

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta elektrotechnická**

**K13115 – Katedra elektroenergetiky**

---



**Model a analýza provozních režimů transformátoru  
přenosové soustavy**

**Bakalářská práce**

**Pavel Skála**

**Praha 2015**

**CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE**

**Faculty of Electrical Engineering**

**K13115 – Department of Electroenergetics**

---



**Model and Operation States Analysis of a Transmission  
Grid Power Transformer**

**Bachelor thesis**

**Pavel Skála**

**Prague 2015**

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 12. 5. 2015

Podpis .....

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Pavel Skála**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Model a analýza provozních režimů transformátoru přenosové soustavy**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Sestavte model v ČR standardně používaného síťového autotransformátoru s regulací odboček pod zatížením pro účely simulace provozních režimů stroje.
- 2) Zhodnoťte možná používaná zapojení stroje a proveďte rozbor mezních stavů z hlediska napěťové úrovně a zkratů.

Seznam odborné literatury:

- [1] Heathcote M. J. - The J&P Transformer Book, 1998
- [2] Harlow H. - Electric Power Transformer Engineering, 2004
- [3] Pešák F. - Výpočty transformátorů, 1955

Vedoucí: Ing. Jan Špetlík, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

Ing. Jan Švec Ph.D.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 1. 4. 2015

# Abstrakt

Předmětem této bakalářské práce je model dvou autotransformátorů přenosové soustavy v programu MATLAB 2012. Oba modely budou připojeny ke generátorům a modelům přenosových soustav. Na celém systému se budou realizovat různé stavy, které mohou v reálné přenosové soustavě nastat. Následně se budou vyhodnocovat výsledky měření. Další částí práce je teoretický rozbor problematiky přenosových soustav a transformátorů, na které bude brán největší důraz.

Cílem simulování modelových příkladů bude zjištění chování autotransformátorů na různé výkyvy parametrů v přenosové soustavě. Tato analýza by mohla svými výsledky přispět při návrhu reálných zařízení.

**Klíčová slova:** přenosová soustava, transformátor, přepínač odboček, model, autotransformátor

# Summary

The subjects of this bachelor's thesis are two autotransformers models of transmission systems in MATLAB 2012 software. Both models will connect to generators and transmission systems models. All systems will be implementing by various states, which can come in real transmission system. The results of measurements will be evaluating. Another part of this bachelor's work is theoretical analysis of transmission system and transformers and their problems.

The aim of these examples of simulating models will determine the autotransformers behavior to various parameters in the transmission system. This analysis could contribute with their results in the design of real equipment.

**Keywords:** transmission system, transformer, tap changer, model, autotransformer

## Poděkování

Úvodem bych rád poděkoval mému vedoucímu práce Ing. Janu Špetlíkovi, Ph.D., který mi byl velmi nápomocný při řešení a konzultaci nad úskalími této práce. Dozvěděl jsem se od něj plno důležitých a zajímavých informací o řešených tématech, které mi jsou přínosem ne jen pro bakalářskou práci, ale i pro budoucí technickou činnost.

# Obsah

1. Úvod .....	9
2. Popis přenosové soustavy ČR.....	10
2.1 Historie přenosových soustav .....	10
2.2 Napěťové hladiny přenosové soustavy .....	10
2.3 Co to je přenosová soustava .....	11
2.4 Vedení přenosové soustavy .....	13
2.5 Kompenzace v přenosové soustavě .....	16
3. Transformátory .....	18
3.1 Teorie transformátorů .....	18
3.2 Náhradní schéma transformátoru a fázorový diagram .....	19
3.3 Chod naprázdno a nakrátko .....	21
3.4 Účinnost a ztráty .....	24
3.5 Hlavní části transformátoru .....	25
3.6 Autotransformátor .....	31
3.7 Zapojení vinutí a hodinový úhel .....	32
3.8 Konkrétní aplikace transformátorů .....	34
4. Přepínač odboček.....	37
4.1 Přepínač odboček bez zatížení .....	37
4.2 Přepínač odboček při zatížení .....	38
5. Popis modelů autotransformátorů .....	43
5.1 Autotransformátor 230/121kV .....	43
5.2 Autotransformátor 400/121kV .....	46
5.3 Přepínač odboček.....	49
6. Měření.....	51

6.1 Autotransformátor 230/121kV .....	52
6.1.1 Zapojení se zatíženou sítí .....	52
6.1.2 Zapojení s nezatíženou sítí, nekompensované .....	52
6.1.3 Zapojení s nezatíženou sítí, kompenzované .....	53
6.1.4 Dynamická změna sekundárního a terciárního napětí .....	54
6. 2 Autotransformátor 400/121kV .....	55
6.2.1 Zapojení se zatíženou sítí .....	55
6.2.2 Zapojení s nezatíženou sítí, nekompensované .....	56
6.2.3 Zapojení s nezatíženou sítí, kompenzované .....	57
6.2.4 Dynamická změna sekundárního a terciárního napětí .....	57
7. Závěr .....	59
Seznam použité literatury: .....	60
Seznam použitých obrázků .....	61
Seznam grafů .....	63
Příloha: .....	64
a) Štítkové hodnoty autotransformátoru 230/121kV .....	64
b) Štítkové hodnoty autotransformátoru 400/121kV .....	65
c) Zapojení autotransformátoru 230/121kV .....	66
d) Zapojení autotransformátoru 400/121kV .....	67



## 1. Úvod

Tato bakalářská práce je v první části zaměřena na teoretický rozbor problematiky přenosových soustav a dále zejména na teorii transformátorů. Základní principy jsou zde uvedeny převážně na dvouvinuťovém stroji a následně je popsán princip autotransformátoru. Jako další téma jsem zvolil druhy a principy přepínačů odboček. Samotný přepínač odboček byl důkladněji probrán, protože je aplikován v modelech autotransformátorů. Závěrem teoretické části jsem uvedl praktické aplikace autotransformátorů v reálných případech.

V druhé části jsem se zaměřil na vytvoření modelu dvou autotransformátorů s automatickým přepínačem odboček. Celé seskupení je implementováno do obvodu generátoru a přenosové soustavy. Po popsání funkce uvedeného systému jsem se zaměřil na vyhodnocování různých stavů, které mohou v přenosové soustavě nastat. Změřené závislosti byly ovlivňovány především reakcí přepínače odboček, který reagoval na změnu zátěže, popř. napětí.

Závěr celé práce je věnován shrnutí změřených poznatků a konečnému vyhodnocení. Je zřejmé, že se reálné systémy chovají jinak než uvedený model, ale díky modelu můžeme odhadnout chování většiny elektrických veličin a tím s nimi počítat v návrhu reálné aplikace.

## 2. Popis přenosové soustavy ČR

V průběhu posledních desítek let, ve kterých lidstvo stále více využívá elektrické stroje a zařízení, se stala elektrická energie hlavní a nezastupitelnou veličinou. Její výroba a následná distribuce napomohla rozmachu nejen hospodářství (průmyslu, dopravy, služeb), ale i růstu životní úrovně obyvatelstva. Díky této vlastnosti stále stoupá její spotřeba, kterou je nutné zabezpečit novými, více účinnými, zdroji energie. Vyrobena elektřina je transportována prostřednictvím elektrizační soustavy. Elektrizační soustavou rozumíme vzájemně propojený systém zařízení pro výrobu, přenos a distribuci, který následně slouží pro zásobování elektrickou energií koncového zákazníka.

### 2.1 Historie přenosových soustav

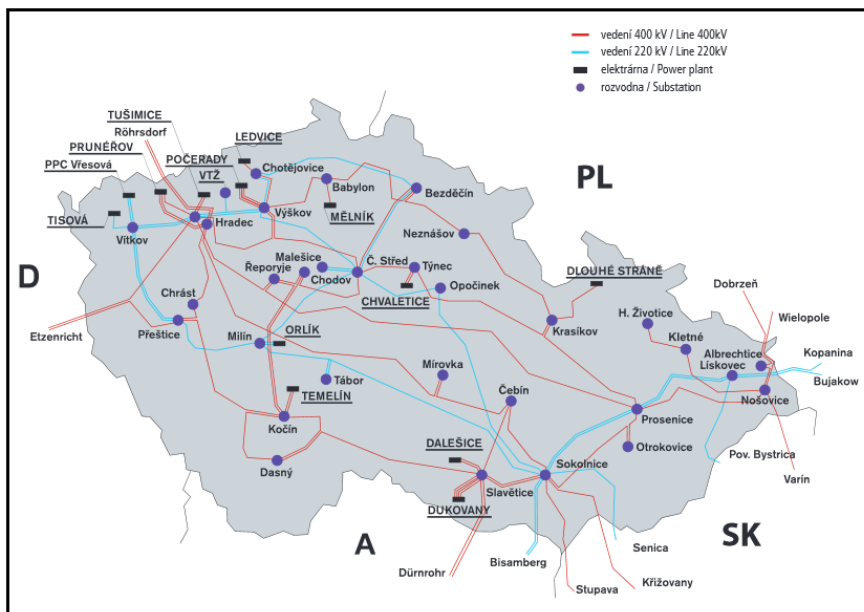
V počátku využívání elektrické energie přenosové soustavy neexistovaly. Bylo to především díky tomu, že se energie spotřebovávala v místě její výroby. Z tohoto důvodu musela mít většina průmyslových závodů vlastní zdroj elektrické energie. První rozvodné systémy se začaly konstruovat v prvním desetiletí minulého století. S tímto rozvojem se začínaly stavět i první veřejné elektrárny. Účel prvních přenosových soustav byl definován v roce 1924 Zemským úřadem na zvelebování živností v Brně.

Páteřní přenosová síť byla vystavena přibližně v 80. letech minulého století. První soustavy, které měly napětí 110kV se od 70. let začaly používat pro uzlové napájení distribučních sítí. Napěťové hladiny 220kV, které se přestaly od 70. let realizovat a 400kV jsou rozebrány v následující kapitole.

### 2.2 Napěťové hladiny přenosové soustavy

Napěťové hladiny přenosových soustav určují velikosti střídavého napětí o frekvenci 50 Hz, které se přenáší přes dané vedení. V České republice se používají v oblasti přenosových soustav hladiny 400kV (nejpoužívanější) a 220kV. Hladina 220kV je v dnešní době na ústupu a tím pádem se neplánuje její další rozvoj a modernizace. Slouží tedy jako záložní a doplňková hladina. Naopak v hladině 400kV

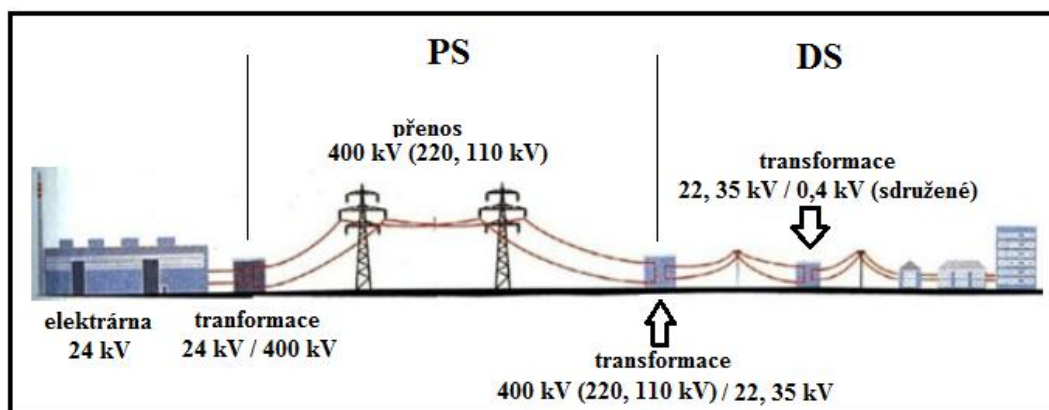
se podnikají veškeré kroky pro její modernizaci, posilování vazeb a přenášených výkonů v rámci přenosové soustavy.



Obrázek 1: Schéma sítě přenosové soustavy

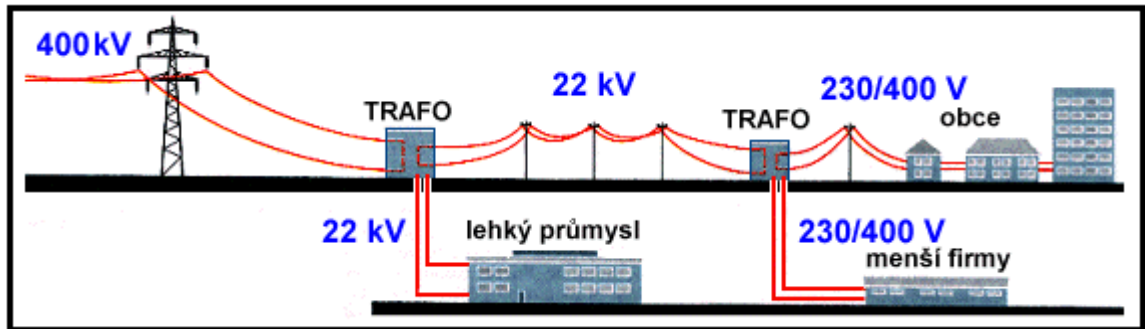
## 2.3 Co to je přenosová soustava

Než začneme popisovat samotnou přenosovou soustavu, tak bych se chtěl zmínit o elektrizační soustavě. Elektrizační soustava, do které patří i přenosová soustava, je vzájemně propojená skupina zařízení pro výrobu, transformaci, přenos a distribuci elektrické energie. Tím pádem tato soustava reprezentuje celou cestu elektřiny od výrobce až po spotřebitele. Do elektrizační soustavy (ES) spadají vedle přenosové soustavy i distribuční soustavy.



Obrázek 2: Elektrizační soustava (schéma)

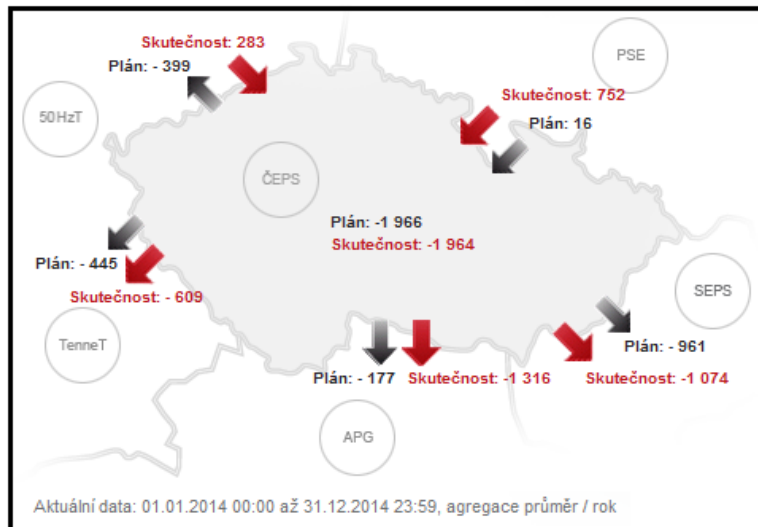
Distribuční soustava (DS) je soustava vedení sítí velmi vysokého napětí (vvn), vysokého napětí (vn) a nízkého napětí (nn). Pro ČR jsou to napětí o velikosti 110, 35, 22, 10, 6, 3 a 0,4kV. Účel distribuční soustavy je přenášet transformovanou elektřinu z přenosové soustavy do regionální a lokální DS a z ní dále ke spotřebitelům.



Obrázek 3: Distribuční soustava (schéma)

Když už jsme si objasnili pojmy ES a DS, tak se můžeme podrobněji zaměřit na přenosovou soustavu (PS). PS tvoří uzlovou síť elektrické energie v ČR. Její hlavní účel je především přenést transformovanou energii z elektráren do distribučních soustav. Toto ale není jediný účel „páteřní“ sítě. Jelikož je ČR „srdcem“ Evropy, tak PS slouží i jako velmi důležité mezinárodní propojení.

V začátcích výstavby PS v ČR se celý systém stavěl s většími výkonovými rezervami, což má pro nás aktuálně nemalé výhody. S rozvojem tzv. „zelené energie“ totiž dochází, především v západních částech Evropy (Německo), k rozsáhlému budování větrných a solárních elektráren. Ty sice neprodukují při výrobě elektřiny žádné škodlivé látky, ale na druhou stranu je jejich výroba závislá na aktuálním počasí (vítr, slunce). Tento fakt způsobuje, že když se v severní části Německa nárazově zvýší výkon větrných elektráren, tak vznikne problém s přenesením vyrobené energie ke spotřebitelům. Jak je známo, elektřina se obtížně akumuluje. Tím pádem se musí transportovat okamžitě. To má za následek přetížení německých přenosových soustav, a jelikož momentálně Německo nemá potřebné kapacity přenosových linek ze severu na jih, tak se velká část energie musí přenášet i přes ČR. Jak jsem již zmínil, naše přenosová soustava má sice určité výkonové rezervy, ale i přes to je to občas výrazný problém.

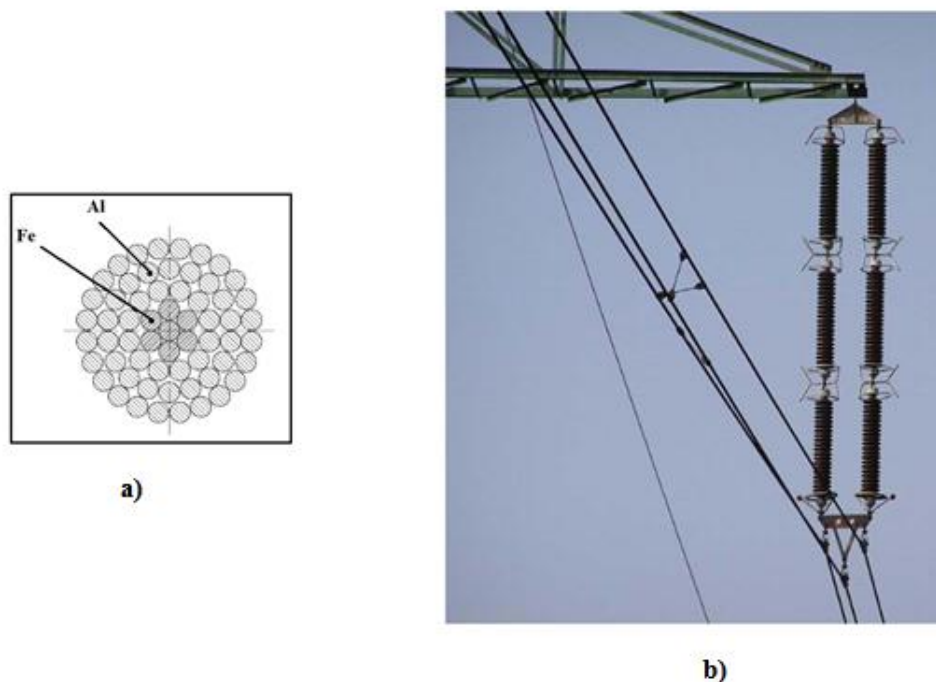


Obrázek 4: Přeshraniční toky

Provozovatelem přenosové soustavy je společnost ČEPS, a.s., která má v tomto směru přirozený monopol. Skupina ČEPS jako provozovatel musí zajistit bezproblémový přenos elektřiny, údržbu a potřebný rozvoj přenosové soustavy, dispečerské řízení v reálném čase a propojení s elektrizačními soustavami jiných zemí podle pravidel ENTSO-E. Dále zprostředkovává bezpečný a spolehlivý přenos, ve kterém technicky reguluje parametry přenášené energie. Ta spočívá především v regulaci výkonu, kmitočtu a velikosti napětí, regulaci jalového výkonu a určené výkonové rezervy. Výkonové rezervy jsou zdroje, které jsou schopny v aktuálním čase dodat potřebný výkon do PS.

## 2.4 Vedení přenosové soustavy

Vedení přenosové soustavy může být dvojího typu. První typ, který je nejpoužívanější, se nazývá venkovním vedením. Venkovní vedení se skládá ze dvou základních částí. Vodičů ve formě lan a stožárů. Lana, která jsou zavěšena na izolátorech stožárů, slouží k přenosu elektrických výkonů. Z tohoto důvodu se jedná o speciální AlFe lana. Složka Al tvoří vodivý plášť, jádro Fe je nosná část. Jak je patrné z obrázku 5, tak je AlFe lano tvořeno z několika drátů. Je to kvůli tomu, že v soustavě přenášíme elektřinu o vysokém proudu (2500A v přenosové soustavě) a tak musíme úměrně zvyšovat průřez lan.



Obrázek 5: a) AlFe lano, b) trojsvazek

Zvláště v přenosových soustavách se setkáme se zapojením lan do tzv. „trojsvazku“. Trojsvazek, jak už název napovídá, je tvořen vodivým zapojením tří vodičů jedné fáze. Vodiče jsou v tomto uspořádání spojeny v definované vzdálenosti ve tvaru n-úhelníku (záleží na velikosti napětí) za pomoci speciálních držáků, které zabraňují samovolnému pohybu a vzájemnému dotýkání vodičů. Tento systém se používá kvůli zmírnění ztrát v koróně. Koróna, nebo-li trsovitý výboj, vzniká na zakřivených vodičích o určitém napětí (pro vedení 400kV a výše) a má za následek elektrické ztráty, rušení signálů a rychlejší korozi vodičů.

Tabulka č. 1: Napěťové hladiny a délky vedení v ČR:

<u>Typ vedení:</u>	<u>Délka trasy vedení (km):</u>
<b>Vedení 400 kV</b>	<b>3 508</b>
<i>z toho dvojitě a vícenásobné vedení</i>	<i>1 145</i>
<b>Vedení 220 kV</b>	<b>1 909</b>
<i>z toho dvojitě a vícenásobné vedení</i>	<i>1 039</i>
<b>Vedení 110 kV</b>	<b>84</b>
<i>z toho dvojitě a vícenásobné vedení</i>	<i>77</i>

Druhým typem vedení přenosové soustavy jsou kabelová vedení. Kabelová vedení zvláště vysokého napětí (zvn) uložená pod povrchem země se v dnešní době staví jen ojediněle. Jejich výhodou je sice v tom, že se mohou realizovat v prostorově stísněných oblastech, ve kterých by se nadzemní vedení nemohlo realizovat, ale jejich cena a komplikace výstavby je posouvá do méně výhodné pozice. Komplikace výstavby je dána nutností uložení šesti jednofázových kabelů v jedné trase a to tak, aby tvořily kabelovou trasu o šířce cca 10m s ochranným pásmem 3m od každého krajního vodiče. Další nevýhodou kabelového systému je obtížnější údržba a zákonem zakázané zpětné vysazování porostů v trase podzemního vedení. Z těchto důvodů se kabelová vedení realizují v krátkých vzdálenostech a pod hustou městskou zástavbou. Co se týče parametrů, tak mají kabelová vedení oproti venkovním vyšší kapacitní reaktanci, která se musí na obou koncích potlačovat kompenzačním zařízením (tento problém je zásadnější hlavně u dlouhých vedení, kde se musí po určitých vzdálenostech přerušovat kompenzační stanicí).



Obrázek 6: Kabelové vedení

## 2.5 Kompenzace v přenosové soustavě

Ještě před tím, než se elektrická energie dostane na úroveň přenosové soustavy, tak se musí vyrobit v elektrárně. Zde se, za pomoci generátoru, vytváří činná složka  $P$ , která je úměrná otáčkám generátoru a jalová složka  $Q$ , která je úměrná velikosti buzení stroje. Již při výrobě jsme tedy schopni regulovat jalovou složku, což je v praxi často užívané. Dynamická regulace jalové energie za pomoci velkých generátorů je centrálně řízena systémem Automatické sekundární regulace napětí (ASRU) společně s velikostí napětí.

Na úrovni přenosové soustavy dochází ke kompenzaci také v rozvodnách. Hlavním úkolem kompenzačních zařízení je kompenzace parametrů přenosové linky. Z tohoto důvodu se v rozvodnách uplatňují paralelní tlumivky a paralelní kondenzátory. Paralelní tlumivky jsou nutné pro vedení ve stavu naprázdno, kdy dochází k uplatnění kapacit vedení, které se musí kompenzovat odebráním jalového výkonu. Kapacity vedení by jinak způsobily Ferrantioho jev, který zvyšuje velikost napětí na konci vedení. Paralelní kondenzátory se mohou využít v případě připojení zátěže a kompenzovat případný napěťový pokles dodáváním jalového výkonu. V České republice se kompenzace pomocí paralelních kondenzátorů moc nepoužívá, protože na našem území máme dostatek velkých generátorů, které zastupují jejich činnost.

Při statické kompenzaci je praxe taková, že jsou v rozvodnách připraveny kompenzační zařízení s různými parametry a v případě potřeby jsou připojeny tak, aby se dosáhlo definovaných hodnot účinníku. Účinník  $\cos\phi$  je fyzikální veličina a je definován jako podíl činného výkonu ( $P$ ) a zdánlivého výkonu ( $S$ ) v obvodu střídavého proudu. Účinník v podstatě určuje, jak velká část ze zdánlivého výkonu se stane „užitečnou“ energií. Samotný výpočet účinníku závisí na kosinu fázového posuvu napětí a proudu. Tím pádem může nabývat hodnot od nuly do jedné (bezrozměrná veličina). V případě kdy platí  $\cos\phi = 1$ , tzn. nulový fázový posun, má výkon pouze činný charakter. Naopak když je účinník nulový ( $\cos\phi = 0$ ) tak je pouze jalový charakter výkonu. Tento druhý extrém může nastat, když je zátěž čistě



induktivní nebo kapacitní a tím je posun mezi proudem a napětím  $\pm 90^\circ$ . Z předešlé teorie je zřejmé, že čím bude účinník menší, tím bude docházet k větším ztrátám.

Problémem uvedeného statického způsobu kompenzace je, že při regulaci dochází ke skokové změně kompenzované veličiny. V případě potřeby pozvolné kompenzace se využívá synchronních kompenzátorů. Synchronní kompenzátor je tvořen synchronním motorem, který při běhu naprázdno dokáže regulovat jalový výkon. Když je nutné dodat jalový výkon, tak se motor přebudí a tím pádem se chová vůči síti jako kondenzátor. Ve chvíli přebytku jalové energie  $Q$  se motor podbudí a tím začne odebírat jalový výkon ze sítě (chová se jako tlumivka). Synchronní kompenzátor je v činnosti například na rozvodně Krasíkov.

Do kompenzace v přenosové soustavě mohou zahrnout i kompenzaci v terciárním vinutí transformátoru přenosové soustavy. Tato kompenzace se realizuje za pomoci zapojení vzduchového reaktoru o výkonech desítek MVar. V případě jeho připojení dochází k odebírání jalové energie  $Q$  a tím snižování napětí sekundárního vinutí.

Na následujícím obrázku číslo 7 je zobrazena aplikace, ve které jsou použity dvě soupravy kompenzačních tlumivek 45MVar, 10kV.



Obrázek 7: Kompenzační reaktory 2x45MVar, 10kV

## 3. Transformátory

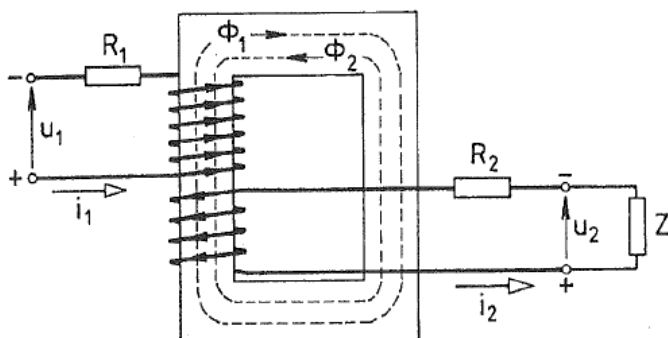
### 3.1 Teorie transformátorů

Vynález tohoto netočivého elektrického stroje ke konci devatenáctého století umožnil rozvoj střídavých sítí, po kterých se elektrická energie mohla dopravovat z místa výroby do vzdáleného místa spotřeby. Do té doby se používaly stejnosměrné systémy, které měly umístěny místo výroby a spotřeby blízko u sebe. Střídavý elektrický proud s sebou přinesl možnost transformace vyrobené elektrické energie o nižším napětí a velkém proudu na vysoké napětí (nižší proud). Po přenesení blíže k zákazníkovi dále dochází k transformaci na požadovanou velikost napětí. Jmenovité výkony takových transformátorů se pak pohybují od zlomků VA, až po stovky MVA což s sebou nese i zvětšování rozměrů a komplikace při dopravě.

Samotný princip funkce transformátorů plyne z Maxwell-Faradayova zákona o indukovaném napětí

$$-e = U_i = \frac{d\Psi}{dt} = N \times \frac{d\Phi}{dt}$$

kde  $e$  je elektromotorické napětí,  $U_i$  indukované napětí,  $\Psi$  spřažený magnetický tok,  $N$  počet závitů vinutí a  $\Phi$  celkový magnetický tok. Tato rovnice popisuje skutečnost, že když přiložíme na vstupní (primární) vinutí transformátoru střídavé elektrické napětí, tak se vytvoří v magnetickém obvodu transformátoru střídavý magnetický tok, který je magneticky spřažen s výstupním (sekundárním) vinutím transformátoru a díky časové změně  $\Psi$  se ve výstupním vinutí indukuje napětí. Samozřejmě se tento jev děje, i když je na magnetickém obvodu navinuto třetí (terciární) vinutí, které většinou slouží pro napájení vlastní spotřeby transformátoru a pro případná měření.


**Obrázek 8: Schéma dvouvinutového transformátoru**

Pro názornost si uvedeme princip funkce na dvouvinutovém transformátoru (obrázek 8) jehož vinutí jsou souhlasně navinuta na magnetickém obvodu. Vstupní vinutí o závitech  $N_1$  je napájeno střídavým napětím  $U_1$  a proudem  $I_1$ , který v závislosti na čase roste. Díky tomu se zvětšuje i magnetický tok  $\Phi_1$ , který vytváří ve výstupním vinutí o závitech  $N_2$  indukované napětí. Výstupní indukované napětí se ale snaží bránit příčině svého vzniku a v případě, kdy je výstupní vinutí zatížené, tak zátěží  $Z$  protéká proud  $I_2$ , který vytváří v magnetickém obvodu transformátoru magnetický tok  $\Phi_2$  opačného směru oproti  $\Phi_1$ . Výsledný magnetický tok je proto určen jako  $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$

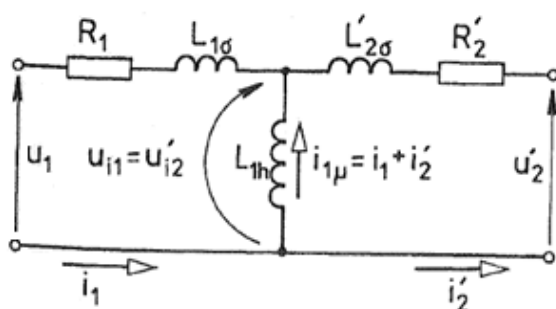
Napěťové rovnice můžeme po úpravě zapsat tímto způsobem:

$$u_1 = R_1 \times i_1 + L_{1\rho} \times \frac{di_1}{dt} + u_{i1} \qquad u_2 = -R_2 \times i_2 - L_{2\rho} \times \frac{di_2}{dt} + u_{i2}$$

kde  $L_{1\sigma}$  a  $L_{2\sigma}$  jsou rozptylové indukčnosti.

### 3.2 Náhradní schéma transformátoru a fázorový diagram

Schéma transformátoru na obrázku 8 lze pro názorný popis překreslit do tzv. náhradního schématu, které je popsáno napěťovými rovnicemi transformátoru.


**Obrázek 9: Náhradní schéma transformátoru**

Náhradní schéma konkrétně zobrazuje dělení indukčností a odporů na podélné a příčné složky. Samotný transformátor, jak již bylo uvedeno, je napájen střídavým napětím. K tomuto faktu je ale nutné dodat, že se jedná o harmonické napětí o definované frekvenci a fázovém posunu v čase. Díky tomu lze napsat zjednodušený vztah pro indukované napětí  $U_{i1} = 4,44 \times f_1 \times N_1 \times \Phi_{MAX}$ , nebo  $U_{i2} = 4,44 \times f_2 \times N_2 \times \Phi_{MAX}$ .

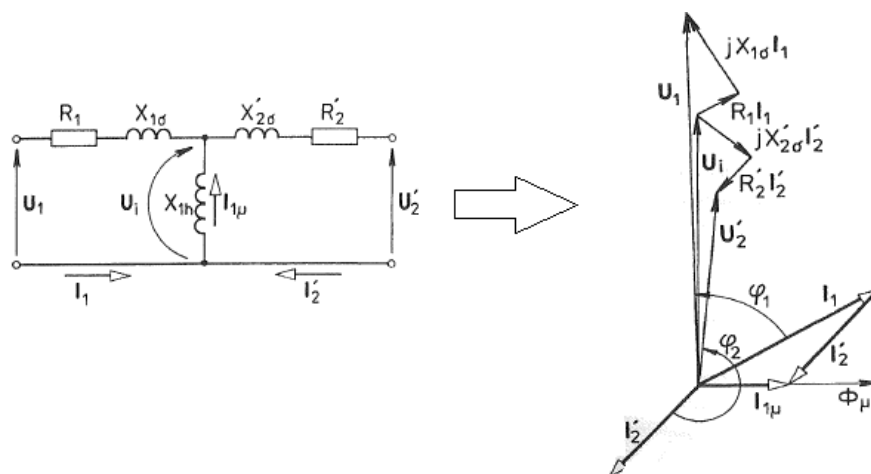
Ve většině aplikací je žádoucí dokázat přepočítat vstupní hodnoty transformátoru na výstupní. To lze realizovat v případě, kdy jsou splněny tyto podmínky:

- sekundární vinutí nahradíme vinutím s počtem závitů  $N'_2 = N_1$
- přepočet nesmí mít vliv na primární stranu stroje
- úhly mezi fázory se nesmí změnit
- energetické poměry stroje musí zůstat nezměněny
- magnetický tok  $\phi$  zůstane nezměněn

Za těchto předpokladů pak platí vztah mezi počty závitů a napětími, který je nazýván převodem transformátoru  $p$ .

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{i1}}{U_{i2}}$$

Pro vykreslení fázorového diagramu, který je nedílnou součástí popisu transformátoru, si musíme sestavit náhradní schéma transformátoru v harmonickém ustáleném stavu (HUS) a přejít do komplexní roviny.



Obrázek 10: Náhradní schéma transformátoru v ustáleném stavu a fázorový diagram

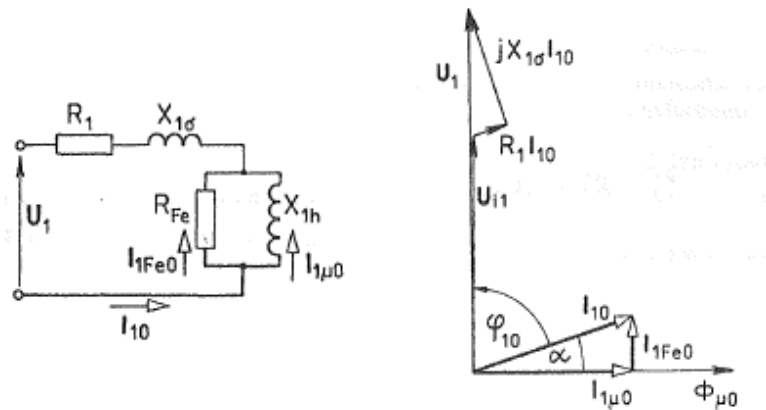
Samotné sestavení fázorového diagramu se realizuje postupným odečítáním úbytků napětí a proudů. Jak je vidět na obrázku 10, tak fázor indukovaného napětí  $\hat{U}_i$  je složen z fázoru  $\hat{U}_1$  (vstupní napětí) od kterého je odečten úbytek na reaktanci  $X_{1\sigma}$  (násobený proudem  $\hat{I}_1$  a imaginární jednotkou  $j$ ) a úbytek na odporu  $R_1$ . Další důležitou vlastností tohoto diagramu je vyjádření vzájemného posunu napětí vůči proudu. Příkladem tomu může být fázor proudu  $\hat{I}_1$ , který je zpožděn za napětím  $\hat{U}_1$  o úhel  $\phi_1$ .

### 3.3 Chod naprázdno a nakrátko

Mezi dva hlavní chody transformátoru patří chod naprázdno a chod nakrátko. V této části se o problematice chodů transformátorů lehce zmíníme a popíšeme si hlavní rozdíly.

#### a) chod naprázdno:

Hlavním rysem chodu naprázdno je, že transformátor není na výstupu žádným způsobem zatížen. To s sebou nese nulový výstupní proud, protože se na sekundární straně transformátoru nemá kudy uzavírat. Díky této vlastnosti můžeme zjistit ztráty v železe transformátoru, které jsou reprezentovány fiktivním odporem  $R_{Fe}$  (dle obrázku 11). V podstatě se jedná o ztráty v magnetickém obvodu transformátoru, které se dělí na dvě hlavní složky a to na ztráty **vířivými proudy** a **ztráty hysterezní**. První uvedené, ztráty vířivými proudy, jsou ztráty, které jsou určeny kvalitou provedení magnetického obvodu a jeho pospojováním. V principu se jedná o jev, kdy dochází vlivem indukovaní napětí v železe k vytvoření ztrátového proudu, který se snaží uzavírat přes magnetický obvod, kolmo na směr magnetického indukčního toku. Eliminace vířivých proudů se realizuje pomocí skládání magnetického obvodu z více navzájem izolovaných plechů. Druhé jmenované, hysterezní ztráty, jsou zapříčiněny přemagnetováním feromagnetického materiálu v důsledku střídavého proudu. Při přemagnetování se vstupní dodaná energie částečně změní na teplo – ztráty. Velikost hysterezních ztrát závisí na ploše hysterezní smyčky, velikosti sycení jádra a frekvenci napětí. Magneticky měkký materiál má v tomto směru nejmenší hysterezní ztráty.



Obrázek 11: Chod naprázdno se zahrnutím ztrát v železe a fázorový diagram

Když se na problematiku ztrát naprázdno podíváme z praktického hlediska, tak se jedná o ztráty relativně nízké, které jsou ale úměrné velikosti a výkonu stroje. Tím pádem u transformátorů vysokých výkonů nejsou zanedbatelné, ale v porovnání se ztrátami při chodu nakrátko jsou menší.

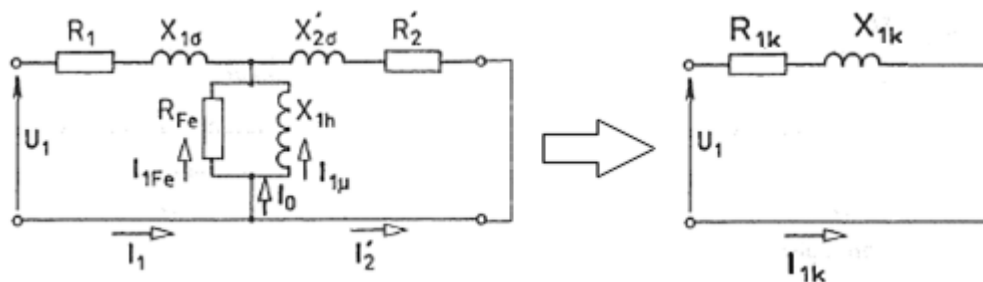
b) chod nakrátko:

Během nakrátko se rozumí zapojení transformátoru tím způsobem, že se výstupní (sekundární) vinutí spojí dokrátka, tzn. zkratuje se. Můžeme tedy překreslit náhradní schéma transformátoru a z toho vidět, že se uplatní především podélná větev. Příčná větev má vzhledem ke zkratu několikanásobně větší impedanci, a proto ji můžeme zanedbat. Zjednodušeně řečeno toto zapojení určuje tzv. ztráty v mědi. Ztráty v mědi jsou reprezentovány Joulovými ztráty ve vinutí transformátoru. Část vstupní energie se totiž ve vinutí transformuje na teplo, které napomáhá k ohřívání celého zařízení, což je nežádoucí.

Hlavní parametr transformátoru zapojeného dokrátka je **napětí nakrátko**. Napětí nakrátko je definováno jako vstupní napětí transformátoru při zkratovaném výstupním vinutí a jmenovitém proudu vinutími. Při chodu nakrátko teče vinutím i ustálený proud nakrátko, který je několikanásobně větší, než jmenovitý proud (za předpokladu jmenovitého vstupního napětí).

Při chodu nakrátko dochází také ke vzrůstu rozptylových magnetických toků, které v železných částech, olejové nádobě a hlavně ve vodičích (jev blízkosti) způsobují přídavné ztráty  $\Delta Pd$ , charakterově podobné vířivým ztrátám. Jak jsem již

uvedl, tak se ztráty v železe zanedbávají, ale mohou se i pro přesný výpočet zahrnout do přídavných ztrát.



**Obrázek 12: Náhradní schéma chodu nakrátko**

Na obrázku číslo 12 je názorně zobrazen přepis náhradního schématu transformátoru se zkratovanou sekundární částí na zjednodušené schéma, ve kterém reprezentuje rezistor  $R_{1k}$  všechny podélné odpory a reaktance  $X_{1k}$  všechny podélné reaktance. Příčná složka je zanedbána. Jak bylo uvedeno i u předchozího zapojení, tak i tyto ztráty jsou závislé na výkonu zařízení. Napětí nakrátko patří samozřejmě k důležitým parametrům na štítku stroje. Je důležité z hlediska udávání hodnoty napětí při poruchovém chodu, protože zkrat na výstupní straně transformátoru není dlouhodobě přípustný.

### 3.4 Účinnost a ztráty

Účinnost jakéhokoliv elektrického zařízení je parametr, na který je kladen silný důraz, protože dává informaci o výhodnosti daného stroje. Všeobecně je účinnost definována jako poměr výstupní energie ke vstupní a je úzce spjata se ztrátami. V třídě transformátorů záleží na výkonu, který dané zařízení má a zda se tím pádem finančně vyplatí investovat do zlepšení účinnosti a tím snížení ztrát. Příkladem tomu mohou být malé síťové transformátory na 230V, u kterých se magnetický obvod spojuje tak, že se po složení plechů v rozích svaří. Samozřejmě tím vznikne zkrat magnetického obvodu a tím zvýšení ztrát. V porovnání mezi výhodností této konstrukce a ušlé energie ve ztrátách ale mohu konstatovat, že je tato konstrukce o tolik výhodnější, že výsledné ztráty jsou relativně zanedbatelné. To se ale nedá říct u transformátorů přenosové soustavy, které mají výkony v desítkách MVA a i jen malé ohnutí transformátorového plechu při skládání magnetického obvodu způsobí nezanedbatelné ztráty a nadměrné zahřívání.

Celkovou účinnost systému můžeme matematicky vyjádřit pomocí následujícího vztahu

$$\eta = \frac{P}{P_p} = \frac{P_p - \Delta P}{P_p} = 1 - \frac{\Delta P}{P_p} = 1 - \frac{\Delta P}{P + \Delta P}$$

kde  $P$  je výstupní výkon,  $P_p$  vstupní výkon (příkon) a  $\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_k$  celkové ztráty dané součtem ztrát naprázdno a ztrát nakrátko. Ztráty naprázdno jsou nezávislé na zatížení, ale ztráty nakrátko (Joulovy ztráty ve vinutí) jsou na zatížení závislé. Pro zjednodušení se zavádí poměrný proud  $i \rightarrow i_2 \approx \Delta P_k \approx \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2}$ . Při dosazení do vztahu celkové účinnosti systému, nám vyjde podrobnější vztah pro účinnost transformátoru

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P_0 + i^2 \times \Delta P_{kN}}{i \times P_N + \Delta P_0 + i^2 \times \Delta P_{kN}}$$

kde  $P_N$  je jmenovitý výkon. Pro maximální účinnost transformátoru musíme pak zajistit následující poměr  $i = \sqrt{\frac{\Delta P_0}{\Delta P_{kN}}}$ , který říká, že účinnost je maximální při takovém zatížení, kdy jsou ztráty ve vinutí shodné se ztrátami naprázdno.



V této chvíli bych pozvolna přešel z teoretické části, kterou jsme dosud v této kapitole řešili, na praktičtější část. V té se zaměřím na obecné konstrukce transformátorů, způsoby jejich zapojení a na konkrétní typy strojů s konkrétním praktickým umístěním. Předešlá teorie byla pojata jako základní a určitě nebylo jejím cílem zabíhání do detailů.

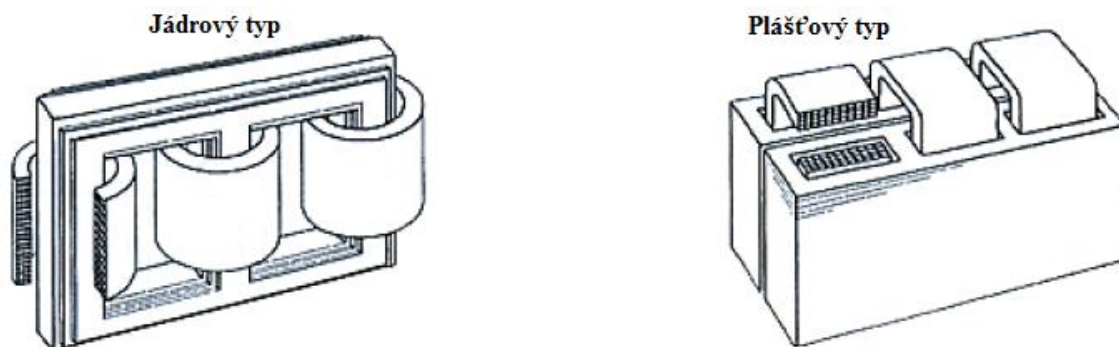
### 3.5 Hlavní části transformátoru

Tématem následujících řádků bude vyjmenování, popis a účel jednotlivých hlavních částí transformátorů. Samozřejmě moderní stroje, které pracují na sofistikovaných pozicích, mají mnohem více periférií, ale jak už jsem uvedl, tak se zde budu zmiňovat hlavně o těch součástech, které musí mít všechny stroje.

#### a) Magnetický obvod:

Tvoří hlavní část transformátoru a slouží k vedení a uzavírání hlavního magnetického toku. Magnetický obvod je postupně skládán z jednotlivých, navzájem izolovaných, plechů s tloušťkou okolo 0,25 až 0,35 mm. Vzájemná izolace plechů se realizuje pro zmenšení ztrát vířivými proudy. Co se týče samotného plechu, tak ten se v dnešní době nejčastěji vyrábí pomocí válcování za studena, aby se dosáhlo směrově orientovaného plechu. To znamená, že má plech ve směru válcování podstatně lepší magnetické vlastnosti a menší ztráty. Jako další úprava plechů se používá legování křemíkem, které vede ke zvětšení činného odporu a dalšímu omezení vířivých proudů. Magnetický obvod se dělí na dvě hlavní části a to na **sloupek** s vinutím a **magnetické spojky**. Skládání magnetického obvodu z EI plechů (plechy ve tvaru písmen E a I) se může realizovat dvěma způsoby. První, nejčastěji používaný, způsob, který je časově náročnější, ale výhodnější pro menší ztráty se nazývá skládání **přeplátováním**. Přeplátování se provádí tím způsobem, že se jednotlivé plechy na sebe skládají střídavě tak, aby se rovnoměrně rozmístila mezera mezi plechy I a E. Druhý způsob, který je jednodušší, ale zato více ztrátový, se nazývá skládání **natupo**. Při tomto skládání se vyskládají dva sloupce plechů E a I, které se následně k sobě spojí a tím pádem vznikne jedna mezera po celé výšce. Magnetické spojky, jak už název napovídá, slouží pro dodatečné pospojování plechů. Další problematikou je například překládání konců jednotlivých plechů, ale do takových

podrobností zde nebudu více zabíhat. Podstatné dělení magnetických obvodů je ještě z hlediska typu konstrukce na **jádrové** a **plášťové**. První jmenovaný typ je konstruován tím způsobem, že jsou jednotlivá vinutí umístěna rovnoměrně na jednotlivá jádra (viz. Obrázek 13). U plášťové konstrukce jsou cívky umístěny na vnitřních jádrech a okolo nich se uzavírá vnější magnetický obvod (viz. Obrázek 13).



Obrázek 13: Typy konstrukce magnetického obvodu

Nejpodstatnější typ transformátoru pro mou práci je zajisté trojfázový stroj. Proto bych rád popsal rozdíl konstrukcí magnetických obvodů trojfázových transformátorů:

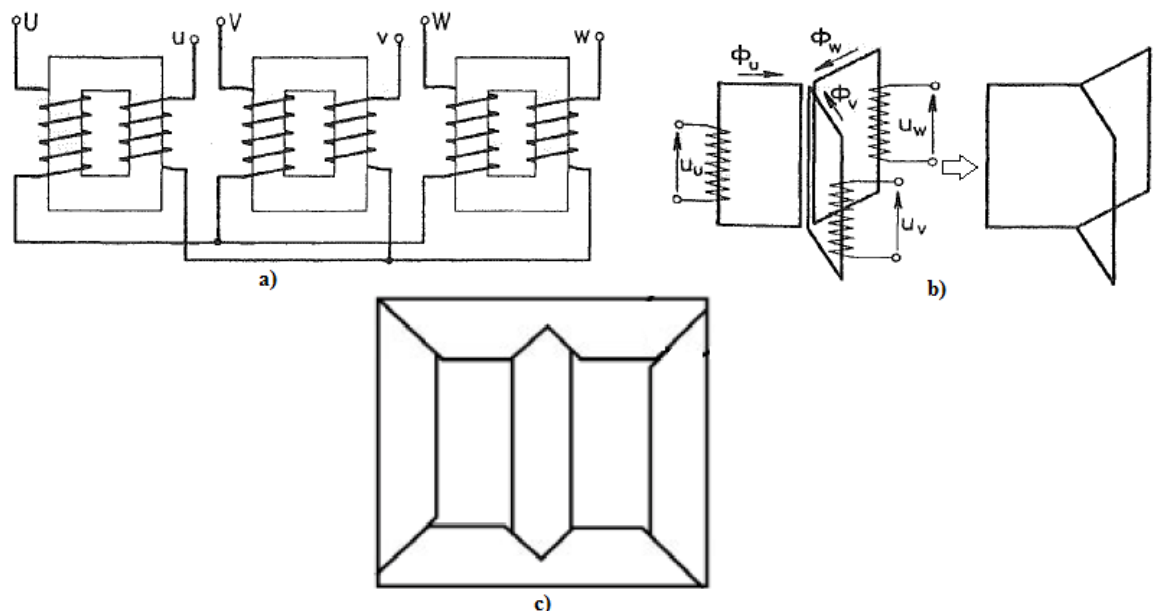
1) S nezávislým magnetickým systémem:

Nezávislý magnetický systém vznikne (Obrázek 14a) takovým zapojením, při kterém je zapojena každá fáze transformátoru na vlastním magnetickém obvodu. Díky tomu dochází k vytvoření magnetických toků, které se navzájem neovlivňují. Mezi výhody tohoto systému zajisté patří menší problémy při dopravě, kdy se jednotky separátně transportují a při poruše možnost výměny jen poškozené fáze. To s sebou nese menší náklady na opravu, protože se nemusí zasahovat do zbylých (funkčních) částí.

2) Se závislým magnetickým systémem:

Na rozdíl od předchozího typu zapojení je tento typ magnetického obvodu sestaven tak, že jsou všechna vinutí osazena na jednom společném magnetickém obvodu. Na začátku se vycházelo z principu tří, navzájem spojených, jednofázových jednotek, vůči sobě natočených o 120°. Jak je patrné z obrázku 14b, tak se jednotlivé magnetické toky sčítají ve společném středu, což má za následek při

elektrické a magnetické symetrii nulový celkový magnetický tok. Díky tomu se nemusí středový sloupek vůbec konstruovat. Závislé magnetické systémy dnes patří k nejčastěji vyráběným typům magnetických obvodů a z praktického hlediska se konstruuje jako jádrové. Příklad je uveden na obrázku 14c kde je obvod, z prostorových důvodů, tvarován rovině. Co se týče výhod a nevýhod daného provedení tak jsou opačné vůči předchozí metodě. V případě aplikace transformátorů okolo výkonů například 200MVA je závislý magnetický systém dobře technicky proveditelný a nese s sebou výhodu jednoho magnetického obvodu v jedné nádobě. U transformátorů vysokých výkonů se ale i dnes používá z důvodu velikosti tří, magneticky nezávislých, systémů.



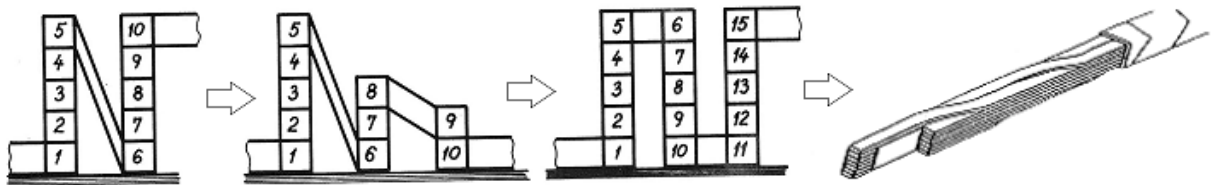
Obrázek 14: Konstrukce magnetických systému trojfázových transformátorů

b) Vinutí:

Druhy, výroba a způsoby uložení vinutí elektrických netočivých strojů, transformátorů, jsou tak rozsáhlým tématem, že by vydaly na samostatnou bakalářskou práci. Proto se zde zaměřím na hlavní typy a postupy výroby vinutí.

Vinutí transformátorů přenosové soustavy je tvořeno z plochých vodičů o definovaném průřezu, nejčastěji vyrobené z mědi, aby dokázalo vést proudy vysokých hodnot. Vodič, který se následně použije pro vytvoření cívky transformátoru, je ale složen z více takovýchto plochých vodičů, aby se dosáhlo

žádaného průměru. Skládání úplného vodiče pro tvarování cívek se realizuje více způsoby. Hlavní a nejčastěji používaný způsob je výroba **přesmyknutého vinutí**. Výroba tohoto vinutí se provádí tak, že se nejprve na sebe navrství pět vodičů. Horní vodič se přesmykne vedle tohoto sloupce a vytvoří se na něm dalších pět vrstev. Následujícími postupy se pomocí přesmykání vytvoří finální vinutí. Způsob výroby je názorně zobrazen na obrázku číslo 15. Mezi výhody přesmyknutého vinutí patří mechanická odolnost, montáž bez pájení a relativně levná výroba. Izolace jak jednotlivých vinutí, tak celého svazku se realizuje ze speciálního transformátorového papíru. Specializací tohoto papíru je ta vlastnost, že v suchém stádiu nemá dostatečné izolační schopnosti. Když je ale vinutí, které je takto izolováno, ponořeno do nádoby s olejem, tak se papír nasákne a zvýší svou izolační pevnost.



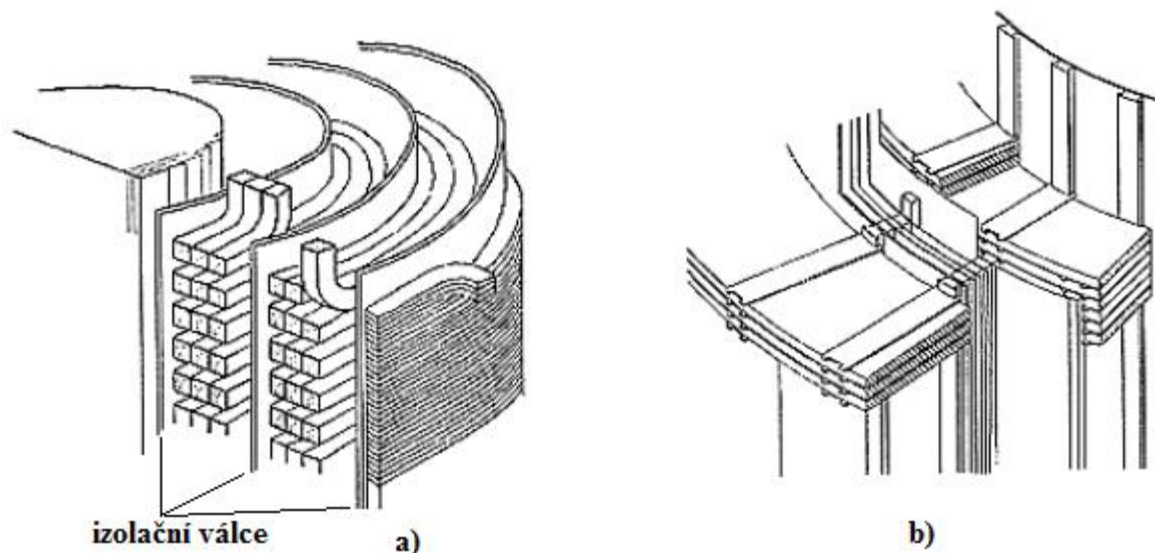
Obrázek 15: Schématický postup výroby přesmyknutého vinutí a finální podoba vinutí

Transformátorové vinutí se dále dělí z hlediska uspořádání na **soustředná vinutí** a **vystřídaná vinutí**. Mezi soustředná vinutí se řadí vedle přesmyknutého vinutí i vinutí cívkové, polohové a cívky jednopohové a více-pohové. U transformátorů vvn/vn se v dnešní době používá také fóliové vinutí. Název soustředné vinutí je odvozen od uložení vinutí. Vinutí je souose uloženo na sloupek transformátoru tak, že blíže ke středu je nízkonapěťové vinutí a více od středu vysokonapěťové vinutí.

Druhý typ s názvem vystřídané vinutí je zastoupen buď souměrným, nebo nesouměrným vinutím. Montáž vystřídaného vinutí se provádí skládáním vysokonapěťového a nízkonapěťového vinutí střídavě pod sebe. V dnešní době se ale tento způsob již nepoužívá.

Samozřejmě mají jednotlivé typy uložení nějaké výhody a nějaké nevýhody. Do takových podrobností bych ale již nezabíhal. Podstatné je, že mezi nejčastěji konstruované vinutí se řadí soustředné vinutí, které má umístěny vodiče s nízkým napětím u středu a vodiče s vysokým napětím okolo něj. Je to z důvodu lepší a snazší

izolace vysokonapětového vinutí vůči magnetickému obvodu. Jasným příkladem je obrázek číslo 16a, na kterém je navíc umístěno i terciární vinutí pro vlastní spotřebu transformátoru, měření nebo kompenzaci.



**Obrázek 16: Umístění vinutí transformátoru a potřebná izolace**

Rozmístění a navinutí vinutí, jak můžeme vidět na obrázku 16a, se mechanicky provádí tak, že je už složený magnetický obvod demontován o horní část a vytvarované vinutí s izolací se nasune na sloupek magnetického obvodu. Samotnou izolaci vodičů jsme si již popsali, ale za zmínku zajisté stojí i izolace oddělující jednotlivá patra vinutí a izolace, která je umístěna ve tvaru válců mezi vinutími. Vše je patrné z obrázku 16b. I zde se jedná o papírovou izolaci, která je více mechanicky pevná. Papírové rozporky, které jsou patrné na obrázku 16b a slouží k oddělení jednotlivých pater vinutí, zastávají také funkci pro vytvoření potřebné mezery mezi patry vinutí. Mezera je důležitá především pro lepší cirkulaci oleje a tím i rovnoměrné chlazení vodičů.

Dosud popsaný model vinutí bez možnosti regulace by se uplatnil například u transformátorů největších výkonů. V některých případech je ale regulace vinutí stroje a tím i změna napětí nutná. Pro tento účel se v transformátorech používá regulační vinutí. Regulační vinutí, jak už název napovídá, slouží k přepínání počtu závitů vinutí. Tím se docílí případná regulace, která je v praxi potřebná. Většina regulačních vinutí je schopna přepínat odbočky za provozu a tím pádem musí

dokázat snést určité nadproudy, které se zde při přepnutí vytvoří. Detailněji je popisovaný systém uveden v kapitole „Přepínač odboček“.

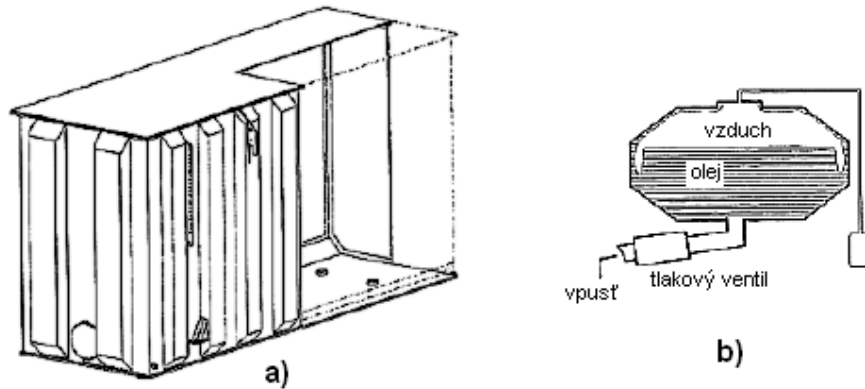
c) Nádoba:

Transformátorová nádoba (obrázek 17a) plní funkci ochranného obalu vinutí a magnetického obvodu. Vedle toho slouží u transformátorů chlazených olejem k jeho uzavření a zamezení prosakování jak oleje z nádoby, tak okolní vlhkosti a nečistot do zařízení. Jako materiál pro výrobu nádoby se nejčastěji používá pevná ocel. Je to z důvodu kladení vysokých požadavků na pevnost celého stroje a na odolnost vůči zvýšeným tlakům, které mohou při problémech uvnitř zařízení vzniknout. Když je potřebná nádoba vyrobena, tak se do ní umístí již připravený magnetický obvod s vinutím. Základním požadavkem je, že se tento proces musí provádět za nejvyšší čistoty a vysušení všech částí. Následně je nádoba zaplněna transformátorovým olejem tak, aby byl celý systém ponořen. Důraz na čistotu a minimální vlhkost při plnění oleje je z toho důvodu, aby napouštěný olej nedegradoval a neztrácel své vlastnosti.

Jako transformátorový olej se nejčastěji používá olej minerální. Jeho předností je, že není zdravotně závadný (na rozdíl od syntetických olejů) a v nádobě plní izolační a chladicí funkci. Zmíněné syntetické oleje mají lepší chladicí i dielektrické vlastnosti, ale jsou ve většině zemí z ekologických důvodů zakázané. Při provozu transformátorů dochází k ohřívání transformátorového oleje. Z tohoto důvodu je nutné olej chladit. U zařízení velkých výkonů je vytvořen v nádobě transformátoru nucený oběh oleje a olej se následně chladí mimo nádobu v tzv. radiátorech. V případech strojů menších výkonů, u kterých by byla investice do přípravku pro cirkulování oleje v nádobě zbytečná, se používají jen konzervátory (samozřejmě se konzervátor používá i u velkých zařízení). Konzervátor (obrázek 17b) je nádrž, do které se může zahřátý olej rozpínat a okolní teplotou chladit. Z toho důvodu není konzervátor zaplněn olejem úplně.

Na závěr této kapitoly bych rád zmínil ještě jednu důležitou součástku nádoby. Jedná se o tlakový ventil, umístěný v horní části nádoby. Jeho účel je důležitý pro vypouštění tlaků, které se v transformátoru (díky zkratům) mohou vytvořit. Bez

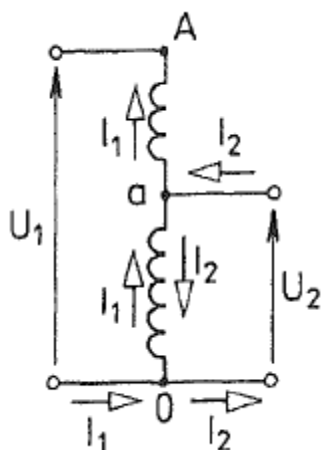
tlakového ventilu by mohlo dojít až k explozi nádoby transformátoru, což je nepřijatelné. Dále bych rád zmínil, že existují i tak zvané suché transformátory, které nejsou plněny olejem. Samozřejmě to s sebou nese nemožnost výroby stroje s vysokým výkonem.



Obrázek 17: Transformátorová nádoba a konzervátor

### 3.6 Autotransformátor

Podobně jak tomu bylo u klasických dvouvinutových transformátorů, autotransformátory slouží k transformaci napětí a jsou to netočivé elektrické stroje. Rozdíl mezi transformátorem a autotransformátorem spočívá v tom, že je jak primární, tak sekundární vinutí galvanicky spojeno. Jedná se tedy o jedno vinutí, z kterého je v určité části vyvedeno sekundární vinutí. Na obrázku číslo 18 je názorné schématické zapojení jednofázového autotransformátoru. Napětí  $U_1$  zde odpovídá napájecímu napětí (primární) a napětí  $U_2$  se považuje za výstupní napětí (sekundární), které je úměrné vinutí  $N_2$  mezi svorkami a – 0. V daném případě se jedná o tzv. snižovací autotransformátor, který má hodnotu napětí  $U_1$  vyšší než napětí  $U_2$ . Existují i autotransformátory zvyšovací, které se používají v elektrárnách



přímo za generátory. Jejich účelem je zvýšení generovaného napětí na napětí  $v_{vn}$ , popřípadě  $z_{vn}$ , které se dále transportuje. Podrobněji se této problematice budeme věnovat ale později. Uvedený princip stroje se samozřejmě může rozšířit o případ, ve kterém je použito i terciární vinutí, které má nižší napětí než je napětí  $U_2$ . Jak už jsem dříve uvedl,

Obrázek 18: Schéma autotransformátoru

tak se jedná o vinutí vhodné pro měření, kompenzaci a napájení vlastní spotřeby.

Použití autotransformátoru v konkrétní aplikaci vede k zamyšlení nad potřebou regulace napětí. Běžný transformátor totiž má, oproti autotransformátoru, rozsáhlou možnost regulace výstupního napětí. Díky tomu se autotransformátory nemohou použít v každé aplikaci. V přenosové soustavě se autotransformátory používají, protože je regulace napětí sice žádaná, ale její rozsah je u autotransformátorů dostatečný. Další výhodu autotransformátorů si můžeme ukázat při srovnání s normálním transformátorem stejných parametrů. Při zatížení výstupních svorek dvouvinutového transformátoru teče výstupní proud  $I_2$  celým sekundárním vinutím a vstupní proud  $I_1$  celým primárním vinutím. U autotransformátoru dochází ale k tomu, že celý vstupní proud  $I_1$  teče pouze částí vinutí mezi body A - a. Ve zbylé části vinutí protéká proud  $I$  který je menší než  $I_1$ . Tyto předpoklady určují, že je ve společné části vinutí proud  $(1 - 1/p)$  krát menší než  $I_2$ . Průřez vodičů a i celkový rozměr autotransformátoru se díky této skutečnosti zmenšuje, což s sebou nese značnou úsporu. Další výrazná úspora je i ve zmenšení celkových ztrát stroje. Funkce autotransformátoru má ale i své nevýhody, do kterých se řadí (vedle již zmiňovaných) i menší odolnost vůči zkratům.

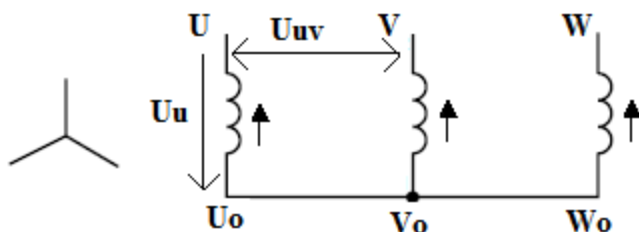
### 3.7 Zapojení vinutí a hodinový úhel

Zapojení vinutí trojfázového transformátoru se realizuje těmito nejčastějšími způsoby. Úvodem bych rád zmínil, že velkým písmenem je značeno zapojení na straně vyššího napětí a menším písmenem je značeno zapojení na straně nižšího napětí.

a) Zapojení do hvězdy: Zapojení do hvězdy se značí písmeny Y, y. Takovéto zapojení vinutí patří mezi nejpoužívanější zapojení výkonových transformátorů přenosové soustavy na straně vyššího napětí. Je to kvůli tomu, že hvězda vytvoří nulový uzel mezi vinutími a při jeho vyvedení můžeme získat fázové a sdružené napětí. Nulový bod nám ale poslouží i z hlediska bezpečného provozování sítě, protože je přímo uzemněn.



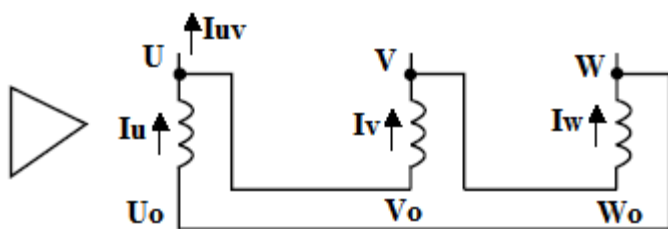
Na následujícím obrázku číslo 19 je schematicky nakresleno spojení vinutí do hvězdy. Je zde také patrné, že pro korektní zapojení je nutné spojit do nulového bodu všechna vinutí na jedné straně. Druhá strana vinutí je následně vyvedena na svorky.



Obrázek 19: Zapojení do hvězdy

Napětí  $U_u$  je napětí fázové a napětí  $U_{uv}$  sdružené. Platí zde vztah mezi sdruženým a fázovým napětím  $U_{UV} = \sqrt{3} \times U_V$ .

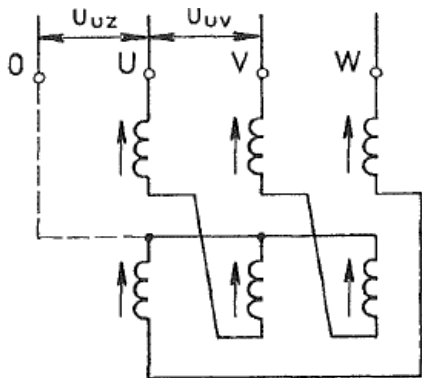
b) Zapojení do trojúhelníka: Značí se písmeny D, d. Spojení do trojúhelníka se u transformátorů přenosové soustavy využívá hlavně u terciárního vinutí. Na rozdíl od předchozího zapojení, jsou zde vinutí spojena prostřídavě. Jako příklad zapojení můžeme použít zapojení na obrázku 20. Vinutí jsou zde střídavě propojena se sousedícími tak, že horní část je spojena s dolní částí následujícího vinutí. Samozřejmě je možné použít jiné spojení vinutí ze čtyř možných, která mají stejný výsledek. Na rozdíl od spojení do hvězdy rozlišujeme u zapojení do trojúhelníka rozdíl mezi fázovým ( $I_u$ ) a sdruženým ( $I_{uv}$ ) proudem. Matematický vztah mezi těmito veličinami je následující  $I_{UV} = \sqrt{3} \cdot I_U$ .



Obrázek 20: Zapojení do trojúhelníku

c) Zapojení do lomené hvězdy: Jako značení lomené hvězdy se používají písmena Z, z. Jedná se o zapojení, které je z části podobné kombinaci předešlých zapojení. Spojení vinutí do lomené hvězdy se může použít například pro zmírnění nesouměrnosti při zatížení jedné fáze trojfázového transformátoru za předpokladu vyvedení nulového

bodů. Lomená hvězda se každopádně nepoužívá tak často jako například spojení do hvězdy. Jistou roli zde hraje i nevýhoda spojená s nutností mít 1,155 krát větším množstvím závitů oproti zapojení do hvězdy pro stejné fázové napětí.



Obrázek 21: Zapojení do lomené hvězdy

V další části se zmíním o hodinovém úhlu, který úzce souvisí s různými zapojeními vinutí. Při různém zapojení vstupního a výstupního vinutí do hvězdy, trojúhelníka, nebo lomené hvězdy dochází k posunutí výstupních napětí oproti vstupním napětím. Prakticky se jedná o fázový posun napětí měřený od fázoru vyššího napětí k fázoru nižšího napětí ve sledu fází, kde jedna hodina je rovna posunu o  $30^\circ$ . Tím pádem je možné dosáhnout posunu v rozmezí 0 až 11 hodin. Co se týče samotného značení, tak se zapojení hvězda – trojúhelník s hodinovým úhlem 5 hodin značí Yd5, kde číslice udává zmíněný posun. Určení hodinového úhlu se provádí nejčastěji jednoduchým měřením při spojení jedné dvojice odpovídajících si vstupních a výstupních svorek.

### 3.8 Konkrétní aplikace transformátorů

Transformátory patří k základním prvkům jak přenosových, tak i distribučních soustav. V této podkapitole si uvedeme konkrétní zástupce transformátorů postupně od generátoru v elektrárně až po distribuční soustavu a podíváme se na jejich funkci.

První transformace elektrické energie se děje již za její výrobou generátorem v elektrárně. Jelikož generátor dokáže vytvořit energii o napětí až do 25kV, tak by bylo z hlediska ztrát velmi nevhodné toto napětí přenášet přenosovou soustavou. Z toho důvodu se za generátor zařazuje tak zvaný zvyšovací transformátor, který má

za úkol zvýšit napětí na hodnotu například 400kV, nebo 220kV. Střídavá elektrická energie o napětí velmi vysokém, nebo zvláště vysokém se následně přenáší při relativně nízkých proudech. Jako zvyšovací transformátor si můžeme uvést zařízení od ABB. Jedná se o třífázový zvyšovací transformátor 19kV až 345kV, 1100MVA, plášťový typ.



**Obrázek 22: ABB 19/345kV**

Jak tento transformátor, tak většina jemu podobných strojů jsou zapojeny jako Ynd. Díky zapojení do trojúhelníku se proud dělí  $\sqrt{3}$  a tím pádem není nutné vinutí z vodičů s velkými průměry, ale počet závitů se navýší  $\sqrt{3}$  krát. Mezi hlavní parametry zvyšovacího transformátoru patří vedle velikosti napětí na primární a sekundární straně i velikost impedance při zkratu a výkon v MVA. Uvedené zařízení by samozřejmě nesplňovalo podmínku na velikost výstupního napětí bez regulace pomocí přepínače odboček, který je zde umístěn na straně vyššího napětí.

Druhá kategorie transformátorů je umístěna na konci přenosové linky a slouží ke snížení napětí ze 400kV (220kV) na hladinu distribuční. Jedná se tedy o tzv. snižovací zařízení. Na území České republiky je v provozu přenosová síť o hladinách 400kV a 220kV. Díky tomu zde uvedu dva typy transformátorů, které snižují napětí na 121kV. Prvním zařízením od firmy ABB je třífázový olejový regulační autotransformátor 400/121kV, 350MVA v zapojení YNa0d1. Přepínač odboček je realizován na straně 400kV. V provozu je transformátor, vyrobený v roce 2004, na rozvodně Čebín. Popisované zařízení je také předlohou pro můj model v této práci.



**Obrázek 23: Autotransformátor ABB 400/121kV**

Druhý transformátor, který je předmětem dalšího modelu této práce, je od výrobce Siemens. Konkrétně se jedná o třífázový autotransformátor 230/121kV, 200MVA ve stejném zapojení jako předchozí typ. Rozdíl mezi tímto a předešlým strojem je, vedle velikosti vstupního napětí, v umístění přepínače odboček. Zde je přepínač odboček umístěn na hladině 121kV a má jiný systém přepínání jednotlivých stupňů. Uvedený transformátor je v provozu na rozvodně TR Vítkov a byl vyroben v roce 2009.



**Obrázek 24: Autotransformátor Siemens 230/121kV (tři jednofázové jednotky)**

## 4. Přepínač odboček

Přepínač odboček (tap changer) je zařízení, které má většina transformátorů. Jeho účelem je za pomoci přepínání odboček vinutí transformátoru změnit velikost napětí. Každý transformátor, který má možnost používání přepínače odboček musí mít vyvedeny jednotlivé odbočky z přepínaného vinutí. Je to tedy již na výrobcí na kolik stupňů rozdělí dané vinutí a jakým krokem bude možné regulovat. Záleží to samozřejmě na individuálním použití a na přípustné odchylce reálně nastaveného napětí od požadovaného. Samotný tap changer je složité zařízení, které musí zabezpečit rychlé a co nejméně ztrátové přepnutí odbočky. Přepínače odboček transformátorů se dělí na dvě základní skupiny, které určují složitost přepínacího systému. Dělení je podle schopnosti přepínače pracovat na zařízení pod zatížením, anebo na zařízení bez zatížení. Ještě než si začneme popisovat rozdíl mezi těmito typy přepínačů bych se měl zmínit o nevýhodách, které nám přepínání odboček přináší. Jedná se o následující problémy:

- a) Transformátor musí být navržen na změny impedance, které jsou vždy dané aktuálně připnutou odbočkou.
- b) Při návrhu chlazení transformátoru se musí počítat s proměnnými ztrátami, které jsou měněny podle aktuální odbočky.
- c) V transformátoru vznikají nerovnoměrné síly. Ty jsou způsobeny neaktivními odbočkami, na které působí elektromagnetické síly.
- d) Čím větší je počet odboček transformátoru, tím je systém složitější a tím je náchylnější k poruše. To samozřejmě platí i o přepínači odboček.

### 4.1 Přepínač odboček bez zatížení

Funkce přepínače odboček bez zatížení je podobná používanějšímu přepínači při zatížení, ale je jednodušší. Je to díky tomu, že systém nepřepíná během provozu transformátoru a tím pádem není nutné minimalizovat proudy, které by vznikaly při přepínání za provozu. Použití tohoto přepínače se volí u transformátorů, které nejsou potřeba průběžně přepínat a tím upravovat výstupní napětí. Jako příklad si můžeme uvést distribuční transformátor 22/0.4kV. Tento transformátor se před

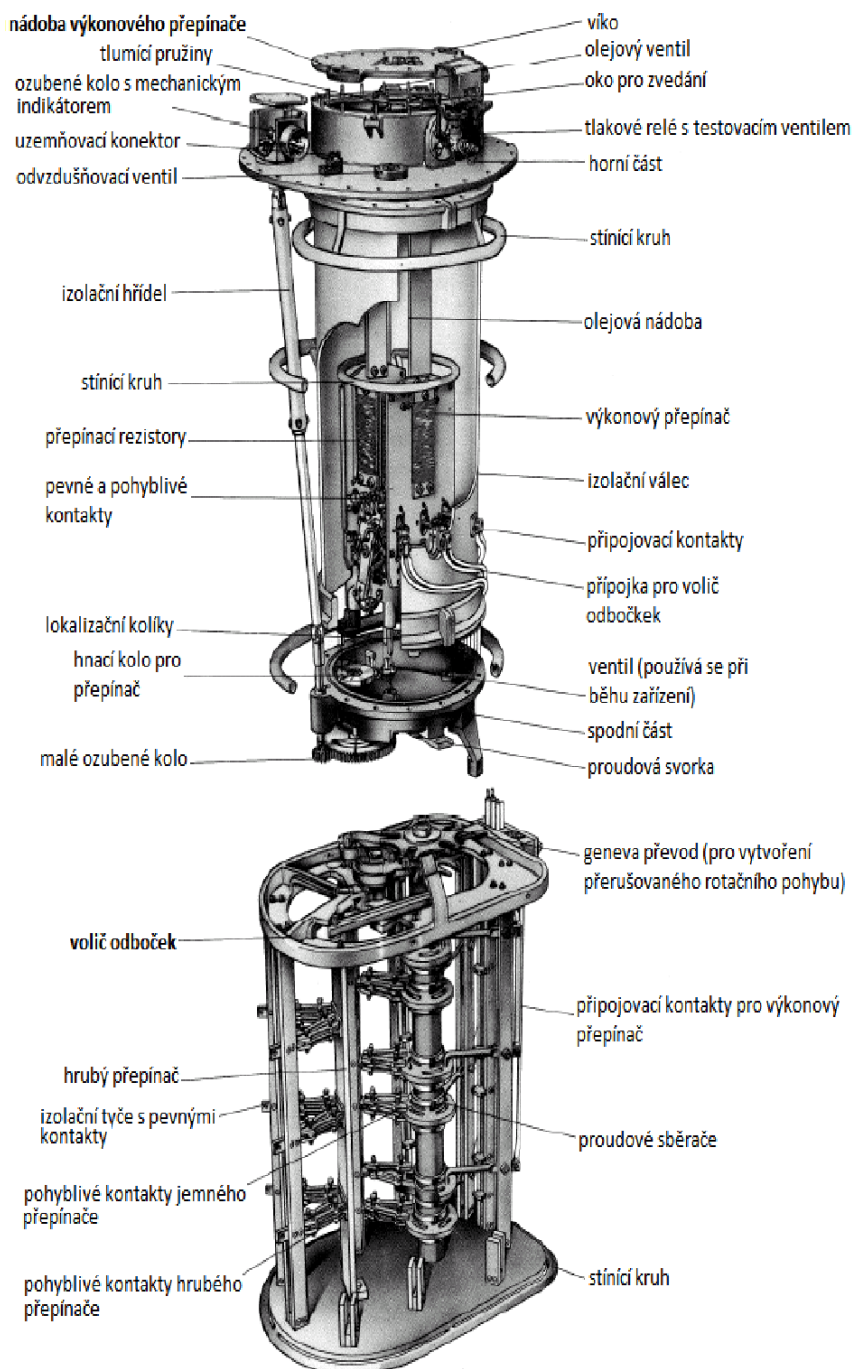
uvedením do provozu nastaví tak, že se manuálně zvolí odbočka, která zaručí požadované výstupní napětí. Jelikož transformátor pracuje v síti, ve které se rapidně nemění zatížení, tak není nutné odbočky dále přepínat. Může ale nastat situace, kdy se k vedení připojí nová odběrná větev a je nutné změnit odbočku transformátoru z důvodu poklesu výstupního napětí díky zvýšení zátěže. Zařízení se tedy uvede do nečinnosti a manuálně se přepne určitá odbočka. Nejvyšší požadavek na přepínač odboček bez zatížení je tedy hlavně na kvalitu a sílu přepínacích kontaktů, které musí vytvořit co nejmenší přechodový odpor mezi odbočkou vinutí a přepínačem.

## 4.2 Přepínač odboček při zatížení

Přepínač odboček, který pracuje v systému, u kterého nedochází při přepínání k odpojení zatížení, musí dokázat přepínat protékající proudy. Z toho důvodu byl vyvinut tak, aby dokázal nepřerušit protékající proud při přepínání z jedné odbočky na druhou. Nepřerušený pracovní proud také nesmí vytvořit žádné částečné zkraty v přepínaném vinutí. Celková funkce popisovaného přepínače odboček může být rozdělena na dvě části.

První část se skládá ze sofistikovaného přepínače, který dokáže přenášeny výkon jedné odbočky přepnout na přenášení výkonu z následující, přilehlé, odbočky. Během této operace jsou obě odbočky spojeny přes přechodovou impedanci (popř. reaktanci) a tím pádem dochází k průchodu zatěžovacího proudu přes zmiňované odbočky. Následně je přerušeno spojení s minulou odbočkou a celková zátěž je přepnuta na následující odbočku. Zařízení, které dokáže takto pracovat, se nazývá výkonovým přepínačem a tvoří horní část celého přepínače odboček. Druhou část, která se nachází pod první částí, můžeme nazvat jako volič odbočky. Volič odbočky řídí přepínání výkonového přepínače a určuje, jaká odbočka bude přepnuta jako následující. Můžeme tedy říci, že pracuje bez proudové zátěže vzniklé při přepínání, s kterou se musí naopak vypořádat výkonový přepínač. Celý systém je vyobrazen a popsán na obrázku 25. Je zde také zřejmé, že celé zařízení je samostatně zapouzdřeno. Při instalaci je integrováno do transformátoru tak, že olej, kterým je výkonový přepínač naplněn, není společný s olejem transformátoru. Je to z toho

důvodu, aby bylo možné lehce náplň přepínače vyměnit, protože při provozu zde dochází k větší degradaci oleje, než u oleje transformátoru.



**Obrázek 25: Tap changer**

Přepínání výkonového přepínače může být realizováno buď s přechodovou impedancí, nebo s reaktancí. Obě mají své výhody a nevýhody, na které se teď zaměříme. Přepínač s impedancí se používá v systémech, které nemají tak velké provozní proudy. Jeho výhodou ale je, že dokáže pracovat s vysokým napětím, a proto se používá v transformátorech na primární straně. Oproti němu má systém

s reaktancí tu výhodu, že dokáže lépe rozpojovat vysoké proudy, než zařízení s impedancí. Má ale tu nevýhodu, že nedokáže dobře pracovat s vyššími kroky napětí, a proto se nehodí do obvodu s vysokým napětím. Při přepínání je u obou principů kladen velký důraz na rychlost přepnutí. Je zřejmé, že výkonový přepínač nemůže být řízen pomocí řídicího motorku, který ovládá přepínání odboček celého zařízení. Využívá se zde proto naakumulované mechanické energie v natažené pružině, která velmi rychle dokáže svou energii uvolnit a tím pádem dojde k přepnutí v čase okolo 50ms. Nejedná se o čas celkové regulace, ale o čas, který je potřebný k jednomu přepnutí mezi odbočkami ve výkonovém přepínači. Jako izolační náplň výkonového přepínače se vedle uvedeného oleje používá plyn SF<sub>6</sub>, který má lepší izolační vlastnosti a při práci nepodléhá takové degradaci. V dnešní době technologie vypínačů směřuje k používání vakua. Vakuum s sebou přináší obrovské výhody ve výborné izolační schopnosti, rychlém zhášení oblouku, skvělé regeneraci prostředí do výchozí izolační schopnosti a mnoho další. Při výrobě vakuového vypínače je ale nutné použití vyspělých technických prostředků, aby byl celý systém dostatečně vzduchotěsný.

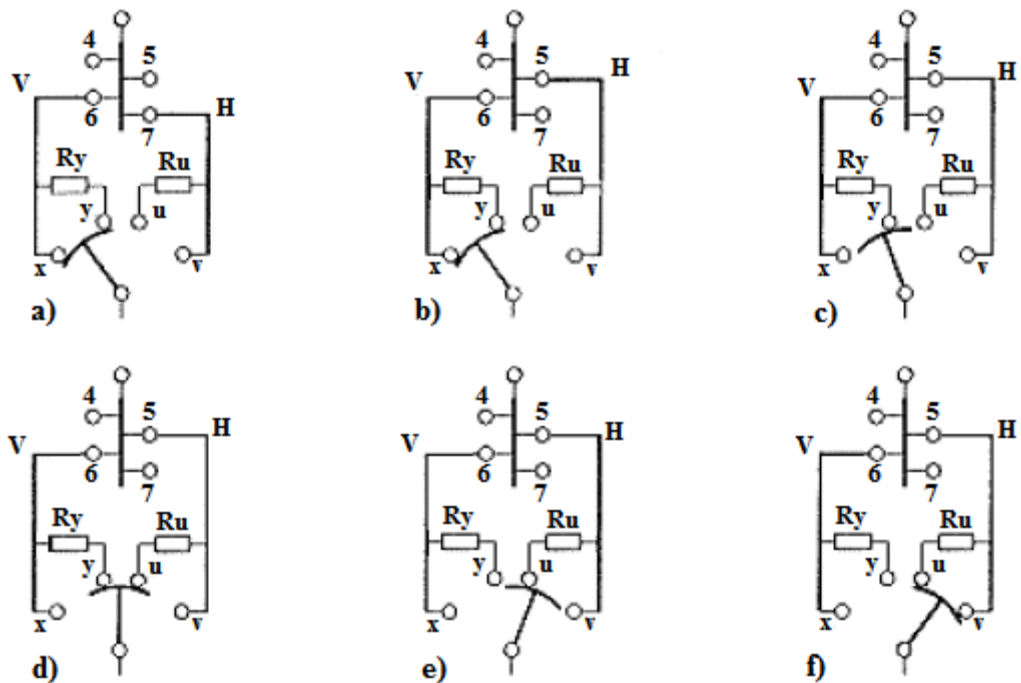
Volič odboček je vyroben jako izolovaný válec se sérií kontaktů, které jsou připojeny k odbočkám vinutí. Uvnitř pouzdra, které je ve tvaru klece, jsou dvě pohyblivá táhla (paže), která se mohou pohybovat krok po kroku po regulačním vinutí. Obě táhla jsou elektricky propojena s kontakty výkonového přepínače. Prakticky tento systém funguje tak, že je jedno táhlo nastaveno na určitou odbočku a je jím protékán pracovní proud. Druhé táhlo je na neaktivní odbočce a je připraveno buď na přepnutí a tím převzetí pracovního proudu místo prvního táhla, nebo se mechanicky přesune na jinou odbočku. Volič odbočky díky tomuto přepínání nikdy nepřerušuje proud a může být umístěn v oleji, který je společný s transformátorem.

Průběh přepínání si popíšeme v následujících bodech:

- a) Systém pracuje na odbočce číslo šest. Jako druhá odbočka je zatím připojena odbočka číslo sedm na rameni H.
- b) Táhlo s označením H se přesune ze sedmé odbočky na pátou.

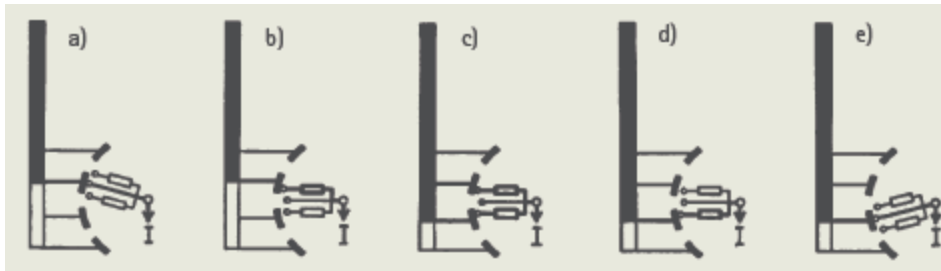


- c) Výkonový přepínač připejme rezistor, zatěžovací proud šestou odbočkou poteče teď přes  $R_y$ .
- d) Obě odbočky číslo pět a šest jsou zkratovány přes  $R_y$  a  $R_u$ . Oba rezistory jsou dimenzovány proti zkratu touto smyčkou a jsou také schopny odolat napěťovým rozdílům. Proud, který teče definovanou smyčkou, musí být v rozsahu zatěžovacího proudu.
- e) Zde přepínač přeruší spojení s odbočkou šest a celý zatěžovací proud převezme z odbočky pět.
- f) V posledním bodě je rezistor  $R_u$  překlenut a veškerý proud teče přímo z odbočky pět.



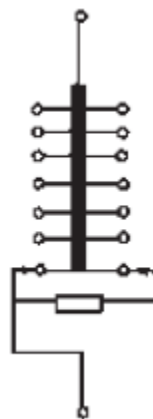
Obrázek 26: Průběh přepínání

Uvedený průběh přepínání se dá považovat za nejčastěji používaný. Rád bych ale zmínil ještě jeden princip. Přepínací kotva, která se přepínala mezi pevnými rezistory (obrázek 26) je zde vybavena vlastními rezistory, které se pohybují s ní. Vzniká tím samostatná větev, která se postupně přepíná po kruhovém rozložení odboček. Tento princip přináší ale určitou nevýhodu, protože při přepínání zde dochází k rozpojování výkonu a tím vytváření elektrického oblouku. Vzniklý elektrický oblouk při přepnutí může přeskočit na další odbočku a díky jeho hoření také dochází k opalování kontaktů a tím zhoršení jejich vlastností.



**Obrázek 27: Kruhový přepínač s pohyblivými rezistory**

V obou předešlých případech se pro přepínání používaly vždy dva rezistory. Následující způsob přepínání odboček je postaven pouze na jedné odporové součástce. V přepínači odboček s jedním rezistorem dochází k odčítání cirkulujícího proudu rezistorem od zatěžovacího proudu. Tímto dochází ke směřování toku výkonu přes transformátor, anebo snížení velikosti zpětného výkonového toku. Výhodou přepínání přes jeden rezistor je rychlejší přepnutí odbočky pouze ve dvou krocích. Mezi nevýhody patří nutnost dvojnásobného počtu vývodů odboček. Systém pracuje na jedné odbočce a dostane požadavek přepnout na druhou odbočku. V tu chvíli se přepne jedna strana rezistoru na požadovanou odbočku (druhá strana je pořád připojena ke stejné odbočce). Následuje přepnutí druhé strany na požadovanou odbočku (proud teče přes rezistor z odbočky, která je již nastavena).



**Obrázek 28: Přepínač s jedním rezistorem**

Řídicí pohon přepínače odboček je tvořen z elektrického pohonu, který se otáčí dle potřeb regulace. Je zřejmé, že musí být vedení aktivně měřeno a pomocí logiky regulátoru vyhodnocováno zda je nutné přepínat odbočku a jakým směrem. Jedná se proto o složité zařízení, které musí dostatečně rychle vyhodnocovat stav sítě a dynamicky doregulovat zvýšení, popř. snížení odběru.

## 5. Popis modelů autotransformátorů

V následující kapitole se zaměřím na popis a postup výpočtů obou modelů autotransformátorů, které jsem použil v simulaci. Nedílnou součástí obou strojů byl i návrh vhodného přepínače odboček, na který se zaměřím v závěru této kapitoly. Nejprve než přejdu k popisu, tak bych rád uvedl, že byl pro tuto činnost použit simulink programu MATLAB R2012b s knihovnou Sim Power Systems. Oba autotransformátory jsem se snažil namodelovat podle reálných strojů, které se v přenosové soustavě používají. Obě jednotky pracují jako třífázové systémy zapojené do hvězdy (Y) a na straně nižšího napětí (10,5kV) zapojené do trojúhelníka (d). Jelikož model třífázového autotransformátoru v simulinku není, tak jsem oba stroje rozdělil na tři jednofázové autotransformátory. Veškerá dokumentace a schémata zapojení modelů jsou uvedeny v příloze této práce.

### 5.1 Autotransformátor 230/121kV

Každá jednofázová jednotka se skládá z modelu vícevinutového autotransformátoru s možností vývodu odboček. Všechny tři jednotky mají stejné parametry, takže systém návrhu budu popisovat na jednom modelu autotransformátoru.

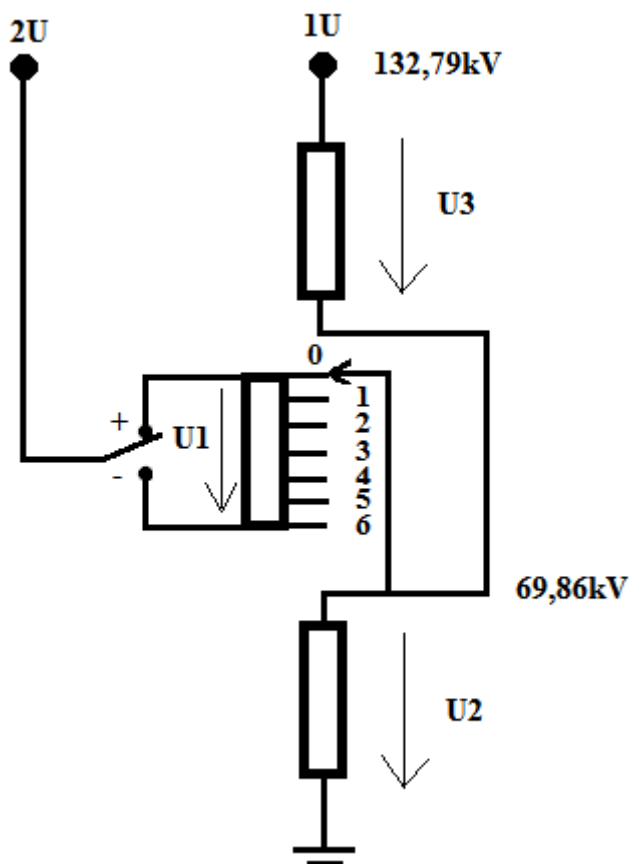
Jak již bylo už několikrát zmíněno, jedná o autotransformátor, pro který je typické jedno vinutí na magnetickém obvodu, které je rozděleno v poměru požadovaných napětí. K tomu jsem využil levou stranu modelu, která je složena ze tří vinutí, navzájem sériově propojených. Shora je jako první umístěno vinutí 1+ až 1 středního napětí, které má vyvedeno sedm odboček (0 až 6). Pod ním je připojeno vinutí 2+ až 2, tvořící na jednom konci uzemněnou část vysokonapěťového stupně. Spodní vinutí s označením 3+ až 3 je připojeno ke vstupnímu napětí 132,79kV a na druhém konci spojeno s vinutím 2.

Pravá strana modelu je využita pro vinutí nízkého napětí 10,5kV s označením 4+ až 4 a je magneticky vázána na levou stranu stroje. To by bylo ze strany popisu rozmístění vinutí vše a následně bych přešel k výpočtu parametrů autotransformátoru.

Jako první parametr, který bylo potřeba vypočítat byl jmenovitý výkon  $P_n$ . Reálný jmenovitý výkon  $P_{n_{reálný}}$  [MW] je roven štítkovému zdánlivému výkonu  $S_n = 200\text{MVA}$ .

$$P_n = \frac{P_{n_{reálný}}}{3} = \frac{200}{3} = 66.666 \text{ [MVA]}$$

Jmenovitá frekvence  $f_n$  byla určena jako 50Hz. Dále bylo nutné vypočítat nominální napětí jednotlivých vinutí  $U_1$  až  $U_4$ . Pro názornost se postup výpočtu odvolává na následující obrázek číslo 29.



Obrázek 29: Schéma autotransformátoru 230/121kV

Uvedená napětí  $U_p = 132,79\text{kV}$  a  $U_s = 69,86\text{kV}$  jsou přepočtena z napětí  $U_{n_a} = 230\text{kV}$  a  $U_{n_b} = 121\text{kV}$  pomocí následujícího vztahu.

$$U_x = \frac{(U_{nx} \times \sqrt{3})}{3} \text{ [kV]}$$

Je to z důvodu přepočtu na sdružené hodnoty a rozdělení do tří jednofázových systémů.

Dále můžeme psát

$$U_3 = U_p - U_s = 132,79 - 69,86 = 62,93 \text{ [kV]}$$

$$U_2 = U_s - 0 = 69,86 - 0 = 69,86 \text{ [kV]}$$

$$U_1 = \frac{U_{1-7}}{\sqrt{3}} = \frac{14,52}{\sqrt{3}} = 8,383 \text{ [kV]}$$

kde  $U_{1-7}$  je štičková hodnota napětí mezi první a sedmou odbočkou. Napětí  $U_4$  na nízkonapěťové straně je nastaveno na  $U_4 = 10,5 \text{ kV}$ .

Mezi další parametry se řadí odpory vinutí, které jsem zvolil  $0,003 \text{ [pu]}$  a indukce vinutí. Uvedená hodnota odporů je zvolena tak, aby neovlivňovala výsledky měření.

Indukce vinutí  $L$  jsem v modelu realizoval pomocí externích cívek, jejichž parametry jsem dopočetl podle následujících vzorců.

$$x_1 = \frac{u_{12} + u_{13} - u_{23}}{2} = \frac{0,1001 + 0,3506 - 0,2114}{2} = 0,1197 \text{ [-]}$$

$$x_2 = \frac{u_{12} + u_{23} - u_{13}}{2} = \frac{0,1001 + 0,2114 - 0,3506}{2} = -0,0196 \text{ [-]}$$

$$x_3 = \frac{u_{13} + u_{23} - u_{12}}{2} = \frac{0,3506 + 0,2114 - 0,1001}{2} = 0,231 \text{ [-]}$$

$$U_{n1} = U_p = \frac{U_{n_a}}{\sqrt{3}} = \frac{230}{\sqrt{3}} = 132,79 \text{ [kV]}$$

$$U_{n2} = U_s = \frac{U_{n_b}}{\sqrt{3}} = \frac{121}{\sqrt{3}} = 69,86 \text{ [kV]}$$

$$U_{n3} = U_{n_c} = 10,5 \text{ [kV]}$$

$$I_{1n} = \frac{P_n}{U_{n_a} \times \sqrt{3}} = \frac{200\,000}{230\sqrt{3}} = 502,04 \text{ [A]}$$

$$I_{2n} = \frac{P_n}{U_{n_b} \times \sqrt{3}} = \frac{200\,000}{121\sqrt{3}} = 954,3 \text{ [A]}$$

$$I_{3n} = \frac{P_n}{U_{n_c} \times \sqrt{3}} = \frac{200\,000}{10,5\sqrt{3}} = 10997,15 \text{ [A]}$$

$$X_{1v} = \frac{x_1 \times U_{n_1}}{I_{1n}} = \frac{0,1197 \times 132,79 \times 10^3}{502,04} = 31,66 \text{ [\Omega]}$$

$$X_{2v} = \frac{x_2 \times U_{n_2}}{I_{2n}} = \frac{-0,0196 \times 69,86 \times 10^3}{954,3} = 1,43 \text{ [\Omega]}$$

$$X_{3v} = \frac{x_3 \times U_{n_3} \times \sqrt{3}}{3 \times I_{3n}} = \frac{0,231 \times 10,5 \times 10^3 \times \sqrt{3}}{3 \times 10997,15} = 0,127 \text{ [\Omega]}$$

$$L_{1v} = \frac{X_{1v}}{2\pi f} = \frac{31,66}{2\pi \times 50} = 0,1008 \text{ [H]}$$

$$L_{2v} = \frac{X_{2v}}{2\pi f} = \frac{1,43}{2\pi \times 50} = -0,00456 \text{ [H]}$$

$$L_{3v} = \frac{X_{3v}}{2\pi f} = \frac{0,127}{2\pi \times 50} = 0,00041 \text{ [H]}$$

Parametr  $u_k$  představuje štítkovou hodnotu napětí nakrátko [%].

## 5.2 Autotransformátor 400/121kV

Druhý typ autotransformátoru, tentokrát 400/121kV, se skládá opět ze tří jednofázových jednotek. Rozdělení a zapojení vinutí je zde však odlišné. Vstupní vinutí A (3 až 3+) je na jednom konci napojeno na napájecí napětí 230,94kV, na druhém konci spojeno s vinutím B (2 až 2+). Tento uzel zároveň tvoří výstupní svorku pro napětí 121kV (při nulté odbočce). Vinutí B navazuje na vinutí C (1 až 1+), které má 17 odboček (+8 -> 0-> -8). Poslední vinutí D je opět pro napětí 10,5kV umístěno na druhé, sekundární, straně (svorky 4 až 4+).

Dříve než uvedu postup výpočtu parametrů daného autotransformátoru bych se chtěl zmínit o problému, který v tomto modelu nastal. Při výpočtu napětí jednotlivých vinutí jsem vždy vztahoval výpočet vinutí s odbočkami k jednomu napětí. Díky tomu jsem dopočetl parametry vinutí A a B. V podstatě se jednalo o totožný postup, který jsem použil pro autotransformátor 230/121kV. Problém ale nastal při simulaci modelu, kdy jsem dosáhl správného výstupního napětí pouze při

zapojení té odbočky, ke které jsem vztahoval výpočet vinutí C. Zkoušel jsem tedy měřit napětí mezi odbočkami a napětí na jednotlivých vinutí, aby jsem zjistil příčinu problému, který zvyšoval (snižoval) výstupní napětí při přepnutí odbočky o vyšší hodnotu oproti žádané. Po diskuzi nad daným problémem s vedoucím práce jsme došli k tomu, že na tento typ autotransformátoru musíme pohlížet jiným způsobem. Je to díky rozdílnému přepínání odboček, které je umístěno na straně vyššího napětí (předchozí stroj má přepínání odboček na straně středního napětí). Oproti autotransformátoru 230/121kV, který má regulační vinutí zapojeno odbočkou z hladiny středního napětí, má autotransformátor 400/121kV regulační vinutí C zapojeno v uzlu systému a tím vzniká odlišnost, kterou je nutné zahrnout ve výpočtu.

Následující postup výpočtu částečně vyřešil problém a tím pádem změřená napětí více korespondují se štítkovými hodnotami. I zde ale vzniká určitá odchylka, která je daná nerovnoměrným rozdělením napětí na jednotlivých odbočkách. Ideálním řešením by bylo pro každý stupeň jiné jmenovité napětí (jiný počet závitů). Tím bych výpočty docílil přesných hodnot napětí na nejvyšší, nejnižší a nulté odbočce. Jednotlivé stupně mezi nimi by pak také odpovídaly štítkovým hodnotám. Model obecného vícevinutového transformátoru bohužel nenabízí možnost integrace více vinutí s odbočkami, a proto jsem zvolil možnost jednoho vinutí s odbočkami a popisovanou chybou.

Jako první parametr pro výpočet napětí jednotlivých vinutí bylo určení velikosti napěťového kroku mezi odbočkami

$$U_{step} = \frac{(U_0 - U_{-1}) \times \sqrt{3}}{3} = \frac{(121 - 119,185) \times \sqrt{3}}{3} = 1,048 \text{ [kV]}$$

kde  $U_0$  je napětí nulté odbočky a  $U_{-1}$  napětí odbočky o jednu nižší.

Následující výpočty určily napětí při kompletně vyřazeném vinutí s odbočkami na straně vvn ( $U_{low}$ ) a napětí na straně zvláště vysokého napětí 400kV ( $U_{HV}$ ).

$$U_{low} = \frac{U_{-8} \times \sqrt{3}}{3} = \frac{106,48\sqrt{3}}{3} = 61,47 \text{ [kV]}$$

$$U_{HV} = \frac{U_n \sqrt{3}}{3} = \frac{400 \sqrt{3}}{3} = 230,94 \text{ [kV]}$$

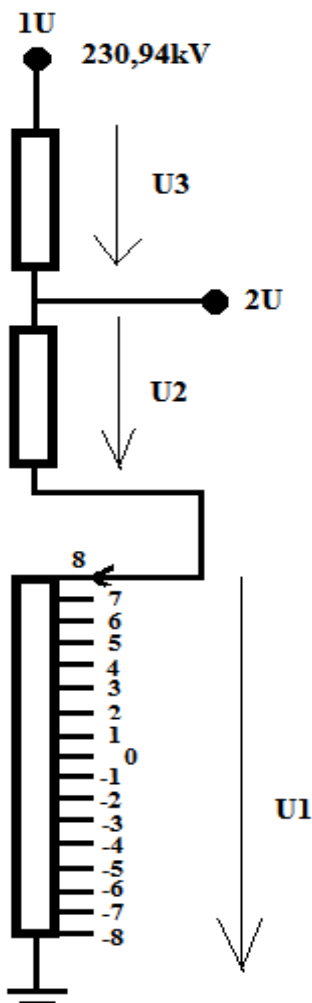
Napětí  $U_{low}$  se následně rovná hodnotě napětí  $U_2$  (na vinutí 2 až 2+). Velikost napětí na vinutí 3 až 3+ se dopočte vzorcem

$$U_3 = U_{HV} - U_{low} = 230,94 - 61,47 = 169,46 \text{ [kV]}.$$

Poslední hodnotu, napětí  $U_1$ , jsem dopočítal upravením následujícího vzorce kde „k“ je počet odboček.

$$\frac{U_{low} + U_1}{U_{HV} + U_1} = \frac{U_{low} + k \times U_{step}}{U_{HV}}$$

$$U_1 = \frac{k \times U_{step} \times U_{HV}}{U_{HV} - U_{low} - k \times U_{step}} \times 2 = \frac{8 \times 1,048 \times 230,94}{230,94 - 61,47 - 8 \times 1,048} \times 2 = 24,04 \text{ [kV]}$$



Obrázek 30: Schéma autotransformátoru 400/121kV



Jmenovitý výkon a hodnoty jednotlivých indukčností reprezentující parametry vinutí se vypočítaly úplně stejným způsobem jako u předchozího autotransformátoru, a proto zde nebudu postup znovu rozebírat.

$$P_n = 116,6 \text{ [MVA]}, L_{1v} = 0,211 \text{ [H]}; L_{2v} = -0.00066 \text{ [H]}, L_{3v} = 0.00072 \text{ [H]}$$

### 5.3 Přepínač odboček

Teoretický rozbor přepínače odboček jsem uvedl v předchozí kapitole, a proto se zaměřím na praktické řešení, které jsem použil v mé práci. Systém funguje tím způsobem, že se nejprve získá hodnota požadované odbočky. Tato hodnota může být buď cíleně zadána, náhodně volena, anebo vypočtena z požadované velikosti výstupního napětí. Číslo odbočky, které je zadáno v podsystému s názvem Tap Changer se dále přivede na nultý stupeň přepínače, kde se porovná, zda žádaná hodnota odbočky je rovna nule. V případě že je, tak se přepínač přepne a na výstupu nastaví 1. Když je číslo požadované odbočky jiné, tak se následně v jednotlivých stupních přepínače odčítá od hodnoty požadované odbočky číslo jedna až do té chvíle, kdy se rovná nule. V případě kdy se hodnota odbočky rovná nule se sepne přepínač aktuální hladiny a na výstupu nastaví hodnotu 1. Stejný systém je použit i pro záporné odbočky, které se musí před samotným odčítáním vynásobit konstantou -1.

Výstupy ze všech přepínačů jsou připojeny na návěstí, která svoji hodnotu (0 pro rozepruto, 1 pro sepruto) transportují do každého podsystému s autotransformátorem. Zde je každá proměnná připojena k odpojovači, který zařazuje příslušnou požadovanou odbočku.

V této chvíli se principy přepínání odboček u obou modelů liší. Přepínání u autotransformátoru 230/121kV se realizuje tak, že když je požadavek na přidání odbočky a tím zvýšení napětí, tak se pomocí odpojovačů přepínají odbočky z nulté až na šestou (spínač na výstupu je v poloze „+“). V případě požadavku na snížení výstupního napětí (odbočky se budou odčítat) se výstupní spínač přepne do polohy „-“ a odbočky se budou přepínat od šesté po nultou. Uvedený způsob je také uveden na obrázku číslo 29.

Přepínání odboček u autotransformátoru 400/121kV je, na rozdíl od předchozího způsobu, lehce odlišný. Není zde umístěn přepínač na výstupu a tím pádem je regulovatelné vinutí rozděleno na více odboček. Konkrétně se jedná o stupně -8 až 0 (ve směru od vývodu 1+ k vývodu 1.8) a 0 až +8 (ve směru od vývodu 1.8 k vývodu 1). Každý stupeň pak přičítá/odčítá 1.048kV k/od napětí předchozí odbočky.

Součástí přepínače odboček je i regulátor, který vyhodnocuje vhodné připojení odbočky pro dosažení co nejmenší odchylky měřeného napětí k referenčnímu.

Princip funkce je takový, že po počátečním odečtu změřeného napětí od referenčního je regulační odchylka přivedena do bloku „Dead Zone“. Zde je nastavena určitá oblast necitlivosti regulace. Dále systém vyhodnotí, zda je nutné odbočku přidat či ubrat. Pro reálnější funkci je v regulátoru přítomna i zpoždovací logika, která definuje dobu regulace (přepnutí odbočky) po kterou není možné dále regulovat. V případě, že je regulace připravena pro další nastavení se tento signál přivede do logického členu AND. Pro zahájení regulace je ale nutné, aby byl přiveden i signál od vyhodnocovacího obvodu, který zjišťuje, zda se regulační odchylka změnila vůči předchozí hodnotě. Hodnota „1“ na výstupu logického členu AND aktivuje Trigger v nastavovacím subsystému. Zde se podle vyhodnocení přidá, nebo ubere odbočka od minulé hodnoty. V saturačním bloku jsou nastaveny maximální hodnoty regulátoru.

## 6. Měření

Na následujících řádcích uvedu výsledky měření, která jsem realizoval na modelech autotransformátorů. Oba modely jsou konstruovány univerzálně, takže je na nich možné simulovat různé případy provozu. Pro mojí bakalářskou práci jsem ale zvolil čtyři typová měření. Jako zdroj napájení jsem použil model 3-fázového generátoru, který v čase měnil výstupní napětí po devíti krocích od 95% až po 105%  $U_n$ . Následně jsem na obou strojích simuloval tři různé provozu. V prvním měření jsem simuloval **provoz při maximálním zatížení 350MVA a účinníku 0.95**. Druhé měření simulovalo **provozní parametry při zapojení nezatížené linky bez kompenzace** a třetí měření simulovalo **provoz linky bez zatížení, ale s kompenzací v terciárním vinutí**. Místo modelu přenosové linky jsem použil kondenzátory, které svými kapacitami reprezentovaly danou síť. Z technických listů reálných linek jsem zvolil kapacitu 10,5nF/km. Použitý model reprezentoval 200km dlouhou nadzemní linku s kapacitou 2,1 $\mu$ F. Kompenzační tlumivka, kterou jsem použil ve třetím případě, má výkon 45MVA. V posledním měření jsem analyzoval **závislost dynamického chování terciárního napětí na sekundárním napětí**.

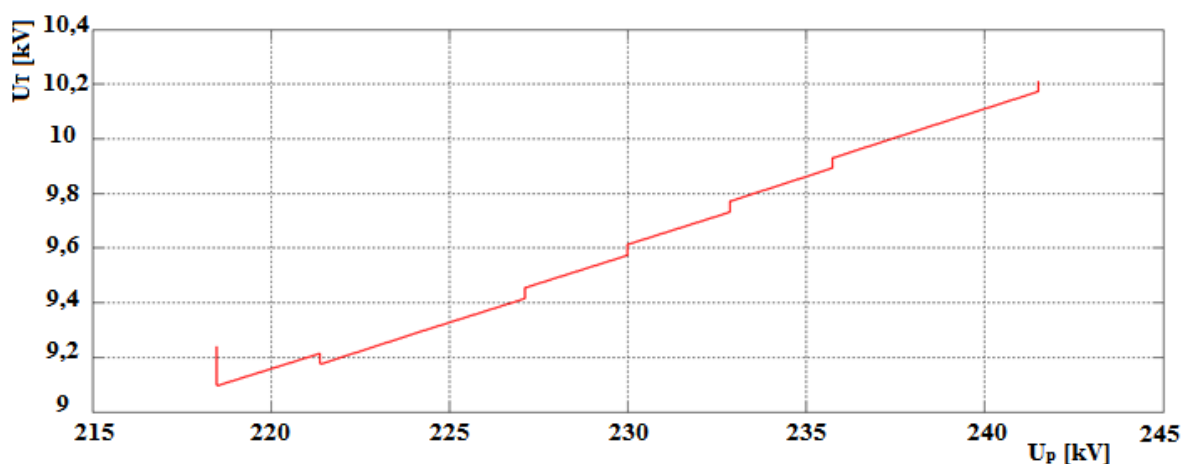
Hlavní roli ve všech případech hrál přepínač odboček s regulátorem. Ten měl za úkol reagovat na změny zatížení a vstupního napětí udržováním žádaného napětí na výstupních svorkách. Hodnotu žádaného napětí jsem zvolil u případu se zatíženou sítí 350MVA jako 118kV. U druhého a třetího měření jsem zvolil takovou hodnotu napětí na výstupních svorkách autotransformátoru, aby napětí na konci vedení nepřesáhlo maximální hodnotu 120kV. Samozřejmě zde hrály velkou roly kapacity linky, které napětí se vzdáleností zvyšovaly.

## 6.1 Autotransformátor 230/121kV

### 6.1.1 Zapojení se zatíženou sítí

Výstupem měření je graf číslo 1 se závislostí napětí terciárního vinutí  $U_T$  na napětí primárního vinutí (vstupního)  $U_p$ . Při měření jsem na 121kV výstup autotransformátoru připojil v čase  $t=0s$  zátěž 350MVA s účinníkem 0.95. Regulační napětí jsem zvolil 118kV a přepínač odboček reguloval od nulté odbočky.

Z grafu je na začátku patrný pokles terciárního napětí při hodnotě primárního napětí 218,5kV. Ten je způsoben přepínačem odboček, který se snažil při  $U_p = 218,5kV$  zvýšit výstupní napětí na požadovanou hodnotu 118kV a tím pádem zařazoval odbočky. Klesající zub, který se vytvořil při napětí  $U_p = 221,4kV$  je způsoben pouze zvýšením primárního napětí při konstantní odbočce. Přepínač odboček začal vyřazovat odbočky (tím pádem snižovat výstupní napětí) od terciárního napětí cca 9,4kV a tím pádem jsou v charakteristice patrné vzestupné skoky. Celkově mohu usoudit, že daná závislost má rostoucí charakter s hranicemi terciárního napětí od 9,095kV do 10,211kV.

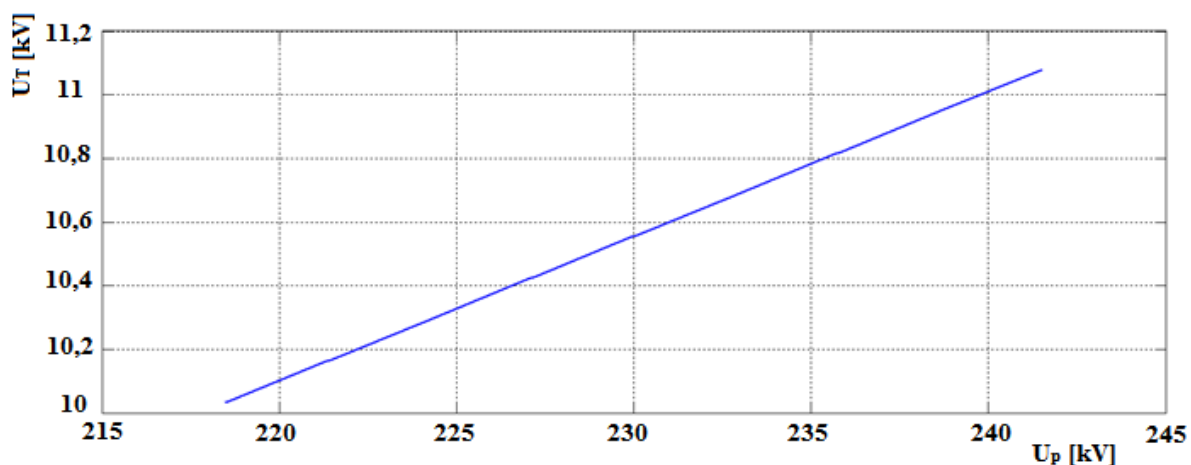


Graf 1: Autotransformátor 230/121kV – zatížená síť

### 6.1.2 Zapojení s nezatíženou sítí, nekompensované

Pro tento případ jsem zvolil zapojení tří kondenzátorů s kapacitou 2,1 $\mu$ F, které reprezentovaly nadzemní elektrické vedení 110kV, 200km dlouhé. V terciárním vinutí nebyl zapojen žádný kompenzační systém. Žádané napětí jsem nastavil na 115kV. Grafická závislost číslo 2 vyobrazuje lineárně rostoucí charakter závislosti

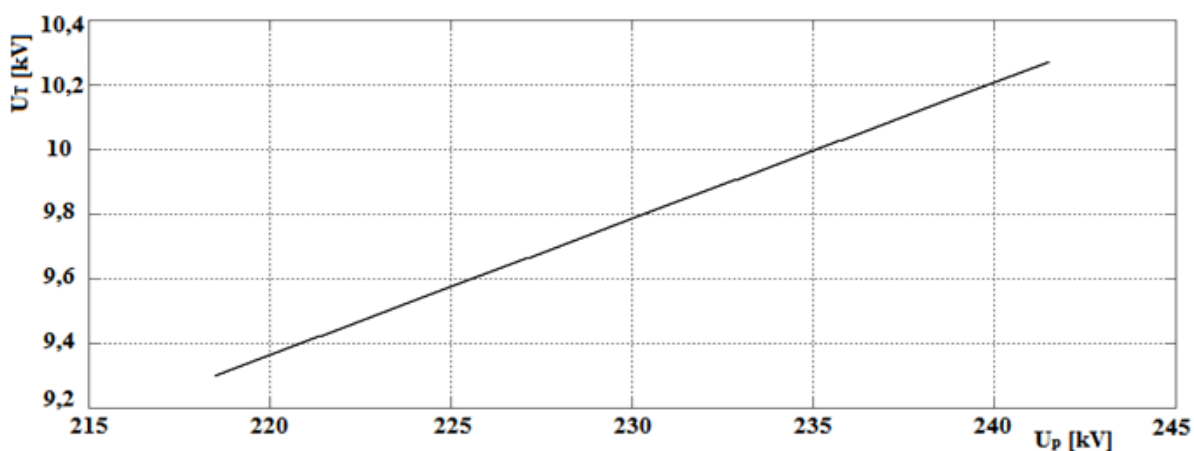
terciárního napětí na primárním napětí. Minimální hodnota napětí  $U_T$  byla změřena jako 10,03kV při  $U_p = 218$ kV. Maximální hodnota terciárního napětí 11,08kV byla při primární hodnotě napětí 241,5kV.



Graf 2: Autotransformátor 230/121kV – nezatížená síť bez kompenzace

### 6.1.3 Zapojení s nezatíženou sítí, kompenzované

Odlišnost oproti předchozímu zapojení je v použití kompenzační tlumivky 45MVAR. Ta je zapojena v terciárním vinutí. Znovu je zde také připojena elektrická linka 110kV, 200km. Rozdíl oproti nekompenzované síti se zde promítl v posunu minimálních a maximálních hodnot. Jak graf číslo 3 zobrazuje, rozsah hodnot terciárního vinutí se pohyboval od 9,3kV do 10,27kV. Díky tomu můžeme určit posun o přibližně 1kV vůči předchozímu měření. Posun maximálního napětí také způsobil, že se napětí na terciárním vinutí nedostalo na jmenovitou hodnotu 10,5kV, i když byla maximální hodnota primárního napětí 105%  $U_n$ .



Graf 3: Autotransformátor 230/121kV – nezatížená síť s kompenzací

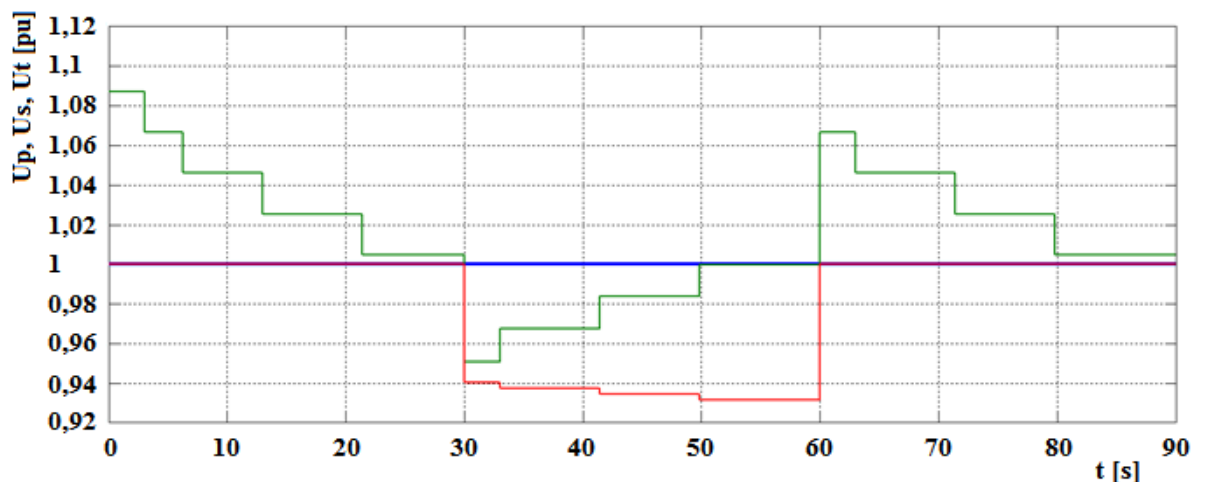
### 6.1.4 Dynamická změna sekundárního a terciárního napětí

Na rozdíl od předchozích měření jsem zde simuloval dynamický děj, který nastane při konstantním primárním napětí 230kV (modrý průběh). Začátek měření zaznamenal pokles sekundárního napětí (zelený průběh) v důsledku odebírání odboček regulátorem až na žádanou hodnotu  $U_s = 118kV$ . Po celou dobu bylo napětí terciárního vinutí (červený průběh) konstantní 10,5kV.

V čase 30s jsem zařadil do sekundárního vinutí zátěž 300MVA,  $\cos \phi$  0,95. Zatížení následně způsobilo skokový pokles sekundárního a terciárního napětí a zásah regulátoru. Ten začal připínat odbočky a tím zvyšovat sekundární napětí na definovanou hodnotu. Spolu se sekundární regulací se začala měnit i hodnota terciárního napětí a to opačně ( $U_s$  rostlo, ale  $U_t$  klesalo). Ustálení regulace proběhlo v čase 50s.

Odepnutí zátěže 300MVA jsem simuloval v čase 60s, kde je opět patrný napěťový skok sekundárního a terciárního napětí s následnou regulací sekundárního napětí.

Na naměřených charakteristikách je patrné, že i když se velikost napětí na výstupní straně 121kV mění o definovaný krok, terciární napětí zůstává konstantní pouze v situaci bez zatížení sekundární strany autotransformátoru. Uvedené chování odpovídá štitkovým údajům, které uvádějí neměnné terciární napětí při změně sekundárního napětí v režimu naprázdno.



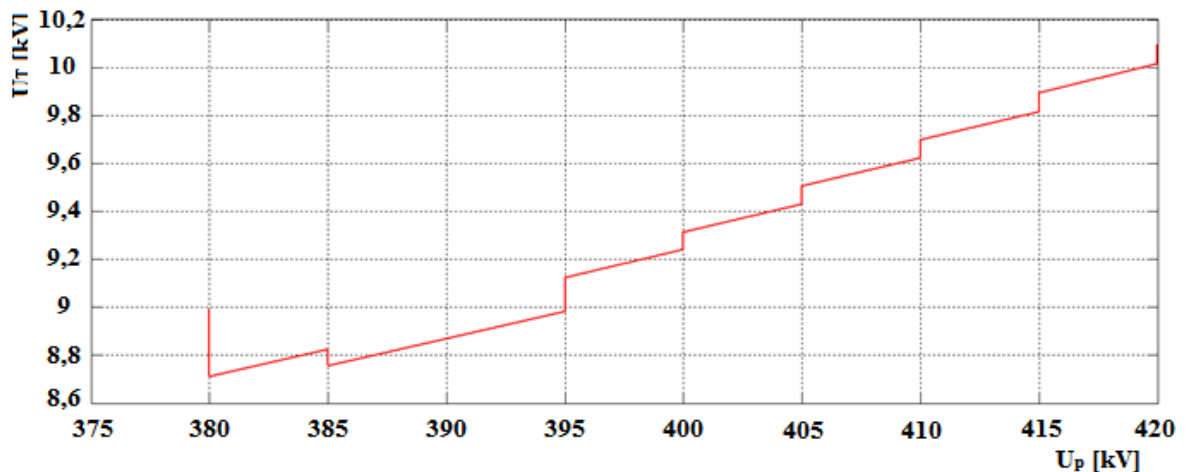
Graf 4: Autotransformátor 230/121kV – dynamická změna sekundárního a terciárního napětí

## 6. 2 Autotransformátor 400/121kV

### 6.2.1 Zapojení se zatíženou sítí

I pro tento případ jsem použil zátěž 350MVA, účinník 0.95, ale aplikoval jsem ji na autotransformátoru 400/121kV. Velikost žádaného napětí byla opět 118kV.

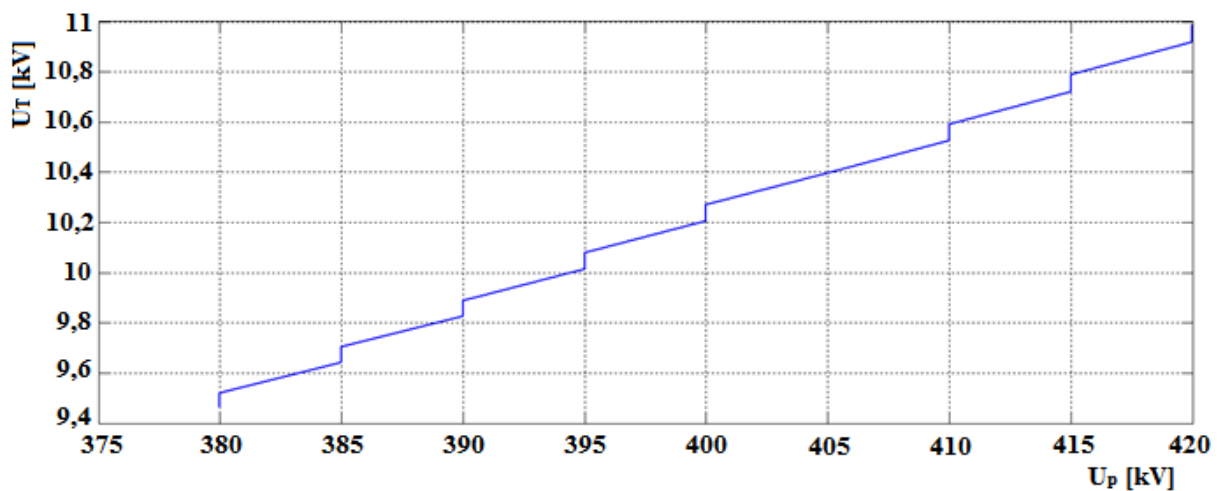
Výsledkem měření je graf číslo 5, ve kterém jsem vynesl závislost napětí terciárního vinutí na napětí primárního vinutí. V levé části charakteristiky je opět patrný pokles terciárního napětí, tentokrát z hodnoty 8,9kV na hodnotu 8,7kV při primárním napětí 380kV. Jedná se o větší napěťový pokles, než byl u autotransformátoru 230/121kV a jeho důvodem je přidávání odboček při konstantním  $U_p = 380\text{kV}$  (a tím zvyšování sekundárního napětí). Mezi napětími 385kV až 395kV regulátor nevyžadoval změnu odbočky, a proto se zde držela stále pátá odbočka. Přepínání odboček nastalo až od napětí 395kV, kde jsou následně vidět napěťové skoky. Terciární napětí se pohybovalo v pásmu 8,7kV až 10,09kV a výsledná křivka má rostoucí charakter.



Graf 5: Autotransformátor 400/121kV – zatížená síť

### 6.2.2 Zapojení s nezatíženou sítí, nekompenzované

Na sekundární straně autotransformátoru jsem použil kondenzátory, které svou kapacitou reprezentovaly nadzemní vedení 200km. Žádané napětí jsem nastavil na 115kV. Když porovnám naměřený graf číslo 6 (který jsem v tomto bodě změřil) s grafem číslo 2, tak jsou na první pohled patrné napěťové kroky, které u grafu číslo 2 vidět nebyly. Napěťové kroky jsou způsobeny změnou primárního napětí a tím i reakcí přepínače odboček. Důvodem viditelnosti zmiňovaných kroků je vyšší napájecí napětí daného autotransformátoru a zároveň umístění přepínače odboček na straně vysokého napětí. Rozsah regulace terciárního napětí je zde mezi 9,46kV a 10,99kV. Tím pádem bylo terciární napětí zvýšeno o 1,53kV oproti počáteční hodnotě (u autotransformátoru 230/121kV byl rozdíl napětí terciárního vinutí 1,05kV) což také přispělo k viditelnosti napěťových skoků.

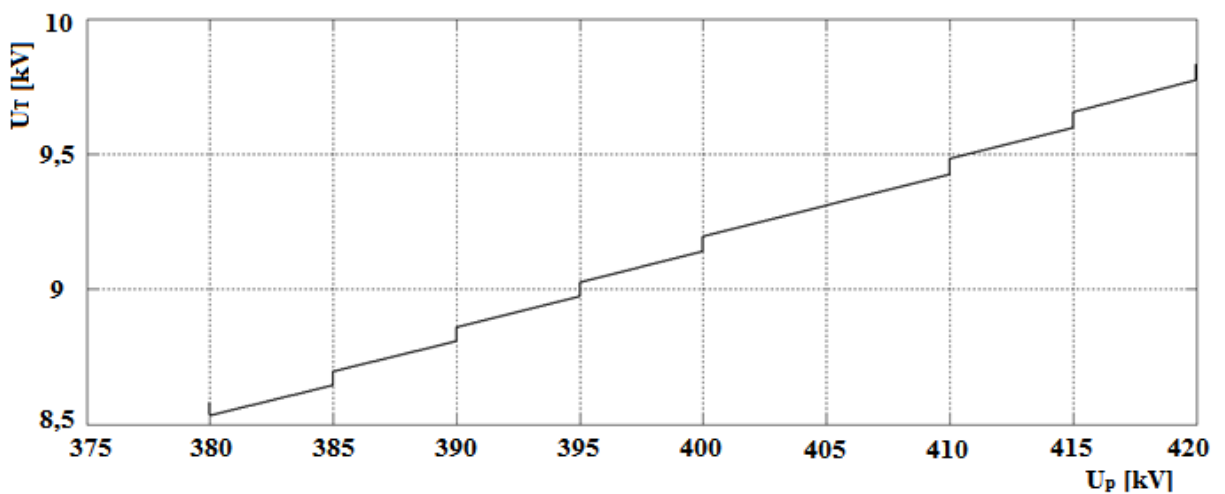


Graf 6: Autotransformátor 400/121kV – nezatížená síť bez kompenzace



### 6.2.3 Zapojení s nezatiženou sítí, kompenzované

Nezatižená síť 200km dlouhá byla kompenzována pomocí tlumivky 45MVAR zapojené v terciárním vinutí autotransformátoru 400/121kV. Zapojení s nezatiženou sítí a kompenzací v terciárním vinutí i v tomto případě způsobilo posun rozsahu terciárního napětí, jako u autotransformátoru 230/121kV. Díky tomu není na terciárním vinutí v žádném bodě přítomno jmenovité napětí 10,5kV. Napěťové skoky vzrůstající charakteristiky jsou patrné i zde. Velikost terciárního napětí se měnila od hodnoty 8,5kV po hodnotu 9,8kV. Ve srovnání s měřením 6.1.3 byla změna terciárního napětí větší (1,3kV).



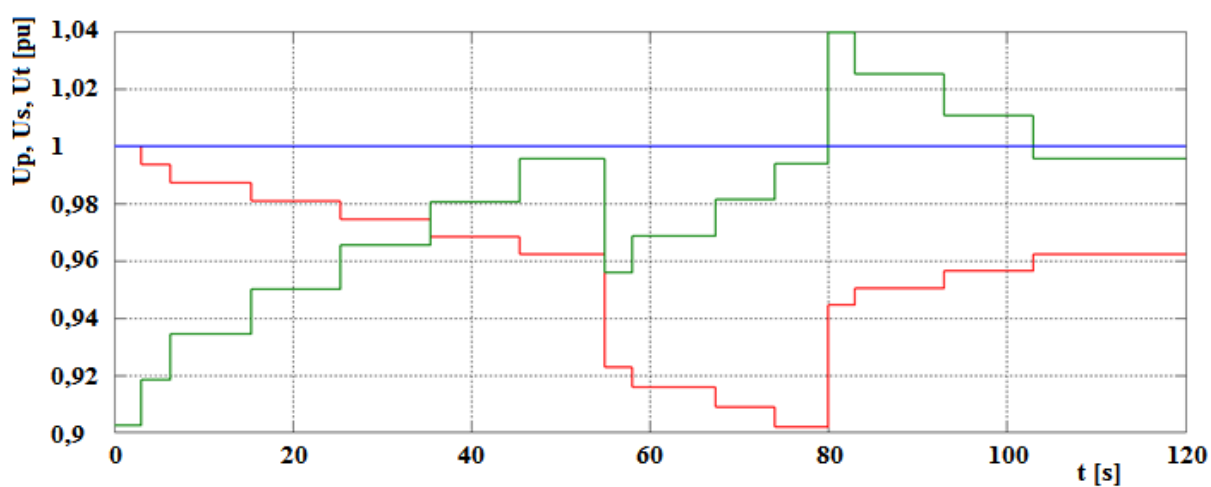
Graf 7: Autotransformátor 400/121kV – nezatižená síť s kompenzací

### 6.2.4 Dynamická změna sekundárního a terciárního napětí

Podobně jako u předchozího autotransformátoru jsem zaznamenal grafickou závislost terciárního (červený průběh), sekundárního (zelený průběh) a konstantního primárního (modrý průběh) napětí v čase. V počátku simulace je zřetelná regulace sekundárního napětí až k žádané hodnotě 118kV. V tomto případě byla nastavena počáteční odbočka záporná a díky tomu se do ustálení regulace v čase 45s přidávaly odbočky. Počáteční regulace dále způsobila zřetelnou změnu terciárního napětí, které zaznamenalo klesající charakter.

V čase 55s od začátku simulace jsem aktivoval zátěž 300MVA,  $\cos\phi=0,95$  umístěnou v sekundárním vinutí. Reakcí poté bylo poklesnutí sekundárního a terciárního napětí s následnou regulací zpět na definovanou hodnotu sekundárního napětí.

V čase 80s jsem simuloval odpojení popsané zátěže sekundárního vinutí. Následná regulace probíhala až do ustálení v čase 103s poklesem sekundárního napětí a vzestupem terciárního napětí, které mělo po celou simulaci opačné chování vůči sekundárnímu napětí ( $U_s$  rostlo při klesání  $U_t$ ).



Graf 8: Autotransformátor 400/121kV – dynamická změna sekundárního a terciárního napětí

## 7. Závěr

V závěrečném hodnocení mé bakalářské práce mohu konstatovat, že se mi podařilo vytvořit modely obou autotransformátorů, na kterých jsem realizoval sérii měření. Autotransformátor 230/121kV svými parametry přesně odpovídal štítkovým hodnotám reálného stroje. U autotransformátoru 400/121kV se mi podařilo vytvořit model, který svými napěťovými poměry odpovídal štítkovým hodnotám hlavně mezi odbočkami 0 až -8. Kladná část regulace mezi odbočkami 0 až +8 vykazovala určitou odchylku od referenčních hodnot. Tato odchylka byla způsobena umístěním přepínače odboček do vysokonapěťové strany autotransformátoru (viz. kapitola 5.2). Externí indukčnosti vinutí autotransformátorů zajistili při měření definované hodnoty napětí nakrátko  $u_k$ .

Vedle modelů autotransformátorů se mi podařilo zkonstruovat funkční model přepínače odboček s regulátorem. Ten dokáže dle nastavených parametrů regulovat přepínání odboček a díky tomu měnit velikost výstupního napětí. Takto vytvořený přepínač odboček byl svými vlastnostmi pro mou práci plně dostačující.

V šesté kapitole jsem autotransformátory podrobil čtyřem typovým měřením. Způsoby měření byly zvoleny tak, aby ukázaly chování strojů v krajních případech. Tím je myšlen především chod naprázdno a chod při maximálním zatížení. Výsledky měření ukázaly, že se zvýšením vstupního (primárního) napětí se zvýší i terciární napětí při regulaci, která zaručí co nejkonstantnější sekundární napětí. Při opačné simulaci, kdy jsem nastavil konstantní primární napětí a nechal jsem, za pomoci odboček, měnit sekundární napětí vznikl děj, který při klesajícím charakteru sekundárního napětí způsobil růstový charakter terciárního napětí. Uvedené chování je názorně zobrazeno v grafech 1 až 8.

Celkově bakalářskou práci hodnotím jako přínosnou, protože vytvořené modely jsou univerzální. Tím pádem se s nimi mohou simulovat různé provozní stavy a následně analyzovat předpokládaná chování reálných strojů. Zajisté je možné modely (hlavně autotransformátor 400/121kV) dále vylepšovat, čemuž se chci věnovat v rámci diplomové práce.

## Seznam použité literatury:

- [1.] Martin J. Heathcote, CEng, FIEE: „The J & P Transformer Book“, 1998, ISBN 07506 1158 8
- [2.] James H. Harlow: „ELECTRIC POWER TRANSFORMER ENGINEERING“, 2004, ISBN 0-8493-1704-5
- [3.] Doc. Ing. Petr Voženílek, CSc., Doc. Ing. Vladimír Novotný, CSc., Doc. Ing. Pavel Mindl, CSc.: „ELEKTROMECHANICKÉ MĚNIČE“, 2011, České vysoké učení technické v Praze, ISBN 978-80-01-04875-7
- [4.] ABB: „Transformer Handbook“, 2004
- [5.] Dr. Dieter Dohnal: „On-Load Tap-Changers for Power Transformers“, 2013, F0126405 – 09/13 – dp
- [6.] John J. Winders, Jr.: „Power Transformers Principles and Applications“, 2002, ISBN: 0-8247-0766-4
- [7.] Ing. František Pešák: „VÝPOČTY TRANSFORMÁTORŮ“, 1955, Státní nakladatelství technické literatury
- [8.] ČEPS a.s.: „Výstavba přenosové soustavy“, ČEPS a.s., 2012, [https://www.ceps.cz/CZE/Media/Ke-stazeni/Documents/Vystavba\\_vedeni\\_2012\\_web.pdf](https://www.ceps.cz/CZE/Media/Ke-stazeni/Documents/Vystavba_vedeni_2012_web.pdf)
- [9.] Ing. René Honišl, Ing. Milan Konečný, Ing. Martin Galetka, Ph.D., Ing. Ivo Ullman, Ph.D.: „Přenosová soustava České republiky“, ISBN 978-80-905392-3-5, <http://partnerstvi-energetiky.msek.cz/wp-content/uploads/2013/01/01-Prenosova-soustava-Ceske-republiky.pdf>
- [10.] EMG Zlín, s.r.o.: „Kompenzace jalové energie“, [http://www.emgzlin.cz/menu/kompenzace-o\\_kompenzaci.html](http://www.emgzlin.cz/menu/kompenzace-o_kompenzaci.html)
- [11.] ČEPS a.s.: „Přeshraniční toky“, ČEPS a.s., 2015, <https://www.ceps.cz/CZE/Data/Vsechna-data/Stranky/Preshranicni-toky.aspx>
- [12.] Tzbinfo: „Stožáry VVN“, 2007, <http://www.tzb-info.cz/4170-stozary-vvn-i>
- [13.] El-insta: „NOKIAN CAPACITORS ALSTOM - vysokonapěťová kompenzace jalové energie“, <http://www.el-insta.cz/nokian-capacitors-alstom-vysokonapetova-kompenzace-jalove-energie>

## Seznam použitých obrázků

Obrázek 1: Schéma sítí přenosové soustavy .....	11
Obrázek 2: Elektrizační soustava (schéma).....	11
Obrázek 3: Distribuční soustava (schéma).....	12
Obrázek 4: Přeshraniční toky .....	13
Obrázek 5: a) AlFe lano, b) trojsvazek .....	14
Obrázek 6: Kabelové vedení .....	15
Obrázek 7: Kompenzační reaktory 2x45MVAR, 10kV .....	17
Obrázek 8: Schéma dvouvinuťového transformátoru .....	19
Obrázek 9: Náhradní schéma transformátoru.....	19
Obrázek 10: Náhradní schéma transformátoru v ustáleném stavu a fázorový diagram	20
Obrázek 11: Chod naprázdno se zahrnutím ztrát v železe a fázorový diagram .....	22
Obrázek 12: Náhradní schéma chodu nakrátko .....	23
Obrázek 13: Typy konstrukce magnetického obvodu .....	26
Obrázek 14: Konstrukce magnetického systému trojfázových transformátorů .....	27
Obrázek 15: Schématický postup výroby přesmyknutého vinutí a finální podoba vinutí .....	28
Obrázek 16: Umístění vinutí transformátoru a potřebná izolace.....	29
Obrázek 17: Transformátorová nádoba a konzervátor .....	31
Obrázek 18: Schéma autotransformátoru .....	31
Obrázek 19: Zapojení do hvězdy.....	33
Obrázek 20: Zapojení do trojúhelníku .....	33
Obrázek 21: Zapojení do lomené hvězdy .....	34
Obrázek 22: ABB 19/345kV.....	35
Obrázek 23: Autotransformátor ABB 400/121kV .....	36
Obrázek 24: Autotransformátor Siemens 230/121kV (tři jednofázové jednotky) .....	36
Obrázek 25: Tap changer .....	39
Obrázek 26: Průběh přepínání.....	41
Obrázek 27: Kruhový přepínač s pohyblivými rezistory .....	42
Obrázek 28: Přepínač s jedním rezistorem.....	42

Obrázek 29: Schéma autotransformátoru 230/121kV .....	44
Obrázek 30: Schéma autotransformátoru 400/121kV .....	48

## Seznam grafů

Graf 1: Autotransformátor 230/121kV – zatížená síť .....	52
Graf 2: Autotransformátor 230/121kV – nezatížená síť bez kompenzace .....	53
Graf 3: Autotransformátor 230/121kV – nezatížená síť s kompenzací .....	53
Graf 4: Autotransformátor 230/121kV – dynamická změna sekundárního a terciárního napětí .....	54
Graf 5: Autotransformátor 400/121kV – zatížená síť .....	55
Graf 6: Autotransformátor 400/121kV – nezatížená síť bez kompenzace .....	56
Graf 7: Autotransformátor 400/121kV – nezatížená síť s kompenzací .....	57
Graf 8: Autotransformátor 400/121kV – dynamická změna sekundárního a terciárního napětí .....	58

Příloha:

a) Štítkové hodnoty autotransformátoru 230/121kV

# SIEMENS

Třífázový transformátor, typ 1 ARP 200 000 - 245		Výrobní číslo 318 239	Rok výroby 2009	IEC 60076			
Jmenovitý výkon 200 000/200 000/100 000 kVA		Typ chlazení ONAN / ONAF		v.n. SI 750 U 950 AC 75-U 190 AC 75 s.n. U 550 AC 230-U 190 AC 75 n.n. U 75 AC 28			
Spojení YNaOd1		Frekvence 50 Hz	Provoz Trvalý	Napětí nakrátko (při 200 MVA a 75°C) v.n.-s.n.   v.n.-n.n.   s.n.-n.n.			
Poloha	Jmenovité napětí			Jmenovité proudy			
	v.n.	s.n.	n.n.	v.n.	s.n.	n.n.	
-6	230 000 V	106 480 V	10 500 V	502.0 A	1084.4 A	5498.6 A	18.79
0	230 000 V	121 000 V	10 500 V	502.0 A	954.3 A	5498.6 A	10.01
+6	230 000 V	135 520 V	10 500 V	502.0 A	852.1 A	5498.6 A	6.12
							35.06
							22.30 %
							21.14 %
							23.28 %
Doba trvání zkratu 3 SEK		Max. okolní teplota 40°C	Celková hmotnost ~ 178 000 kg				
Nádoba a dilatační nádoba navrženy pro plné vakuum		Oteplení vinutí 65 K	Aktivní část ~ 90 000 kg				
Typ oleje Inhibited - Nytro Y 3000 Olej neobsahuje PCB		Oteplení oleje 60 K	Hmotnost oleje ~ 42 000 kg				
Typ přepínače odboček 3xM I 1203-170/B-14 131 W		Výrobní č. 1063222	Transportní hmotnost (bez oleje) ~ 120 000 kg				
Jmenovitý proud převodů 1200 A							
PTP	CT1-CT6	Převod 600 / 1	A/A	30 VA, třída 5P20			
PTP	CT7-CT12	Převod 1200 / 1	A/A	30 VA, třída 5P20			
PTP	CT13-CT18	Převod 6000 / 1	A/A	30 VA, třída 5P20			
PTP	CT19	Převod 600 / 1	A/A	30 VA, třída 10P20			
PTP	CT20-CT22	Převod 530 / 1	A/A	10 VA, třída 1; Fs10			
PTP	CT23-CT25	Převod 1200 / 1	A/A	10 VA, třída 1; Fs10			
PTP	CT26-CT28	Převod 5600 / 1	A/A	10 VA, třída 3; Fs10			
PTP	CT29	Převod 530 / 2	A/A	10 VA, třída 3; Fs10			
PTP	CT30	Převod 550 / 2	A/A	10 VA, třída 3; Fs10			
PTP	CT31	Převod 1100 / 4	A/A	10 VA, třída 3; Fs10			
PTP	CT32	Převod 5800 / 2	A/A	10 VA, třída 3; Fs10			

Poloha	v.n.		s.n.		n.n.		Připojení svazek vinutí	Připojení svazek plotáček
	napětí (V)	proud (A)	napětí (V)	proud (A)	napětí (V)	proud (A)		
-6	230 000	502.0	106 480	1084.4	10 500	5498.6	7	
-5	230 000	502.0	108 500	1080.3			6	
-4	230 000	502.0	107 500	1085.5			5	
-3	230 000	502.0	111 740	1052.7			4	
-2	230 000	502.0	116 560	994.1			3	
-1	230 000	502.0	119 580	973.8			2	
0	230 000	502.0	121 000	964.5	10 500	5498.6	1	
+1	230 000	502.0	125 840	917.6			5	
+2	230 000	502.0	128 820	900.3			4	
+3	230 000	502.0	133 060	863.5			3	
+4	230 000	502.0	135 000	857.5			2	
+5	230 000	502.0	135 520	852.1			1	

Vyrobeno firmou Siemens v Chorvatsku



## b) Štítkové hodnoty autotransformátoru 400/121kV

# ABB Transformatoren

**3 FÁZOVÝ OLEJOVÝ REGULAČNÍ AUTOTRANSFORMÁTOR** TYP PDOR 294125/420

NORMA IEC 76 VÝR.Č. 110111 ROK VÝROBY 2004 DRUH AUTO PROVOZ TRVALÝ

FREKVENCE Hz 50 JMENOVITÝ VÝKON MVA 350/350/100 CHLAZENÍ ONAF Un kV 420/123/12

IZOLAČNÍ HLADINA kV LI1425 AC630-AC75 / LI550 AC230-AC75 / LI75 AC28 SKUPINA SPOJENÍ YNa0d1

HMOTNOSTI: CELKEM t 309.8 TRANSPORTNÍ BEZ OLEJE t 210 VYJÍMATELNÁ ČÁST t 171 OLEJ t 70.5

TŘÍDA KRYTÍ IP 54 TŘÍDA TEPelnĚ ODOLNOSTI A

OLEJOVÁ NAPLNĚ: TECHNOL Y 3000, NEOBSAHUJE PCB, TŘÍDA 2A PODLE IEC 2 96

VAKUOVÁ ODOLNOST: NÁDOBA 100 %

DILATAČNÍ NÁDOBA NENÍ VAKUO ODOLNÁ

POLOHA	400/121 kV	400/10.5 kV	121/10.5 kV
+8	14.67 %	11.64 %	5.52 %
0	13.87 %	11.36 %	5.86 %
-8	13.13 %	11.11 %	6.57 %

VZTAHUJE SE NA 350 MVA 100 MVA 100 MVA

STRANA VYŠŠÍHO NAPĚTÍ

JMENOVITÝ VÝKON MVA 350

JMENOVITÉ NAPĚTÍ V 400000

JMENOVITÝ PROUD A 505

SKUPINA SPOJENÍ YNa0

STRANA STŘEDNÍHO NAPĚTÍ

JMENOVITÝ VÝKON MVA 350

POLOHA	ODBOČKA VNITŘÍ	VOLT	350 MVA AMPÉR
+8	9	155530	1491
+7	8a	153795	1511
+6	8	151890	1532
+5	7a	150075	1554
+4	7	148260	1575
+3	6a	146445	1596
+2	6	144630	1621
+1	5a	142815	1645
0	5	141000	1670
-1	4a	139185	1695
-2	4	137370	1722
-3	3a	135555	1749
-4	3	133740	1777
-5	2a	131925	1805
-6	2	130110	1833
-7	1a	128295	1866
-8	1	126480	1898

STRANA NIŽŠÍHO NAPĚTÍ

JMENOVITÝ VÝKON MVA 100

JMENOVITÉ NAPĚTÍ V 10500

JMENOVITÝ PROUD A 5499

SKUPINA SPOJENÍ d1

SCHÉMA VÍKA

ÚDAJE PŘÍSTROJOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

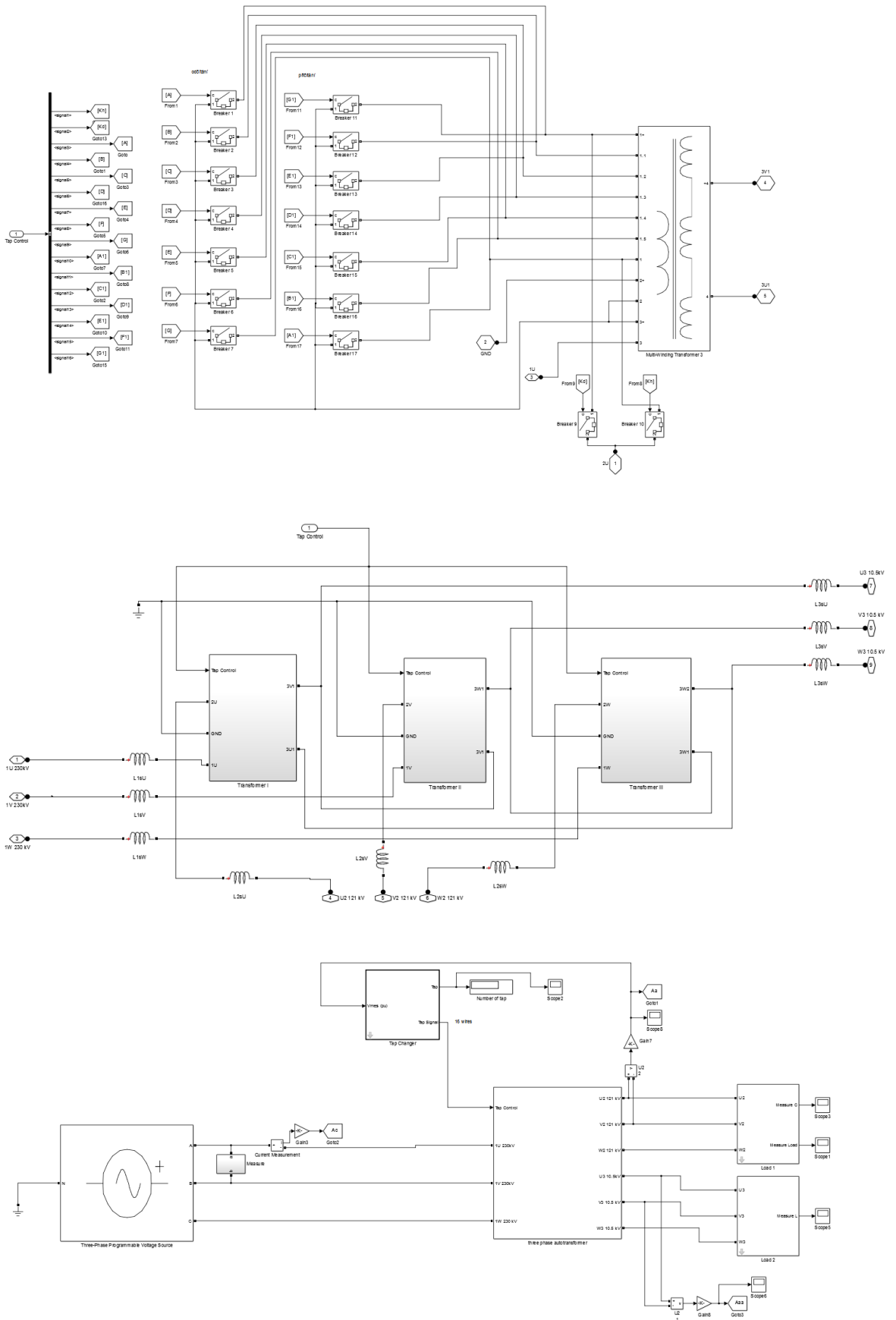
T1-T12, T14-T19	TŘÍDA	5 P20, 30 VA	T14	6000/1 A	
T13	TŘÍDA	10 P20, 30 VA	T15	6000/1 A	
T1	6000/1 A	T7	2000/1 A	T16	6000/1 A
T2	6000/1 A	T8	2000/1 A	T17	6000/1 A
T3	6000/1 A	T9	2000/1 A	T18	6000/1 A
T4	6000/1 A	T10	2000/1 A	T19	6000/1 A
T5	6000/1 A	T11	2000/1 A		
T6	6000/1 A	T12	2000/1 A		
		T13	6000/1 A		

T20	S1-S2	505/1.5 A	} PRO TEPelnĚ OBRAZ
T21	S1-S3	1890/1.5 A	
T22	S1-S2	5499/1.5 A	

HÁVOD K OBLUZE Č. 1178

110110-111  
XDE294500-ERR  
Rev. B

### c) Zapojení autotransformátoru 230/121kV



### d) Zapojení autotransformátoru 400/121kV

