\sigma 2'}}{P_U^2} = \frac{0,622}{3,88^2} = 0,041 \Omega \quad (16)$$

$$u_{k\%} = \frac{U_{1k}}{U_{1N}} * 100\% = \frac{83,77}{231,3} * 100\% = 36,21 \quad (17)$$

Tabulka 14 Dypočtené hodnoty pro ostatní odbočky v prvním transformátoru

Větev	k	$R_1$	$X_{\sigma 1}$	$R_2$	$X_{\sigma 2}$
48V	3,88	11,550	0,623	11,450	0,041
80V	2,53	11,550	0,623	11,480	0,097
92V	2,20	11,550	0,623	11,490	0,129
100V	2,00	11,550	0,623	11,500	0,156
110V	1,82	11,550	0,623	11,510	0,187
220V	0,53	11,550	0,623	11,530	2,199

## 4.2 Vyhodnocení parametrů druhého transformátoru

Měření naprázdno, zde použijí vztahy 6 až 10, jako u prvního transformátoru.

Tabulka 15 Vypočtené hodnoty pro druhý transformátor z měření naprázdno

$Z_0$ ( $\Omega$ )	423,2353
$\cos \varphi_0$ (-)	0,286
$R_{Fe}$ ( $\Omega$ )	1479,844
$X_\mu$ ( $\Omega$ )	441,6846
$i_{0\%}$ (-)	2,346

Měření nakrátko, zde použijí vztahy 11 až 18, stejně jako u prvního transformátoru.

Tabulka 16 Vypočtené hodnoty pro druhý transformátor z měření nakrátko

Výstup	k	$R_1$	$X_{\sigma 1}$	$R_2$	$X_{\sigma 2}$
z1	0,76	11,460	0,282	11,323	0,488
z2	0,84	11,460	0,282	11,343	0,399
z3	0,94	11,460	0,282	11,356	0,319

Procentní napětí nakrátko vyšlo  $u_{k\%} = 6,58$ .

## Závěr

V první části své bakalářské práce jsem se seznámil s normou ČSN EN 60076. Touto normou jsem se řídil při většině měření. Norma předepisuje mimo jiné také zkoušky pro suché transformátory, které chci znovu zavést do provozu nebo výuky.

Ve druhé části jsem provedl diagnostiku transformátorů, kde jsem zjistil jejich vnitřní zapojení vinutí. První transformátor měl na sobě výrobní štítek, takže potřebné jmenovité hodnoty k práci jsem ze štítku vyčetl. Vstupní jmenovité napětí 380 V, zdánlivý výkon 12000 VA a dále jsem dopočítal už jen jmenovitý fázový proud o hodnotě 17,39 A. U druhého transformátoru nebyl štítek k dispozici, takže dále jsem postupoval výpočtem jmenovitých hodnot z plochy magnetického obvodu. Konstanta  $C$  byla pomocí porovnání obou transformátorů zvolena na hodnotu 7. Výpočtem jsem dospěl k jmenovitému fázovému proudu 23,9 A a zdánlivému výkonu 16500 VA (díky konstantě  $C$ ) při vstupním napájení 380 V.

V třetí části jsem provedl na transformátorech měření proudů a ztrát naprázdno a měření napětí a ztrát nakrátko. U prvního transformátoru měření naprázdno prošlo v pořádku, snesl napěťové zatížení 400/230 V. Byly naměřeny následující hodnoty: při napětí 230 V byl proud naprázdno 0,383 A. Při měření nakrátko se ale transformátor začal silně zahřívat a měření bylo raději ukončeno. Měření jsem ukončil na proudu 12,57 A. Zbylé hodnoty jsem získal aproximací v grafech. Díky proložení grafu křivkou jsem zjistil přibližnou hodnotu napětí nakrátko 83,77 V a účinník 0,966. Tyto hodnoty budu potřebovat v následující části práce. Při měření na druhém transformátoru jsem se nepotýkal s žádnými komplikacemi a naměřil jsem tyto hodnoty: proud naprázdno 0,544 A při napětí 230 V, napětí nakrátko 15,15 V a účinník při jmenovitém proudu byl 0,243. Rozdílnost účinníků obou transformátorů je dána jejich konstrukcí, takže se nedají mezi sebou srovnávat.

Ve čtvrté části jsem provedl výpočty z naměřených hodnot. Pomocí výše uvedených vztahů (6 až 17) jsem získal hodnoty prvků pro náhradní zapojení transformátorů.

U prvního transformátoru vyplývá z naměřených hodnot, že je to měkký zdroj. Prokazuje vysoké napětí nakrátko při jmenovitém proudu. Obstál v izolační zkoušce při napájecím

napětí 400/230 V. Provoz na konstrukční napětí 380/220 V bude bezpečný. Díky neschopnosti se dobře chladit, by jsem omezil napájecí fázový proud na hodnotu 10 A. Tuto hodnotu jsem určil z obrázku 16. Proud do hodnoty 10 A má lineární nárůst, ale pak se charakteristika láme a už nemá lineární průběh. Do provozu nebo výuky by jsem transformátor zavedl, ale pouze s výše uvedeným omezením proudů.



Obrázek 31 Foto prvního transformátoru

U druhém transformátoru vyplývá z naměřených hodnot, že je to tvrdý zdroj napětí, má nízké napětí nakrátko. Provozní napětí, na které byl zkonstruován 380/220 V, snese. Při jmenovitém proudu 24 A se transformátor dostatečně chladí. Tento transformátor bych zařadil do provozu nebo výuky bez omezení.



Obrázek 32 Foto druhého transformátoru



## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MENTLÍK, Václav a TRNKA, Pavel. *Diagnostika elektrických zařízení.* vyd. BEN - technická literatura, Praha 2008. 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9
- [2] BARTOŠ, Václav a SKALA, Bohumil. *Měření na elektrických strojích.* 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. 109 s.
- [3] BAŠTA, Jan. *Měření na elektrických strojích. 2, Měření na transformátorech.* vyd. 1. Praha: SNTL, 1959. 247 s.
- [4] Normy ČSN. [online]. Dostupné z: <https://csnonline.unmz.cz/>

## Přílohy

### Příloha A - Diagnostika - Měření odporu vinutí - IEC 60076-11 - Měření odporu vinutí stejnosměrným proudem

Hodnoty odporu vinutí pro první diagnostikovaný transformátor.

Tabulka 17 Odporu vinutí výstupní hvězdy s odbočkami na 80/92/100 a 110 V vůči svorce 2.2

Svorka	Proud [A]	Napětí [V]	Odpor vinutí [ $\Omega$ ]
2.1	1	11,48	11,48
2.2	-	-	-
2.3	1	11,48	11,48
3.1	1	11,48	11,48
3.2	1	11,48	11,48
3.3	1	11,48	11,48
4.1	1	11,47	11,47
4.2	1	11,47	11,47
4.3	1	11,47	11,47
5.1	1	11,46	11,46
5.2	1	11,46	11,46
5.3	1	11,46	11,46
6.0	1	11,43	11,43

Tabulka 18 Odporu vinutí výstupní hvězdy s odbočkami na 80/92/100 a 110 V vůči svorce 3.2

Svorka	Proud [A]	Napětí [V]	Odpor vinutí [ $\Omega$ ]
2.1	1	11,46	11,46
2.2	1	11,45	11,45
2.3	1	11,45	11,45
3.1	1	11,44	11,44
3.2	-	-	-
3.3	1	11,44	11,44
4.1	1	11,44	11,44
4.2	1	11,44	11,44
4.3	1	11,44	11,44
5.1	1	11,44	11,44
5.2	1	11,43	11,43
5.3	1	11,43	11,43
6.0	1	11,43	11,43

Tabulka 19 Odporů vinutí výstupní hvězdy s odbočkami na 80/92/100 a 110 V vůči svorce 4.2

Svorka	Proud [A]	Napětí [V]	Odpor vinutí [ $\Omega$ ]
2.1	1	11,44	11,44
2.2	1	11,43	11,43
2.3	1	11,43	11,43
3.1	1	11,42	11,42
3.2	1	11,42	11,42
3.3	1	11,42	11,42
4.1	1	11,42	11,42
4.2	-	-	-
4.3	1	11,42	11,42
5.1	1	11,42	11,42
5.2	1	11,42	11,42
5.3	1	11,42	11,42
6.0	1	11,42	11,42

Tabulka 20 Odporů vinutí výstupní hvězdy s odbočkami na 80/92/100 a 110 V vůči svorce 5.2

Svorka	Proud [A]	Napětí [V]	Odpor vinutí [ $\Omega$ ]
2.1	1	11,41	11,41
2.2	1	11,43	11,43
2.3	1	11,42	11,42
3.1	1	11,42	11,42
3.2	1	11,41	11,41
3.3	1	11,41	11,41
4.1	1	11,40	11,40
4.2	1	11,40	11,40
4.3	1	11,40	11,40
5.1	1	11,40	11,40
5.2	-	-	-
5.3	1	11,40	11,40
6.0	1	11,43	11,43

Tabulka 21 Odporů vinutí výstupní hvězdy na 48 V vůči svorce 7.2

Svorka	Proud [A]	Napětí [V]	Odpor vinutí [ $\Omega$ ]
7.1	1	11,56	11,56
7.3	1	11,55	11,55
7.4	1	11,53	11,53

Tabulka 22 Odporů vinutí výstupní hvězdy na 48 V vůči svorce 7.3

Svorka	Proud [A]	Napětí [V]	Odpor vinutí [ $\Omega$ ]
7.1	1	11,55	11,55
7.2	1	11,53	11,53
7.4	1	11,53	11,53

Tabulka 23 Odporů vinutí výstupní hvězdy na 48 V vůči svorce 7.4

Svorka	Proud [A]	Napětí [V]	Odpor vinutí [ $\Omega$ ]
7.1	1	11,54	11,54
7.2	1	11,54	11,54
7.3	1	-	#HODNOTA!

Hodnoty odporu vinutí pro druhý diagnostikovaný transformátor.

*Tabulka 24 Naměřené hodnoty na vinutí 4 vůči svorce 4.-*

Svorka	Proud [A]	Napětí [V]	Odpor vinutí [ $\Omega$ ]
4.X	1	11,46	11,46
4.Y	1	11,46	11,46
4.Z	1	11,46	11,46

*Tabulka 25 Naměřené hodnoty na vinutí 1 vůči svorce 1.0*

Svorka	Proud [A]	Napětí [V]	Odpor vinutí [ $\Omega$ ]
1.1	1	11,33	11,33
1.2	1	11,32	11,32
1.3	1	11,32	11,32

*Tabulka 26 Naměřené hodnoty na vinutí 2 vůči svorce 2.0*

Svorka	Proud [A]	Napětí [V]	Odpor vinutí [ $\Omega$ ]
2.1	1	11,33	11,33
2.2	1	11,35	11,35
2.3	1	11,35	11,35

*Tabulka 27 Naměřené hodnoty na vinutí 3 vůči svorce 3.0*

Svorka	Proud [A]	Napětí [V]	Odpor vinutí [ $\Omega$ ]
3.1	1	11,34	11,34
3.2	1	11,38	11,38
3.3	1	11,35	11,35

**Příloha B - Měření na prvním transformátoru**

Tabulka 28 Tabulka měření proudu a ztrát naprázdno

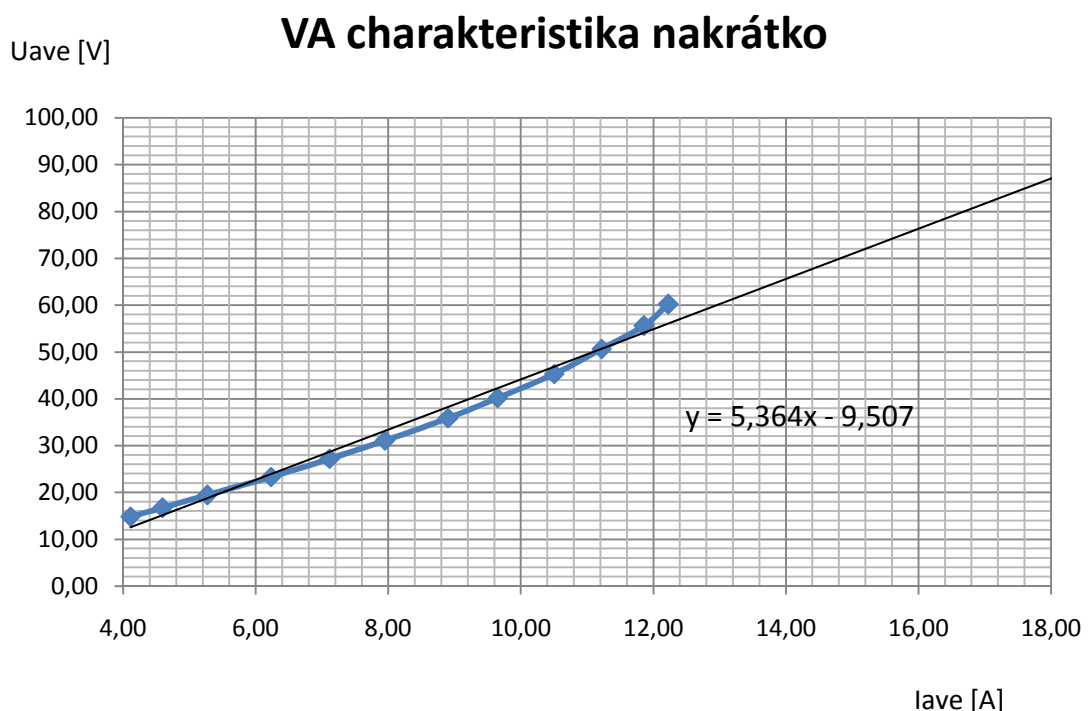
T108	U <sub>ave</sub> [V]	I <sub>ave</sub> [mA]	Výstupy							účinník cos φ	P [W]	Q [VAr]	S [VA]	U1 [V]	I1 [mA]	U2 [V]	I2 [mA]	U3 [V]	I3 [mA]
			80V	92V	110V	48V	220V	100V											
0	18,4	0	0,0	0,0	0,0	4,7	34,3	9,2	0,426	0,0	0,0	0,0	18,4	0	18,3	0	18,5	0	
50	24,2	0	0,0	0,0	0,0	6,0	46,1	12,1	0,487	0,0	0,0	0,0	24,0	0	24,2	0	24,3	0	
80	48,1	90	18,7	21,7	26,3	13,8	90,1	23,9	0,604	0,0	0,0	0,0	47,9	0	48,3	115	48,1	0	
100	59,0	101	23,0	26,7	32,2	14,9	110,0	29,3	0,640	0,0	0,0	0,0	58,7	89	59,0	127	58,7	85	
120	70,6	113	27,7	32,0	38,8	17,8	131,6	35,2	0,660	0,0	0,0	0,0	70,7	101	70,7	142	70,4	113	
140	82,9	127	32,4	37,6	45,6	21,0	154,2	41,0	0,674	0,0	0,0	0,0	83,0	114	83,2	160	82,7	108	
160	94,2	140	36,9	42,8	51,6	23,9	174,8	46,8	0,680	0,0	0,0	39,5	94,2	125	94,3	174	93,8	120	
180	105,6	153	41,6	48,0	57,9	27,0	196,8	52,5	0,683	0,0	0,0	48,6	105,8	138	105,9	190	105,4	131	
200	117,3	167	46,1	53,3	64,3	30,0	217,9	58,2	0,683	40,1	43,1	58,8	117,6	151	117,4	207	116,8	143	
220	128,5	181	50,6	58,4	70,5	32,9	239,4	64,1	0,678	47,4	51,4	70,0	128,7	165	128,6	224	128,2	156	
240	139,4	196	54,9	63,4	76,4	35,9	259,8	69,6	0,671	55,2	60,9	82,0	139,7	178	139,4	242	139,3	169	
260	152,2	215	59,9	69,1	83,5	39,0	282,8	75,9	0,660	64,7	73,6	98,0	152,6	196	152,2	264	151,7	185	
280	163,5	232	64,4	74,3	89,5	41,9	304,8	81,8	0,648	73,8	66,6	113,8	163,8	221	163,4	286	162,9	199	
300	174,1	250	68,8	79,3	95,6	44,7	309,7	86,9	0,635	83	101	131	174,7	228	174,0	307	173,5	214	
320	186,3	272	73,4	84,7	102,2	48,0	351,6	93,2	0,618	94	120	152	186,9	248	186,2	335	185,8	233	
340	197,6	295	77,9	90,1	108,6	50,7	370,7	98,6	0,599	104	140	175	198,0	269	197,8	364	197,0	252	
360	209,3	321	82,6	95,4	115,2	54,0	394,9	104,8	0,576	116	164	202	209,8	293	209,4	396	208,5	275	
380	220,0	349	86,8	100,1	120,7	56,6	414,0	110,2	0,554	127	191	230	220,5	318	219,9	431	219,7	299	
400	231,3	383	91,5	105,1	126,8	59,6	434,7	115,7	0,526	140	225	265	231,7	348	230,8	470	230,7	327	

Napětí označované jako T108 je sdružené napětí, ostatní napětí a proudy jsou fázové.

Tabulka 29 Tabulka měření napětí a ztrát nakrátko

U1	I1	U2	I2	U3	I3	P	Q	S	účinník	U <sub>ave</sub>	I <sub>ave</sub>
[V]	[A]	[V]	[A]	[V]	[A]	[W]	[VAr]	[VA]	cos φ	[V]	[A]
14,80	4,13	14,60	4,25	14,98	4,12	162,5	84,4	183,0	0,888	14,82	4,11
16,60	4,58	16,50	4,63	16,86	4,60	205,0	105,0	230,0	0,890	16,70	4,59
19,30	5,26	19,30	5,33	19,59	5,27	275,7	138,5	305,2	0,894	19,45	5,27
23,23	6,25	23,20	6,29	23,30	6,22	391,8	193,0	435,8	0,897	23,30	6,23
27,01	7,13	27,13	7,23	27,26	7,11	524,7	251,7	582,0	0,902	27,19	7,12
30,90	8,01	31,97	8,09	31,13	7,94	673,2	315,4	745,0	0,906	31,12	7,95
35,63	9,01	35,78	9,07	35,80	8,91	877,6	394,9	960,4	0,912	35,88	8,90
39,94	9,85	40,09	9,88	40,21	9,71	1080,2	470,7	1172,2	0,917	40,20	9,65
45,00	10,68	45,20	10,70	45,29	10,51	1320,0	551,2	1431,7	0,923	45,30	10,51
50,22	11,51	50,55	11,52	50,60	11,31	1605,9	641,2	1722,8	0,929	50,63	11,22
55,37	12,12	55,51	12,11	55,42	11,88	1863,2	707,3	1985,6	0,935	55,60	11,86
59,90	12,57	60,08	12,47	59,84	12,30	2094,1	758,4	2220,7	0,941	60,19	12,23

Měření jsem ukončil na hodnotě 12,23 A z důvodu silného zahřívání transformátoru. Průběh VA charakteristiky jsem aproximoval lineární funkcí  $U_{ave} = 5,364I_{ave} - 9,507$ .



Obrázek 33 Lineární aproximace VA charakteristiky

Při proudu  $I_N = 17,39 \text{ A}$  by jsem dostal napětí nakrátko přibližně  $U_{1k} = 83,77 \text{ V}$ .

## Příloha C - Měření na druhém transformátoru

Tabulka 30 Tabulka měření proudu a ztrát naprázdno

T108	U <sub>ave</sub> [V]	I <sub>ave</sub> [mA]	Výstupy měřené vůči Z4			účinník cos $\phi$	P [W]	Q [VAr]	S [VA]	U1 [V]	I1 [mA]	U2 [V]	I2 [mA]	U3 [V]	I3 [mA]
			z1	z2	z3										
30	18,4	0	24,6	22,2	19,9	0,261	0,0	0,0	0,0	18,5	0	18,3	0	18,5	0
40	23,4	0	31,2	28,1	25,1	0,288	0,0	0,0	0,0	23,4	0	23,4	0	23,5	81
60	35,2	86	46,4	42,1	37,6	0,314	0,0	0,0	0,0	35,1	0	35,2	82	35,2	102
80	47,4	101	62,5	56,6	50,7	0,327	0,0	0,0	0,0	47,3	88	47,5	94	47,4	121
100	59,7	115	78,8	71,5	63,9	0,335	0,0	0,0	0,0	59,6	102	59,7	106	59,6	139
120	69,8	127	92,3	83,7	74,7	0,342	0,0	0,0	0,0	69,8	112	69,7	115	69,6	154
140	82,4	141	109,1	99,1	88,3	0,349	0,0	0,0	0,0	82,5	124	82,4	126	82,1	172
160	94,2	155	124,4	112,9	101,0	0,351	0,0	40,9	43,7	94,4	136	94,2	138	93,9	189
180	104,1	168	137,9	125,1	111,9	0,350	0,0	49,2	52,6	104,5	147	104,7	149	103,7	205
200	115,1	183	152,4	138,6	124,7	0,349	0,0	59,2	63,2	115,8	161	115,7	163	115,2	225
220	129,1	204	170,6	154,8	138,2	0,347	0,0	73,8	78,6	129,1	179	128,9	180	128,6	251
240	139,6	222	183,6	168,0	149,8	0,343	0,0	87,3	93,0	139,7	195	139,9	197	139,3	274
260	150,3	242	197,5	180,1	161,1	0,338	36,0	102,5	109,2	150,5	213	150,3	214	150,9	300
280	161,5	267	213,0	194,0	173,2	0,333	43,1	122,9	128,9	162,0	234	161,8	236	161,1	331
300	174,6	300	230,4	209,6	185,3	0,325	0,0	148,0	157	175,1	263	174,4	264	173,6	372
320	184,4	328	242,5	220,0	195,7	0,320	0,0	172,0	182	185,1	288	184,5	290	183,6	409
340	196,8	371	258,1	233,8	209,6	0,312	0,0	208,0	219	197,9	326	196,8	326	196,1	462
360	207,3	416	273,7	247,7	221,7	0,303	79,0	247,0	259	208,8	365	207,4	366	206,3	520
380	219,9	481	289,3	261,5	233,8	0,295	93,0	303,0	316	220,6	422	219,3	421	220,7	602
400	230,2	544	303,1	273,7	246,0	0,286	108,0	360,0	379	231,1	479	230,6	476	229,5	682



Napětí označované jako T108 je sdružené napětí, ostatní napětí a proudy jsou fázové.

Tabulka 31 Tabulka měření napětí a ztrát nakrátko

U1	I1	U2	I2	U3	I3	Q	P	S	účinník	Uave	Iave
[V]	[A]	[V]	[A]	[V]	[A]	[VAr]	[W]	[VA]	cos $\phi$	[V]	[A]
6,75	11,42	6,82	11,40	6,70	11,64	52,0	223,6	229,7	0,227	6,72	11,49
8,79	14,85	8,80	11,88	8,70	15,11	89,8	337,4	389,0	0,230	8,74	13,95
10,36	17,64	10,45	17,65	10,30	18,00	128,7	542,0	555,6	0,230	10,34	17,76
12,33	21,18	12,38	21,20	12,20	21,36	177,2	760,3	787,5	0,230	12,30	21,25
13,78	23,57	13,85	23,54	13,55	23,98	226,0	952,0	987,0	0,230	13,75	23,70
15,15	26,00	15,25	26,01	15,10	26,38	275,0	1154,0	1188,0	0,234	15,15	26,13