

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**Změna napětí na nn svorkách distribučního  
transformátoru vn/nn při změně jeho zatížení**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

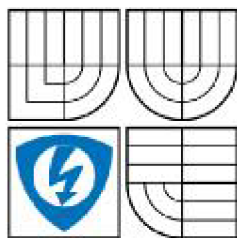
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**JIŘÍ JANDORA**

**BRNO 2009**



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

**Student:** Jiří Jandora

**ID:** 73021

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2008/2009

## NÁZEV TÉMATU:

### Změna napětí na nn svorkách distribučního transformátoru vn/nn při změně jeho zatížení

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Pojedejte o distribučních transformátorech, jejich elektrických parametrech a o jejich náhradě dvojbranem.
2. Průmyslový závod má tři transformátory, každý se jmenovitým výkonem  $S_n = 1,6$  MVA a jmenovitým převodem  $p = 22/0,4$  kV. Závod je napájen z trojfázového vedení se jmenovitým napětím  $U_n = 22$  kV se zadanými parametry z rozvodny 22 kV, kde se udržuje konstantní napětí 23,1 kV. Určete, jak se bude měnit napětí na svorkách nízkého napětí u transformátorů při změnách výkonu od chodu naprázdno do jmenovitého zatížení transformátorů. Účinník se předpokládá konstantní a rovný 0,95 ind.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího

**Termín zadání:** 9.2.2009

**Termín odevzdání:** 1.6.2009

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

**doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Jiří Jandora

Bytem: Bratislavská 39, Brno 60200 Česká republika

Narozen/a (datum a místo): 15.7.1987 v Brně

(dále jen „autor“)

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,

se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno,

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

## Čl. 1

### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

bakalářská práce

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Změna napětí na nn svorkách distribučního transformátoru  
vn/nn při změně jeho zatížení

Vedoucí/ školitel VŠKP: Doc. Ing. Vladimír Blažek CSc.

Ústav: Ústav elektroenergetiky

Datum obhajoby VŠKP: 16.6.2009

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v\*:

tištěné formě – počet exemplářů .....2.....

elektronické formě – počet exemplářů .....2.....

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

---

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: .....

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

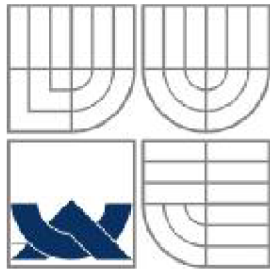
Bibliografická citace práce:

JANDORA J. Změna napětí na nn svorkách distribučního transformátoru vn/nn při změně jeho zatížení. Bakalářská práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2009,49 stran. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.

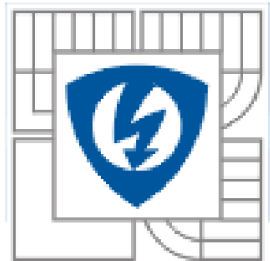
Prohlašuji, že jsem svou **bakalářskou práci** vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, internet atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Také bych chtěl velice poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Vladimíru Blažkovi, CSc. za pomoc při vytváření této práce. Za jeho rady a poskytnuté materiály, které mi pomohly.

.....



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií**  
**Ústav elektroenergetiky**

**Bakalářská práce**

# **Změna napětí na nn svorkách distribučního transformátoru vn/ nn při změně jeho zatížení**

**Jiří Jandora**

**vedoucí: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2009**

**Brno**



**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**



**Faculty of Electrical Engineering and Communication**

**Department of Electrical Power Engineering**

**Bachelor's Thesis**

**Change of voltage at LV terminals of a M V/ LV  
power distribution transformer  
caused by changes in its load**

by

**Jří Jandora**

**Supervisor: doc. Ing. Vladimír Blažek, CSc.**

**Brno University of Technology, 2009**

**Brno**

## ABSTRAKT

Tato práce má za cíl řešit využití distribučních transformátorů, jejich zařazení do elektrické sítě, vlastnosti, princip a způsoby jejich regulace na vzniklou změnu zatížení. V úvodní části se budeme hlavně věnovat teoretickým úvahám o principu těchto transformátorů. Jejich konstrukci shrneme jen zkrátka, protože to není hlavní cíl této práce, ale na druhou stranu předpokládám, že čtenář této práce nemusí být až tak zainteresován v problematice tohoto bloku elektrické sítě a měl by být schopen zhruba porozumět principu transformátorů. Dále nastíníme způsoby regulace transformátorů. Důležitou věc, kterou by si měl čtenář odnést z teoretické části je náhrada transformátoru dvojbranem, tedy náhradním schématem. Dvojbran je nahrazení vlastností zapojení jednoduchými elektrickými prvky, se kterými už dokážeme dál bez problémů pracovat. K jejich řešení budeme používat princip Blondelových konstant pro naše zvolené náhradní schéma. Tyto konstanty umožňují jednodušší pracování se základními veličinami obvodu jako je proud, napětí a výkon. Druhá část práce je věnována řešení příkladu s použitím distribučních transformátorů. Zadání příkladu je dáno v této následující podobě. Máme průmyslový závod, který má tři transformátory, každý se jmenovitým výkonem a jmenovitým převodem. Závod je napájen z trojfázového vedení VN se jmenovitým napětím a se zadanými parametry z rozvodny, kde se udržuje konstantní napětí. Máme určit, jak se bude měnit napětí na svorkách nízkého napětí u transformátorů při změnách výkonu od chodu naprázdno do jmenovitého zatížení transformátorů. Účinník se předpokládá konstantní. V teoretické části jsem již nastínil, jak bychom měli postupovat při řešení tohoto příkladu. Výsledky jsem se snažil shrnout do jednoduché tabulky a doplnil ji grafy, které vystižně popisují výsledek našeho hledání.

## KLÍČOVÉ SLOVA:

Distribuční transformátor, regulace, dvojbran, náhradní schéma, Blondelovy konstanty, zatížení.



## ABSTRACT

The thesis deals with the use of distribution transformers, their integration into the electrical network, their properties, and principles and means of regulation according to changes in load. The introductory chapter is devoted mainly to the theoretical background concerning the functioning of the transformers. Even though it is not the focus of this thesis, a brief summary of their structure will be provided because it is presumed that not all the readers are familiar with this particular electrical network block and thus they should be explained how the transformer works. Then the ways of transformer regulation will be outlined. In the theoretical part, the important point for the reader is the substitution of the transformer by two-port network i.e. the equivalent circuit. The two-port network is a substitution of the connection properties by simple electric elements, which are not so problematic for further use. When dealing with the two-port networks in the chosen equivalent circuit, Blondel's constants will be used. Blondel's constants facilitate working with the basic network invariables of the circuit such as amperage, voltage and power. The second part of the thesis is devoted to solving a problem that involves the use of distribution transformers. The problem is as follows: there is a manufacturing plant with three transformers, each of them having rated power and nominal transformation ratio. The manufacturing plant is supplied by HV three-phase line with rated voltage and parameters given by the distribution point, where constant voltage is maintained. The task is to determine in what ways the voltage of the low voltage terminals of the transformers will change when changing the power from idling circuit to the rated load. The power factor should be constant. The method for solving this task has already been outlined in the theoretical part. The results are summed up in a simple chart completed with diagrams, which concisely describe the result of the research.

## KEY WORDS:

Distribution transformer, regulation, two-port network, equivalent circuit, Blondel's constants, load

# OBSAH

Seznam obrázků.....	8
Seznam tabulek.....	9
Definice a rozměr použitých veličin.....	10
<b>1 Úvod .....</b>	<b>12</b>
<b>2 Charakteristika současného stavu řešené problematiky.....</b>	<b>13</b>
<b>3 Cíle práce.....</b>	<b>14</b>
<b>4 Metody a postupy řešení.....</b>	<b>15</b>
<b>5 Teoretická část.....</b>	<b>16</b>
<b><i>5.1 Konstrukce transformátorů</i></b>	
5.1.1 Jádra transformátorů .....	16
5.1.2 Vinutí a izolace transformátorů.....	17
5.1.3 Ochrana transformátorů.....	17
5.1.4 Zkoušky transformátorů.....	18
<b><i>5.2 Principy transformátorů</i></b>	
5.2.1 Základní vzorce transformátoru.....	19
5.2.2 Zapojení transformátoru.....	20
5.2.3 Ztráty transformátoru.....	20
5.2.4 Namáhání transformátoru .....	21
<b><i>5.3 Náhrada transformátoru dvojhranem</i></b>	
5.3.1 Náhrada transformátoru dvojbranem.....	22
5.3.2 Přepočítání parametrů transformátoru .....	24
5.3.3 Blondelovy konstanty.....	25
<b><i>5.4 Zatížení transformátorů</i></b>	
5.4.1 Druhy zatížení transformátorů.....	27
<b><i>5.5 Regulace napětí u transformátorů</i></b>	
5.5.1 Úvod o regulaci napětí .....	28
5.5.2 Transformátory s odbočkami .....	29
5.5.2.1 Funkce transformátoru v jednoduchém přenosu.....	29
5.5.2.2 Přepínání odboček za vypnutého stavu.....	30
<b><i>5.6 Novinky u distribučních transformátorů .....</i></b>	<b>32</b>
5.6.1 Monitor distribučního transformátoru - MDT 9.e (i)	
<b>6 Výpočet změny napětí na nn svorkách distribučního transformátoru vn/nn při změně jeho zatížení.....</b>	<b>34</b>
<b>7 Závěr.....</b>	<b>48</b>
<b>Použitá literatura.....</b>	<b>49</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 5.1-1 Jádrové transformátory[1].....	16
Obr. 5.1-2 Plášťové transformátory[1].....	16
Obr. 5.1-3 Válcové (a) a kotoučové (b) cívky[1].....	17
Obr. 5.1-4 Kombinace VN vypínačů s pojistkami[2].....	18
Obr. 5.2-1 Zapojení transformátoru (Hvězda, Trojúhelník, lomená hvězda).....	20
Obr. 5.3-1 Náhradní článek trans. T(a) odpovídající náhradnímu schématu trans.(b)....	22
Obr. 5.3-2 Náhradní článek transformátoru $\Gamma$ .....	22
Obr. 5.3-3 Náhradní dvojbran daný Blondelovými konstantami.....	25
Obr. 5.3-4 Náhradní článek $\Gamma$ s příčnou admitancí na výstupu (a) a na vstupu.....	26
Obr. 5.5-1 Zjednodušené schéma distribuční sítě.....	29
Obr. 5.5-2 Napěťové poměry v síti.....	30
Obr. 5.5-3 Princip přepínání odboček.....	30
Obr. 5.5-4 Princip regulace napětí v distribučních sítích.....	31
Obr. 5.6-1 Ukázka zapojení monitoru distribučního transformátoru[10] .....	32
Obr. 5.6-2 Schematicky znázorněný MDT 9[10] .....	33
Obr. 6-1 Náhradní článek transformátoru $\Gamma$ .....	35
Obr. 6-2 Náhradní schéma vedení.....	36
Obr. 6-3 Náhradní schéma nesouměrným T článkem.....	37
Obr. 6-4 závislost napětí na straně NN na změně zatížení pro odbočku 20,9kV.....	45
Obr. 6-5 závislost napětí na straně NN na změně zatížení pro odbočku 22kV .....	46
Obr. 6-6 závislost napětí na straně NN na změně zatížení pro odbočku 23,1kV.....	46
Obr. 6-7 závislost fáze sekundárního napětí na změně zatížení pro odbočku 23,1kV....	47

## **SEZNAM TABULEK**

**Tab. 5.5-1 Přípustné odchylky od jmen. napětí podle norem ČSN 330120 a IEC 38...28**

**Tab. 6-1 Změna napětí na NN svorkách transformátoru při změně zatížení.....44**

## DEFINICE A ROZMĚR POUŽITÝCH VELIČIN

<b>A</b>	<b>Blondelova konstanta</b>	<b>[-]</b>
<b>a</b>	<b>Převod transformátoru</b>	<b>[-]</b>
<b>a<sub>s</sub></b>	<b>Střední vzdálenost cívek</b>	<b>[m]</b>
<b>B</b>	<b>Blondelova konstanta</b>	<b>[-]</b>
<b>B<sub>1</sub></b>	<b>Magnetická indukce</b>	<b>[T]</b>
<b>B<sub>j</sub></b>	<b>Magnetická indukce v jádře</b>	<b>[T]</b>
<b>B<sub>t</sub></b>	<b>Susceptance</b>	<b>[S]</b>
<b>C</b>	<b>Blondelova konstanta</b>	<b>[-]</b>
<b>D</b>	<b>Blondelova konstanta</b>	<b>[-]</b>
<b>D<sub>s</sub></b>	<b>Střední průměr vinutí</b>	<b>[m]</b>
<b>e<sub>k</sub></b>	<b>Poměrné napětí nakrátko</b>	<b>[%]</b>
<b>f</b>	<b>Kmitočet</b>	<b>[Hz]</b>
<b>F</b>	<b>Síla odtlačující cívky od sebe</b>	<b>[N]</b>
<b>G<sub>t</sub></b>	<b>Konduktance</b>	<b>[S]</b>
<b>i<sub>o</sub></b>	<b>Poměrný proud naprázdno</b>	<b>[%]</b>
<b>I</b>	<b>Proud ve vinutí</b>	<b>[A]</b>
<b>I<sub>1</sub></b>	<b>Primární proud</b>	<b>[A]</b>
<b>I<sub>2</sub></b>	<b>Sekundární proud</b>	<b>[A]</b>
<b>k</b>	<b>Převod nesouměrného článku</b>	<b>[-]</b>
<b>l</b>	<b>Délka vedení</b>	<b>[km]</b>
<b>l<sub>z</sub></b>	<b>Délka závitů</b>	<b>[m]</b>
<b>m<sub>1</sub></b>	<b>Zjednodušující konstanta</b>	<b>[-]</b>
<b>m<sub>2</sub></b>	<b>Zjednodušující konstanta</b>	<b>[-]</b>
<b>m</b>	<b>Zjednodušující konstanta</b>	<b>[-]</b>
<b>N<sub>1</sub></b>	<b>Počet primárních závitů</b>	<b>[-]</b>
<b>N<sub>2</sub></b>	<b>Počet sekundárních závitů</b>	<b>[-]</b>
<b>P</b>	<b>Výkon</b>	<b>[VA]</b>
<b>P<sub>k</sub></b>	<b>Ztráty ve vinutí</b>	<b>[W]</b>
<b>P<sub>0</sub></b>	<b>Ztráty v železe</b>	<b>[W]</b>
<b>P<sub>2</sub></b>	<b>Činný výkon transformátoru</b>	<b>[W]</b>
<b>P<sub>d</sub></b>	<b>Dodatečné ztráty</b>	<b>[W]</b>
<b>R</b>	<b>Odpor vinutí</b>	<b>[Ω]</b>
<b>R<sub>t</sub></b>	<b>Rezistence</b>	<b>[Ω]</b>
<b>R<sub>k</sub></b>	<b>Odpor vedení na km délky</b>	<b>[Ω/km]</b>
<b>Q<sub>k</sub></b>	<b>Jalový kompenzační výkon</b>	<b>[VAr]</b>
<b>Q<sub>2</sub></b>	<b>Jalový výkon transformátoru</b>	<b>[VAr]</b>
<b>Q<sub>2k</sub></b>	<b>Jalový výkon, který chceme vykompenzovat</b>	<b>[VAr]</b>
<b>Q<sub>ž</sub></b>	<b>Jalový vykompenzovaný výkon</b>	<b>[VAr]</b>
<b>S<sub>j</sub></b>	<b>Průřez jádra</b>	<b>[m<sup>2</sup>]</b>
<b>S<sub>n</sub>, S<sub>2</sub></b>	<b>Jmenovitý výkon transformátoru</b>	<b>[VA]</b>
<b>t</b>	<b>Tloušťka transformátorových plechů</b>	<b>[mm]</b>
<b>U</b>	<b>Napětí</b>	<b>[V]</b>

$U_0$	Konstantní hodnota napětí na straně vyššího napětí	[V]
$U_1$	Napětí na primárním vinutí	[V]
$U_2$	Napětí na sekundárním vinutí	[V]
$U_{21}$	Napětí odbočky 20,9kV přepočítané na NN	[V]
$U_{22}$	Napětí odbočky 22kV přepočítané na NN	[V]
$U_{23}$	Napětí odbočky 23,1kV přepočítané na NN	[V]
$\Delta U$	Úbytek napětí	[V]
$X_k$	Reaktance vedení na km délky	[ $\Omega$ /km]
$X_t$	Rozptylová reaktance	[ $\Omega$ ]
$Y_t$	Příčná admitance	[S]
$Y_q$	Příčná admitance nesouměrného článku	[S]
$Z$	Impedance	[ $\Omega$ ]
$Z_t$	Podélná impedance	[ $\Omega$ ]
$Z_{1b}$	Podélná impedance nesouměrného článku na výstupu	[ $\Omega$ ]
$Z_v$	Impedance vedení	[ $\Omega$ ]
$Z_{1a}$	Podélná impedance nesouměrného článku na vstupu	[ $\Omega$ ]
$\alpha$	Teplotní součinitel odporu	[1/°C]
$\alpha$	Fáze Blondelovy konstanty A	[°]
$\beta$	Fáze Blondelovy konstanty B	[°]
$\Phi$	Magnetický tok jádra	[Wb]
$v_2$	Fáze sekundárního napětí transformátoru	[°]
$\pi$	Ludolfovo číslo	[-]
$\omega$	Úhlová rychlost	[rad/s]

# 1 ÚVOD

Transformátor je jedním z hlavních elektrických částí, pomocí které realizujeme přesunutí elektrické energie z místa její výroby do míst, kde se elektrická energie spotřebovává, a kde není prozatím možnost ji vyrábět. A to například z důvodů ekonomických nebo není lokalita uzpůsobená pro její výrobu. Například zde nejsou zdroje nerostných surovin (např. uhlí, které je prioritou z hlediska našeho státu), přírodních živlů jako voda (tu využívá hlavně třeba Rakousko), vítr. A v neposlední řadě se začíná rozvíjet elektrická energie získávána ze Slunce pomocí solárních panelů. Solární energie začíná mít velkou budoucnost ve směru k ekologičtějšímu chování k přírodě a celé zemi. Transformátor transformuje střídavý proud o určitém vysokém napětí na hodnotu napětí pro nás přijatelnou, buď pro její hospodárný přenos z jednoho místa na druhé, nebo pro hodnotu napětí, kterou využijeme pro naše potřeby. Napětí pro využití samozřejmě dělíme do více kategorií podle jeho velikosti. Například pro silnoproudou elektrotechniku, což jsou napětí vyšších hodnot a používáme je u velkých strojů, např. ve strojírenství, až po ty napětí nízké, které využíváme v našich domácnostech či jiných odvětvích.

Užití transformátorů je velmi široké. A to nejen pro už zmíněné důvody (viz výše), ale i k průmyslovým účelům. Například k napájení usměrňovačů dřív rtuťových dnes už polovodičových (pomocí diod, tyristorů atd.). Další využití pro svařovací účely či třeba napájení elektrických lokomotiv, tím se zvětší její výkon a provoz je úspornější. Dále specificky sestrojené výkonové transformátory, které jsou použité na elektrické obloukové pece používané v ocelářství, pro spojování impedancí, přizpůsobování impedance nebo zkušební transformátory a v neposlední řadě transformátory elektrických spotřebičů jako PC, rádio, televize, nabíječky k bateriím od mobilů, automobily.

Průmyslové využití transformátorů jsem uvedl jenom jako okrajové, čímž se nestávají méně důležité, ale pro moji práci nepodstatné. Práce se bude zabírat transformátory pro přesun elektrické energie, jiným názvem její distribucí a tudíž se tyto transformátory jmenují **DISTRIBUČNÍ**. Přesně se bude jednat o transformátory pro převod vysokého napětí (vn) 22kV na napětí nízké (nn) 400V(420V). Jejich výkon se pohybuje do 1600kVA. Tyto transformátory jsou stále pod napětím a očekávají se od nich co nejmenší ztráty. Proto pro jejich výrobu je důležité použít co nejkvalitnější transformátorové plechy. Pokoušíme se i o jejich co největší odlehčení a zjednodušení, protože počet míst, kde se tyto transformátory vyskytují, je opravdu široký. Budeme se zabývat regulací těchto transformátorů. To znamená, aby nedocházelo ke stálé změně napětí od základní hodnoty.

## 2 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Dnešní doba si žádá, aby se výrobci snažili, co nejvíce přizpůsobit zákazníkům. Čím více zákazníků tím více požadavků. Spousta zákazníků kupuje distribuční transformátor pouze jednou za čas a dávají důraz proto jenom na investiční náklady. (To je velmi krátkozraké.) Oproti tomu např. elektrické rozvodné závody, které jich kupují mnohem více, tak ti se zajímají i o provozní náklady. Další zákazník potřebuje u transformátoru snížený hluk, jiný zase nepotřebuje transformátor používat neustále, tudíž u něho budou jiné ztráty než u permanentně používaného.

Další vývoj transformátorů je ohledně jejich velikosti, ale tento vývoj je velmi omezen. Důvod je, že transformátor potřebuje ke své činnosti magnetické plechy, a ty nejsme dosud schopni až tak tolik zmenšovat. Takže zmenšování transformátorů není zatím možné, pokud nevyrobíme magnetické plechy s menší velikostí, ale se stejnými magnetickými vlastnostmi.

Další zlepšení se týká transformátorových olejů, mezi nejpoužívanější oleje jsou dnes např. značka NYNAS atd., který dokonale izoluje prostředí. Dále se používají i izolační kapaliny jako MIDEL. Používají se jako náhrada za minerální oleje v transformátorech tam, kde je nutná zvýšená ochrana lidí a majetku před nebezpečím ohně nebo v místech, kde jsou zvýšené požadavky na ochranu životního prostředí.

I ochrana transformátorů docílila zlepšení, jako ochrana před zvýšením teploty pomocí kontrolních teploměrů nebo PTC termistorů. Dále ochrana před zvýšením tlaku pomocí přetlakových ventilů nebo ochrana proti zplynování a úniku oleje pomocí Buchholzova relé. Proudové a napěťové ochrany zajišťují kombinace VN odpínačů s VN pojistkami.



### 3 CÍLE PRÁCE

1) Provedeme teoretickou úvahu o distribučních transformátorech, tedy o jejich principu, vlastnostech, parametrech, a jejich náhradu dvojhranem.

2) Řešení zadaného příkladu na téma změny výkonu transformátorů a o jeho působení na napětí na nn svorkách.

**Zadání příkladu:** Průmyslový závod má tři transformátory, každý se jmenovitým výkonem  $S_n = 1,6$  MVA a jmenovitým převodem  $p = 22/0,4$  kV. Závod je napájen z trojfázového vedení se jmenovitým napětím  $U_n = 22$  kV se zadanými parametry z rozvodny 22 kV, kde se udržuje konstantní napětí 23,1 kV. Určete, jak se bude měnit napětí na svorkách nízkého napětí u transformátorů při změnách výkonu od chodu naprázdno do jmenovitého zatížení transformátorů. Účinník se předpokládá konstantní a rovný 0,95 ind.

## 4 METODY A POSTUPY ŘEŠENÍ

Jako zdroj pro řešení zadaného příkladu jsem využíval hlavně elektronické texty druhé a čtvrtého ročníku ústavu elektroenergetiky VUT v Brně. Byly to texty o distribučních sítích od pana doc. Ing. Vladimíra Blažka CSc a přenosových sítích od pana doc. Ing. Vladimíra Blažka CSc a pana Ing. Martina Paara. Dále jsem používal další knižní vydání o transformátorech, nebo elektronické texty z internetových stránek s dobrým renomé.

V teoretické části shrnu všechny důležité informace o distribučních transformátorech. V další části výpočtu hlavně využiji náhradu transformátorů dvojbranem a řešení pomocí Blondelových konstant.

V druhé části zadání, tedy příkladu, jsem použil metodu náhradu transformátoru dvojbranem a to článkem  $\Gamma$ . Spolu s vedením jsme vytvořili nesouměrný článek  $T$ . Pomocí Blondelových konstant a s nimi spojenými vzorci jsme zjistili závislost napětí  $u_n$  svorek na změně zatížení transformátoru od chodu naprázdno až po jmenovitý chod.

## 5 TEORETICKÁ ČÁST

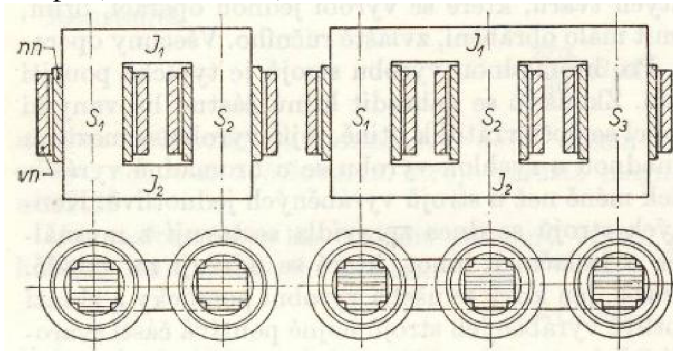
### 5.1 STAVBA TRANSFORMÁTORŮ

Jako na úvod si myslím, že je důležité uvést úplně ty nezákladnější informace o transformátorech, hlavně z hlediska jejich konstrukce a principu.

#### 5.1.1 Jádra transformátorů

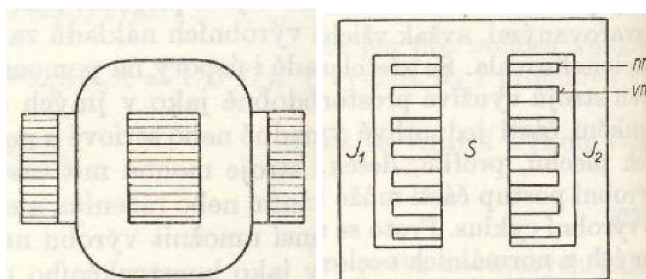
Základní stavební kámen transformátoru je železné jádro, na kterém jsou navinuté vinutí a to primární a sekundární. Primárním vinutím se chápe vinutí, do něhož se směřuje elektrická energie. Ze sekundárního se naopak odebírá. Těchto vinutí může být více. Nejpoužívanější jsou jednofázové a trojfázové. Železná jádra se dělí podle provedení na **jádrové a plášťové**.

Začneme jádrovými, ty se vyrábí jako jednofázové či trojfázové. Jednofázové se skládají ze dvou sloupů (můžeme je označit jako  $S_1, S_2$ ) na nichž jsou navinuty cívky  $vn$  a  $nn$ . Sloupy jsou spojeny spojkami, ty označíme  $J_1$  a  $J_2$ . U trojfázového transformátoru je ten rozdíl že sloupy nejsou dva ale tři ( $S_1, S_2, S_3$ ). Také jsou spojeny delšími spojkami  $J_1$  a  $J_2$ . Na všech sloupech jsou navinuty cívky  $vn$  a  $nn$ . U obou druhů jsou cívky  $nn$  navinuty blíž ke sloupu. (viz obr. 1.1-1)



Obr.5.1-1 Jádrové transformátory[1]

**Plášťové transformátory** se vyrábí jenom jednofázové. Jádro je u tohoto transformátoru ležící a na něm jsou navinuté kotoučové cívky. Je zde jenom jeden sloup  $S$ , a ten je uzavřen dvěma spojkami  $J_1$  a  $J_2$ . Cívky jsou navinuty střídavě vedle sebe  $vn$  a  $nn$ . Chlazení probíhá v mezerách mezi vinutími. (viz obr. 1.1-2)

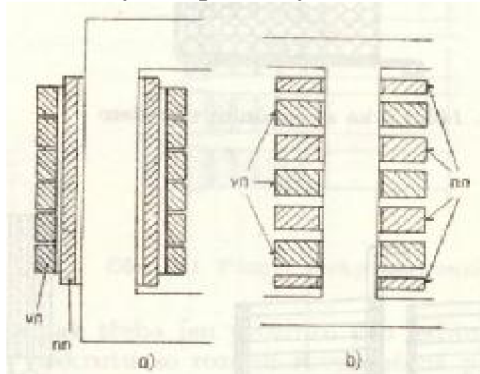


Obr. 5.1-2 Plášťové transformátory[1]

**Magnetický obvod** transformátoru (jádro) je složen z plechů z oceli s přísádkou křemíku. Základní tloušťky plechů ( $t$ ) jsou 0,35 nebo 0,5 mm. Normalizované ztrátové číslo pro plechy je 1,3W/kg (výjimečně 1W/kg). Pokud nám nezáleží na ztrátách v železe, můžeme použít i dynamové plechy. Plechy se vyrábějí buď válcováním za **tepla** nebo za **studena**.

## 5.1.2 Vinutí a izolace transformátorů

Teď jsme se zabírali jádrem transformátoru. Měli bychom blíže také vysvětlit **vinutí transformátorů**. Vinutí se skládá z drátů, které se vyrábí buď z hliníku, nebo mědi. Další dělení je podle tvaru a to na kulaté nebo čtyřhranné. Vodiče se od sebe izolují papírovým páskem aspoň dvakrát překrývaným nebo papírem tvrzeným. V některých případech se užívá k izolaci lepenka sklo nebo silikony. Celkový tvar vinutí se dělí na válcové a kotoučové. (viz obr. 1.1-3) Využití válcových cívek je u jádrových transformátorů a kotoučových u plášťových.



Obr. 5.1-3 Válcové (a) a kotoučové (b) cívky[1]

Zmínili jsme izolační materiály používaných v transformátorech. Nejpoužívanější z nich je papír. Dále používáme izolační lepenku. Pro tento účel se vyrobené archy řezou na vhodné pásy a ohýbají. Vyrábějí se z nich kostry cívek a izolace elektrických vodičů a jiných součástí v transformátorech, nebo se upravují na jiný žádoucí tvar. Neposlední materiál, který můžeme použít, je **silikon**. Jeho chemické složení neumožňuje elektrickému náboji jeho postup. Díky tomu jsou silikony nevodivé a tedy dobře použitelné pro izolaci cívek transformátorů.

## 5.1.3 Ochrana transformátorů

Ochrana transformátorů je velmi důležitá, dělíme ji do těchto tří bodů

- 1) Vnitřní poruchy
- 2) Tepelná ochrana
- 3) Nadproudová a napěťová ochrana

První typ ochrany, kterou uvedeme, se zabývá vnitřními poruchami. Jde hlavně o poruchy v oleji a to zplynování nebo masivní unik oleje. Tato ochrana se zajišťuje **Buchholzovým relé**. Toto relé se zapojuje mezi nádobu transformátoru a konzervátor oleje. Ochrana obsahuje alarm, který se nejdříve spustí a poté pokud je nebezpečí pořád vysoké, tak se vypnou vypínací kontakty.

Další ochrana je pomocí PTC termistorů. Termistory jsou součástky ovlivnitelné teplotou. Jsou dvě sady těchto termistorů. První slouží ke spuštění alarmu a druhá k vypnutí. Termistory jsou zapojeny ve vinutí a mohou být připojeny k relé, které vypne vypínač. Jsou nastaveny na určitou teplotu a ta je neměnná. Teplené ochrany jsou i další jako např. ochrana platinovým odporovým čidlem, analogovým kontaktním teploměrem, bimetalický spínač.

Další řadou ochrany jsou kombinace VN vypínače s VN pojistkami (viz obr.5.1-4). První ze zmíněných dokáže vypnout až do hodnot svého jmenovitého proudu. A pro velmi vysoké hodnoty proudu (poruchové) jsou zde VN pojistky, které zároveň dokážou odpojit i odpínač. Je to kombinace velmi lehce vyrobitelná, spolehlivá a co je pro výrobce nejdůležitější i levná. A navíc dokážeme do téhle kombinace zařadit i obě dvě před chvílí zmíněné ochrany



*Obr. 5.1-4 Kombinace VN vypínačů s pojistkami[2]*

### 5.1.4 Zkoušky transformátorů

Celou dobu jsme se zabývali konstrukcí transformátoru. Poté co je transformátor vyroben, je důležité u něj provést několik typů zkoušek, aby mohl být uveden do provozu bez nebezpečí jak pro člověka, tak pro jeho funkci. Tyto zkoušky dělíme do tří typů.

- 1) Typové zkoušky
- 2) Kusové zkoušky
- 3) Speciální zkoušky

**1) Typové zkoušky**, které se provádějí na jednom transformátoru od každého typu, vypadají následovně:

- (a) Zkoušky oteplení
- (b) Rázové zkoušky

**2) Kusové zkoušky** se provádí na každém transformátoru. U těchto zkoušek se provádí následující měření:

- a) Měření odporu vinutí
- b) Měření transformačního poměru
- c) Měření impedance nakrátko
- d) Ztráty nakrátko
- e) Měření proudu naprázdno a ztrát naprázdno
- f) Dielektrické zkoušky
  - 1) Zkouška přiloženým napětím
  - 2) Zkouška indukovaným napětím

**3) Speciální zkoušky** nejsou součástí typových nebo kusových a provádí se na základě dohody mezi zákazníkem a výrobcem. Mezi speciální zkoušky patří:

- (a) Dielektrické speciální zkoušky
- (b) Stanovení kapacity mezi vinutím a zemí a mezi vinutími
- (c) Zkoušky zkratové odolnosti
- (d) Stanovení úrovně hluku
- (e) Měření harmonických u proudu naprázdno
- (f) Měření izolačního odporu nebo ztrátového činitele ( $\tan \delta$ )
- (g) Napětí radiových poruch

## 5.2 PRINCIP TRANSFORMÁTORŮ

### 5.2.1 Základní vzorce transformátoru

Elektrická energie přiváděná do primárního vinutí transformátoru se přenáší magnetickým obvodem do vinutí sekundárního. Poměr počtu závitů primárního a sekundárního vinutí udává též poměr napětí ze vztahu[3]:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} \quad (5.2)$$

$\frac{U_1}{U_2}$  .... Transformační poměr napětí

$\frac{N_1}{N_2} = k$ .... Závitový převod

Další poměr je poměr závitů a proudů

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (5.21)$$

Proud  $I_1$  protékající primárním vinutím vybudí v magnetickém obvodu magnetický tok  $\Phi$ . Při rovnoměrném rozložení magnetického toku po průřezu můžeme psát.[3]

$$\Phi = B_j S_j \quad (5.22)$$

Na změnu toku  $\Phi$  reaguje sekundární vinutí a indukuje se v něm napětí  $U_2$ . Ve vinutí začíná protékat proud  $I_2$ , který působí proti změně, která ho vyvolala (Lencův zákon).

$\Phi$ ..magnetický tok jádra (Wb)

$B_j$ ..magnetická indukce (T)

$S_j$ ..průřez jádra ( $m^2$ )

Další důležitý vzorec je pro napětí připadající na jeden závit. Z tohoto napětí se dá určit celkový počet závitů  $N_1$  a  $N_2$ .

$$u = 4.44 \Phi f \quad (5.23)$$

Rovnice přenášeného výkonu transformátoru je

$$P = U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad (5.24)$$

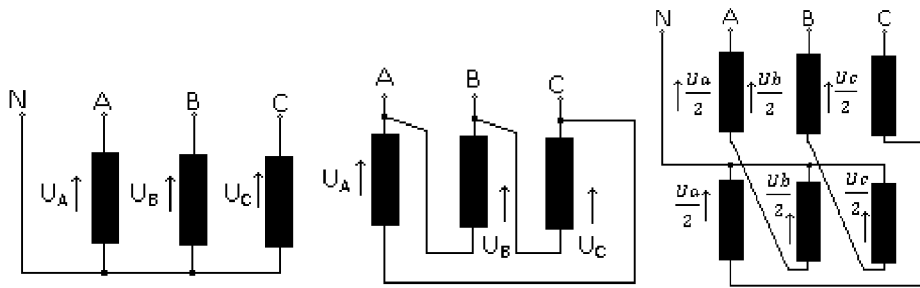
Jako výkon transformátoru se udává součin  $U_2 I_2$  (VA, KVA, MVA) a záleží na něm jak velikost a váha transformátoru tak i jeho cena.

### 5.2.2 Zapojení transformátoru

Bavili jsme se o jednofázových či trojfázových transformátorech. Z ekonomických důvodů je výhodnější vyrábět transformátory trojfázové. Transformátory jsou zaprvé výhodnější finančně a za druhé jsou ekonomičtější na prostor, který zabírají. Nemusíme se o ně tolik starat, ale zase na druhou stranu, když dojde k poruše, musíme nahradit celý trojfázový transformátor a ne jenom jednu fázi, ve které dojde k poruše. Všechny tři fáze zapojujeme dohromady a z toho nám vyplívají tři možnosti zapojení:

1) Zapojení do trojúhelníka (D)

- 2) Zapojení do hvězdy (Y)
- 3) Zapojení do lomené hvězdy (Z)



**Obr. 5.2-1 Zapojení transformátoru (hvězda, trojúhelník, lomená hvězda)**

Zapojení na vstupu a výstupu má hodně variant. Pro praxi se však všechny kombinace nehodí. Důležitým faktorem je fázové natočení vektorů napětí výstupního vzhledem k napětí vstupním. Tato závislost se vyznačuje tzv. hodinovým úhlem. Hodinový uhel se značí dvěma písmeny a jedním číslem. První velké písmeno je zapojení fází na vstupu, druhé malé písmeno je zapojení fází na výstupu transformátoru. Číslice udává zpoždění fáze menšího napětí za touž fází většího napětí v hodinách 0 až 11 hodin, při čemž jedné hodině, podobně jako na hodinovém ciferníku, odpovídá úhel  $30^\circ$ . [4] Svorky fází se označují na straně vyššího napětí A, B, C a na straně nižšího a, b, c.

### 5.2.3 Ztráty transformátoru

V úvodu jsme se zmiňovali o ztrátách transformátoru. Teď je trochu rozebereme víc. Transformátor má ztráty v železe, ztráty ve vinutí, dodatečné ztráty ve vinutí a ztráty v dielektriku.

#### 1) Ztráty v železe

Ztráty v železe (naprázdno)  $P_0$ , jsou daný ztrátami hysterezními a ztrátami vířivými proudy. Jak už je z názvu patrné tyto ztráty se zjišťují při nulovém zatížení tedy při měření neprázdně

#### 2) Ztráty ve vinutí

Ztráty ve vinutí (nakrátko) jsou způsobeny odporem vinutí  $R$ . Z Ohmova zákona, když vodičem o odporu  $R$  protéká proud  $I$ , tak vzniká úbytek napětí  $u=RI$ . Vznikají tedy ztráty  $P_k$ . Těmto ztrátám se říká Joulové ztráty tedy ztráty teplem vzniklé průchodem proudu.

#### 3) Dodatečné ztráty ve vinutí

Podobným způsobem, jakým vznikají ztráty vířivými proudy v plechách magnetického obvodu (ztráty naprázdno), vznikají ztráty vířivými proudy ve vodičích vinutí nacházejících se ve střídavém magnetickém poli, které zvyšuje tepelné (Joulové) ztráty. Tyto ztráty jsou tím větší, čím větší je rozměr vodiče kolmý k rozptylovému poli. [3]

#### 4) Ztráty v dielektriku

Jsou to ztráty velmi nepatrné a většinou se zanedbávají. Je to energie, která se ztratí v dielektriku působením elektrického pole.

## 5.2.4 Namáhání transformátoru

Posledním bodem v této kapitole je namáhání transformátorů. Budeme se zabývat dvěma druhy a to: **1) Dielektrické namáhání**

### 2) Mechanické namáhání

#### 1) Dielektrické namáhání

Dielektrické namáhání transformátoru se projevuje pro hodnoty odlišné než je jmenovité napětí. Pro jmenovité napětí je nebezpečí malé. Všechny části, které proti sobě mají napětí, jsou od sebe buď tak vzdálené, že napětí mezi nimi nemůže vzniknout, nebo jsou od sebe dostatečně odizolované. Přepětí, které vznikají, jsou způsobeny dvěma důvody, buď **přepětí od atmosférických výbojů** či **přepětí spínacích pochodů**. Hodnoty těchto přepětí jsou velice odlišné. Přepětí od atmosférických výbojů je velmi vysoké, ale čas jejich působení je velmi malý, takže se izolace prorazí jenom na pár místech. Kdyby se ale přepětí opakovalo, může dojít až k závitovému zkratu. Naopak přepětí od spínacích obvodů je malé, ale má delší dobu působení a většinou dojde k poruše transformátoru. Konkrétní izolace jsem už zmínil v kapitole o konstrukci transformátorů.

#### 2) Mechanické namáhání

Vinutí, kterým protéká proud, je namáháno mechanickými silami podle směru proudů. Cívky téhož směru se přitahují, cívky opačného směru se odpuzují. Při jmenovitém proudu transformátoru jsou síly a namáhání nepatrné. Značné namáhání však vzniká při zkratech, při nichž jsou průměrné proudy asi 25krát větší než normální a nárazové ještě mnohem větší. Protože síly závisí na čtverci proud, může být namáhání při zkratu velmi značné. Úplně souměrné válcové vinutí je namáháno tak, že se vnitřní cívka radikálně stlačuje a vnější cívka radikálně roztahuje. Celková síla ( $F$ ), kterou jsou cívky od sebe odtlačovány, je podle silového zákona.[1]

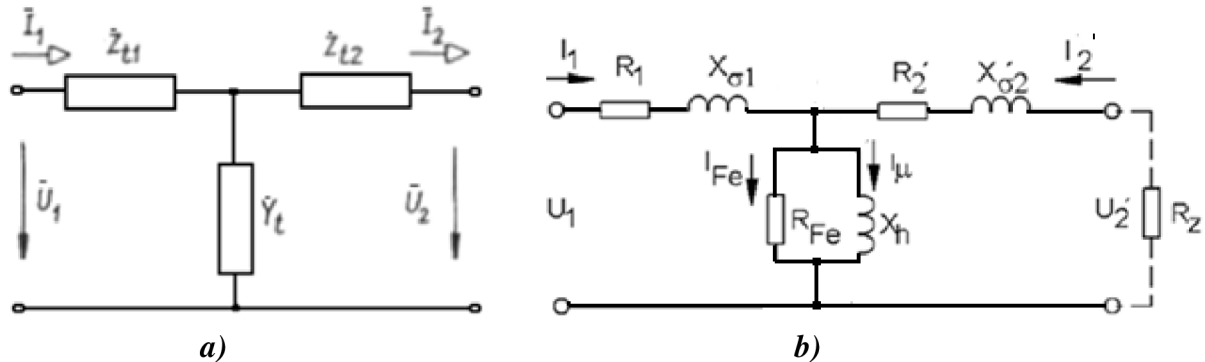
$$F = \frac{2\pi D_S}{a_S} \cdot (N_1 I_1)^2 \cdot 10^{-7} \quad (5.27)$$



## 5.3 NÁHRADA TRANSFORMÁTORU DVOJBRANEM

### 5.3.1 Náhrada transformátoru dvojbranem

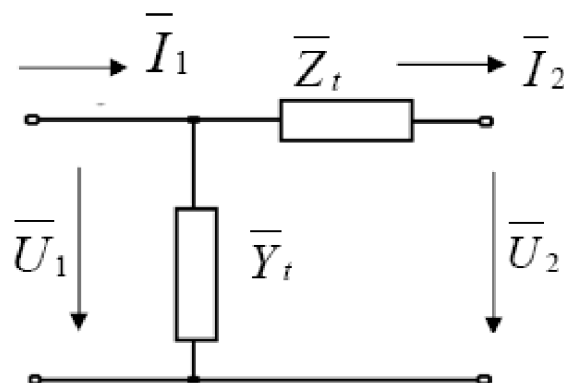
Transformátor je stroj, na kterém vzniká úbytek napětí a ztráty výkonu. Tyto ztráty musíme brát v úvahu. Trojfázový transformátor je ve fázích souměrný a proto ho můžeme v každé fázi nahradit článkem  $T$ , nebo článkem  $\Gamma$ . Náhradní schéma používáme pro jednodušší určení provozních stavů.



Obr. 5.3-1 Náhradní článek transformátoru  $T$ (a) odpovídající náhradnímu schématu transformátoru(b)

Vysvětlivky k náhradnímu schématu

- $R_1$  – ohmický odpor primárního vinutí
- $X_{\sigma 1}$ - rozptylová reaktance prim. Vinutí
- $R_{Fe}$ - virtuální odpor představující ztráty v železe
- $I_{\mu}$ - magnetizační proud
- $I_1$  – primární proud
- $R_2$  - ohmický odpor sekundárního vinutí (přepočítaná hodnota)
- $X_{\sigma 2}$ -rozptylová reaktance sekundárního vinutí (přepočítaná hodnota)
- $X_h$ - hlavní reaktance
- $I_{Fe}$  – proud představující ztráty v železe
- $I_2$ - sekundární proud (přepočítaná hodnota)



Obr. 5.3-2 Náhradní článek transformátoru  $\Gamma$

Podélné impedance v obou člancích ( $Z_{t1}, Z_{t2}$  a  $Z_t$ ) vyjadřují nedokonalost magnetické vazby mezi primárním a sekundárním vinutím jinými slovy s rozptylovými toky a odporem obou vinutí. Admittance  $Y_t$  vyjadřují magnetizační proud. Tyto parametry určujeme z měření naprázdno a nakrátko.  $Z_t$  určujeme z měření impedance nakrátko a  $I/Y_t$  jako impedanci transformátoru při měření naprázdno.

Abychom mohli vypočítat tyto parametry, udávají výrobci na štítek transformátoru tyto údaje:

- 1)  $S_n$  - jmenovitý výkon
- 2)  $e_k$  - poměrná hodnoty napětí nakrátko vztažená ke jmenovitému napětí
- 3)  $\Delta P_{fe}$  - ztráty výkonu v železe (výkon naprázdno)
- 4)  $\Delta P_{cu}$  - ztráty výkonu ve vinutí (výkon nakrátko)
- 5)  $i_0$  - poměrná hodnota proudu nakrátko vztažená ke jmenovitému napětí
- 6)  $U_1, U_2$  - jmenovitá sdružená napětí primárního a sekundárního vinutí

### Podélná impedance

Podélná impedance se zjišťuje z měření nakrátko.  $Z_t = R_t + jX_t$

Rezistence:

$$\Delta P_{Cu} = 3 \cdot R_t \cdot I_n^2 = 3 \cdot R_t \cdot \left( \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} \right)^2 \quad (5.31)$$

$$R_t = \frac{\Delta P_{cu} \cdot U_n^2}{S_n^2} \quad (5.32)$$

$\Delta P_{cu} = P_k \gg \gg$  ztráty nakrátko

Rozptylová reaktance:

$$X_t = \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \sqrt{e_k^2 - \frac{\Delta P_{cu}^2}{S_n^2}} \quad (5.33)$$

### Příčná admittance

Příčná admittance se zjišťuje z měření naprázdno.  $Y_t = G_t - jB_t$

Konduktance:

$$\Delta P_{fe} \cong G_t \cdot U_n^2 \quad (5.34)$$

$$G_t = \frac{\Delta P_{fe}}{U_n^2} \quad (5.35)$$

$\Delta P_{fe} = P_o \gg \gg$  ztráty naprázdno

**Susceptance:**

$$B_t = \frac{1}{U_n^2} \cdot \sqrt{(S_n \cdot i_o)^2 - \Delta P f e^2} \quad (5.36)$$

**5.3.2 Přepočítání parametrů transformátoru**

Stranu (vstup, výstup) na kterou chceme parametry přepočítat, si můžeme volit, jak chceme. Zde uvádím oba dva způsoby přepočtu:

**a) Převod parametrů výstupní vinutí na počet závitů vstupního vinutí**

Velikost napětí na jeden závit musí zůstat při převodu zachována. Převedený proud  $I_2'$ , který prochází vstupním vinutím o  $N_1$  závitů, musí vytvořit stejné magnetomotorické napětí jako proud  $I_2$  procházející  $N_2$  závitů výstupního vinutí [8]

$$\frac{U_2}{N_2} = \frac{U_2'}{N_1} \Rightarrow U_2' = \frac{N_1}{N_2} \cdot U_2 = \boxed{\frac{1}{k} \cdot U_2} \quad (5.37)$$

$$N_1 \cdot I_2' = N_2 \cdot I_2 \Rightarrow I_2' = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 = \boxed{k \cdot I_2} \quad (5.38)$$

Pro převedenou impedanci  $Z_{t2}'$  a její části  $R_{t2}'$  a  $X_{\sigma 2}'$  platí

$$Z_{t2}' = \frac{U_2'}{I_2'} = \frac{\frac{1}{k} \cdot U_2}{k \cdot I_2} = \frac{1}{k^2} \cdot Z_{t2} \quad (5.39)$$

$$R_{t2}' = \frac{1}{k^2} \cdot R_{t2} \quad (5.310)$$

$$X_{\sigma 2}' = \frac{1}{k^2} \cdot X_{\sigma 2} \quad (5.311)$$

**b) Převod parametrů vstupní vinutí na počet závitů výstupního vinutí**

$$\frac{U_1}{N_1} = \frac{U_1'}{N_2} \Rightarrow U_1' = \frac{N_2}{N_1} \cdot U_1 = \boxed{k \cdot U_1} \quad (5.312)$$

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_1' \Rightarrow I_1' = \frac{N_1}{N_2} \cdot I_1 = \boxed{\frac{1}{k} \cdot I_1} \quad (5.313)$$

Pro převedenou impedanci  $Z_{t1}'$  a její části  $R_{t1}'$  a  $X_{\sigma 1}'$  platí

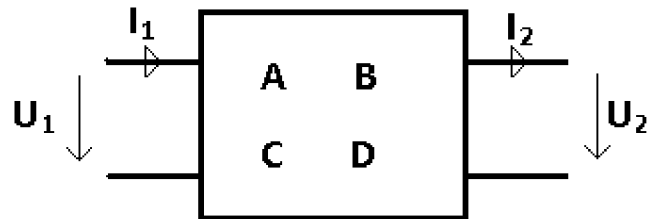
$$Z_{t1}' = \frac{U_1'}{I_1'} = \frac{k \cdot U_1}{\frac{1}{k} \cdot I_1} = k^2 \cdot Z_{t1} \quad (5.314)$$

$$R_{t1}' = k^2 \cdot R_{t1} \quad (5.315)$$

$$X_{\sigma 1}' = k^2 \cdot X_{\sigma 1} \quad (5.316)$$

### 5.3.3 Blondelovy konstanty

Jestliže nepotřebujeme přesně znát hodnoty parametrů transformátoru, můžeme tento dvojbran ( $T, I$ ) nahradit dvojbranem, u kterého známe pouze veličiny na vstupních svorkách, veličiny na výstupních svorkách, a tzv. přenosovou schopnost, která je dána přenosovými konstantami tzv. Blondelovými konstantami.



Obr. 5.3-3 Náhradní dvojbran daný Blondelovými konstantami

K řešení ustáleného stavu je pro účely přenosu elektrické energie nejvhodnější kaskádní tvar rovnic dvojbranu [9]:

$$U_1 = AU_2 + BI_2 \quad (5.317)$$

$$I_1 = CU_2 + DI_2 \quad (5.318)$$

$U_2, I_2$  – jsou zadané výstupní hodnoty proudu a napětí  
 $I_1, U_1$  – jsou hledané vstupní hodnoty proudu a napětí  
 A, B, C, D – jsou přenosové konstanty tzv. Blondelovy konstanty

Tyto konstanty mají mezi sebou tyto vztahy:

Nesouměrný dvojbran (bude vysvětlen následovně):

$$A \cdot D - B \cdot C = 1 \quad (5.319)$$

Souměrný dvojbran (bude vysvětlen následovně):

$$A = D \gg \quad A^2 - B \cdot C = 1 \quad (5.320)$$

Dále můžeme napsat výkonovou rovnici:

$$U_1 = A \cdot U_2 + B \cdot \frac{S_2}{U_2^*} \quad (5.321)$$

Zmiňovali jsme se o dvou náhradních člancích a to  $T$  a  $\Gamma$ . Oba dva z těchto článků mají úplně jiné vzorce pro výpočet Blondelových konstant. Nyní je uvedu:

### T článek (schéma viz. kapitola 5.31)

Jedná-li se o souměrný článek, tedy, že:

$$Z_{t1} = Z_{t2} = 0,5 \cdot Z_t \quad (5.322)$$

Pak Blondelovy konstanty mají tyto tvary:

$$\begin{aligned} A = D &= 1 + 0,5 \cdot Z_t \cdot Y_t \\ B &= Z_t + 0,25 \cdot Z_t^2 \cdot Y_t \\ C &= Y_t \end{aligned} \quad (5.323)$$

Jedná-li se o nesouměrný článek:

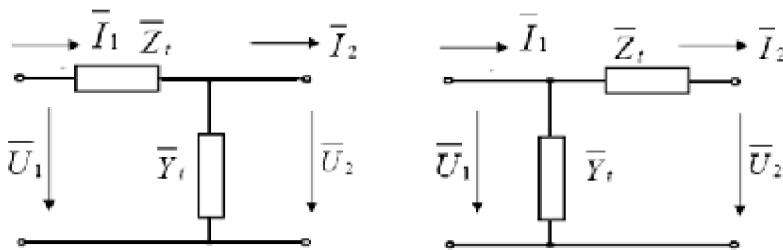
$$Z_{t1} \neq Z_{t2}$$

Pak Blondelovy konstanty mají tyto tvary:

$$\begin{aligned} A &= 1 + Z_{t1} \cdot Y_t \\ B &= Z_{t1} + Z_{t2} + Z_{t1} \cdot Z_{t2} \cdot Y_t \\ C &= Y_t \\ D &= 1 + Z_{t2} \cdot Y_t \end{aligned} \quad (5.324)$$

### $\Gamma$ článek

Článek  $\Gamma$  může být ve dvou provedeních a to s příčnou admitancí na výstupu článku nebo s příčnou admitancí na vstupu článku (a,b).



*Obr. 5.3-4 Náhradní článek  $\Gamma$  s příčnou admitancí na výstupu (a) a na vstupu (b)*

Blondelovy konstanty pro příčnou admitancí na výstupu:

$$\begin{aligned} A &= 1 + Z_t \cdot Y_t & B &= Z_t \\ C &= Y_t & D &= 1 \end{aligned} \quad (5.325)$$

Blondelovy konstanty pro příčnou admitancí na vstupu:

$$\begin{aligned} A &= 1 & B &= Z_t \\ C &= Y_t & D &= 1 + Z_t \cdot Y_t \end{aligned} \quad (5.326)$$

## 5.4 ZATÍŽENÍ TRANSFORMÁTORŮ

### 5.4.1 Druhy zatížení transformátoru

Transformátory mohou pracovat v základních třech typech zatížení:

- 1) Naprázdno
- 2) Nakrátko
- 3) Jmenovité zatížení

Samozřejmě existují i zatížení, které se pohybují mezi těmito třemi typy.

#### 1) Zatížení naprázdno

Chod naprázdno je charakterizován tím, že transformátor je na primární straně napájen jmenovitým napětím, na které je transformátor vytvořen a sekundární vinutí je rozpojeno. Primární obvod je uzavřen a prochází jím primární proud. Proud primárním vinutím vytváří magnetické pole, které působí na sekundární vinutí a indukuje v něm napětí. Proud v sekundárním vinutí ale samozřejmě díky rozpojenému vinutí nemůže procházet.

Díky rovnici přenášeného výkonu (5.22), by měl být primární proud také nulový. On ale v podstatě je, protože se spotřebovává na vytvoření a udržení magnetického pole a přemagnetování železa.

Měření zatížení naprázdno má využití jenom na zjištění náhradních parametrů transformátoru, konkrétně na parametry příčné větve ( $Y_i$ ).

#### 2) Zatížení nakrátko

Chod nakrátko je charakterizován tím, že transformátor je na primární straně napájen napětím, toto napětí nesmí být jmenovité, jinak by se transformátor zničil. Sekundární vinutí je zkratováno vodičem o stejném průřezu. Tento stav je stav poruchový a nebezpečný.

Primární obvod vytváří magnetické pole, které indukuje napětí v sekundárním vinutí. Proud sekundárním vinutím je téměř nekonečný, protože sekundární obvod je zkratován pouze vodičem a ten má velmi malý odpor. Napětí sekundárního obvodu je nulové, díky velkým úbytkům napětí vzniklým téměř nekonečným proudem.

Z měření naprázdno získáváme další hodnoty náhradní schématu transformátoru, konkrétně parametry podélné větve ( $Z_i$ ).

#### 3) Jmenovité zatížení

Chod s jmenovitým zatížením je charakterizován tím, že transformátor je na primární straně napájen jmenovitým napětím, na které je transformátor vytvořen a na svorky sekundárního vinutí je připojen odpor.

Odpor může být typu: kapacitního ( $\cos\varphi = 0,3$ ; proud předbíhá napětí)

Induktivního ( $\cos\varphi = 0,6$ ; proud se zpožďuje za napětím)

Čistě ohmického ( $\cos\varphi = 1$ , sekundární proud je ve fázi se sekundárním napětím)

Připojeným odporem protéká proud vytvořený magnetickým polem vytvořeným primárním obvodem. Pokud chceme tento proud zvýšit či snížit, musí tomu odpovídat i zvýšení či snížení proudu primárního.

## 5.5 REGULACE NAPĚTÍ U TRANSFORMÁTORŮ

### 5.5.1 Úvod o regulaci napětí

Změny napětí v elektrických sítích, které jsou vyvolány změnami zatížení, je nutné z technických důvodů a různé citlivosti spotřebičů udržet v určitých mezích. V distribučních sítích jsou dovolené odchylky napětí určeny požadavky odběratelů a optimálním způsobem regulace, při které se přihlíží k účinnosti a životnosti spotřebičů.[4]

Přístroje, které jsou velmi citlivé:

- a) **pro přepětí**-počítače, mikroprocesorová ovládání, audiovizuální technika, světelné regulátory, video přístroje, satelity, telefonní ústředny, faxy
- b) **pro podpětí**- ledničky, mrazničky, automatické pračky apod.

Přípustné odchylky od jmenovitého napětí jsou zobrazeny v tabulce. Různá technická kritéria určující meze odchylek napětí vedou k tomu, že je vhodné při regulaci napětí uvažovat zvlášť sítě přenosové a zvlášť sítě distribuční. Při tom se vlastní regulace provádí v každém stupni odděleně a to automaticky nebo ručně. U přenosových sítí můžeme připustit větší změny napětí, poněvadž v nich nejsou přímo zapojeny spotřebiče.[4]

*Tab.5.5-1 Přípustně odchylky od jmenovitého napětí podle norem ČSN 330120 a IEC 38*

Jmenovité Napětí(U) v kV	Přípustná odchylka v % U
do 1	±10
do 10	±10
22	±10
35	±10
110	±10
220	±10
400	±10

Transformátory, které zaprvé zajišťují transformaci napětí, ale zároveň počítají i se změnou zatížení na výstupních svorkách transformátoru můžeme dělit na tři typy a to:

#### 1) Transformátory s odbočkami

Tyto transformátory nás budou hlavně zajímat, protože tento druh regulace napětí používají hlavně distribuční transformátory. Jedná se o regulaci napětí, která je možná jedině, když je transformátor vypnut. Odbočky jsou většinou navrhnuty na ±5 nebo ±2,5% jmenovitého napětí. Vzhledem k tomu, že je to velmi jednoduchý a levný princip, tak má velmi velké využití v distribučních sítích v městských a jiných lokalitách. Transformátory regulační i s odbočkami nedokážou regulovat fázový posun. Proto se dají použít transformátory s příčnou regulací.

#### 2) Transformátory regulační

Transformátory, které mívají 8 až 16 regulačních stupňů po 2 až 2,5% jmenovitého napětí. Přepínání odboček se děje pod zatížením dálkovým ovladačem Jsou to zpravidla transformátory největších výkonů spojující sítě 400(220)/110kV (obvykle provedené jako autotransformátory) a transformátory spojující sítě 110/22(35)kV.[4]

### 3) Transformátory s příčnou regulací

Tyto transformátory dokážou regulovat fázový posun mezi vstupním a výstupním napětím. Jsou to transformátory velmi drahé a v podstatě se u nás nepoužívají. Nebudeme se již o nich ani už dále zmiňovat.

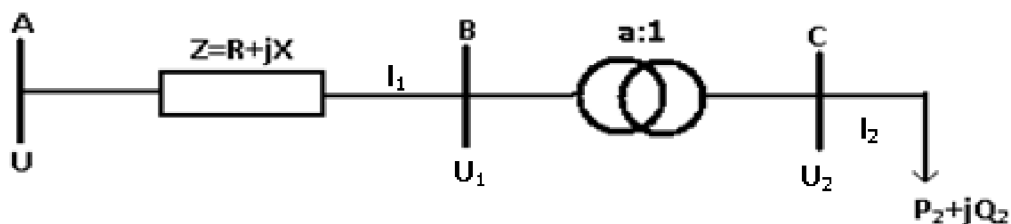
### Regulace napětí jalovým výkonem

Jsou to zdroje pro výrobu jalového výkonu např. synchronní stroje nebo kondenzátory. Tato skupina samozřejmě nepatří pod transformátory, ale myslím si, že je důležité ji zmínit. Později bude probraná trochu podrobněji.

## 5.5.2 Transformátory s odbočkami (Stupňová regulace)

### 5.5.2.1 Funkce transformátoru v jednoduchém přenosu

Pro objasnění jeho funkce uvažujme odběratele, který je zásobován ze sítě s konstantním napětím  $U$  přes vedení a ideální transformátor. Uvedení pro zjednodušení dalších úvah zanedbejme příčné admittance viz. obr. 1.4.-1.[4]

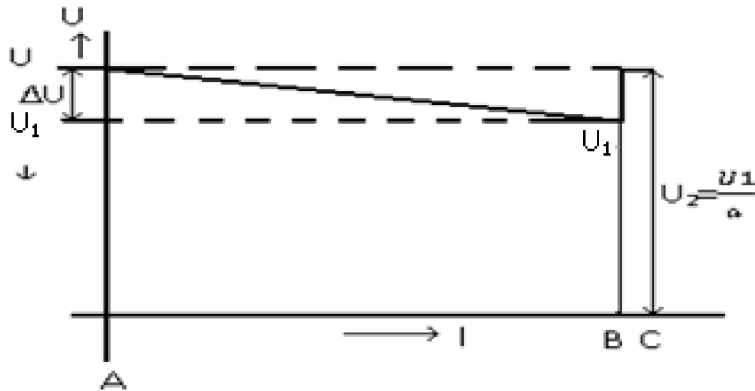


Obr. 5.5-1 Zjednodušené schéma distribuční sítě

$$U_2 = \frac{U \pm \sqrt{U^2 - 4XQ_2}}{2a} \quad (5.41)[4]$$

Z toho vzorce vyplývá (1.41), že můžeme regulovat napětí  $U_2$  pomocí nastavení převodu  $a$ . Pro zvýšení napětí ho musíme snížit a pro zmenšení naopak zvýšit. Předpokládáme výsledek rovnice kladný, kdyby se tak nestalo, překročili bychom mezní odebíraný výkon  $Q_2$ . Znaménko před odmocninou bereme jenom kladné, jinak by nám vyšlo příliš malé napětí nevhodné pro spotřebiče. Nevýhodou regulovaných transformátorů ale je to, že nedokážou odstranit jalový výkon  $Q_2$  což je příčina vzniku úbytku napětí  $\Delta U$ . Naopak změnou převodu  $a$  se můžou jalové ztráty i zvyšovat. Je tedy nutné zařadit prvek pro snížení jalového výkonu např. paralelní kompenzace.



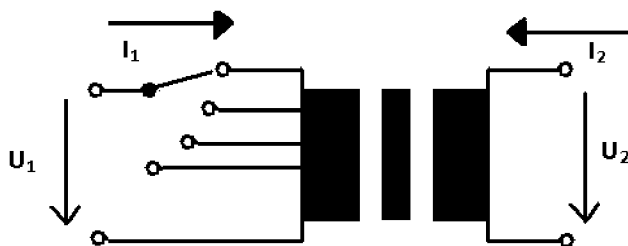


Obr. 5.5-2 Napěťové poměry v síti

Už jsme se zmínili, že napětí se řídí změnou převodu  $a$ , čili změnou počtu závitů příslušného vinutí. Změna počtu vinutí se může dít jak na sekundárním tak na primárním vinutí, ale je výhodné je měnit na té straně, kde se napětí mění. Jelikož v energetických rozvodech hlavní úbytky vznikají v dálkových sítích, tj. na straně vyššího napětí, řídí se obvykle napětí na straně vyššího napětí.[5] Pro tuto volbu mluví i důvody konstrukční, jelikož lze snáze navrhnout přepínač zařízení na vyšší napětí a menší proudy než naopak[5]. Ale samozřejmě vše se může dít i naopak protože napětí se může měnit i změnou zatížení ze strany sekundární to jest nižšího napětí.

Změna počtu závitů se provádí tzv. odbočkovou cívkou. Ta je na řídicím vinutí a to na konci vinutí nebo uprostřed. Trojfázové transformátory mají zapojeno řídicí vinutí do hvězdy či do trojúhelníka. Nejvíce využívané je zapojení do hvězdy. U tohoto zapojení je výhodné zapojit odbočkovou cívkou u uzlu, protože je pak přepínač zatížen pouze napětím odbočkové cívkou a ne celým napětím transformátoru. Přepínač může být umístěn v tomto zapojení uprostřed či na konci vinutí.

### 5.5.2.2 Přepínání odboček za vypnutého stavu

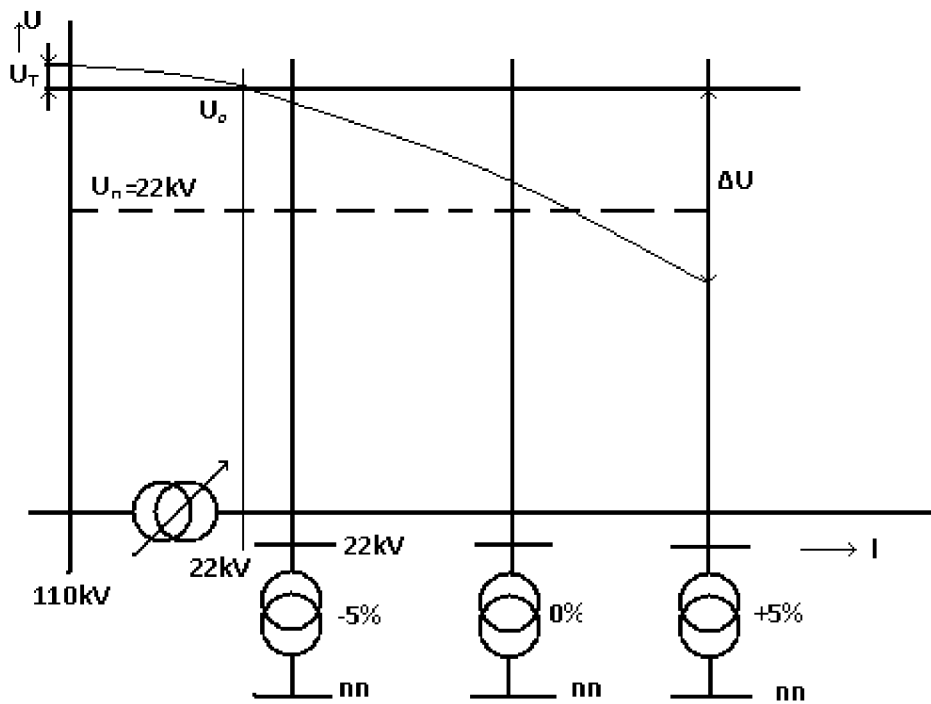


Obr. 5.5-3 Princip přepínání odboček

Transformátory s odbočkami jsou standardně vybaveny přepínačem odboček primárního vinutí vn. Přepnutí se provádí ručně a s ohledem na konstrukci vlastního přepínače a bezpečnost pracovníků, kteří tuto činnost provádějí, za vypnutého stavu, neboť ovládací páka přepínače odboček je umístěna na víku transformátoru v blízkosti průchodkových izolátorů vn. Přepnutím přidáváme nebo ubíráme závitů na primárním vinutí a tím měníme převodový poměr transformátoru.

Přepnutím odbočky na  $-5\%$  se nám zmenší napěťový převodový poměr, neboť ubereme počet závitů na primárním vinutí a tím se zvýší o  $5\%$  napětí na sekundárním vinutí nn. Logicky přepnutím na  $+5\%$  se nám napětí na sekundárním vinutí transformátoru sníží. S

ohledem na malou četnost přepínání je poruchovost přepínačů odboček minimální a životnost srovnatelná s životností vlastního transformátoru.



Obr. 5.5-4 Princip regulace napětí v distribučních sítích

## 5.6 NOVINKY U DISTRIBUČNÍCH TRANSFORMÁTORŮ

### 5.6.1 Monitor distribučního transformátoru - MDT 9.e (i)

Přístroj určený k provoznímu měření kvality dodávky elektrické energie dle EN 50160. Umožňuje statistický třífázový záznam měřených a vypočtených veličin U, I, P, Q, S, E, f, T, na sekundární straně a vyhodnocení abnormálních provozních stavů distribučních transformátorů venkovních a kabelových sítí vn.[10]



*Obr. 5.5-1 Ukázka zapojení monitoru distribučního transformátoru[10]*

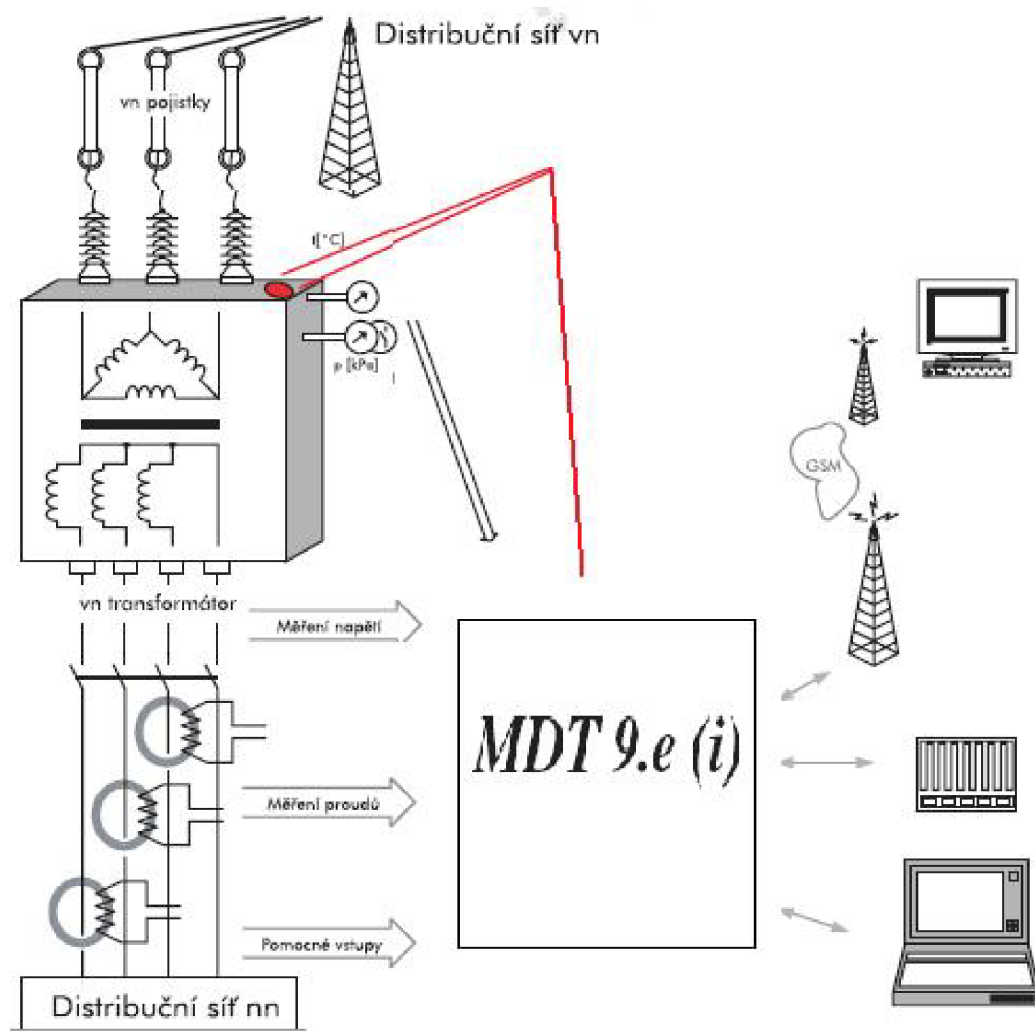
Měřicí část je složena z:

- 1) Tři napěťové vstupy (např. měření sekundárního napětí, využívají se děliče)
- 2) Tři proudové vstupy (např. měření sekundárních proudů, měřicí transformátory, Rogowského cívky)
- 3) Třífázové měření Q, S, P,  $\cos\varphi$ , E, f.
- 4) Měření teplot (pyročidlo, snímače-teplota okolí, teploty vinutí)
- 5) Pomocné vstupy- vnitřní poruchy (buchholzova ochrana, otevřená skříň rozvaděče)

Monitor MDT je založen na principu jednočipových signálových procesorů, má tři komunikační kanály:

- 1) Místní bezdrátové rozhraní IrDA pro spojení s notebookem
- 2) Připojení dálkové signalizace a přenosu dat ( integrovaný modem GSM-SMS, GSM-GPRS s možností připojení externí antény)
- 3) Připojení k místnímu ŘS trafostanice.

Pro místní signalizaci alarmových a poruchových hlášení je MDT vybaven dvoustupňovým alarmem a jedním poruchovým relé. Měřené a vypočítávané veličiny jsou vizualizovány na LCD grafickém displeji (128 x 64 bodů)



**Obr. 5.6-2 Schematicky znázorněný MDT 9[10]**

## 6 Výpočet změny napětí na nn svorkách distribučního transformátoru vn/nn při změně jeho zatížení

### Zadání

Průmyslový závod má tři transformátory, každý se jmenovitým výkonem  $S_n = 1,6 \text{ MVA}$  a jmenovitým převodem  $p = 22/0,4 \text{ kV}$ . Závod je napájen z trojfázového vedení se jmenovitým napětím  $U_n = 22 \text{ kV}$  se zadanými parametry z rozvodny  $22 \text{ kV}$ , kde se udržuje konstantní napětí  $23,1 \text{ kV}$ . Určete, jak se bude měnit napětí na svorkách nízkého napětí u transformátorů při změnách výkonu od chodu naprázdno do jmenovitého zatížení transformátorů. Účinník se předpokládá konstantní a rovný  $0,95$  ind.

### Parametry

#### Transformátor –

$$S_n = 1,6 \text{ MVA}$$

$$U_{1n} = 22 \text{ kV}$$

$$U_{2n} = 400 \text{ V}$$

$$e_k\% = 6$$

$$i_0\% = 0,7$$

$$\Delta P_{Fe} = 2,41 \text{ kW}$$

$$\Delta P_{Cu} = 16 \text{ kW}$$

$$D/y1$$

Odbočky transformátoru jsou  $(0,95 - 1 - 1,05) \times U_n$

#### Vedení-

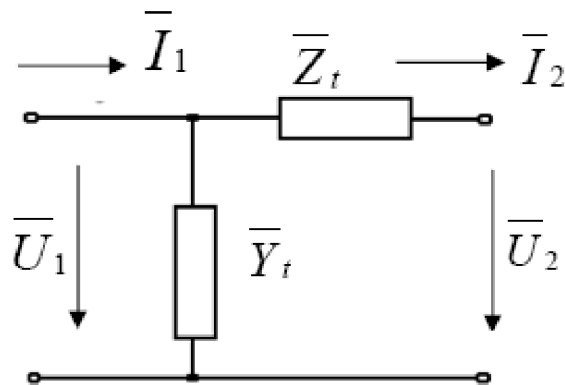
$$R_k = 0,319 \Omega/\text{km}$$

$$X_k = 0,36 \Omega/\text{km}$$

$$l = 18 \text{ km}$$

## Řešení

Transformátor nahradíme dvojhranem typu  $\Gamma$



Obr. 6-1 Náhradní článek transformátoru  $\Gamma$

### Podélná impedance

Podélná impedance ( $Z_t$ ) vyjadřuje nedokonalost magnetické vazby mezi primárním a sekundárním vinutím jinými slovy s rozptylovými toky a odporem obou vinutí

Podélná impedance se zjišťuje z měření nakrátko.

$$\boxed{Z_{It} = R_{It} + jX_{It}} \quad (6.11)$$

**Rezistence  $R_t$**  - Rezistence obou vinutí

Vztah pro ni je vzorec :

$$R_{It} = \frac{\Delta P_{Cu} \cdot U_n^2}{S_n^2} = \frac{16000 \cdot 22000^2}{1600000^2} = \underline{\underline{3,025\Omega}} \quad (6.12)$$

**Rozptylová reaktance  $X_t$**  - Rozptylová reaktance obou vinutí

Vztah pro ni je:

$$X_{It} = \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \sqrt{e_k^2 \cdot \frac{\Delta P_{Cu}^2}{S_n^2}} = \frac{22000^2}{1600000} \cdot \sqrt{0,06^2 \cdot \frac{16000^2}{1600000^2}} = \underline{\underline{17,9\Omega}} \quad (6.13)$$

$$\bar{Z}_{It} = R_{It} + jX_{It} = \underline{\underline{(3,025 + j17,9)\Omega}} \quad (6.14)$$

## Příčná admittance

Admittance  $Y_t$  vyjadřují magnetizační proud. Tyto parametry určujeme z měření naprázdno a nakrátko. Příčná admittance se zjišťuje z měření naprázdno.

$$\boxed{Y_{It} = G_{It} - jB_{It}} \quad (6.15)$$

**Konduktance  $G_t$**  - Ztráty v magnetickém obvodu vřivými proudy a magnetickou hysterzi  
Vztah pro ni je:

$$G_{It} = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_n^2} = \frac{2410}{22000^2} = \underline{\underline{4,98 \cdot 10^{-6} \text{ S}}} \quad (6.16)$$

**Susceptance  $B_t$**  - Zahrnuje jalový výkon potřebný k magnetizaci při  $U_n$   
Vztah pro ni je:

$$B_{It} = \frac{1}{U_n^2} \cdot \sqrt{(S_n \cdot i_0)^2 - \Delta P_{Fe}^2} = \frac{1}{22000^2} \cdot \sqrt{(1600000 \cdot 0,007)^2 - 2410^2} = \underline{\underline{2,26 \cdot 10^{-5} \text{ S}}} \quad (6.17)$$

$$\bar{Y}_{It} = G_{It} - jB_{It} = \underline{\underline{(4,98 - j22,6) \cdot 10^{-6} \text{ S}}} \quad (6.18)$$

Teď jsme vypočítali parametry jednoho transformátoru, pro lepší počítání budeme nyní počítat se všemi třemi transformátory shrnutými do jednoho článku  $\Gamma$

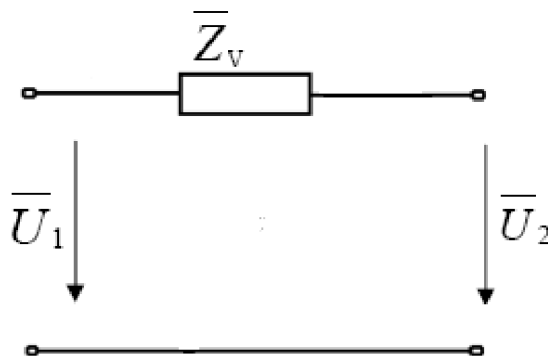
Pro tento článek platí:

$$\bar{Z}_t = \frac{1}{3} \cdot \bar{Z}_{1t} = R_t + jX_t = \frac{1}{3} \cdot (3,025 + j17,9) = \underline{\underline{(1,0083 + j5,966) \Omega}} \quad (6.19)$$

$$\bar{Y}_t = 3 \cdot \bar{Y}_{1t} = G_t - jB_t = 3 \cdot (4,98 - j22,6) \cdot 10^{-6} = \underline{\underline{(14,94 - j67,8) \mu\text{S}}} \quad (6.2)$$

Nyní musíme vytvořit i náhradní schéma vedení

Související schéma:

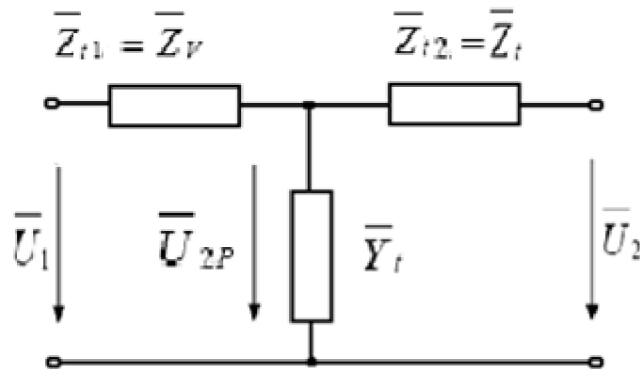


Obr. 6-2 Náhradní schéma vedení

Vypočítáme podélnou impedanci vedení  $\overline{Z}_V$

$$\overline{Z}_V = \mathbf{l} \cdot (\mathbf{R}_k + j\mathbf{X}_k) = 18 \cdot (0,319 + j0,36) = \underline{\underline{5,742 + j6,46}} \Omega \quad (6.21)$$

Vypočítali jsme náhradní schéma transformátorů a teď i vedení. Spojením těchto dvou schémat do jednoho získáme nesouměrný T člunek. Jeho podoba je na následujícím schématu.



Obr. 6-3 Náhradní schéma vedení a transformátoru nesouměrným T člunkem

Pro další naše výpočty je důležité vypočítat z toho T-článku vypočítat Blondelovy konstanty.

$$\begin{aligned} A &= \mathbf{1} + \mathbf{Z}_{t1} \cdot \mathbf{Y}_t = 1 + (5,742 + j6,48) \cdot (14,94 - 67,8) \cdot 10^{-6} = \\ &= (1,000525 - 0,0002925) = \underline{\underline{1,000525 \angle -0,0168^\circ}} \end{aligned} \quad (6.22)$$

$$\begin{aligned} B &= \mathbf{Z}_{t1} + \mathbf{Z}_{t2} + \mathbf{Z}_{t1} \cdot \mathbf{Z}_{t2} \cdot \mathbf{Y}_t = (5,742 + j6,48) + (1,0083 + j5,966) + \\ &+ (5,742 + j6,48) \cdot (1,0083 + j5,966) \cdot (14,94 - 67,8) \cdot 10^{-6} = \\ &= (6,753 + j12,448) = \underline{\underline{14,162 \angle 61,52^\circ}} \end{aligned} \quad (6.23)$$

$$C = \mathbf{Y}_t = (14,94 - 67,8) \cdot 10^{-6} = \underline{\underline{69,43 \cdot 10^{-6} \angle -77,587^\circ}} \quad (6.24)$$

$$\begin{aligned} D &= \mathbf{1} + \mathbf{Z}_{t2} \cdot \mathbf{Y}_t = 1 + (1,0083 + j5,966) \cdot (14,94 - 67,8) \cdot 10^{-6} = \\ &= 1,00042 + 2,077 \cdot 10^{-5} = \underline{\underline{1,00042 \angle 0,0012^\circ}} \end{aligned} \quad (6.25)$$



Pro výpočet našeho příkladu budeme potřebovat tento vztah (5.311):

$$\overline{U}_1 = \overline{A} \cdot \overline{U}_2 + \overline{B} \cdot \frac{\overline{S}_2}{\overline{U}_2^*}$$

Z tohoto vzorce vyjádříme  $\overline{S}_2$

$$\overline{S}_2 = \frac{\overline{U}_1 \cdot \overline{U}_2^*}{\overline{B}} - \frac{\overline{A}}{\overline{B}} \cdot \overline{U}_2 \cdot \overline{U}_2^* \quad (6.26)$$

Takto charakterizujeme jednotlivé členy použité v 6.26:

$$\overline{U}_1 = U_1 \angle 0^\circ \quad (6.27)$$

$$\overline{U}_2 = k \cdot U_1 \angle v_2 \quad (6.28)$$

$$\overline{A} = A \angle \alpha \quad (6.29)$$

$$\overline{B} = B \angle \beta \quad (6.3)$$

Nyní do vztahu 6.26 dosadíme 6.27, 6.28, 6.29, 6.3.

$$\overline{S}_2 = P_2 - jQ_2 = f(k, U_1, A, B, \alpha, \beta, v_2) = \frac{k \cdot U_1^2}{B} \angle (-v_2 - \beta) - \frac{A \cdot k^2 \cdot U_1^2}{B} \angle \alpha - \beta \quad (6.31)$$

(Pozn.  $\overline{U}_2 \cdot \overline{U}_2^* = U_2^2$  )

Znamé hodnoty v rovnici 6.31 sjednotíme do tří konstant:

$$m_1 = \frac{U_1^2}{B} \quad (6.32)$$

$$m_2 = \frac{A \cdot U_1^2}{B} \cdot \cos(\alpha - \beta) \quad (6.33)$$

$$m_3 = \frac{A \cdot U_1^2}{B} \cdot \sin(\alpha - \beta) \quad (6.34)$$

Nyní do rovnice 6.31 dosadíme již zmíněné konstanty  $m_1, m_2, m_3$ .

$$\begin{aligned}\overline{S_2} &= P_2 - jQ_2 = [k \cdot m_1 \cdot \cos(-\nu_2 - \beta) + j \cdot k \cdot m_1 \cdot \sin(-\nu_2 - \beta)] - [k^2 \cdot m_2 + j \cdot k^2 \cdot m_3] = \\ &= [k \cdot m_1 \cdot \cos(\nu_2 + \beta) - k^2 \cdot m_2] - j[k \cdot m_1 \cdot \sin(\nu_2 + \beta) + k^2 \cdot m_3]\end{aligned}\quad (6.35)$$

Z předcházející rovnice 6.35 tedy platí pro výkony  $P_2$  a  $Q_2$ :

$$P_2 = k \cdot m_1 \cdot \cos(\nu_2 + \beta) - k^2 \cdot m_2 \quad (6.36)$$

$$Q_2 = k \cdot m_1 \cdot \sin(\nu_2 + \beta) + k^2 \cdot m_3 \quad (6.37)$$

Potřebujeme znát  $\nu_2$  a  $k$ , začneme tedy s vyjadřováním goniometrických členů z rovnic 6.36 a 6.37:

$$\cos(\nu_2 + \beta) = \frac{P_2 + k^2 \cdot m_2}{k \cdot m_1} \quad (6.38)$$

$$\sin(\nu_2 + \beta) = \frac{Q_2 - k^2 \cdot m_3}{k \cdot m_1} \quad (6.39)$$

Tato rovnice je základní pro goniometrické funkce :

$$\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha = 1 \quad (6.4)$$

Pro náš příklad má tato rovnice tento tvar:

$$\cos^2(\nu_2 + \beta) + \sin^2(\nu_2 + \beta) = 1 \quad (6.41)$$

Do rovnice 6.41 dosadíme rovnice 6.38 a 6.39:

$$\left(\frac{P_2 + k^2 \cdot m_2}{k \cdot m_1}\right)^2 + \left(\frac{Q_2 - k^2 \cdot m_3}{k \cdot m_1}\right)^2 = 1 \quad (6.42)$$

Po první úpravě obdržíme:

$$\frac{P_2^2 + 2 \cdot P_2 \cdot m_2 \cdot k^2 + m_2^2 \cdot k^4}{m_1^2 \cdot k^2} = \frac{Q_2^2 - 2 \cdot Q_2 \cdot m_3 \cdot k^2 + m_3^2 \cdot k^4}{m_1^2 \cdot k^2} = 1 \quad (6.43)$$

Po druhé úpravě:

$$P_2^2 + 2 \cdot P_2 \cdot m_2 \cdot k^2 + m_2^2 \cdot k^4 + Q_2^2 - 2 \cdot Q_2 \cdot m_3 \cdot k^2 + m_3^2 \cdot k^4 = m_1^2 \cdot k^2 \quad (6.44)$$

Nyní vytvoříme bikvadratickou rovnici pro člen k :

$$k^4 \cdot (m_2^2 + m_3^2) + k^2(2 \cdot P_2 \cdot m_2 - 2 \cdot Q_2 \cdot m_3 - m_1^2) + (P_2^2 + Q_2^2) = 0 \quad (6.45)$$

Nejjednodušší řešení pro tuto rovnici je řešit ji metodou **substituce**.

$$\text{Tzn.} \quad \boxed{y = k^2} \quad (6.46)$$

Takže naše rovnice se změní v rovnici kvadratickou.

Potřebné hodnoty k výpočtu kvadratické rovnice

$$\bar{U}_1 = U_1 \angle 0^\circ = 23100 \angle 0^\circ$$

$$\bar{A} = A \angle \alpha = 1,000525 \angle -0,0168^\circ$$

$$\bar{B} = B \angle \beta = 14,162 \angle 61,52^\circ$$

$$\cos \varphi = 0.95$$

$$S_n = 4,8 \text{MVA}$$

Tyto zadané nebo vypočítané hodnoty dosadíme do našich již zmíněných konstant  $\boxed{m_1, m_2, m_3}$ . (Vztahy 6.32, 6.33, 6.34)

$$m_1 = \frac{U_1^2}{B} = \frac{23100^2}{14,162} = \underline{\underline{37679000}} \quad (6.47)$$

$$m_2 = \frac{A \cdot U_1^2}{B} \cdot \cos(\alpha - \beta) = \frac{1,000525 \cdot 23100^2}{14,162} \cdot \cos(-0,0168 - 61,52) = \underline{\underline{17967021}} \quad (6.48)$$

$$m_3 = \frac{A \cdot U_1^2}{B} \cdot \sin(\alpha - \beta) = \frac{1,000525 \cdot 23100^2}{14,162} \cdot \sin(-0,0168 - 61,52) = \underline{\underline{-33141881}} \quad (6.49)$$

Dále potřebujeme k řešení bikvadratické rovnice vypočítat činnou a jalovou složku výkonu:

$$P_2 = |\bar{S}| \cdot \cos \varphi = 4,8 \cdot 10^6 \cdot 0,95 = \underline{\underline{4,56 \text{MW}}} \quad (6.5)$$

$$Q_2 = |\bar{S}| \cdot \sin(\cos^{-1} \varphi) = 4,8 \cdot 10^6 \cdot 0,3123 = \underline{\underline{1,4988 \text{MVAr}}} \quad (6.51)$$

Tedy vypočítáme jednotlivé členy bikvadratické rovnice 6.45:

Člen s  $k^4$  (bikvadratický):

$$m_2^2 + m_3^2 = 17967021^2 + (-33141881)^2 = \underline{\underline{1,4212 \cdot 10^{15}}} \quad (6.52)$$

Člen s  $k^2$  (kvadratický):

$$\begin{aligned} 2 \cdot P_2 \cdot m_2 - 2 \cdot Q_2 \cdot m_3 - m_1^2 &= 2 \cdot 4,56 \cdot 10^6 \cdot 17967021 - 2 \cdot 1,4988 \cdot 10^6 \cdot \\ &\cdot (-33141881) - 37679000^2 = \underline{\underline{-1,157 \cdot 10^{15}}} \end{aligned} \quad (6.53)$$

Člen reálný (absolutní):

$$P_2^2 + Q_2^2 = (4,56 \cdot 10^6)^2 + (1,4988 \cdot 10^6)^2 = \underline{\underline{2,304 \cdot 10^{13}}} \quad (6.54)$$

Celá vyčíslená bikvadratická rovnice je ve tvaru:

$$\boxed{k^4 \cdot 1,4212 \cdot 10^{15} + k^2 \cdot (-1,157 \cdot 10^{15}) + 2,304 \cdot 10^{13} = 0} \quad (6.55)$$

Zvolili jsme při řešení této rovnice metodu substituce, tudíž za  $k^2$  dosadíme  $y$  a dostaneme rovnici kvadratickou, kterou již umíme řešit.

$$\boxed{y^2 \cdot 1,4212 \cdot 10^{15} + y \cdot (-1,157 \cdot 10^{15}) + 2,304 \cdot 10^{13} = 0} \quad (6.56)$$

Klasické řešení kvadratické rovnice spočívá ve výpočtu diskriminantu (D):

Jednotlivé členy rovnice si označíme písmeny:

$$A = 1,4212 \cdot 10^{15}$$

$$B = -1,157 \cdot 10^{15}$$

$$C = 2,304 \cdot 10^{13}$$

$$\text{Diskriminant D: } \boxed{D = B^2 - 4 \cdot A \cdot C} \quad (6.57)$$

$$D = (-1,157 \cdot 10^{15})^2 - 4 \cdot 1,4212 \cdot 10^{15} \cdot 2,304 \cdot 10^{13} =$$

$$D = \underline{\underline{1,2077 \cdot 10^{30}}} \quad (6.58)$$

Když známe diskriminant, můžeme vypočítat oba dva výsledné kořeny rovnice  $y_1$  a  $y_2$ :

$$y_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{D}}{2 \cdot A} \quad (6.59)$$

$$y_1 = \frac{-B + \sqrt{D}}{2 \cdot A} = \frac{1,157 \cdot 10^{15} + \sqrt{1,2077 \cdot 10^{30}}}{2 \cdot 1,4212 \cdot 10^{15}} = \underline{\underline{0,7937}} \quad (6.6)$$

$$y_2 = \frac{-B - \sqrt{D}}{2 \cdot A} = \frac{1,157 \cdot 10^{15} - \sqrt{1,2077 \cdot 10^{30}}}{2 \cdot 1,4212 \cdot 10^{15}} = \underline{\underline{0,0204}} \quad (6.61)$$

Použili jsme metodu substituce, takže musíme výsledky kvadratické rovnice zase převést zpátky. Dosadíme do rovnice 6.46 a vyjádříme  $k$ :

$$k_1 = \sqrt{y_1} = \sqrt{0,7937} = \underline{\underline{0,8907}} \quad (6.62)$$

$$k_2 = \sqrt{y_2} = \sqrt{0,0204} = \underline{\underline{0,1429}} \quad (6.63)$$

Výsledek  $k_2$  nepřichází v úvahu, proto uvažujeme jenom:

$$\mathbf{k_1 = 0,8907}$$

Když nyní již známé  $k$ , tak můžeme vypočítat hodnotu napětí na konci nesouměrného dvojbranu, tedy  $U_2$ .

$$U_2 = k \cdot U_1 = 0,8907 \cdot 23100 = \underline{\underline{20575,2V}} \quad (6.64)$$

Vypočítali jsme modul ( $U_2$ ) sekundárního napětí. Potřebujeme znát i jeho fázi, vyjádříme ji z rovnice 6.38:

$$v_2 = \left[ \cos^{-1} \left[ \frac{P_2 + m_2 \cdot k^2}{k \cdot m_1} \right] - \beta \right] \quad (6.65)$$

$$v_2 = \left[ \cos^{-1} \left[ \frac{4,56 \cdot 10^6 + 17967021 \cdot 0,8907^2}{0,8907 \cdot 37679000} \right] - 61,52 \right] = \underline{\underline{-5,62^\circ}} \quad (6.66)$$

Dále bychom měli zjistit napětí na svorkách primárního vinutí transformátoru ( $U_P$ ). Toto napětí se dá logicky zjistit z náhradního schématu transformátoru a vedení nesouměrným T článkem (6.2.-3). K napětí  $U_2$  musíme přičíst úbytek napětí na podélné impedanci  $Z_{t2}$ , tedy na podélné impedanci transformátoru  $Z_t$ .

$$U_P = U_2 + U_{Zt} \quad (6.67)$$

$$U_P = U_2 + R_t \cdot \frac{P_2}{U_2} + X_t \cdot \frac{Q_2}{U_2} \quad (6.68)$$

$$U_P = 20575,2 + 1,0083 \cdot \frac{4,56 \cdot 10^6}{20575,2} + 5,966 \cdot \frac{1,4988 \cdot 10^6}{20575,2} = \underline{\underline{21232,68V}} \quad (6.69)$$

Z předcházejícího výpočtu jsme zjistili napětí na konci nesouměrného dvojbranu. Nyní potřebujeme, zjistit jaké je napětí na NN svorkách distribučního transformátoru. Tudíž musíme napětí  $U_2$ , což je VN převést na stranu NN.

Tento převod musíme provést pro všechny tři odbočky transformátoru (0,95 - 1 - 1,05) x  $U_n$ , tedy 20,9kV – 22kV – 23,1kV.

**a) První odbočka 20,9kV**

$$U_{20,9}' = U_2 \cdot \frac{400}{20900} = k \cdot U_1 \cdot \frac{400}{20900} = k \cdot 23100 \cdot \frac{400}{20900} = \boxed{k \cdot 442(V)} \quad (6.7)$$

**b) Jmenovité napětí 22kV**

$$U_{22}' = U_2 \cdot \frac{400}{22000} = k \cdot U_1 \cdot \frac{400}{22000} = k \cdot 23100 \cdot \frac{400}{22000} = \boxed{k \cdot 420(V)} \quad (6.71)$$

**c) Druhá odbočka 23,1kV**

$$U_{23,1}' = U_2 \cdot \frac{400}{23100} = k \cdot U_1 \cdot \frac{400}{23100} = k \cdot 23100 \cdot \frac{400}{23100} = \boxed{k \cdot 400(V)} \quad (6.72)$$

Nyní tedy provedeme výpočet odboček pro jmenovitý výkon transformátoru

**a) Pro odbočku 20,9kV**

$$U_{20,9}' = k \cdot 442 = 0,8907 \cdot 442 = \underline{\underline{391,91V}} \quad (6.73)$$

b) Pro Jmenovité napětí 22kV

$$U_{22}' = k \cdot 420 = 0,8907 \cdot 420 = \underline{\underline{374,09V}} \quad (6.74)$$

c) Pro odbočku 23,1kV

$$U_{23,1}' = k \cdot 400 = 0,8907 \cdot 400 = \underline{\underline{356,28V}} \quad (6.75)$$

Dále jsem vytvořil tabulku pro zatížení transformátoru od chodu naprázdno až do jmenovitého zatížení. Tabulka obsahuje vypočítané hodnoty  $k, U_P, U_2, U_{20,9}, U_{22}, U_{23,1}$  a  $u_2$ . Jako krok jsem zvolil 5%. Tabulka je na následující straně

Tab. 6-1 změna napětí na NN svorkách transformátoru při změně zatížení

$S_n$ (MVA)	$P_2$ (MW)	$Q_2$ (MVar)	$k$ (-)	$U_P$ (V)	$U_2$ (V)	$U_{20,9}$ (V)	$U_{22}'$ (V)	$U_{23,1}'$ (V)	$u_2$ (°)
0	0,000	0,000	0,9995	23674,31	23087,86	439,77	419,78	399,79	0,017
0,24	0,228	0,075	0,9948	23569,31	22980,12	437,72	417,82	397,92	-0,235
0,48	0,456	0,150	0,9901	23462,91	22870,90	435,64	415,83	396,03	-0,489
0,72	0,684	0,225	0,9853	23355,04	22760,15	433,53	413,82	394,12	-0,746
0,96	0,912	0,300	0,9804	23245,65	22647,81	431,39	411,78	392,17	-1,005
1,2	1,140	0,375	0,9755	23134,69	22533,83	429,22	409,71	390,20	-1,267
1,44	1,368	0,450	0,9705	23022,12	22418,16	427,01	407,60	388,19	-1,532
1,68	1,596	0,525	0,9654	22907,85	22300,71	424,78	405,47	386,16	-1,800
1,92	1,824	0,600	0,9602	22791,84	22181,44	422,50	403,30	384,09	-2,070
2,16	2,052	0,675	0,9550	22674,02	22060,26	420,20	401,10	382,00	-2,344
2,4	2,280	0,750	0,9497	22554,30	21937,10	417,85	398,86	379,86	-2,622
2,64	2,508	0,824	0,9442	22432,62	21811,87	415,46	396,58	377,69	-2,902
2,88	2,736	0,899	0,9387	22308,89	21684,49	413,04	394,26	375,49	-3,187
3,12	2,964	0,974	0,9331	22183,01	21554,86	410,57	391,91	373,24	-3,475
3,36	3,192	1,049	0,9274	22054,90	21422,88	408,05	389,51	370,96	-3,767
3,6	3,420	1,124	0,9216	21924,44	21288,43	405,49	387,06	368,63	-4,063
3,84	3,648	1,199	0,9156	21791,53	21151,40	402,88	384,57	366,26	-4,364
4,08	3,876	1,274	0,9096	21656,04	21011,65	400,22	382,03	363,84	-4,670
4,32	4,104	1,349	0,9034	21517,83	20869,04	397,51	379,44	361,37	-4,980
4,56	4,332	1,424	0,8971	21376,76	20723,41	394,73	376,79	358,85	-5,296
4,8	4,560	1,499	0,8907	21232,68	20575,20	391,91	374,09	356,28	-5,620

## Shrnutí výsledků

Když se podíváme na výsledné hodnoty v tabulce tak:

### **Pro jmenovité napětí 22kV platí:**

Že napětí na straně nízkého napětí s rostoucím zatížením klesá. A to v intervalu  $\langle 419,78; 374,09 \rangle$  V. Hodnota při maximálním zatížení je (viz 1.671) 374,09V.

### **Pro odbočku 20,9kV platí:**

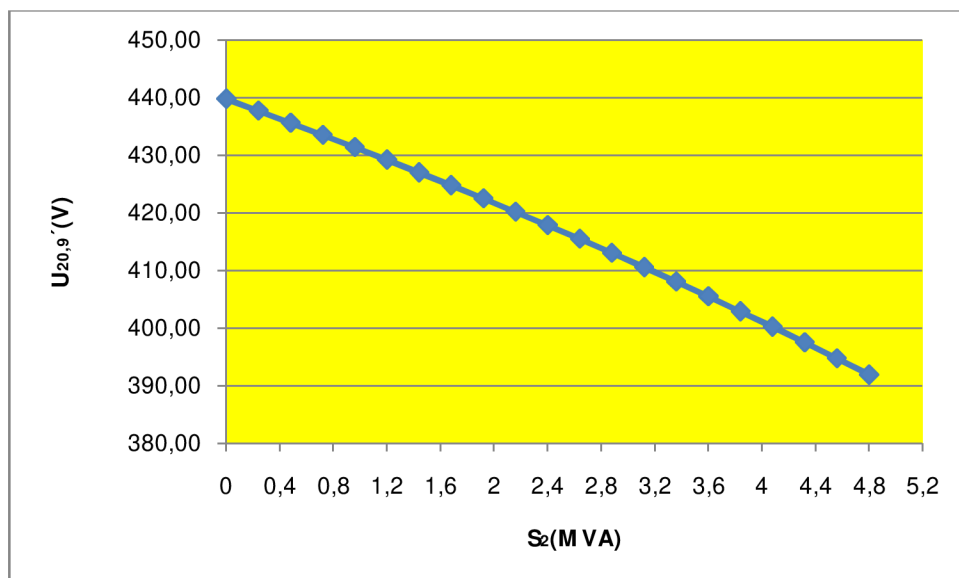
Že napětí na straně nízkého napětí s rostoucím zatížením klesá. A to v intervalu  $\langle 439,77; 391,9 \rangle$  V. Hodnota při maximálním zatížení je (viz 1.672) 391,9V.

### **Pro odbočku 23,1kV platí:**

Že napětí na straně nízkého napětí s rostoucím zatížením klesá. A to v intervalu  $\langle 399,79; 356,28 \rangle$  V. Hodnota při maximálním zatížení je (viz 1.672) 356,28V.

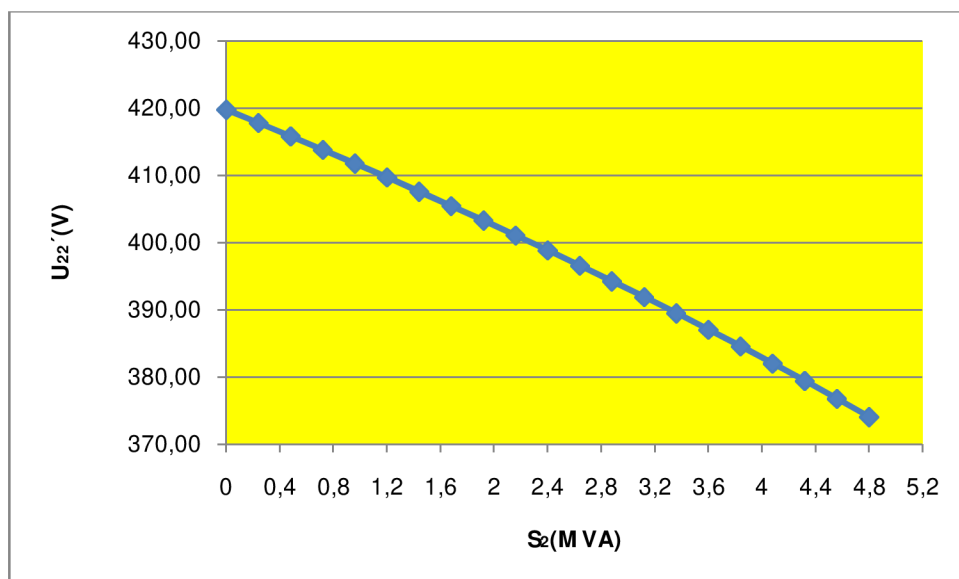
Fáze  $v_2$  se změnou zatížení samozřejmě taky mění. Její změna je s rostoucím zatížením klesající a to v intervalu  $\langle 0,017^\circ; -5,62^\circ \rangle$

Dále zde uvádím graficky zpracované hodnoty z výpočtů a to závislost napětí na straně NN na změně zatížení.

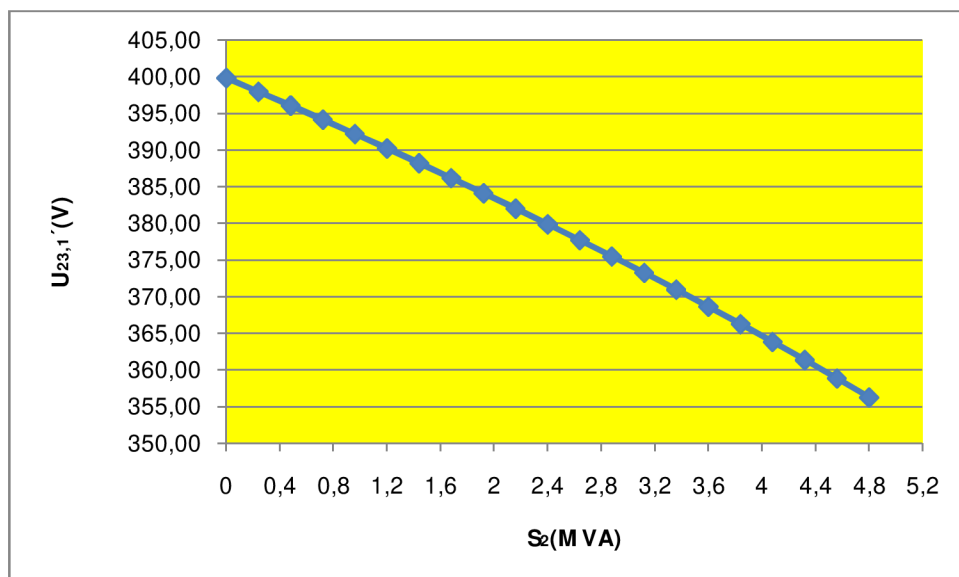


**Obr. 6-4 závislost napětí na straně NN na změně zatížení pro odbočku 20,9kV**

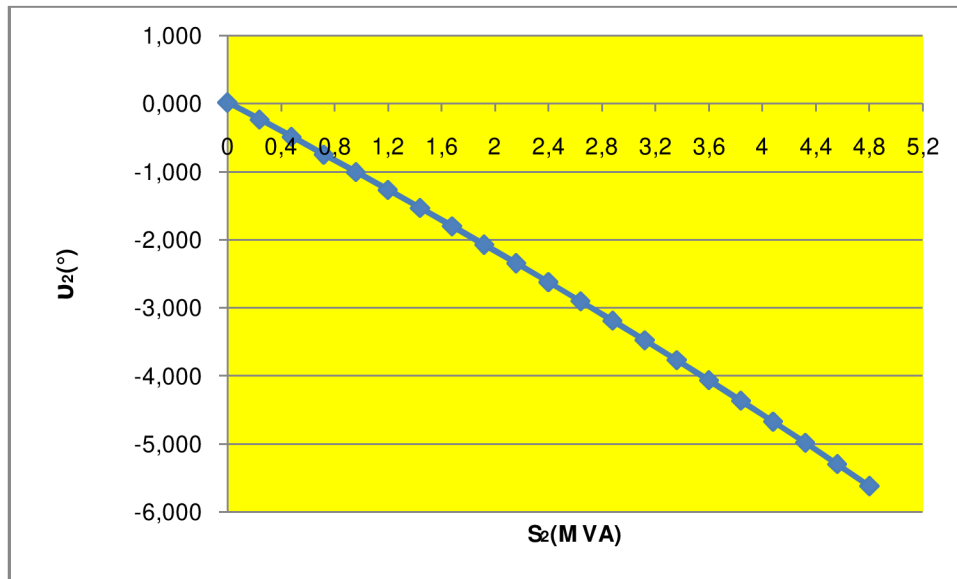




*Obr. 6-5 závislost napětí na straně NN na změně zatížení pro jmenovité napětí 22kV*



*Obr. 6-6 závislost napětí na straně NN na změně zatížení pro odbočku 23,1kV*



*Obr. 6-7 závislost fáze sekundárního napětí na změně zatížení pro odbočku 23,1kV*

## 7 Závěr

V této práci jsem se ze začátku věnoval konstrukci a principu transformátoru, abychom věděli vůbec, co tyto přístroje dělají a jak jsou konstruovány. Tuto teorii jsem velmi zestručnil. Hlavní úlohou bylo trošku nastínit princip transformátoru čtenářovi, aby se dokázal v dalších stránkách lépe orientovat.

Dále jsem psal o náhradě transformátoru dvojbranem, tedy náhradou článkem T a  $\Gamma$ . Tyto články umožňují, abychom mohli s transformátory počítat a jednodušeji určovat jejich provozní stavy. K této kapitole patří i přepočítání parametru transformátorů. Na ní navazovalo řešení těchto dvojbranů a to pomocí Blondelových konstant, které tento článek velmi zjednodušuji, a tím nám usnadňují operace s těmito články. Jejich vzorce jsem vypsals pro oba dva druhy článků, které jsem již zmínil. V našem příkladě, který bude následovat po teoretické části, využijeme vzorce Blondelových konstant pro nesouměrný T článek.

Další kapitola se zabývala regulací napětí u transformátorů. Samozřejmě jsem rozebral transformátory s odbočkami, na tomto principu pracují distribuční transformátory, které jsou úkolem mojí práce. Zkusil jsem na jednoduchém přenosu vysvětlit využití distribučního transformátoru a vysvětlení převodu transformátoru, pomocí kterého dokážeme napětí u transformátoru regulovat. Převod je změna délky jedné z cívek u transformátoru. Popsal jsem i postup jak se změna odboček provádí.

Poslední krátká kapitolka se věnovala jedné novince u distribučních transformátorů a to přístroji **MDT 9**. Je to přístroj, pomocí kterého kontrolujeme hodnoty veličin jako U, I, P, Q, S, E, f, T na sekundární straně transformátorů. Tento přístroj kontroluje i stavy ochrany transformátorů. Přístroj vlastní připojení k počítačům, i k velmi vzdáleným rozvodnám, které využijeme u transformátorů, u kterých neustále nejsme, abychom je kontrolovali.

Na teoretickou část navazoval příklad o transformátorech, jeho zadání (zjednodušeně) bylo vysledovat, jak se mění napětí na sekundárních svorkách transformátoru (nn), když měníme jeho zatížení od chodu naprázdno až po jmenovité zatížení. Počítání se provádělo i pro obě dvě odbočky transformátoru.

Tento příklad jsem řešil náhradou transformátoru dvojbranem, v našem případě jsem použil článek  $\Gamma$ . V zadání jsem musel samozřejmě brát v úvahu i vedení. Takže jsem spojil náhradní články vedení a transformátoru, v jeden nesouměrný článek T. Dále jsem tento článek řešil pomocí Blondelových konstant. Využil jsem vzorec 5.311, a z něho jsem dál vycházel k zjištění hledaného výsledku. Všechny výsledky jsou podrobně shrnuty v tab. 6-1.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Dr. LADISLAV CIGÁNEK, *STAVBA ELETRICKÝCH STROJŮ*, Vydalo Státní nakladatelství technické literatury Praha 1 v roce 1958
- [2] ELEKTRONICKÝ KATALOG DRIBO, Brno [www.dribo.cz](http://www.dribo.cz)
- [3] MAXMILIÁN SKÁLA, *TRANSFORMÁTORY*, Vydalo Státní nakladatelství technické literatury Praha 1 v roce 1964.
- [4] EVŽEN HALUZÍK, *ŘÍZENÍ PROVOZU ELEKTRIZAČNÍCH SOUSTAV*, Vydalo Vysoké učení technické v Brně v roce 1983
- [5] Prof. Ing. Dr. JAN BAŠTA DrSc., Prof. Ing. JAROSLAV CHLÁDEK, Doc. Ing., IMRICH MAYER, *TEORIE ELEKTRICKÝCH STROJŮ*, Vydalo Státní nakladatelství technické Literatury Praha 1 společně s nakladatelství ALFA Bratislava v roce 1968.
- [6] FRANTIŠEK PEŠÁK, *TRANSFORMÁTORY*, Vydal Elektrotechnický svaz
- [7] SCHNEIDER ELEKTRIC-INTERNETOVÝ OBCHOD, [www.schneider elektrik.cz](http://www.schneider elektrik.cz)
- [8] ONDRŮŠEK, Č., *ELEKTRICKÉ STOJE. SCRIPTUM*. VUT, Brno, 2006
- [9] BLAŽEK VLADIMÍR, *DISTRIBUCE ELEKTRICKÉ ENERGIE. SCRIPTUM*. VUT, Brno, 2007
- [10] FIRMA EGÚ BRNO, [www.egu.cz](http://www.egu.cz)  
BLAŽEK VLADIMÍR, PAAR MARTIN, *PŘENOSOVÉ SÍTĚ, SCRIPTUM*, VUT, Brno, 2007