

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Obecná teorie transformátorů

**vedoucí práce: Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.
autor: Tomáš Linhart**

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš LINHART**
Osobní číslo: **E09B0149P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Obecná teorie transformátorů**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

Bakalářská práce "Obecná teorie transformátorů" bude zaměřena na tyto body:

1. Uveďte základní rozdělení a použití transformátorů a způsoby zapojení vinutí transformátoru.
2. Popište speciální stavy transformátoru - stav naprázdno, stav nakrátko, paralelní provoz transformátorů.
3. Uveďte druhy transformátorů dle způsobu použití v elektrických sítích, včetně ochrany a dispozičního uspořádání.
4. Uveďte výkonové řady transformátorů dle použití.
5. Navrhněte provedení 1fázového transformátoru pro převod a použití na nn z 230/60, 10 V střídavých.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

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

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

Seznam odborné literatury:

- 1. Přednášky a literatura uvedená pro studium předmětu Elektrické přístroje.**
- 2. Internetové podklady.**
- 3. Literatura a podklady určené konzultantem.**

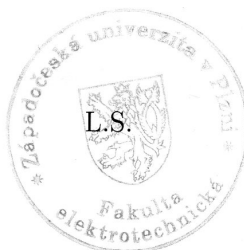
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

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

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

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

V této práci se zabývám vybranými problémy teorie transformátorů. V prvních pěti kapitolách popisuji konstrukci transformátoru, způsoby spojení vinutí transformátorů, princip činnosti transformátoru, transformátor naprázdno a nakrátko, paralelní spolupráci transformátorů, transformátory v elektrických sítích a jejich ochrany. V poslední šesté kapitole navrhuji konkrétní jednofázový transformátor malého výkonu.

Klíčová slova

Transformátor, ochrany, návrh výpočtu.

Abstract

In this work I am dealing with chosen issues of the theory of transformers. In the first five chapters I am going to describe the construction of a transformer, the ways of connection of transformer winding, function principle of transformer, idle transformer, short-circuit transformer, parallel connection of transformers, transformers in electrical grid and their protection. In the last chapter I am designing a particular single-phase low output transformer.

Key words

Transformer, protections, concept of calculation.

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 4.6.2012

Jméno příjmení

.....

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
SEZNAM OBRÁZKŮ	13
SEZNAM TABULEK	14
ÚVOD	15
1 VÝZNAM A KONSTRUKCE TRANSFORMÁTORU	16
1.1 VÝZNAM TRANSFORMÁTORŮ.....	16
1.2 KONSTRUKCE TRANSFORMÁTORU	16
1.2.1 Magnetický obvod	16
1.2.2 Elektrický obvod (vinutí).....	18
1.2.3 Mechanické části konstrukce	18
1.2.4 Chladicí nádoba s příslušenstvím	18
2 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ A POUŽITÍ TRANSFORMÁTORŮ	19
2.1 ROZDĚLENÍ PODLE POČTU FÁZÍ.....	19
2.2 ROZDĚLENÍ PODLE MAGNETICKÉHO OBVODU	19
2.3 ROZDĚLENÍ PODLE ZPŮSOBU CHLAZENÍ.....	19
2.4 ROZDĚLENÍ PODLE POČTU VINUTÍ.....	19
2.5 ROZDĚLENÍ PODLE POUŽITÍ.....	20
2.5.1 Energetické transformátory	20
2.5.2 Přístrojové transformátory	20
2.5.3 Galvanické transformátory	20
2.5.4 Autotransformátory.....	21
2.5.5 Svařovací transformátory	21
2.5.6 Usměrňovačové transformátory.....	21
2.5.7 Pecové transformátory.....	22
2.5.8 Tlumivky.....	22
2.5.9 Transformátory – měniče počtu fází	22
2.5.10 Transformátory – měniče frekvence.....	23
3 ZPŮSOBY ZAPOJENÍ VINUTÍ TRANSFORMÁTORU	24
3.1 IDEÁLNÍ TRANSFORMÁTOR	24
3.2 SKUTEČNÝ TRANSFORMÁTOR	24
3.3 TROJFÁZOVÝ TRANSFORMÁTOR.....	25
3.4 SPOJOVÁNÍ VINUTÍ TROJFÁZOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ	25
3.4.1 Spojení hvězda	26
3.4.2 Spojení trojúhelník.....	26
3.4.3 Spojení lomená hvězda.....	27
3.4.4 Používané kombinace spojení	27
4 PRINCIP ČINNOSTI TRANSFORMÁTORU A JEHO SPECIÁLNÍ STAVY	29
4.1 PRINCIP ČINNOSTI TRANSFORMÁTORU	29
4.2 VELIKOST INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ	30
4.3 PŘEVOD TRANSFORMÁTORU	31
4.4 CHOD NAPRÁZDNO	32
4.5 CHOD NAKRÁTKO	33
4.6 PARALELNÍ PROVOZ TRANSFORMÁTORŮ.....	36

5	DRUHY TRANSFORMÁTORŮ DLE ZPŮSOBU POUŽITÍ V ELEKTRICKÝCH SÍTÍCH, OCHRANY A DISPOZIČNÍ USPOŘÁDÁNÍ.....	38
5.1	ELEKTRICKÉ SÍTĚ.....	38
5.1.1	Napěťové úrovně.....	38
5.1.2	Přenosové sítě.....	39
5.1.3	Distribuční sítě.....	39
5.2	ZPŮSOBY PROVOZU UZLU TRANSFORMÁTORU.....	39
5.2.1	Sítě kompenzované.....	40
5.2.2	Sítě s uzemněným uzlem přes rezistenci.....	40
5.2.3	Sítě s přímo uzemněným uzlem.....	41
5.2.4	Sítě izolované.....	41
5.2.5	Bauchův zhášecí transformátor.....	42
5.3	DRUHY TRANSFORMÁTORŮ PODLE ÚČELU POUŽITÍ V ENERGETICE.....	42
5.3.1	Transformátory blokové.....	42
5.3.2	Transformátory spojovací.....	43
5.3.3	Transformátory průmyslové distribuční a transformátory vlastní spotřeby.....	43
5.3.4	Transformátory izolační.....	43
5.4	VÝKONOVÉ ŘADY TRANSFORMÁTORŮ.....	43
5.4.1	Výkonová řada jednofázových transformátorů.....	43
5.4.2	Výkonová řada trojfázových transformátorů.....	43
5.4.3	Výkony transformátorů v české přenosové a rozvodné soustavě.....	44
5.5	PROVEDENÍ TRANSFORMÁTORŮ A DISPOZIČNÍ USPOŘÁDÁNÍ.....	44
5.5.1	Umístění transformovny.....	44
5.5.2	Umístění v transformátorových komorách.....	44
5.5.3	Chlazení transformátorů umístěných v komorách.....	45
5.5.4	Venkovní transformátory.....	45
5.6	PORUCHY TRANSFORMÁTORŮ.....	45
5.7	OCHRANY.....	46
5.7.1	Plynové relé.....	46
5.7.2	Nádobová ochrana.....	46
5.7.3	Rozdílová ochrana.....	47
6	NÁVRH JEDNOFÁZOVÉHO TRANSFORMÁTORU.....	48
6.1	ZADÁNÍ.....	48
6.2	VÝPOČTY NÁVRHU TRANSFORMÁTORU.....	48
6.2.1	Výpočet zdánlivého výkonu transformátoru z hodnot výstupních veličin.....	48
6.2.2	Výpočet příkonu pro danou účinnost.....	48
6.2.3	Určení počtu závitů na 1 V.....	49
6.2.4	Určení magnetické indukce.....	49
6.2.5	Výpočet vstupního a výstupního vinutí.....	49
6.2.6	Návrh uspořádání vinutí.....	50
6.2.7	Kontrolní výpočty.....	52
	ZÁVĚR.....	54
	POUŽITÁ LITERATURA.....	56
	PŘÍLOHY.....	58
	PŘÍLOHA A – TABULKA PRO JÁDRA EI.....	58
	PŘÍLOHA B – PŘEHLED A VLASTNOSTI MĚDĚNÝCH VODIČŮ.....	59
	PŘÍLOHA C – PLECHY EI.....	60

Seznam symbolů a zkratek

Symbol	Popis	Základní jednotky
B_m	Maximální indukce	(T)
C	Kapacita	(F)
$\cos(\varphi_0)$	Účinitel při chodu naprázdno	(–)
$\cos(\varphi_k)$	Účinitel při chodu nakrátko	(–)
d_1, d_2, d_3	Jmenovité průměry vodičů	(m)
d_{i1}, d_{i2}, d_{i3}	Maximální vnější průměry vodičů	(m)
d_{o1}, d_{o2}, d_{o3}	Opravné průměry vodičů vzhledem k jejich nerovnostem	(m)
f	Frekvence	(Hz)
g	Maximální šířka pro vinutí	(m)
h	Počet závitů nad sebou v jedné vrstvě vinutí	(–)
I_0	Proud naprázdno	(A)
I_1	Proud vinutím primární strany	(A)
I_2	Proud vinutím sekundární strany	(A)
I_{Fe}	Ztrátový proud	(A)
I_k	Proud nakrátko	(A)
I_N	Jmenovitý proud	(A)
I_V	Vyrovňovací proud	(A)
I_μ	Magnetizační proud	(A)
J	Proudová hustota	(A · m ⁻²)
k_0	Činitel opracování jádra	(–)
L	Indukčnost	(H)
m	Maximální výška pro vinutí	(m)
m_{Fe}	Hmotnost jádra	(kg)
N_1	Počet závitů primárního vinutí	(–)

N_2	Počet závitů sekundárního vinutí	(–)
N_{1V}	Počet závitů na 1 V	(V^{-1})
P	Převod transformátoru	(–)
R	Činný odpor	(Ω)
R_1	Odpor primárního vinutí	(Ω)
R_2	Odpor sekundárního vinutí	(Ω)
R_{Fe}	Náhradní odpor železných plechů	(Ω)
S	Zdánlivý výkon	(VA)
S_{Fe}	Průřez jádra	(m^2)
U_1	Napětí na primární straně	(V)
U_2	Napětí na sekundární straně	(V)
U_i	Indukované napětí	(V)
U_k	Napětí nakrátko	(V)
u_k	Napětí nakrátko	(%)
ν	Počet vrstev vinutí vedle sebe	(–)
X	Reaktance	(Ω)
X_μ	Rozptylová reaktance	(Ω)
$X_{\sigma 1}$	Rozptylová reaktance primárního vinutí	(Ω)
$X_{\sigma 2}$	Rozptylová reaktance sekundárního vinutí	(Ω)
Z	Impedance	(Ω)
η	Účinnost	(–)
$\Delta p_{1,0}$	Měrné ztráty	($W \cdot kg^{-1}$)
ΔP	Celkové ztráty	(W)
ΔP_0	Ztráty při chodu naprázdno	(W)
ΔP_k	Ztráty při chodu nakrátko	(W)
ΔP_{Fe}	Ztráty v železe	(W)
ΔP_v	Ztráty ve vinutí	(W)
ΔU	Úbytek napětí	(V)

$\Delta \vartheta$	Oteplení	(K)
Φ	Magnetický tok	(Wb)
$\Phi_{1\sigma}$	Rozptylový tok primárního vinutí	(Wb)
$\Phi_{2\sigma}$	Rozptylový tok sekundárního vinutí	(Wb)
Φ_h	Hlavní magnetický tok	(Wb)
Φ_m	Maximální hodnota magnetického toku	(Wb)
EI	Transformátorové plechy tvaru EI	
M	Transformátorové plechy tvaru M	
P _{tl.}	Petersenova tlumivka	
T _A , T _B	Transformátor A a transformátor B	

Seznam obrázků

OBR. 1.1 TRANSFORMÁTOROVÉ PLECHY: A) TVAR M, B) TVAR EI	17
OBR.2.1 ZAPOJENÍ AUTOTRANSFORMÁTORU	21
OBR.3.1 NÁHRADNÍ SCHÉMA IDEÁLNÍHO TRANSFORMÁTORU	24
OBR. 3.2 NÁHRADNÍ SCHÉMA SKUTEČNÉHO TRANSFORMÁTORU	25
OBR 3.3 ZAPOJENÍ DO HVĚZDY	26
OBR 3.4 ZAPOJENÍ DO TROJÚHELNÍKA	26
OBR 3.5 ZAPOJENÍ DO LOMENÉ HVĚZDY	27
OBR. 4.1 ELEKTROMAGNETICKÉ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU	29
OBR.4.2 MAGNETICKÉ TOKY	30
OBR. 4.3 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU PŘI CHODU NAPRÁZDNO	32
OBR. 4.4 ZAPOJENÍ PRO MĚŘENÍ ZTRÁT NAPRÁZDNO	33
OBR. 4.5 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU PŘI CHODU NAKRÁTKO	33
OBR. 4.6 ZAPOJENÍ PRO MĚŘENÍ ZTRÁT NAKRÁTKO	35
OBR. 4.7 PARALELNÍ ZAPOJENÍ DVOU TRANSFORMÁTORŮ	36
OBR. 5.1 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA	38
OBR. 5.2 KOMPENZOVANÁ SÍŤ	40
OBR. 5.3 SÍŤ UZEMNĚNÁ PŘES REZISTENCI	40
OBR. 5.4 SÍŤ S PŘÍMO UZEMNĚNÝM UZLEM	41
OBR. 5.5 IZOLOVANÁ SÍŤ	41
OBR. 5.6 ZAPOJENÍ BAUCHOVA ZHÁŠECÍHO TRANSFORMÁTORU	42
OBR. 5.7 ZAPOJENÍ ROZDÍLOVÉ OCHRANY TRANSFORMÁTORU PŘI ZAPOJENÍ YD	47

Seznam tabulek

TAB. 3.1 TABULKA ZAPOJENÍ VINUTÍ TROJFÁZOVÉHO TRANSFORMÁTORU.....	26
TAB. 5.1 TABULKA STRÍDAVÝCH TROJFÁZOVÝCH SDRUŽENÝCH NAPĚTÍ	38
TAB. 6.1 TABULKA POUŽÍVANÝCH VÝKONŮ TRANSFORMÁTORŮ SE VSTUPNÍM NAPĚTÍM VVN ...	44

Úvod

Transformátory jsou netočivé elektrické stroje sloužící k přenosu elektrické energie z jedné části obvodu do druhé za pomoci vzájemné elektromagnetické indukce, nebo-li transformátorové vazby.

Transformátory se často využívají k přenosu elektrické energie, ke snižování nebo zvyšování velikosti střídavého napětí na hodnoty, které jsou vhodné pro přenos a rozvod. Transformátory se také používají ke změně počtu fází nebo ke změně frekvence. Jejich využití je možné najít téměř všude, kde se setkáváme s elektrickou energií. Jsou vyráběny se širokou škálou výkonů.

V první části své práce popisují vybrané problémy z teorie transformátorů - konstrukci, princip činnosti, rozdělení a použití, způsoby zapojení vinutí, speciální stavy, využití v energetice, včetně dispozičního uspořádání a ochran. Ve druhé části se věnují návrhu jednofázového transformátoru malého výkonu.

1 Význam a konstrukce transformátoru

1.1 Význam transformátorů

Transformátory jsou netočivé elektrické stroje, které transformují elektrickou energii, přitom forma energie na vstupu i na výstupu je elektrická. Transformátory nemají žádné rotační části. Oproti jiným elektrickým strojům se jedná o poměrně jednoduchý stroj, který má vysokou účinnost přenosu elektrické energie. [1]

Transformátory se používají ke snižování nebo zvyšování napětí, změně počtu fází nebo ke změně kmitočtu střídavého proudu. Používají se pro přenos a rozvod elektrické energie, přeměnu elektrického proudu v průmyslových zařízeních, radiotechnice, automatizačních a regulačních zařízeních, a v mnoha dalších odvětvích. Jejich výkony se pohybují v rozmezí zlomků VA až stovek MVA. [2]

1.2 Konstrukce transformátoru

Z funkčního i konstrukčního hlediska má transformátor tyto základní části:

- a) magnetický obvod,
- b) elektrický obvod (vinutí),
- c) mechanické části konstrukce,
- d) chladicí nádobu s příslušenstvím. [3]

1.2.1 Magnetický obvod

Hlavním úkolem magnetického obvodu je usměrnit magnetický tok takovým způsobem, aby jeho co možná největší část byla tokem činným. [1]

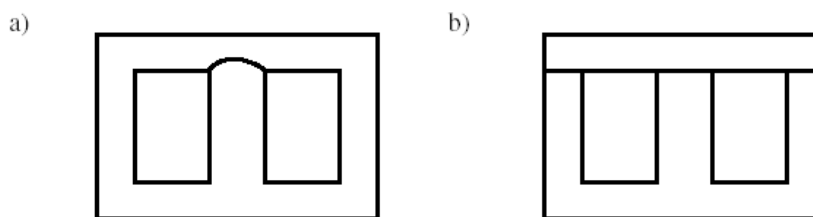
Magnetické obvody se skládají z tzv. transformátorových plechů. Tyto plechy jsou nejčastěji tloušťky 0,35 mm nebo 0,5 mm. Plechy jsou od sebe navzájem izolované, aby se snížily ztráty vířivými proudy. Materiál, ze kterého jsou vyráběny transformátorové plechy se volí podle účelu použití transformátoru a podle přenášené frekvence. Pro nižší frekvence (energetika) se používají orientované, za studena válcované plechy, které jsou navíc legovány křemíkem z důvodu snížení ztrát v železe. Pro vyšší frekvence (radiotechnika) se používá feromagnetických materiálů, které jsou charakterizovány vyšším měrným odporem, než mají kovové magnetické materiály. [4] [8]

Podle uspořádání magnetického obvodu se dělí transformátory převážně na tři základní typy:

- a) plášťové,
- b) jádrové,
- c) toroidní. [2]

Plášťové transformátory

Plášťový tvar jádra mají nejčastěji transformátory jednofázové. Vinutí je umístěno na středním sloupku, který má největší průřez. Magnetický tok ve středním sloupku je dvojnásobný oproti magnetickému toku ve sloupcích postranních, které proto mohou mít poloviční průřez. Pro výrobu plášťových transformátorů menších výkonů se používají plechy typu EI nebo M (obr. 1.1). Plášťové uspořádání magnetického obvodu má dobré rozdělení magnetického toku, snadné navíjení vinutí na jednu cívku a také relativně snadné upevnění svazku jádra. Nevýhodou je horší možnost chlazení a také vyšší hmotnost. [2] [20]



Obr. 1.1 Transformátorové plechy: a) tvar M, b) tvar EI (převzato z [13])

Jádrové transformátory

Jádrové transformátory jsou hmotnostně lehčí, ale mají větší rozptylové toky. Průřez magnetického jádra je na všech místech stejný. Z důvodu zmenšení rozptylových toků se vinutí rozděluje na dvě části, přičemž každá polovina vinutí se umístí na samostatný sloupek. Výhodou jádrového provedení transformátoru je lepší chlazení, a to zejména u chlazení vzduchem. [4] [20]

Toroidní transformátory

Toroidní transformátory se vyznačují nízkým rozptylovým tokem, nízkým proudem naprázdno, vysokou účinností a snadnou montáží. Vývody se vyvádějí na jedné straně toroidu. Nejčastěji jsou určeny pro vestavbu do elektronických zařízení. [18]

1.2.2 Elektrický obvod (vinutí)

Na vinutí transformátoru je kladena řada důležitých požadavků, a to zejména:

a) mechanická pevnost (Na vinutí působí mechanické namáhání při stahování během montáže a při zkratech, kdy na závity a cívky působí elektromagnetické síly. Vinutí nesmí toto namáhání poškodit.),

b) elektrická pevnost (Izolaci nesmí poškodit dlouhodobé namáhání střídavým elektrickým polem při jmenovitých podmínkách provozu, tak i krátkodobá zvýšená rázová namáhání způsobená přepětím.),

c) technologická proveditelnost (Výroba musí být levná a snadno proveditelná.),

d) odolnost proti tepelnému namáhání (Musí být zaručeno dobré chlazení. Teplota izolace nesmí přesáhnout hodnoty pro danou třídu izolace.),

e) ekonomika provozu (Elektrické ztráty ve vinutí nesmí překročit stanovené hodnoty.). [2]

Pro výrobu vinutí se většinou používají měděné vodiče, méně často vodiče hliníkové. Měděné vodiče mají průřezy kruhové, nebo čtyřhranné obdélníkové nebo čtvercové. Součástí je také izolace mezi závity a cívkami, a také izolace jednotlivých částí vinutí vzhledem k dalším vodivým a uzemněným částem transformátoru. [2]

1.2.3 Mechanické části konstrukce

Jsou to součásti, které zajišťují mechanickou pevnost transformátoru. Slouží také pro upevnění transformátoru a jeho přepravu. [3]

1.2.4 Chladicí nádoba s příslušenstvím

Velké výkonové transformátory mají olejové chlazení (malé transformátory jsou chlazeny vzduchem). Chladicí nádoba se skládá ze tří základních částí. Z olejové vany, vlnovce ve tvaru „harmonik“ a vrchního nosného rámu. [20]

2 Základní rozdělení a použití transformátorů

Transformátorů je velké množství a lze je dělit podle jejich konstrukce nebo použití do několika skupin.

2.1 Rozdělení podle počtu fází

Podle počtu fází se rozdělují transformátory na:

- a) jednofázové transformátory (Jsou to převážně transformátory malých výkonů, a to desítek až stovek wattů. Používají se většinou pro transformaci na nižší napětí.),
- b) trojfázové transformátory (Používají se hlavně pro přenos a distribuci elektrické energie. Jejich výkon dosahuje hodnot až stovek MW.),
- c) speciální transformátory (mají dvě nebo více fází.). [19]

2.2 Rozdělení podle magnetického obvodu

Transformátory se dělí podle provedení magnetického obvodu na:

- a) jádrové,
- b) plášťové.
- c) toroidní. [3]

Další informace k jednotlivým typům magnetických obvodů jsou uvedeny v kapitole 1.2.1.

2.3 Rozdělení podle způsobu chlazení

Podle způsobu chlazení se transformátory dělí na tyto dva základní typy:

- a) transformátory chlazené vzduchem (Takto jsou chlazeny především transformátory malých výkonů.),
- b) transformátory s olejovým chlazením (Tento typ chlazení se používá hlavně u transformátorů velkých výkonů.). [2] [19]

2.4 Rozdělení podle počtu vinutí

Transformátory se dělí do tří skupin podle počtu vinutí na:

- a) dvojvinut'ové (primár, sekundár),
- b) trojvinut'ové (primár, sekundár, terciár),
- c) vícevinut'ové. [20]

2.5 Rozdělení podle použití

Transformátory dělíme podle účelu použití na mnoho druhů. Jsou to transformátory energetické, přístrojové, galvanické, svařovací, pecové, usměrňovačové, transformátory – měniče počtu fází, transformátory – měniče frekvence a autotransformátory.

2.5.1 Energetické transformátory

Jsou to transformátory blokové, spojovací, průmyslové distribuční, vlastní spotřeby a izolační. Další informace jsou uvedeny v kapitole 5.3. [6]

2.5.2 Přístrojové transformátory

Jsou to transformátory, které jsou určeny pro napájení měřicích a jisticích přístrojů. Používají se pro:

- a) oddělení obvodů s měřicími nebo jisticími přístroji od obvodů vysokého napětí,
- b) transformaci proudu nebo napětí na hodnoty měřicích přístrojů. [2] [9]

Přístrojové transformátory se dělí podle toho, jaké přístroje napájejí a to na:

- a) měřicí transformátory (Musí dosahovat vysoké přesnosti v okolí jmenovitých hodnot. Při velkých nadproudech je vyžadováno, aby se přesytily, a omezily sekundární proud na hodnoty, které nepoškodí měřicí přístroje.),
- b) jisticí transformátory (Tyto transformátory musí dosahovat vysoké přesnosti při malých napětích a vysokých nadproudech.). [9]

Přístrojové transformátory se dále dělí podle transformované veličiny na:

- a) transformátory proudu (Zapojují se tak, že jejich primární vinutí je zapojeno sériově s měřeným obvodem a k sekundárnímu vinutí se připojují jisticí a měřicí přístroje. Primární vinutí bývá tvořeno jedním závitem.),
- b) transformátory napětí (Napájejí napěťové systémy měřicích a jisticích přístrojů. Primární vinutí je připojeno paralelně k obvodu, ve kterém se sleduje velikost napětí. K sekundárnímu vinutí jsou připojeny měřicí přístroje.). [9]

2.5.3 Galvanické transformátory

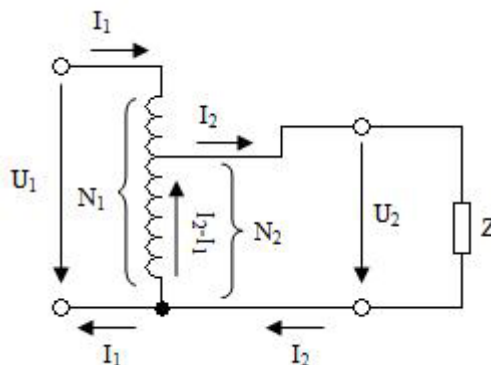
Jsou to transformátory s převodem 1:1. Používají se ke galvanickému oddělení obvodu. To znamená, že tyto dvě části obvodu nejsou spojeny vodičem. Přesto dochází k přenosu elektrické energie pomocí transformátorové vazby. [21]

2.5.4 Autotransformátory

Autotransformátory mají na magnetickém obvodu umístěno jen jedno vinutí, přičemž vstupní a výstupní vinutí jsou galvanicky spojena. Používají se při spouštění asynchronních motorů nebo jako děliče napětí v laboratořích pro plynulé řízení napětí. Také se používají v energetice ve vedeních vvn při vzájemném propojení sítí s různým napětím. Autotransformátory se dělí na:

- zvyšovací ($N_1 < N_2$, $U_1 < U_2$),
- snižovací ($N_1 > N_2$, $U_1 > U_2$),
- řiditelné (Počet závitů N_2 je možné měnit plynule nebo skokem.). [3]

Schéma zapojení autotransformátoru je uvedeno na obr. 2.1.



Obr.2.1 Zapojení autotransformátoru [3]

2.5.5 Svařovací transformátory

Jednofázové svařovací transformátory se používají pro obloukové svařování. Mají možnost řízení svařovacího proudu v rozsahu 20 až 700 A. Výstupní napětí naprázdno dosahuje hodnot 65 až 100 V a pracovní napětí 15 až 30 V. Vyžaduje se, aby měly velkou impedanci nakrátko, aby platilo $I_k \cong I_N$. [3]

Pro odporové svařování se používají transformátory s výstupním napětím do 10 V a proudy 100 kA a více. Výstupní vinutí má jeden závit a je chlazeno vodou. [3]

2.5.6 Usměrňovačové transformátory

Používají se pro napájení usměrňovačů střídavým napětím vhodné velikosti, počtu fází a fázového posunu. Usměrňovač se zapojuje na výstupní stranu transformátoru a způsobuje nesouměrné zatížení transformátoru. [3]

2.5.7 Pecové transformátory

Jsou určeny pro napájení pecí na tepelné zpracování kovů. Jedním typem takové pece je oblouková elektrická pec. Taková pec se napájí jednofázovým nebo trojfázovým proudem o nízkém napětí. Z tohoto důvodu se připojují k síti pomocí snížovacího transformátoru, který nemívá výstupní jmenovité napětí větší než 500 až 600 V. Výkon pecových transformátorů dosahuje až tisíců kVA a jmenovité výstupní proudy mají velikost až několik stovek kA. U těchto transformátorů se požaduje řízení napětí až do $\pm 50\%$. Pracují v podmínkách rychle se měnícího zatížení (od chodu naprázdno až po chod nakrátko). Na vinutích při častých zkratech působí veliké síly a z toho důvodu je potřeba zajistit spolehlivé mechanické vyztužení vinutí. Pro omezení proudu nakrátko je možné zapojit do obvodu vstupního vinutí tlumivky. [2]

2.5.8 Tlumivky

Jsou přístroje, které jsou podobné transformátorům. Používají se k zvýšení indukční reaktance obvodů. Po průchodu proudu vinutím tlumivky se vytváří magnetické pole, které ve vinutí indukuje reaktanční napětí U_x . Napětí na spotřebiči zapojeném v obvodu se pak snižuje právě o hodnotu U_x . Tlumivky se dělí do těchto skupin:

- a) zhášecí (Zapojují se mezi uzel transformátoru a zem a slouží jako ochrana před poškozením při vzniku jednopólových zkratů.),
- b) předřazené (Používají se u zářivek ke snižování napětí na pracovní hodnotu),
- c) vyhlazovací (Slouží pro vyhlazení vyšších harmonických proudů v obvodech s polovodičovými usměrňovači.),
- d) komutační (Redukují strmost proudu při spínání polovodičových součástek.),
- e) spouštěcí (Redukují záběrný proud při spouštění střídavých elektromotorů.),
- f) kompenzační (Kompenzují jalové proudy, které mají kapacitní charakter.).

2.5.9 Transformátory – měniče počtu fází

Například při napájení elektrických pecí je zapotřebí změnit počet fází střídavého proudu. Toho lze dosáhnout pomocí tohoto transformátoru – měniče počtu fází. Je možné například změnit trojfázový proud na dvoufázový pomocí dvou jednofázových transformátorů. [2]

2.5.10 Transformátory – měniče frekvence

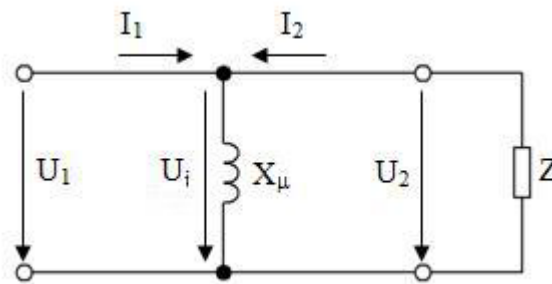
Transformátory mohou být použity také ke změně kmitočtu střídavého proudu. Prakticky jsou používány pro získávání dvojnásobné nebo trojnásobné frekvence. Pro získání vícenásobné frekvence je nutné kaskádní spojení měnících transformátorů a tím také výrazně roste spotřeba aktivních materiálů. [2]

3 Způsoby zapojení vinutí transformátoru

3.1 Ideální transformátor

Uvažuji transformátor, jehož odpor vinutí je nulový, magnetická vodivost vazebního obvodu je nekonečně velká a rozptylové toky jsou nulové. [2]

Předpokládám-li převod transformátoru roven jedné, můžu schéma ideálního transformátoru nakreslit podle obr.3.1. Jelikož převod transformátoru se rovná jedné, můžu vinutí galvanicky spojit. Na obr.3.1 představuje reaktance X_μ vazební reaktanci. [19]



Obr.3.1 Náhradní schéma ideálního transformátoru [19]

3.2 Skutečný transformátor

Pokud má transformátor převod různý od jedné, tak aby bylo možné primární a sekundární vinutí vodivě spojit, je nutno všechny sekundární veličiny přepočítat na stranu primární. Dalším důvodem je i lepší zakreslení elektrických veličin. Přepočtem sekundárních veličin na primární stranu vzniká transformátor s převodem rovným jedné. [19]

Pro přepočet napětí U_2 proudu I_2 a impedance Z_2 platí vztahy: [19]

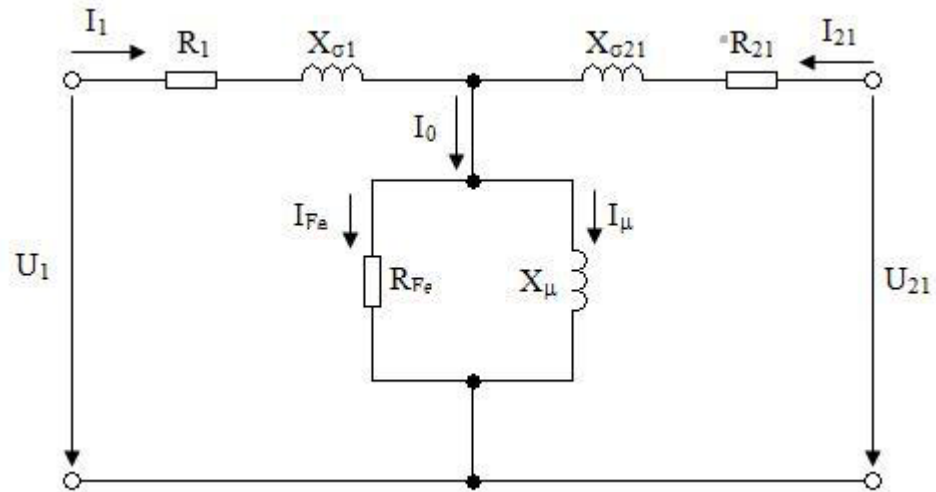
$$U_{21} = U_2 \frac{N_1}{N_2}, \quad (3.1)$$

$$I_{21} = I_2 \frac{N_2}{N_1}, \quad (3.2)$$

$$Z_{21} = \frac{U_{21}}{I_{21}} = \frac{pU_2}{I_1} p = Z_2 p^2. \quad (3.3)$$

Při vytváření náhradního schématu je nutno vycházet z energetické bilance. Musím uvažovat činný odpor R vinutí a konečnou magnetickou vodivost vazebního obvodu. Činný odpor vinutí má za následek vznik Joulových ztrát. Konečná magnetická vodivost má za následek vznik ztrát v železe, které se dělí na ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy. Do náhradního schématu se zavádí tyto ztráty v železe jako ztráty rezistivitou železných plechů

R_{Fe} . Z důvodu, že část magnetického toku se uzavírá kolem vlastního vinutí cívky, je nutné ještě do schématu přidat rozptylovou reaktanci X_{μ} . K tomuto jevu dochází jak u primárního, tak i u sekundárního vinutí. Náhradní schéma je uvedeno na obr. 3.2. [19]



Obr. 3.2 Náhradní schéma skutečného transformátoru [19]

3.3 Trojfázový transformátor

Trojfázový transformátor lze popsat jako spojení tří stejných jednofázových transformátorů. Tyto transformátory se používají v rozvodných soustavách pro přenos elektrické energie, protože zvětšují přenášený výkon a zároveň dochází k úspoře materiálu, snížení hmotnosti a také výrobních nákladů. [3]

3.4 Spojování vinutí trojfázových transformátorů

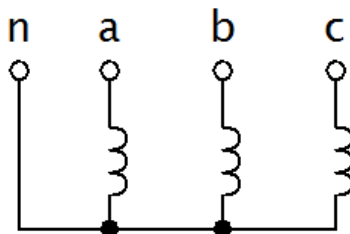
Zásadně může být vinutí trojfázového transformátoru spojeno do hvězdy (značení Y,y), trojúhelníku (D,d) nebo do lomené hvězdy (Z,z). Velké písmeno ve značení představuje stranu vyššího napětí. Je-li ke značení přidáno písmeno n (N), tak to znamená, že je vyvedený uzel na straně nižšího (vyššího) napětí. [1] V tabulce 3.1 jsou uvedeny základní spojení a jejich vlastnosti.

Tab. 3.1 Tabulka zapojení vinutí trojfázového transformátoru [3]

Druh spojení	Hodnoty pro jednu fázi			
	Napětí	Proud	Počet závitů	Průřez vinutí
Hvězda	$U/\sqrt{3}$	I	N	S
Trojúhelník	U	$I/\sqrt{3}$	$N\sqrt{3}$	$S/\sqrt{3}$
Lomená hvězda	$U/\sqrt{3}$	I	$2N/\sqrt{3} = 1,15N$	S

3.4.1 Spojení hvězda

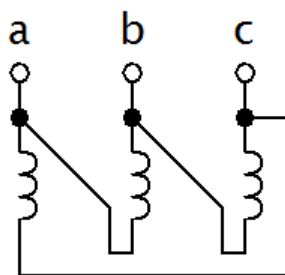
Začátky vinutí jednotlivých fází jsou spojeny do uzlu. Schéma zapojení je uvedeno na obr. 3.3. [3]



Obr 3.3 Zapojení do hvězdy [3]

3.4.2 Spojení trojúhelník

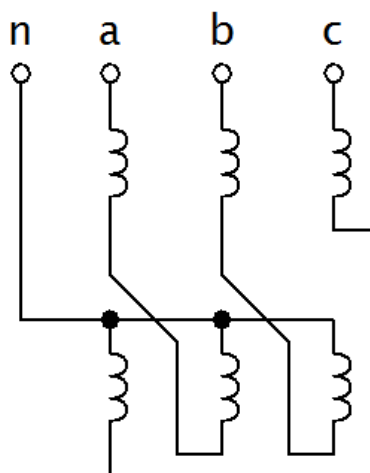
Začátek vinutí jedné fáze je spojen s koncem následující fáze. Schéma zapojení je uvedeno na obr. 3.4. [3]



Obr 3.4 Zapojení do trojúhelníka [3]

3.4.3 Spojení lomená hvězda

Polovina závitů vinutí jedné fáze je spojena s polovinou závitů vinutí následující fáze a začátky jsou spojeny do uzlu. Toto zapojení se používá méně často a zásadně jen na straně nižšího napětí. Schéma zapojení je uvedeno na obr.3.5. [1] [3]



Obr 3.5 Zapojení do lomené hvězdy [3]

3.4.4 Používané kombinace spojení

Dále uvažují pravotočivé cívky, jejichž začátky jsou označeny tečkou. Jsou-li kombinována různá spojení primární a sekundární strany, objeví se kromě převodu také různá fázová natočení mezi primární a sekundární stranou. [1] Pro toto natočení se zavádí pojem skupina spojení (hodinový úhel) a vyjadřuje fázový posun mezi fázory vstupního a výstupního napětí té samé fáze. Jedna hodina odpovídá fázovému posunu 30° . [2] Tento fázový posun může nabývat pouze hodnot, které jsou celým násobkem 30° . [1]

Spojením dvou stejných vinutí na primární i sekundární straně vzniká vždy hodinové číslo 0. Jsou-li prohozeny začátky a konce na jednom vinutí, tak vzniká hodinové číslo 6. Cyklickým přesvorkováním vzniká hodinové číslo 4. Z praktických důvodů se používají jen některé kombinace. [1] [2]

Spojení Yd

Používá se pro velké výkony. Výhodou je, že nevzniká třetí harmonická magnetického toku. U transformátorů používaných pro vvn je možno zapojit do uzlu vinutí kompenzační tlumivku. [2]

Spojení Yy

Používá se pro malé a střední výkony a souměrná zatížení. Velikou výhodou je jednoduchá výroba. [2]

Spojení Yyn

Používá se pro souměrné zatížení a uzel má proti zemi nulové napětí. Toto uspořádání poskytuje jak fázové, tak i sdružené napětí. [2]

Spojení Yzn

Používá se pro sítě nn s napětím 400 V a výkonem 250 kVA. Uzel je u tohoto zapojení vždy vyveden. Výhodou je, že nevytváří třetí harmonickou a nesouměrné zatížení je možné až do jmenovitého proudu jedné fáze. Nevýhodou je větší hmotnost vinutí. [2]

Spojení Dyn

Používá se pro výkony větší než 400 kVA a pro nesouměrná zatížení. Nevytváří třetí harmonickou a je možnou náhradou za spojení Yzn. [2]

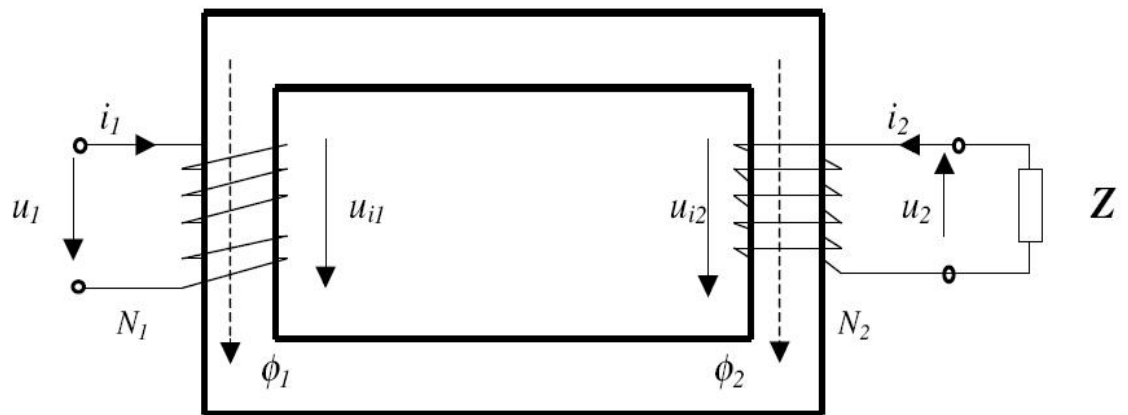
Spojení Dz

Používá se pro výjimečné napájení světelných sítí do výkonu 315 kVA. Také nahrazuje transformátory Yy v kruhových sítích. [2]

4 Princip činnosti transformátoru a jeho speciální stavy

4.1 Princip činnosti transformátoru

Transformátor je netočivý elektromagnetický stroj, který pracuje na principu elektromagnetické indukce. [4] Matematický popis je relativně složitý. Princip činnosti vysvětlují na tzv. ideálním transformátoru který je popsán v kapitole 3.1 včetně náhradního schématu. Je to jednofázový transformátor s pravotočivým vinutím a uzavřeným magnetickým obvodem, kde se zanedbávají rozptylové toky cívek, ztráty jsou nulové a magnetický odpor jádra je také nulový. [3] [8] Schéma transformátoru je na obr. 4.1.



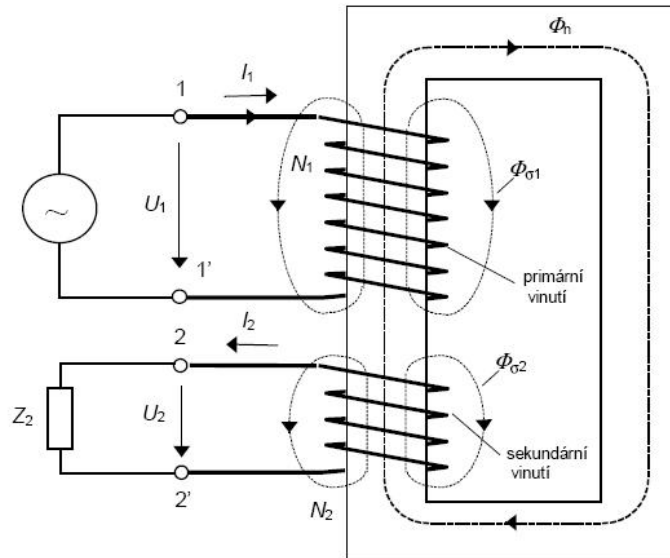
Obr. 4.1 Elektromagnetické schéma transformátoru (převzato z [19])

Na vstupní (primární) vinutí je připojeno napětí U_1 . Toto napětí protlačuje vinutím proud I_1 , který vyvolává magnetický tok o stejné frekvenci jako má napětí U_1 . Magnetický tok je veden z jednoho vinutí do druhého vinutí prostřednictvím magnetického obvodu. Magnetický tok Φ (obr. 4.2) se dělí na hlavní tok Φ_h , který se uzavírá magnetickým obvodem, a na rozptylový tok Φ_σ , který se uzavírá kolem vinutí, jež ho vybudilo. [3] [20] Pro magnetický tok platí následující vztahy: [1]

$$\Phi_1 = \Phi_h + \Phi_{1\sigma}, \quad (4.1)$$

$$\Phi_2 = \Phi_h + \Phi_{2\sigma}, \quad (4.2)$$

$$\Phi_h = \Phi_{1h} + \Phi_{2h}. \quad (4.3)$$



Obr.4.2 Magnetické toky (převzato z [12])

Časová změna magnetického toku vyvolává ve vstupním (primárním) vinutí indukované napětí U_{i1} : [3]

$$u_{i1} = N_1 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (4.4)$$

Stejná změna magnetického toku působí také na výstupní (sekundární) vinutí a indukuje v něm napětí U_{i2} : [3]

$$u_{i2} = N_2 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (4.5)$$

Směry indukovaných napětí a jim odpovídajících proudů jsou dány Lenzovým zákonem: [3] „Indukovaný elektrický proud v uzavřeném obvodu má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, která je jeho příčinou“. [22]

Po připojení zátěže na výstupní vinutí začne obvodem procházet proud I_2 . Vstupní vinutí se chová jako spotřebič a výstupní jako zdroj. [3]

4.2 Velikost indukovaného napětí

Okamžitá hodnota indukovaného napětí v jednom závitě cívky v důsledku působení časové změny magnetického toku je popsána vztahem: [3]

$$u_{iN} = \frac{d\Phi}{dt}. \quad (4.6)$$

Okamžitá hodnota magnetického toku je: [3]

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t . \quad (4.7)$$

Po dosazení jsem získal vztahy: [3]

$$u_{iN} = \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} , \quad (4.8)$$

$$u_{iN} = \omega \Phi_m \cos \omega t . \quad (4.9)$$

Z toho vyplývá, že indukované napětí předbíhá magnetický tok o 90°. [3]

Maximální hodnota indukovaného napětí je: [3]

$$U_{iNm} = \omega \Phi_m = 2\pi f \Phi_m . \quad (4.10)$$

Efektivní hodnota je dána vztahem: [3]

$$U_{iN} = \frac{U_{iNm}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} f \pi \Phi_m . \quad (4.11)$$

Po úpravě tohoto vztahu vznikne: [3]

$$U_{iN} = 4,44 \Phi_m f . \quad (4.12)$$

Ve vstupním a výstupním vinutí se indukují tato napětí: [3]

$$U_{i1} = 4,44 \Phi_m f N_1 . \quad (4.13)$$

$$U_{i2} = 4,44 \Phi_m f N_2 . \quad (4.14)$$

4.3 Převod transformátoru

Převod transformátoru p je dán jako poměr napětí indukovaných ve vstupním a výstupním vinutí a platí pro něj vztah: [3]

$$p = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} . \quad (4.15)$$

Pokud se u transformátoru zanedbají ztráty, tak platí vztahy: [3]

$$P_1 = P_2 , \quad (4.16)$$

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 . \quad (4.17)$$

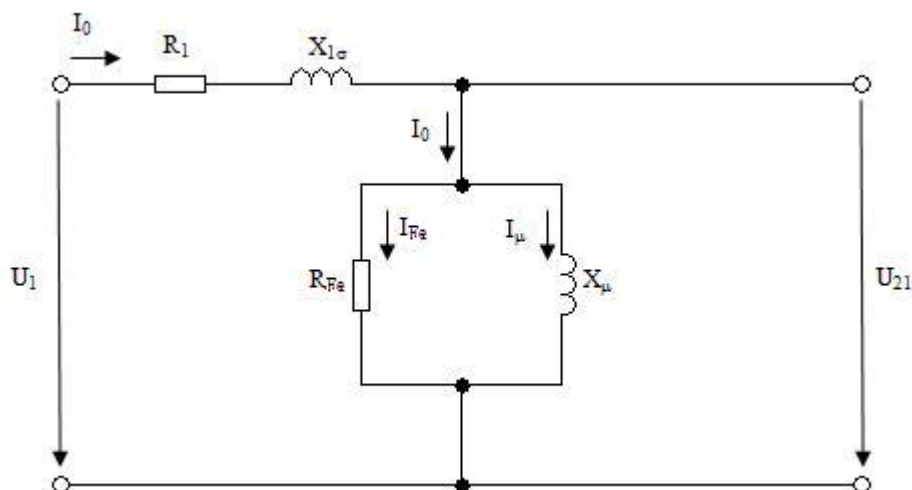
Pro převod transformátoru tak platí vztah: [3]

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} . \quad (4.18)$$

Z toho plyne, že napětí jsou přímo úměrná počtu závitů a nepřímo úměrná proudům. [3]

4.4 Chod naprázdno

Jedná se o speciální stav transformátoru (náhradní schéma je uvedeno na obr. 4.3), kdy jeho vstupní vinutí je připojeno ke zdroji střídavého napětí a výstupní vinutí je rozpojeno, tedy proud $i_2 = 0$. [3] [8]



Obr. 4.3 Náhradní schéma transformátoru při chodu naprázdno [3]

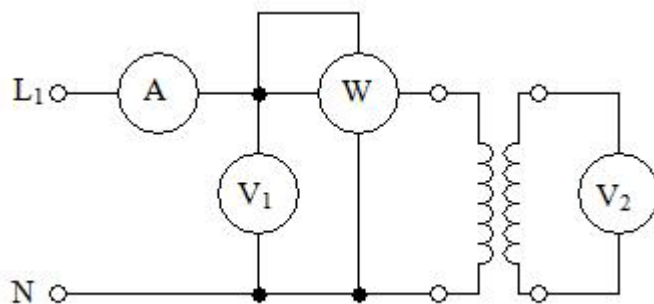
Transformátor odebírá ze sítě proud naprázdno I_0 , který má velikost 5 – 10 % jmenovitého proudu I_N . Proud I_0 má dvě složky, a to činnou a jalovou. Činná složka představuje ztrátový proud I_{Fe} , který kryje ztráty v železe magnetického obvodu ΔP_{Fe} . Tyto ztráty se skládají ze ztrát hysterezních a ztrát vířivými proudy a mají za následek oteplování magnetického obvodu. Jalová složka představuje magnetizační proud I_μ . Ten má za následek buzení magnetického toku Φ , který se uzavírá magnetickým obvodem transformátoru. Součtem fázorů proudu ztrátového a proudu magnetizačního je proud naprázdno a platí vztahy: [3] [8]

$$\vec{I}_0 = \vec{I}_{Fe} + \vec{I}_\mu, \quad (4.19)$$

$$I_0 = \sqrt{I_{Fe}^2 + I_\mu^2}. \quad (4.20)$$

V transformátoru vznikají ztráty naprázdno ΔP_0 , které můžeme stanovit měřením podle schématu, které je uvedeno na obr. 4.4. Ztráty činné ($\Delta P_{Fe} + \Delta P_{j1}$) se měří wattmetrem. Protože ztráty ve vstupním vinutí jsou malé, tak po jejich zanedbání platí $\Delta P_0 \cong \Delta P_{Fe}$. Součin hodnot voltmetru a ampérmetru udává zdánlivý výkon: [3]

$$S_0 = U_0 I_0. \quad (4.21)$$



Obr. 4.4 Zapojení pro měření ztrát naprázdno [3]

Účinnost při chodu na prázdno se spočte jako: [3]

$$\cos \varphi_0 = \frac{\Delta P_0}{S}, \tag{4.22}$$

a tedy pro jednofázový transformátor platí vztah:

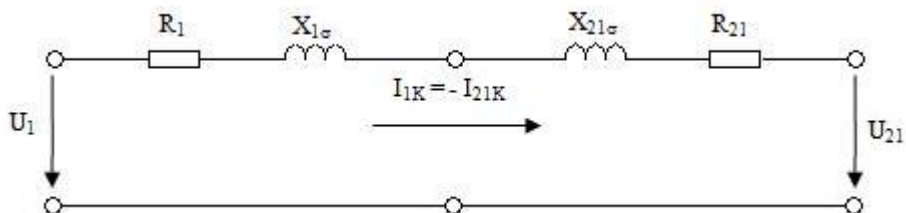
$$\cos \varphi_0 = \frac{\Delta P_0}{U_0 I_0}, \tag{4.23}$$

a pro transformátor trojfázový:

$$\cos \varphi_0 = \frac{\Delta P_0}{\sqrt{3} U_0 I_0}. \tag{4.24}$$

4.5 Chod nakrátko

Transformátor pracuje ve stavu nakrátko (náhradní schéma uvedeno na obr. 4.5), pokud ke vstupnímu vinutí je připojen zdroj střídavého napětí a výstupní vinutí je spojeno nakrátko bezodporovou spojkou. Jedná se o havarijní a nežádoucí stav, ve kterém transformátor nemůže trvale pracovat bez poškození. [3]



Obr. 4.5 Náhradní schéma transformátoru při chodu nakrátko [3]

Po připojení jmenovitého napětí U_1 dochází k tomu, že toto napětí začne protlačovat vstupním vinutím zkratovaného transformátoru proud nakrátko I_{1k} a výstupním vinutím proud I_{2k} . Tyto proudy jsou sedmkrát až pětaticetkrát větší než proudy jmenovité. Proud naprázdno I_0 je vzhledem ke zkratovému proudu I_k zanedbatelný, a proto s ním není počítáno v náhradním schématu. Odporů vinutí jsou spojeny do série: [3] [12]

$$R = R_1 + R_{21}, \quad (4.25)$$

$$X_\sigma = X_{1\sigma} + X_{21\sigma}. \quad (4.26)$$

Celková impedance transformátoru Z je malá, protože je tvořena malými hodnotami parametrů vinutí a je dána vztahem: [3]

$$Z = R + jX_\sigma. \quad (4.27)$$

Hodnota úbytku napětí na výstupu je (spojení bezodporovou spojkou): [3]

$$U_2 = U_{21} = 0. \quad (4.28)$$

V tomto stavu se celý příkon transformátoru spotřebovává na krytí Joulových ztrát. [12]

Pro posouzení vlastností transformátoru je důležitá znalost jeho poměrů při chodu nakrátko. Při měření těchto údajů pracuje transformátor dlouhodobě ve stavu nakrátko. Aby nedošlo k jeho poškození, tak musí jeho primárním i sekundárním vinutím procházet jmenovitý proud I_N . Tento proud je dán napětím nakrátko U_k . Pokud spojíme výstupní vinutí nakrátko, tak napětí U_k je takové napětí, které protlačuje vinutími jmenovitý proud I_N . Toto napětí je uvedeno v procentech na štítku transformátoru: [3]

$$u_k = \frac{U_k}{U_1} \cdot 100\% = \frac{I_1 Z}{U_1} \cdot 100\%. \quad (4.29)$$

Napětí nakrátko má dvě složky (činnou U_R a jalovou U_X) a platí pro ně vztahy: [3]

$$U_R = I_{1k} R, \quad (4.30)$$

$$u_R = \frac{U_R}{U_1} \cdot 100\% = \frac{I_{1k} R}{U_1} \cdot 100\%, \quad (4.31)$$

$$U_X = I_{1k} X_\sigma, \quad (4.32)$$

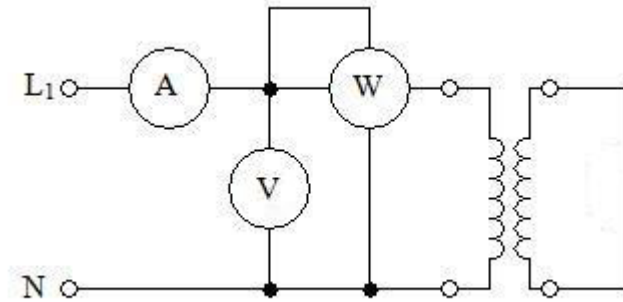
$$u_X = \frac{U_X}{U_1} \cdot 100\% = \frac{I_{1k} X_\sigma}{U_1} \cdot 100\%, \quad (4.33)$$

$$u_k = \sqrt{u_R^2 + u_X^2}, \quad (4.34)$$

$$u_R = u_k \cos \varphi_k, \quad (4.35)$$

$$u_X = u_k \sin \varphi_k. \quad (4.36)$$

V transformátoru při chodu nakrátko vznikají ztráty nakrátko, které lze stanovit měřením podle schématu na obr. 4.6. [3]



Obr. 4.6 Zapojení pro měření ztrát nakrátko [3]

Na vstupní vinutí se přivádí napětí nakrátko U_k a vinutími procházejí jmenovité proudy. Ze získaných hodnot veličin U_k , I_1 a ΔP_k se vypočte impedance transformátoru: [3]

$$Z = \frac{U_k}{I_1} = \frac{u_k U_1}{I_1 \cdot 100\%}, \quad (4.37)$$

proud nakrátko:

$$I_{1k} = \frac{U_1}{Z} = \frac{I_1}{u_k} \cdot 100\%, \quad (4.38)$$

účinník nakrátko:

$$\cos \varphi_k = \frac{R}{Z} = \frac{\Delta P_k}{U_k I_1}, \quad (4.39)$$

složka napětí nakrátko

$$u_R = \frac{\Delta P_k}{S} \cdot 100\% = \frac{\Delta P_k}{U_k I_1} \cdot 100\%, \quad (4.40)$$

a celkový odpor vinutí:

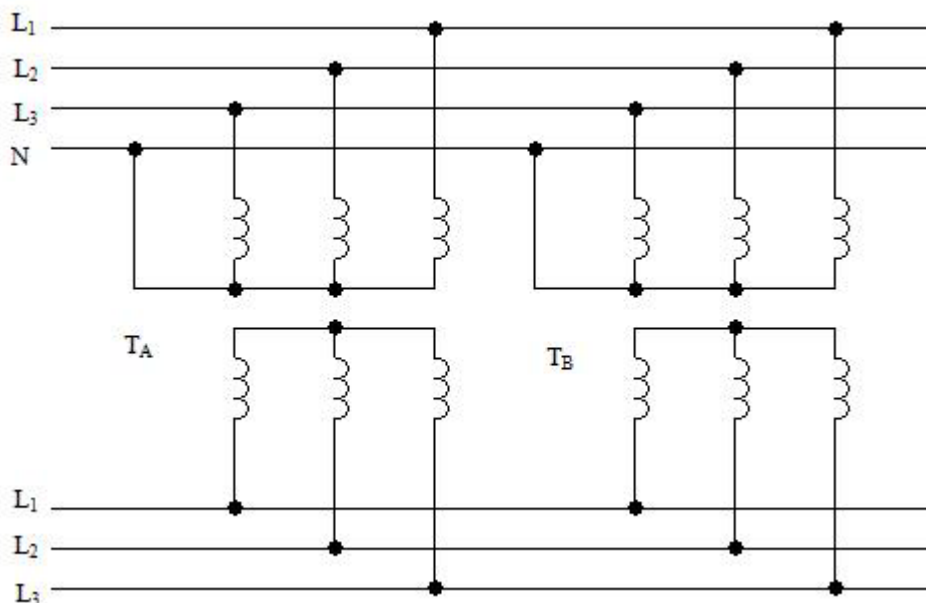
$$R = \frac{\Delta P_k}{I_1^2} = Z \cos \varphi_k. \quad (4.41)$$

Při zkratu dochází k namáhání vinutí. Zkratový proud má dynamické a tepelné účinky. Tepelné namáhání je způsobeno ustáleným proudem nakrátko. Nebezpečné zvýšení teploty může způsobit poškození izolace. Dynamické namáhání způsobuje nárazový zkratový proud. Silový účinek tohoto proudu je velký, jelikož proud dosahuje maximální hodnoty v krátkém čase a síla působící na 1 m délky vodiče může dosáhnout hodnoty až 10000 N. [3]

4.6 Paralelní provoz transformátorů

Transformátory pracují paralelně, pokud mají primární vinutí připojena na společnou síť a sekundární vinutí připojena na společné přípojnice. [3]

Požadovaný výkon lze přenášet jedním transformátorem, který je navržený na maximální výkon nebo je možné ho přenášet pomocí dvou či více transformátorů o stejném celkovém výkonu, které jsou k síti připojeny paralelně (obr. 4.7). [2] [3]



Obr. 4.7 Paralelní zapojení dvou transformátorů [3]

Rozdělení výkonu mezi více transformátorů znamená zvýšení celkových ztrát a také spotřeby materiálu. Na druhou stranu je výhodou, že při poruše transformátoru mohou ostatní transformátory převzít plně nebo alespoň částečně jeho zatížení. Je také potřeba brát v úvahu, že zatížení transformovny v průběhu let roste a je výhodné instalovat průběžně několik transformátorů dle růstu zatížení. Zatížení není v průběhu dne nebo roku konstantní, a tak je možné v případě potřeby jeden nebo několik transformátorů odpojit a snížit tak ztráty naprázdno. [2] [3]

Při paralelním chodu transformátorů je důležité zajistit rovnoměrné zatížení mezi jednotlivými transformátory. Automaticky se rovnoměrného rozložení zatížení dosáhne, pokud paralelně spolupracují transformátory, které mají stejný jmenovitý výkon a stejné konstrukční provedení. V praxi je ale nutné paralelně spojovat transformátory s různým konstrukčním provedením a o různém jmenovitém výkonu. [2]

Při paralelní spolupráci transformátorů je nutné splnit tyto podmínky:

- a) stejné jmenovité vstupní a výstupní napětí,
- b) stejný převod transformátoru,
- c) přibližně stejná napětí nakrátko,
- d) stejné hodinové úhly. [3]

Pokud transformátory nemají stejný převod, tak vzniká mezi paralelně zapojenými vinutími transformátorů rozdíl napětí, který způsobuje vznik vyrovnávacího proudu. Maximální tolerance v převodu podle normy ČSN 35 1000 je $\pm 0,5\%$. Tato podmínka omezuje vyrovnávací proud na velikost 5 až 10 % jmenovitého proudu nejmenšího výkonu paralelně spolupracujících transformátorů. Velikost vyrovnávacího proudu je: [3]

$$I_v = \frac{\Delta p}{\frac{u_{kA}}{I_A} + \frac{u_{kB}}{I_B}}, \quad (4.42)$$

kde

$$\Delta p = \frac{U_A - U_B}{U}. \quad (4.43)$$

Pokud mají transformátory na štítcích uvedeny stejné hodinové úhly, tak se spojí paralelně stejně označené svorky, a to jak na straně nižšího, tak i vyššího napětí. Pokud jsou hodinové úhly různé, tak vzniká mezi okamžitými hodnotami výstupních napětí rozdíl. Ten má za následek vznik velkých vyrovnávacích proudů. [3]

Při různých napětích nakrátko mohou transformátory spolupracovat paralelně, ale jejich výkonové zatížení se rozdělí v nepřímém poměru jejich jmenovitých výkonů. Transformátor, který má menší napětí nakrátko, a tedy i menší impedanci, tak je zatížen větším výkonem. [3]

Výpočet zatížení připadajícího na jednotlivé paralelně spolupracující transformátory je možný podle následující rovnice: [3]

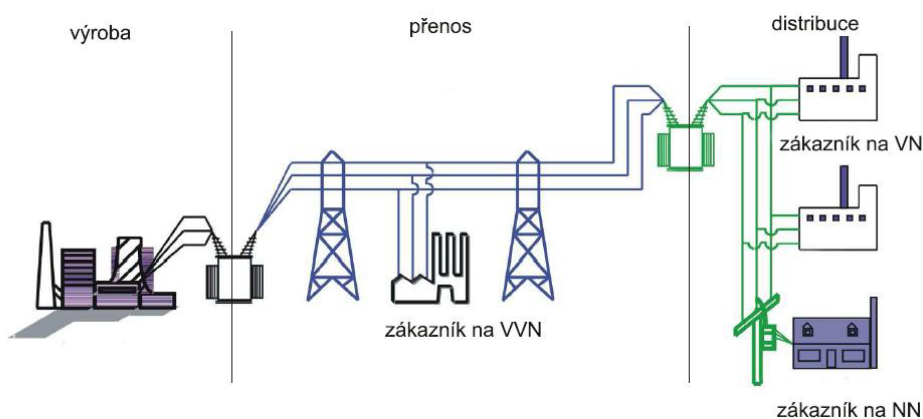
$$\frac{S_A}{S_{NA}} u_{kA} = \frac{S_B}{S_{NB}} u_{kB}, \quad (4.44)$$

kde S_{NA} a S_{NB} jsou zdánlivé výkony, u_{kA} a u_{kB} jsou napětí nakrátko a S_A a S_B jsou zatěžovací výkony jednotlivých transformátorů.

5 Druhy transformátorů dle způsobu použití v elektrických sítích, ochrany a dispoziční uspořádání

5.1 Elektrické sítě

Elektrizační soustava (obr. 5.1) se skládá z výroby elektrické energie, přenosu a rozvodu elektrické energie a spotřeby elektrické energie. Mezi výrobními, přenosovou a rozvodnou sítí a ve vlastní rozvodné sítí mezi sítí a spotřebiči jsou umístěny elektrické stanice. Ty slouží k transformaci napětí, rozdělování dodávky elektrické energie jednotlivých napětíových úrovní a někdy také k přeměně střídavého napětí na stejnosměrné a naopak. Dále slouží ke sběru a předávání dat v elektrizační soustavě a k řešení poruchových stavů. [5] [6]



Obr. 5.1 Elektrizační soustava (převzato z [8])

5.1.1 Napětíové úrovně

Normalizovaná řada střídavých trojfázových sdružených napětí je uvedena v tab. 5.1.

Tab. 5.1 Tabulka střídavých trojfázových sdružených napětí [6]

Nízké napětí nn (kV)	Jmenovité	0,4 / 0,23			0,5	0,69
	Max. provozovací	0,42 / 0,241			---	0,73
Vysoké napětí vn (kV)	Jmenovité	3	6	10	22	35
	Max. provozovací	3,6	7,2	12	25	37
Velmi vysoké napětí vvn (kV)	Jmenovité	110		220	---	
	Max. provozovací	123		245	---	
Zvláště vysoké napětí zvn (kV)	Jmenovité	400			750	
	Max. provozovací	420			787 (předpokládá se zvýšení na 800)	

Napětí 400 a 220 kV vytváří přenosové soustavy. Navíc přenosová soustava 400 kV je napojena na evropskou síť UCTE. Distribuční (rozvodnou) soustavu napájí především uzlové stanice 400 (220)/110 kV z přenosové soustavy a zdroje menších výkonů. Základní napětí distribuční sítě velmi vysokého napětí je 110 kV a vysokého napětí 35 kV nebo 22 kV. Menší obce v regionech jsou napájeny na úrovni 10 kV ze sítí s napětí 35 kV nebo na úrovni 6 kV ze sítí s napětí 22 kV. Jako nízké napětí se používá především hodnota 400 V. [6]

5.1.2 Přenosové sítě

Přenosová síť je díky svému dominantnímu postavení označována také jako nadřazená. Jejím hlavním úkolem je propojení uzlů, do kterých je přiváděna elektrická energie z elektráren a uzlů, ze kterých se elektrická energie rozvádí do distribučních sítí. Důležité je rozložení výkonu v celé oblasti, a to jak po stránce nákladů na výrobu, tak i pro přenos. [6]

5.1.3 Distribuční sítě

Pomocí těchto sítí se přivádí elektrická energie ke spotřebitelům. Do těchto sítí se připojují výrobní zdroje malých výkonů, jako například průmyslové elektrárny nebo elektrárny využívající obnovitelné zdroje. Hlavním zdrojem pro distribuční sítě je nadřazená soustava. [6]

5.2 Způsoby provozu uzlu transformátoru

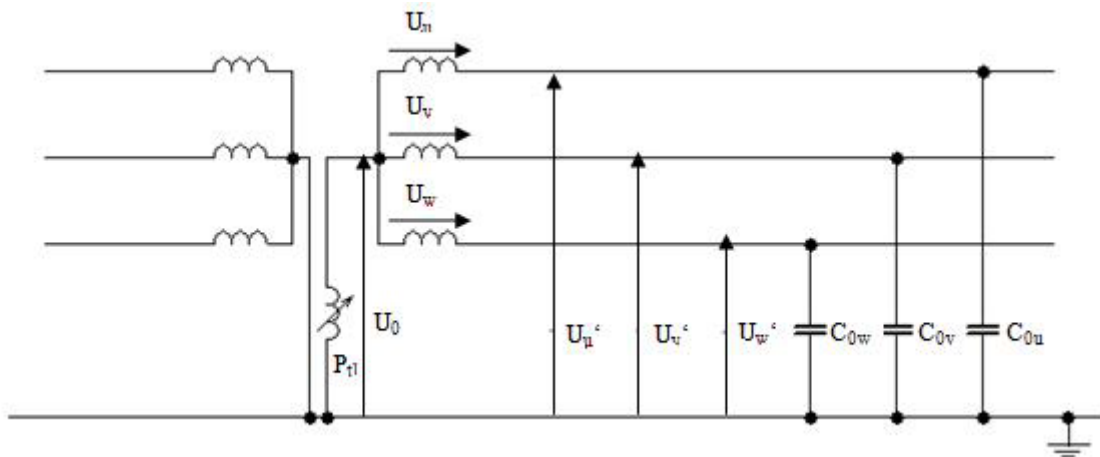
Způsob, jakým je spojen uzel vinutí transformátoru se zemí, je jedním z důležitých technických ukazatelů. Způsob spojení uzlu ovlivňuje:

- a) velikost proudu při spojení jedné nebo více fází se zemí,
- b) velikost napětí mezi fázovým vodičem a zemí. [5]

Vinutí vvn transformátorů je v přenosové i distribuční síti účinně uzemněno. V sítích vn, kde převažují venkovní vedení, se uzel uzemňuje přes zhášecí tlumivku. U malých distribučních sítí a sítí vn průmyslových závodů se používá síť s izolovaným uzlem. Kabelové sítě vn u velkých měst se často uzemňují přes rezistenci. U nízkého napětí 400 V se používá uzemnění uzlu a současně vyvedení nulového vodiče. [6]

5.2.1 Síť kompenzované

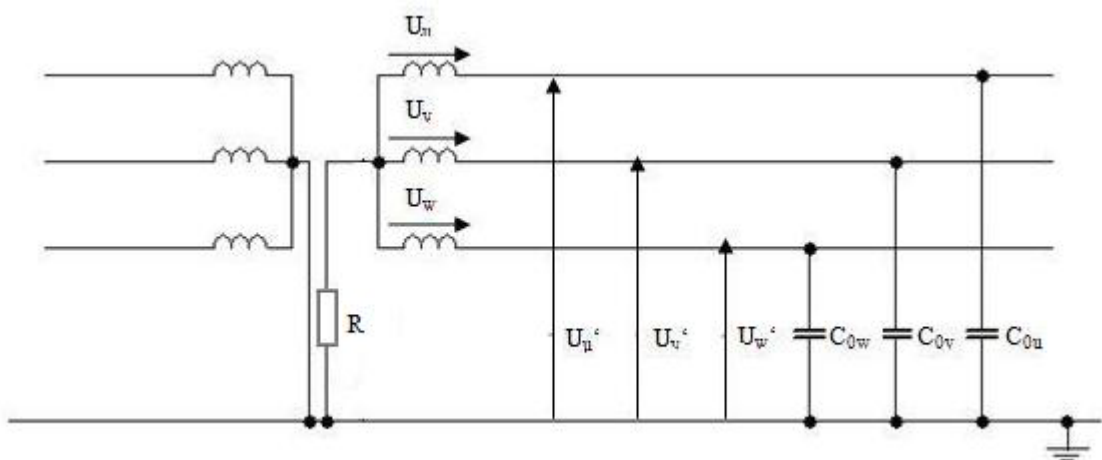
U této sítě se do nulového bodu zapojuje Petersenova (zhášecí) tlumivka (obr. 5.2), kterou při nesymetrii fázových napětí protéká proud, který má induktivní charakter. Tlumivka je regulovatelná. Pokud je její indukčnost vhodně nastavena, tak její proud při zemní poruše snižuje výsledný proud místem zemní poruchy tak, že kompenzuje součet proudů fázových kapacit C . Výsledný poruchový proud je dán rozdílem kapacitního proudu sítě a induktivního proudu Petersenovy tlumivky. Síť s kompenzovaným uzlem se využívá hlavně u venkovních sítí vn, kde je kapacitní proud větší než 10 A. [5] [6]



Obr. 5.2 Kompenzovaná síť [5]

5.2.2 Síť s uzemněným uzlem přes rezistenci

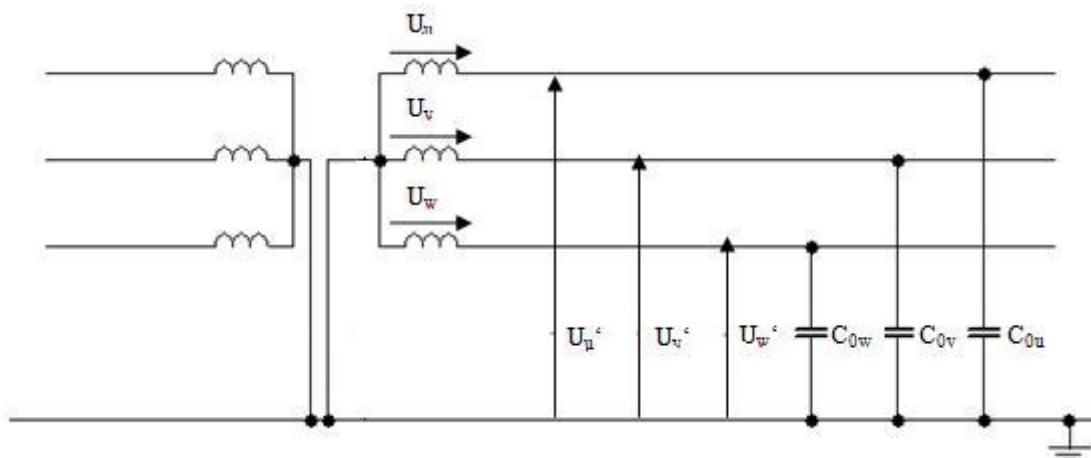
Uzel soustavy se uzemňuje přes činný odpor (obr. 5.3). Pokud vznikne v síti izolační porucha, tak napětí na porušené fázi se sníží a napětí uzlu se zvýší téměř na hodnotu fázového napětí. Vhodnou volbou velikosti odporu R se snižuje velikost zkratového proudu uzlem. [14]



Obr. 5.3 Síť uzemněná přes rezistenci [14]

5.2.3 Sítě s přímo uzemněným uzlem

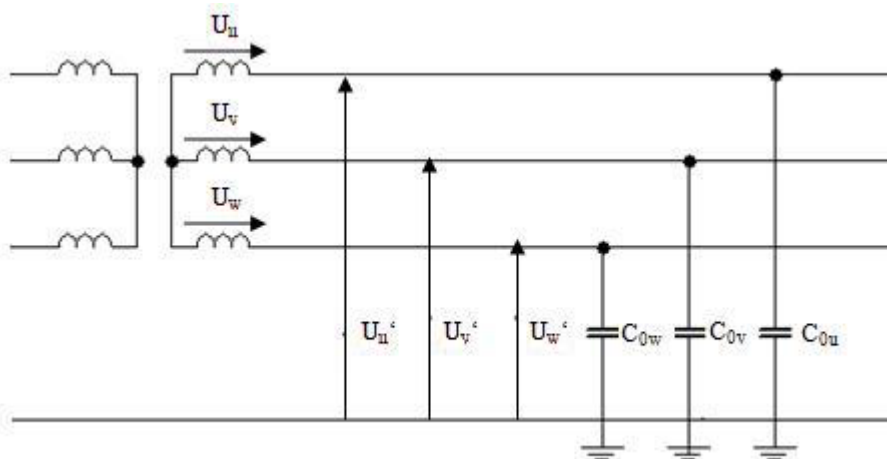
Všechny uzly transformátorů jsou přímo spojeny se zemí (obr. 5.4) nebo přes malou impedanci. Napětí uzlů vinutí transformátorů má proti zemi napětí téměř rovné nule a napětí zdravých fází proti zemi má fázovou velikost. Při spojení jedné fáze se zemí musí dojít k odpojení vedení, jelikož zkratový proud dosahuje vysokých hodnot. [5]



Obr. 5.4 Sítě s přímo uzemněným uzlem [14]

5.2.4 Sítě izolované

Jsou to sítě, ve kterých není uzel vinutí transformátoru na uvažované straně spojen se zemí. Provedení této sítě je uvedeno na obr. 5.5. [5]



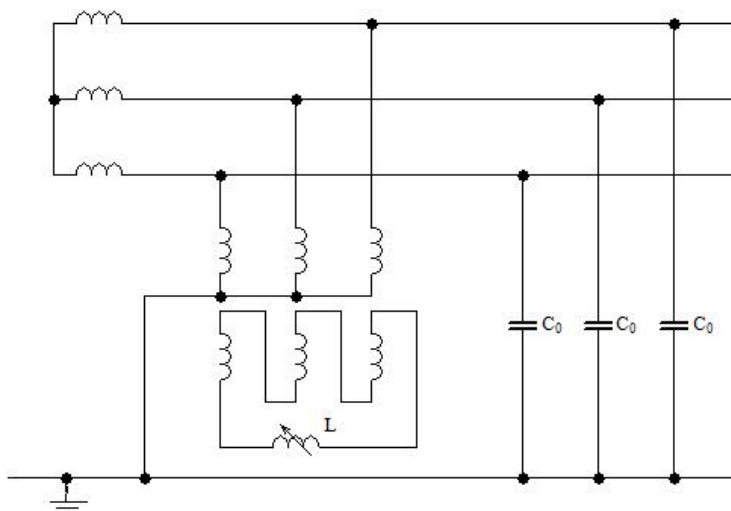
Obr. 5.5 Izolovaná síť [5]

Při spojení jedné fáze se zemí dochází ke zvýšení napětí uzlu proti zemi na napětí fázové a napětí mezi zdravými fázemi se zvýší na napětí sdružené. Tuto síť je možné provozovat i při tomto spojení jedné fáze se zemí, ale vzhledem k tomu, že na zdravých fázích se objeví napětí sdružené, je nutné dimenzovat izolaci na tuto hodnotu. Nevýhodou je, že

místem spojení se zemí teče kapacitní proud. Jeho velikost je dána kapacitami zdravých fází celé sítě proti zemi a činnými rezistencemi obvodu, kterým se proud uzavírá. [5]

5.2.5 Bauchův zhášecí transformátor

Používá se v sítích neúčinně uzemněných (sítě kompenzované a sítě uzemněné přes resistenci), kde vedení nemá vyvedený uzel pro připojení Petersenovy tlumivky. Bauchův transformátor (obr. 5.6) zajišťuje stejnou funkci jako Petersenova tlumivka, ale vzhledem k vysoké ceně se jeho používání tolik nerozšířilo. U sítí, které jsou uzemněny přes resistenci, se spojuje uzel transformátoru se zemí přes rezistor. Bauchův transformátor se používá hlavně u kabelových sítí. Jeho výhodou je omezení přepětí. [11]



Obr. 5.6 Zapojení Bauchova zhášecího transformátoru [11]

5.3 Druhy transformátorů podle účelu použití v energetice

Při přenosu a rozvodu elektrické energie se používají transformátory ke snižování nebo zvyšování napětí. [6]

5.3.1 Transformátory blokové

Zapojují se v sérii s alternátorem. Používají se, pokud odběr z elektrárny není na alternátorovém napětí a je ho nutné transformovat na požadovanou hodnotu. Používají se transformátory dvouvinutové nebo trojvinutové (připojení dvou alternátorů na jeden transformátor). Konstrukce těchto transformátorů je jednofázová nebo trojfázová. [6]

5.3.2 Transformátory spojovací

Používají se ke spojení dvou různých sítí o jiném napětí. Při transformaci napětí z vvn na vn se používají transformátory trojfázové. Při spojování soustav vvn transformátorů se používá transformátorů trojfázových, jednofázových (3 jednotky a 1 záložní) nebo autotransformátorů. [6]

5.3.3 Transformátory průmyslové distribuční a transformátory vlastní spotřeby

Těmito transformátory se napájejí vnitřní rozvody objektů. Výstupní napětí mají na úrovni vvn a jsou konstruovány jako trojfázové. [6]

5.3.4 Transformátory izolační

Slouží ke galvanickému oddělení výrobních zdrojů od venkovního vedení. Tím zabraňují atmosférickým přepětím a omezují zkratové proudy. Mají převod 1:1. [6]

5.4 Výkonové řady transformátorů

5.4.1 Výkonová řada jednofázových transformátorů

Pro jednofázové transformátory je výkonová řada:
10,5 – 13,3 – 16,7 – 21 – 26,7 – 33,3 – 41,7 – 53,3 – 66,7 – 83,3 (kVA) a násobky 10, 10^2 a 10^3 těchto hodnot. [6]

5.4.2 Výkonová řada trojfázových transformátorů

Pro trojfázové transformátory je výkonová řada:
12,5 – 16 – 20 – 25 – 31,5 – 40 – 50 – 63 – 80 – 100 – (125) – 160 – (200) – 250 – (315) –
– 400 – (500) – 630 – (800) – 1000 (kVA) a násobky 10, 10^2 a 10^3 těchto hodnot. Hodnot výkonů uvedených v závorkách se používá jen výjimečně. [6]

5.4.3 Výkony transformátorů v české přenosové a rozvodné soustavě

Nejčastěji používané výkony transformátorů se vstupním napětím vvn jsou uvedeny v tab. 6.1.

Tab. 6.1 Tabulka používaných výkonů transformátorů se vstupním napětím vvn [6]

vstupní / výstupní napětí (kV)	jmenovitý výkon (MVA)
400/242	400 – 630
400/121	200 – 250 – 330
220/121	200 – (3 x 66)
110/23	10 – 16 – 25 – 40
110/6,3	31,5

5.5 Provedení transformátorů a dispoziční uspořádání

Stanoviště transformátoru je provedeno v závislosti na velikosti a provedení transformátoru a na okolním zařízení. Podle provedení se dělí transformátory na suché se silikonovou izolací nebo na olejové. Suché se silikonovou izolací se používají hlavně v průmyslu a mohou být umístěny ve skříních ve výrobních halách. Jsou to transformátory vn/nn. Olejové transformátory je možno umístit do skříňových rozvaděčů s olejovou jímkou, do transformátorových komor nebo venkovní stanoviště a stožáry. Používají se u všech sítí vvn/vvn, vvn/vn, vn/vn a také u většiny vn/nn. [6]

5.5.1 Umístění transformovny

Transformovna se umísťuje tak, že nesmí ohrozit kontaminací podzemní a povrchové vody a ani studně a to i v případě havárie transformátoru. Umístění transformovny musí být schváleno hygienikem dané oblasti a nesmí se umísťovat v 1. a 2. hygienickém pásmu ochrany vodních zdrojů. [6]

5.5.2 Umístění v transformátorových komorách

Z důvodu požární bezpečnosti se olejové transformátory umísťují do samostatných větraných komor, které mají stěny, strop a dveře provedeny z nehořlavého materiálu. Transformátorové komory musí být řešeny tak, aby v případě havárie transformátoru plameny a plyny neznemožnily použití schodišť a východů. [6]

5.5.3 Chlazení transformátorů umístěných v komorách

Větrání transformátorových komor je provedeno přirozeným tahem nebo uměle. Transformátor se v komoře umísťuje tak, aby byl vystaven vlivu chladícího vzduchu. Otvor pod transformátorem by měl být pokud možno stejně velký nebo menší než půdorys transformátoru. Vývod ohřátého vzduchu z komory se umísťuje do co nejvyšší polohy a nejlépe na protilehlé straně než je směr vstupujícího vzduchu. [6]

5.5.4 Venkovní transformátory

Stanoviště venkovních transformátorů je zhotoveno z betonového základu, jehož výška záleží na způsobu dopravy transformátoru. Stanoviště obsahuje jímku nebo štěrkové lože, které slouží k zachycení nebo popřípadě k odvedení oleje. Rozměry půdorysu jímky musí přesahovat na všech stranách rozměry půdorysu transformátoru o přibližně 1 m. Transformátory vn/nn jsou v distribučních sítích často umístěny na koncových stožárech vedení vn. [6]

5.6 Poruchy transformátorů

Poruchy transformátorů se dělí do dvou skupin na průchozí poruchy a vnitřní poruchy. Průchozí poruchy vznikají následkem připojených zařízení, zatímco vnitřní poruchy vznikají přímo na transformátoru. [7]

Průchozí poruchy trvají často delší dobu a jejich následkem je zvýšení teploty. Dělí se na dva typy:

- a) přepětí,
- b) vnější zkrat na připojeném objektu. [7]

Vnitřní poruchy se dělí také na dva typy:

- a) objevující se náhle (zkraty na svorkách, zkraty vinutí nebo zkraty mezi vinutími),
- b) projevující se pozvolna (špatné galvanické styky, nedokonalá izolace plechů, poruchy chlazení).

Poruchy, které se objevují náhle, zachycují ochrany rozdílové, nádobové nebo plynové relé.

Poruchy, které se projevují postupně, dokáže v počáteční fázi zachytit jen plynové relé. [7]

5.7 Ochrany

Jsou zařízení, která kontrolují spolehlivost a provozní bezpečnost na určité části energetického systému, jako například na alternátorech, vedení nebo právě na transformátorech a dalších částech. Informace o hodnotách veličin chráněného objektu získávají pomocí přístrojových transformátorů proudu a napětí, přes které jsou připojeny. Úkolem ochrany je rozlišit, jestli je chráněný objekt v mezích normálního provozu nebo se jedná o poruchový stav. První možností je, že v případě poruchy ochrana vypne chráněný objekt a současně vyšle signál pro obsluhu. Druhou možností je, že ochrana pouze vyšle signál o poruše obsluze, která vyhodnotí situaci a v případě potřeby vypne chráněný objekt. Obsluha také může měnit parametry ochrany jako například její citlivost nebo časové zpoždění. [7] [15]

5.7.1 Plynové relé

Využívá se u transformátorů chlazených olejem. Je umístěno v potrubí mezi víkem transformátoru a konzervátorem. Plynové relé kontroluje v oleji vývin plynů, které vznikají vlivem tepla oblouku nebo ohřátím vodiče. Ohřevem se z oleje uvolňuje vodík, metan, oxid uhličitý, oxid uhelnatý, dusík a další plyny. Plynové relé poruchy doprovázené vývojem plynů signalizuje nebo provádí vypnutí transformátoru a to v případě, že vývin plynů probíhá rychle. [7] [10]

5.7.2 Nádobová ochrana

Používá se u transformátorů, které mají účinně uzemněný uzel vinutí. Působí při přeskoku na průchodkách, jiných zkratech nebo při zemním spojení, kdy kostrou transformátoru prochází zemní proud. Chráněný transformátor se umísťuje na izolované kolejnice. Kostra transformátoru se spojuje se zemnicí soustavou transformovny vodičem a ten prochází transformátorem proudu. Pak při přeskoku na průchodkách nebo při jiném zkratu protéká proud přes průvlekový transformátor proudu do země a proudová ochrana zajišťuje vypnutí. Aby ochrana nefungovala chybně při zkratech v pomocných obvodech (osvětlení, ventilátor a další), tak je nutné protáhnout přívody k těmto zařízením také průvlekovým transformátorem proudu. Chybné fungování ochrany může být také zapříčiněno nedostatečným izolačním odporem nádoby proti zemi. [7] [10]

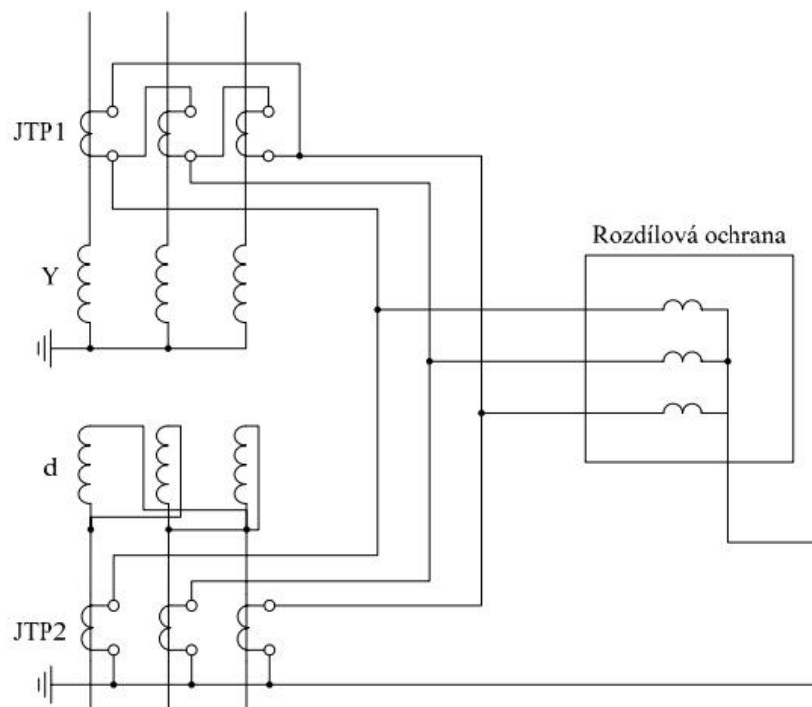
5.7.3 Rozdílová ochrana

Tyto ochrany měří proud na obou koncích chráněného transformátoru. Poruchu vyhodnocují na základě rozdílu fázorů proudu na všech vstupech a výstupech chráněného objektu. Tento rozdíl proudů představuje proud rozdílový. Pokud je rozdílový proud větší než nastavený proud, tak ochrana odpojí transformátor na primární i sekundární straně. Pro normální provoz platí: [7] [16]

$$\Delta I = \left| \sum_{j=1}^k \overline{I}_j \right| = 0. \quad (5.1)$$

Rozdílové ochrany transformátoru se zapojují přes jisticí transformátory proudu, které většinou nemají sladěné převody. Je nutné správné nastavení citlivosti rozdílového měřicího členu, aby ochrana nepůsobila špatně při zkratech mimo chráněný objekt nebo při normálním provozu. [7] [16]

Pokud má spojení vinutí transformátoru různý hodinový úhel (nejčastěji spojení Yd), tak je nutné provést vyrovnání jejich fázových natočení (obr.5.7). [7] [16]



Obr. 5.7 Zapojení rozdílové ochrany transformátoru při zapojení Yd (převzato z [16])

6 Návrh jednofázového transformátoru

Návrh tohoto transformátoru jsem provedl podle zdroje [3].

6.1 Zadání

Jedná se o jednofázový transformátor malého výkonu na jádře typu EI. Transformátor je plášťového typu a je chlazený vzduchem. Teplota prostředí je maximálně 35°C a maximální oteplení je 60°C. Transformátor má tyto hodnoty:

$$f = 50 \text{ Hz},$$

$$\text{vstupní vinutí: } U_1 = 230 \text{ V},$$

$$\text{výstupní vinutí: } U_2 = 60 \text{ V; } I_2 = 0,2 \text{ A},$$

$$U_3 = 10 \text{ V; } I_3 = 0,05 \text{ A}.$$

6.2 Výpočty návrhu transformátoru

6.2.1 Výpočet zdánlivého výkonu transformátoru z hodnot výstupních veličin

Zdánlivý výkon jsem vypočítal z hodnot výstupních napětí a proudů podle vztahu:

$$S_2 = U_2 I_2 + U_3 I_3 = 60 \cdot 0,2 + 10 \cdot 0,05 = 12,5 \text{ VA}. \quad (6.1)$$

V příloze A jsem vyhledal typ jádra s nejbližší vyšším příkonem. To je jádro typu EI 20x16 s příkonem $S_{1t} = 14 \text{ VA}$ a účinností $\eta = 71\%$.

6.2.2 Výpočet příkonu pro danou účinnost

Vypočetl jsem velikost příkonu pro danou účinnost:

$$S_1 = \frac{S_2}{\eta} \cdot 100\% = \frac{12,5}{71} \cdot 100\% = 17,61 \text{ VA}. \quad (6.2)$$

Musí být splněna podmínka $S_1 < S_{1t}$. Tato podmínka splněna není, a proto tento typ jádra nevyhovuje. Musel jsem zvolit jádro o stupeň větší, což je jádro EI 20x20, které má příkon o velikosti $S_{1t} = 17,5 \text{ VA}$ a účinnost $\eta = 73\%$. Pro toto jádro jsem také vypočítal příkon:

$$S_1 = \frac{S_2}{\eta} \cdot 100\% = \frac{12,5}{73} \cdot 100\% = 17,12 \text{ VA}. \quad (6.3)$$

Nyní už podmínka $S_1 < S_{1t}$ je splněna a jádro EI 20x20 tedy vyhovuje.

Rozměry jádra jsem také vypočítal (vztah pro velikost S_{Fe} v cm^2):

$$S_{Fe} = (6až8) \sqrt{\frac{S_1}{f}} = 6,5 \sqrt{\frac{17,12}{50}} = 3,80 cm^2. \quad (6.4)$$

To odpovídá jádru EI 20x20. Zvolil jsem plechy tloušťky 0,5 mm, které mají měrné ztráty přibližně $\Delta p_{1,0} = 2,6 W \cdot kg^{-1}$. Z přílohy A jsem zjistil: $S_{Fe} = 3,8 cm^2$ a $B_m = 1,25 T$.

6.2.3 Určení počtu závitů na 1 V

Počet závitů na 1 V jsem určil podle vztahu:

$$N_{1V} = \frac{1}{4,44 B_m S_{Fe} f} = \frac{1}{4,44 \cdot 1,25 \cdot 3,8 \cdot 10^{-4} \cdot 50} = 9,48 V^{-1}. \quad (6.5)$$

Pro tuto vypočtenou hodnotu N_{1V} musí platit, že je menší než hodnota uvedená v tabulkách. V příloze A jsem našel tabulkovou hodnotu $11,85 V^{-1}$ a podmínka je tedy splněna.

6.2.4 Určení magnetické indukce

Velikost magnetické indukce jsem určil z přílohy A. Její hodnota je 1,25 T. Také jsem její velikost určil početně. Napřed jsem určil ztráty v železe:

$$\Delta P_{Fe} \cong \frac{\Delta P}{2} = \frac{S_1 - S_2}{2} = \frac{17,12 - 12,5}{2} = 2,31 W \quad (6.6)$$

a poté magnetickou indukci:

$$B_m = \sqrt{\frac{\Delta P_{Fe}}{\Delta p_{1,0} m_{Fe} k_0}} = \sqrt{\frac{2,31}{2,6 \cdot 0,36 \cdot 1,4}} = 1,33 T, \quad (6.7)$$

kde m_{Fe} je hmotnost jádra (kg), kterou jsem určil z přílohy A, $\Delta p_{1,0}$ jsou měrné ztráty ($W \cdot kg^{-1}$) a k_0 je činitel opracování jádra (-) o velikosti 1,05 až 1,4.

6.2.5 Výpočet vstupního a výstupního vinutí

Určil jsem velikost proudu I_1 :

$$I_1 = \frac{S_1}{U_1} = \frac{17,12}{230} = 0,074 A, \quad (6.8)$$

počet závitů primárního vinutí:

$$N_1 = U_1 N_{1V} = 230 \cdot 9,48 = 2181, \quad (6.9)$$

a průměry vodičů vstupního a výstupního vinutí:

$$d_1 = 1,13 \sqrt{\frac{I_1}{J_s}} = \sqrt{\frac{0,074}{3,9 \cdot 10^6}} = 0,156 \text{ mm}, \quad (6.10)$$

$$d_2 = 1,13 \sqrt{\frac{I_2}{J_s}} = \sqrt{\frac{0,2}{3,9 \cdot 10^6}} = 0,26 \text{ mm}, \quad (6.11)$$

$$d_3 = 1,13 \sqrt{\frac{I_3}{J_s}} = \sqrt{\frac{0,05}{3,9 \cdot 10^6}} = 0,13 \text{ mm}, \quad (6.12)$$

kde J_s je střední hustota proudu (aritmetický průměr skutečných hodnot proudů vstupního a výstupního vinutí) a její velikost jsem určil z přílohy A.

V příloze B jsem našel normalizované hodnoty vodičů se smaltovou izolací:

$d_1 = 0,16 \text{ mm}$	$d_{i1} = 0,189 \text{ mm}$	$S_1 = 0,0201 \text{ mm}^2$	$R_1 = 845 \text{ } \Omega \cdot \text{km}^{-1}$
$d_2 = 0,265 \text{ mm}$	$d_{i2} = 0,303 \text{ mm}$	$S_2 = 0,055 \text{ mm}^2$	$R_2 = 324 \text{ } \Omega \cdot \text{km}^{-1}$
$d_3 = 0,132 \text{ mm}$	$d_{i3} = 0,161 \text{ mm}$	$S_3 = 0,0137 \text{ mm}^2$	$R_3 = 1305 \text{ } \Omega \cdot \text{km}^{-1}$

Z důvodu, že při zatížení transformátoru vznikají ve vinutí úbytky napětí, tak je nutné zvýšit počty závitů výstupního vinutí nebo snížit počet závitů vstupního vinutí. Z přílohy A jsem zjistil procentní úbytek napětí $\Delta u_R = 16,5 \%$ a určil jsem velikost opravného činitele k :

$$k = 1 + \frac{\Delta u_R}{100\%} = 1 + \frac{16,5\%}{100\%} = 1,165. \quad (6.13)$$

Dále jsem určil konečný počet závitů výstupního vinutí:

$$N_2 = U_2 N_{1V} k = 60 \cdot 9,48 \cdot 1,165 = 663, \quad (6.14)$$

$$N_3 = U_3 N_{1V} k = 10 \cdot 9,48 \cdot 1,165 = 111. \quad (6.15)$$

6.2.6 Návrh uspořádání vinutí

Z přílohy C jsem zjistil maximální šířku pro vinutí $g = 8,5 \text{ mm}$ a absolutní výšku pro vinutí $m = 27,5 \text{ mm}$.

Určil jsem počet závitů nad sebou v jedné vrstvě vstupního vinutí:

$$h_{v1} = \frac{m}{d_{01}} = \frac{0,0275}{1,1 \cdot 0,000189} = 133, \quad (6.16)$$

kde d_0 představuje opravný průměr vodiče vzhledem k jeho nerovnostem a je definován jako:

$d_0 = 1,1 d_i$ pro průměr vodiče do $0,7 \text{ mm}$, $d_0 = 1,15 d_i$ pro průměr vodiče od $0,7 \text{ mm}$ do 1 mm a $d_0 = 1,2 d_i$ pro průměr vodiče od 1 mm do $1,3 \text{ mm}$.

Poté jsem určil počet vrstev vstupního vinutí vedle sebe:

$$v_1 = \frac{N_1}{h_{v1}} = \frac{2181}{133} = 17. \quad (6.17)$$

Šířka vstupního vinutí je:

$$l_{v1} = v_1 d_{01} = 17 \cdot 1,1 \cdot 0,000189 = 3,53 \text{ mm}. \quad (6.18)$$

Obdobným způsobem jsem určil rozměry výstupního vinutí:

$$h_{v2} = \frac{m}{d_{02}} = \frac{0,0275}{1,1 \cdot 0,000303} = 83, \quad (6.19)$$

$$v_2 = \frac{N_2}{h_{v2}} = \frac{663}{83} = 8, \quad (6.20)$$

$$l_{v2} = v_2 d_{02} = 8 \cdot 1,1 \cdot 0,000303 = 2,67 \text{ mm}, \quad (6.21)$$

$$h_{v3} = \frac{m}{d_{03}} = \frac{0,0275}{1,1 \cdot 0,000161} = 156, \quad (6.22)$$

$$v_3 = \frac{N_3}{h_{v3}} = \frac{111}{156} = 1, \quad (6.23)$$

$$l_{v3} = v_3 d_{03} = 1 \cdot 1,1 \cdot 0,000161 = 0,18 \text{ mm}. \quad (6.24)$$

Šířka vinutí v mm je:

$$l = l_{v1} + l_{v2} + l_{v3} = 3,53 + 2,67 + 0,18 = 6,38 \text{ mm}. \quad (6.25)$$

Tímto výpočtem jsem zjistil, že vinutí se na cívku vejde. Celková šířka se výsledně ještě zvětší o mezivrstvou izolaci. Já jsem zvolil izolaci folie PET o tloušťce 0,04 mm. Těleso cívky, na kterou se vine první vrstva závitů, vinutí o různých napětích a poslední vrstvu izolují dvojnásobným ovinutím. Jinak izolují každou šestou vrstvu jednoduchým ovinutím.

Výsledná izolace v tomto případě je:

$$l_{iz} = 2 \cdot 0,04 + 0,04 + 0,04 + 2 \cdot 0,04 + 0,04 + 2 \cdot 0,04 + 2 \cdot 0,04 = 0,44 \text{ mm}. \quad (6.26)$$

Výsledná šířka vinutí je:

$$l_v = l + l_{iz} = 6,38 + 0,44 = 6,82 \text{ mm}. \quad (6.27)$$

Tato velikost je vyhovující, pokud mezi vinutím a jádrem zůstane vůle 1,5 až 2 mm. Tato podmínka je splněna, jelikož absolutní šířka zmenšená o l_v (8,5 mm – 6,82 mm) je 1,68 mm.

Tyto výpočty jsou postačující pro návrh transformátoru bez kontrolních výpočtů.

6.2.7 Kontrolní výpočty

a) Výpočet odporu vinutí

Vstupní vinutí:

$$R_{1c} = R_1 l_{v1} N_1 = 0,845 \cdot 0,113 \cdot 2181 = 208,3 \Omega. \quad (6.28)$$

Výstupní vinutí:

$$R_{2c} = R_2 l_{v2} N_2 = 0,324 \cdot 0,113 \cdot 663 = 24,3 \Omega, \quad (6.29)$$

$$R_{3c} = R_3 l_{v3} N_3 = 1,305 \cdot 0,113 \cdot 111 = 16,4 \Omega. \quad (6.30)$$

R_1, R_2, R_3 jsou střední hodnoty odporů vodiče o délce 1 m zvoleného průměru. Hodnotu l_v jsem určil z přílohy A.

b) Výpočet provozních hodnot odporů

Hodnoty provozních odporů jsem vypočítal takto:

$$R_{2c}'' = R_{2c} + R_{1c} \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{I_1}{I_2} = 24,3 + 208,3 \cdot \frac{663 \cdot 0,074}{2181 \cdot 0,2} = 47,7 \Omega, \quad (6.31)$$

$$R_{3c}'' = R_{3c} + R_{1c} \cdot \frac{N_3}{N_1} \cdot \frac{I_1}{I_3} = 16,4 + 208,3 \cdot \frac{111 \cdot 0,074}{2181 \cdot 0,05} = 32,1 \Omega. \quad (6.32)$$

c) Kontrola úbytků napětí na vstupní straně

Velikosti úbytků napětí jsem vypočítal takto:

$$\Delta U_2 = R_{2c}'' I_2 = 47,7 \cdot 0,2 = 9,54 V, \quad (6.33)$$

$$\Delta u_2 = \frac{\Delta U_2}{U_2} \cdot 100\% = \frac{9,54}{60} \cdot 100\% = 15,9\%. \quad (6.34)$$

$$\Delta U_3 = R_{3c}'' I_3 = 32,1 \cdot 0,05 = 1,605 V, \quad (6.35)$$

$$\Delta u_3 = \frac{\Delta U_3}{U_3} \cdot 100\% = \frac{1,605}{10} \cdot 100\% = 16,1\%. \quad (6.36)$$

Úbytky napětí jsou v toleranci tabulkové hodnoty $\Delta u_R = 16,5\%$, která je uvedena v příloze A.

d) Kontrola ztrát

Ztráty ve vinutí jsou:

$$\Delta P_v = \Delta U_2 I_2 + \Delta U_3 I_3 = 9,54 \cdot 0,2 + 1,605 \cdot 0,05 = 1,99 W. \quad (6.37)$$

Ztráty v železe jsou:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta p_{1,0} \left(\frac{B_m}{B_1} \right)^2 m_{Fe} k_0 = 2,6 \cdot \left(\frac{1,25}{1} \right)^2 \cdot 0,285 \cdot 1,4 = 2,05 W. \quad (6.38)$$

Takže podmínka $\Delta P_{Fe} \cong \Delta P_v$ je splněna.

Celkové ztráty jsou:

$$\Delta P = \Delta P_v + \Delta P_{Fe} = 1,99 + 2,05 = 4,04W. \quad (6.39)$$

e) Účinnost transformátoru

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{12,5}{12,5 + 4,04} = 0,76 \quad (6.40)$$

V příloze A je uvedena tabulková hodnota účinnosti 0,73. Vypočtená hodnota se tedy moc neliší a je dokonce větší.

f) Oteplení při dobrém chlazení

Vztah pro velikost S_0 je pro výsledek v cm^2 :

$$S_0 = \Delta P \cdot 18 = 4,04 \cdot 18 = 72,72\text{cm}^2. \quad (6.41)$$

V příloze A je uvedena tabulková hodnota $S_0 = 104 \text{ cm}^2$. To znamená, že ztráty budou bezpečně odvedeny a chlazení je dostačující.

Výpočet oteplení:

$$\Delta \vartheta = \frac{\Delta P}{\alpha \cdot S_0} = \frac{4,04}{8 \cdot 104 \cdot 10^{-4}} = 48,5^\circ\text{C}. \quad (6.42)$$

Velikost α jsem použil z [3] a za hodnotu S_0 jsem dosadil tabulkovou hodnotu.

g) Proud naprázdno

Magnetizační proud I_μ je:

$$I_\mu = \frac{H_1 l_{Fe}}{N_1} = \frac{3,8 \cdot 11,1}{2181} = 0,01934A. \quad (6.43)$$

Za H_1 jsem dosadil hodnotu uvedenou v [3] a za l_{Fe} jsem dosadil tabulkovou hodnotu z přílohy A.

Proud I_{Fe} pro krytí ztrát v železe je:

$$I_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_i} = \frac{2,05}{230} = 0,00891A. \quad (6.44)$$

Proud naprázdno jsem vypočítal takto:

$$I_0 = I_{Fe} + I_\mu = 0,00891 + 0,01934 = 0,02129A. \quad (6.45)$$

Transformátor je vyhovující, pokud pro výkon: do 50 VA je maximálně $I_0 = 0,8I_1$, od 50 VA do 160 VA je maximálně $I_0 = 0,5I_1$ a od 160 VA je maximálně $I_0 = 0,25I_1$.

Maximální proud naprázdno tedy může být: $I_0 = 0,8 \cdot I_1 = 0,8 \cdot 0,074 = 0,0592A$.

V tomto případě platí, že $0,02129 \text{ A} < 0,0592 \text{ A}$ a proud naprázdno tedy požadovaným podmínkám vyhovuje.

Závěr

Tuto práci jsem rozdělil do šesti kapitol, přičemž prvních pět je teoretických. Věnoval jsem se v nich především popisu transformátorů z různých pohledů. V poslední šesté kapitole navrhl konkrétní jednofázový transformátor.

V první kapitole jsem vysvětlil význam transformátorů a věnoval se jejich konstrukci. Rozdělil jsem jejich konstrukční části na čtyři hlavní: magnetický obvod, vinutí, mechanické části konstrukce a chladicí nádobu s příslušenstvím. Převážně jsem se zabýval magnetickým obvodem a vinutím. Podle uspořádání magnetického obvodu jsem popsal transformátory jádrové, plášťové a toroidní. U vinutí jsem uvedl důležité požadavky, které jsou na něj kladeny a to: mechanická pevnost, elektrická pevnost, technologická proveditelnost, odolnost proti tepelnému namáhání, a ekonomika provozu.

Ve druhé kapitole jsem popsal základní rozdělení a použití transformátorů. Rozdělil jsem je podle počtu fází na transformátory jednofázové, trojfázové a vícefázové, podle magnetického obvodu na transformátory jádrové, plášťové a toroidní, podle způsobu chlazení na transformátory chlazené vzduchem a transformátory s olejovým chlazením, podle počtu vinutí na transformátory dvojvinutíové, trojvinutíové a vícevinutíové a podle způsobu použití jsem popsal transformátory energetické, přístrojové, autotransformátory, svařovací, usměrňovačové, pecové, galvanické, měniče počtu fází, měniče frekvence a tlumivky.

Ve třetí kapitole jsem se zabýval způsoby spojování vinutí transformátorů. Nejprve jsem, z důvodu lepšího pochopení, popsal ideální transformátor, skutečný transformátor a trojfázový transformátor. Dále jsem popsal spojení vinutí transformátorů do hvězdy, trojúhelníka a lomené hvězdy, přičemž jsem uvedl i velikosti napětí a proudů, počty závitů a průřezy vinutí u jednotlivých spojení. Na konci této kapitoly jsem vysvětlil pojem hodinový úhel a popsal jsem nejčastěji používané kombinace spojení primární a sekundární strany transformátoru Yd, Yy, Yyn, Yzn, Dyn a Dz.

Ve čtvrté kapitole jsem nejprve vysvětlil princip činnosti transformátoru a odvodil jsem velikost indukovaného napětí a převod transformátoru. Poté jsem se věnoval speciálním stavům transformátorů. Nejprve jsem popsal chod naprázdno, uvedl jeho náhradní schéma, popsal jsem proud naprázdno a ztráty naprázdno, které při tomto stavu vznikají, a také jsem uvedl schéma zapojení pro měření ztrát naprázdno. Dále jsem popsal chod nakrátko a uvedl jeho náhradní schéma a popsal u něj, obdobně jako u chodu naprázdno, napětí nakrátko, ztráty nakrátko a schéma zapojení pro měření ztrát nakrátko. Dalším speciálním stavem, který jsem popsal a uvedl požadované podmínky, je paralelní spolupráce transformátorů.

V páté kapitole jsem popsal elektrizační soustavu a uvedl napět'ové úrovně používané pro přenos elektrické energie. Dále jsem popsal způsoby provozování uzlu transformátoru, jimiž jsou sítě kompenzované, sítě s uzemněným uzlem přes rezistenci, sítě s přímo uzemněným uzlem a sítě izolované. Uvedl jsem i možnost použití Bauchova zhášecího transformátoru u sítí neúčinně uzemněných. V další části této kapitoly jsem rozdělil transformátory podle účelu použití v energetice na transformátory blokové, spojovací, izolační, průmyslové distribuční a vlastní spotřeby a popsal dispoziční uspořádání transformátorů. Uvedl jsem výkonové řady jednofázových a trojfázových transformátorů. Dále jsem popsal tři primární ochrany transformátorů a to plynové relé, nádobovou ochranu a rozdílovou ochranu.

V poslední šesté kapitole jsem se věnoval konkrétnímu návrhu jednofázového transformátoru malého výkonu pro převod a použití na nn z 230/60,10 V střídavých. Nejprve jsem vypočítal velikost zdánlivého výkonu transformátoru z hodnot výstupních veličin, který mi vyšel $S_2 = 12,5 \text{ VA}$ a vybral jsem z tabulek vhodný typ jádra (EI 20x20). Poté jsem vypočítal velikost příkonu pro tento typ jádra a jeho účinnost ($\eta = 73 \%$), který mi vyšel $S_1 = 17,12 \text{ VA}$. Dále jsem určil počet závitů na jeden volt ($N_{1V} = 9,48 \text{ V}^{-1}$) a velikost magnetické indukce ($B_m = 1,33 \text{ T}$). Také jsem určil průměry vodičů ($d_1 = 0,16 \text{ mm}$, $d_2 = 0,265 \text{ mm}$ a $d_3 = 0,132 \text{ mm}$) a počty závitů vstupního a výstupního vinutí ($N_1 = 2181$, $N_2 = 663$ a $N_3 = 111$) a zkontroloval jsem, že se vinutí na cívku vejde. Poté jsem provedl kontrolní výpočty, tím že jsem vypočetl velikosti odporů vinutí a úbytků napětí a provedl jsem kontrolu ztrát, účinnosti, oteplení a proudu naprázdno. Kontrolní výpočty mi vyšly podle požadavků, které byly dány podmínkami v hlavním textu a přílohách. Podle tohoto návrhu by bylo možné tento malý transformátor sestrojít.

Tato práce mi zlepšila znalosti o teorii transformátorů a jeden malý transformátor jsem i početně navrhl.

Použitá literatura

- [1] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. Vyd. 1. Plzeň: Západočeská univerzita, 1995, 221 s. ISBN 80-708-2221-X.
- [2] Petrov G. N. *Elektrické stroje 1, Úvod – Transformátory*. 3. dopl. vyd. Praha: Academia, 1980.
- [3] KOČMAN, Karel. *Elektrické stroje a přístroje I: učebnice pro 3. roč. studia oboru Zařízení silnoproudé elektrotechniky na stří. prům. školách*. 1. vyd. Překlad Josef Říha. Praha: SNTL, 1990, 420 s. ISBN 80-030-0406-3.
- [4] Bašta, J.; Chládek, J.; Mayer, I.: *Teorie elektrických strojů*, SNTL Praha 1968.
- [5] MERTLOVÁ, Jiřina a Martin KOČMICH. *Elektrické stanice a vedení*. Vyd. 2., upr. Plzeň: Západočeská univerzita, 1997, 161 s. ISBN 80-708-2356-9.
- [6] MERTLOVÁ, Jiřina a Lucie NOHÁČOVÁ. *Elektrické stanice a vedení*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, 2008, 168 s. ISBN 978-80-7043-724-7.
- [7] GRYM, Rudolf, Petr HOCHMAN, Jíří BERMAN, Josef MACHOŇ a Břetislav CICHONĚ. *Chránění II: elektrická zařízení vysokého napětí, chránění zařízení v průmyslu*. Havířov: IRIS, 2004. ISBN 80-903540-0-9.
- [8] Nevřivý, T.: *Modelování jednofázového transformátoru malého výkonu*, [online], Brno, 26.5.2011, [20.4.2012], Dostupné z :
http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40764,
Bakalářská práce, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Ing. Ondřej Vitek, Ph.D
- [9] BAREŠ, Jan. *Přístrojové transformátory – základní informace*. [online], V Plzni, 2011. [20.4.2012], Dostupné z:
https://portal.zcu.cz/wps/PA_StagPortletsJSR168/KvalifPraceDownloadServlet?typ=1&adipidno=40520. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.
- [10] JUDAS, J. *Testování ochrany transformátoru*, [online], Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009, [20.4.2012], Dostupné z :
http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17287,
57 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.
- [11] BARTOŠ, P. *Výpočet nastavení distanční ochrany pro vedení 110 kV*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 76 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
- [12] TRANSFORMÁTORY Katedra obecné elektrotechniky Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB - TU Ostrava Ing. Tomáš Mlčák, Ph.D., Doc. Ing. Václav Vrána, CSc. [online]. [cit. 2012-04-20]. Dostupný z:
http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FMMI/Prednasky/9_trafa_sylab_bc_06.pdf
- [13] Základy elektroinženýrství. In: [online]. [cit. 2012-04-29]. Dostupné z:
moje.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=27639
- [14] Zemní spojení v trojfázových soustavách. In: [online]. [cit. 2012-04-29]. Dostupné z:
<http://www.powerwiki.cz/attach/ES/ZemniSpojeni.pdf>
- [15] Teoretický rozbor ochrany a jištění. In: [online]. [cit. 2012-04-29]. Dostupné z:
http://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/ochrany/Ochrany-%favod.pdf

- [16] HALUZÍK, Evžen, WEIDINGER a Milan KRÁTKÝ. *Ochrany a jištění energetických zařízení* [online]. Brno [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/VIT/images/pdf/studijni_materialy/bc/Ochrany_a_jistenie_energetickych_zarizeni_S%20.pdf
- [17] Plechy EI. In: [online]. [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: http://www.b324.com/ek/nobilis_skripta/priloha_2-jadra_transformatoru.pdf
- [18] GES electronics [online]. [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.ges.cz/cz/zdroje-nabijece-menice-trafa/transformatory-sitove/sitove-toroidni/XKA3.html>
- [19] KONÍČEK, Václav. *Elektrické stroje* [online]. [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.vosaspsekrizik.cz/cs/download/studium/vos/el-stroje-a-pristroje/transformatory.pdf>
- [20] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Transformátor [online]. c2012 [citováno 16. 05. 2012]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Transform%C3%A1tor&oldid=8526872>
- [21] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Galvanické oddělení [online]. c2012 [citováno 16. 05. 2012]. Dostupný z WWW: http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Galvanick%C3%A9_odd%C4%9Blen%C3%AD&oldid=8438409
- [22] Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Lenzův zákon [online]. c2012 [citováno 20. 04. 2012]. Dostupný z WWW: http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Lenz%C5%AFv_z%C3%A1kon&oldid=8080404.

Přílohy

Příloha A – Tabulka pro jádra EI

Tabulka hodnot podle [3]

Typ EI (mm)	S_{It} (VA)	η (%)	B_m (T)	J (A.mm ⁻²)	Δu_R (%)	Počet závitů na 1V (0,5 mmm)	S_{Fe} (cm ²)	l_{Fe} (cm)	m_{Fe} (g)	l_v (mm)	S_0 (cm ²)
16x16	8	70	1,25	4,3	23,0	18,5	2,43	8,9	190	90	66
16x20	10	70	1,25	4,3	20,0	14,8	3,04	8,9	230	99	73
16x25	12	70	1,25	4,3	17,8	11,85	3,80	8,9	290	110	83
20x16	14	71	1,25	3,9	20,0	14,8	3,04	11,1	285	104	95
20x20	17,5	73	1,25	3,9	16,5	11,85	3,80	11,1	360	113	104
20x25	21	72	1,25	3,9	14,5	9,58	4,7	11,1	440	124	115
20x32	27	75	1,25	3,9	12,6	7,36	6,1	11,1	570	138	130
25x20	30	74	1,25	3,7	14,65	9,85	4,7	13,9	560	131	148
25x25	35	78,5	1,25	3,75	12,8	7,66	5,9	13,9	680	142	163
25x32	47	79,5	1,25	3,6	10,53	5,92	7,6	13,9	890	156	181
25x40	54	80,2	1,25	3,52	9,17	4,74	9,5	13,9	1080	173	203
32x25	68	82	1,25	3,26	10,3	5,92	7,6	17,8	1070	168	242
32x32	85	84,5	1,25	3,29	9,2	4,65	9,7	17,8	1370	182	268
32x40	100	84,5	1,1	3,3	8,72	3,39	12,2	17,8	1710	199	295
32x50	123	85,4	1,05	3,3	8,1	2,96	15,2	17,8	2150	220	330
40x32	143	85,5	1,1	2,88	8,1	3,69	12,2	22,3	2170	211	381
40x40	175	87	1,05	2,82	7,34	2,96	15,2	22,3	2780	228	416
40x50	203	87,7	1,0	2,84	6,7	2,37	19,0	22,3	3380	249	460
40x64	248	88	0,95	2,88	6,2	1,84	24,4	22,3	4250	278	520
50x40	280	88,4	1,05	2,4	5,65	2,37	19,0	27,9	4320	264	595

Příloha B – Přehled a vlastnosti měděných vodičů

Tabulka hodnot podle [3]

Jmenovitý průměr vodiče d (mm)	Maximální vnější průměr vodiče d _i (mm)	Průřez vodiče S (mm ²)	Činný odpor R (Ω.km ⁻¹)
0,112	0,141	0,0098	1813
0,125	0,154	0,0122	1455
0,132	0,161	0,0137	1305
0,140	0,169	0,0154	1097
0,150	0,179	0,0177	959
0,160	0,189	0,0201	845
0,170	0,200	0,0226	787
0,180	0,210	0,0254	702
0,190	0,220	0,0284	630
0,200	0,230	0,0314	568
0,212	0,247	0,0353	506
0,224	0,259	0,0392	453
0,236	0,271	0,0437	408
0,250	0,285	0,0491	364
0,265	0,303	0,0550	324
0,280	0,318	0,0616	290
0,300	0,338	0,0707	253
0,315	0,360	0,0776	229
0,335	0,380	0,0880	202
0,355	0,400	0,0990	180
0,375	0,420	0,1100	168

Příloha C – Plechy EI

Převzato z [17]

PLECHY EI		Typ plechů	výška svazků (mm)	počet plechů (ks)	vhodné pro výkon (W)	efektivní průřez železa (cm ²)		závitů na 1V		délka mg. siločáry (mm)	obvod tělíská cívky (mm)	střední délka závitů při plnění (mm)		délka pro vinutí (mm)		výška pro vinutí (mm)		plocha pro vinutí (cm ²)		hmotnost železa (kg)	ochlaz plocha (cm ²)		
						0,5	0,35	0,5	0,35			0,5	0,35	abs	2x	abs	2x	abs	2x			abs	2x
EI 10	8*	16	22	1	0,76	0,68	50,2	66,2	38	47	53	100%	abs	12,5	10	9	3,5	3	2,5	0,44	0,30	0,23	24
	10*	20	28	2	0,95	0,85	47,5	53,0	42	51	57	50%	abs	12,5	10	9	3,5	3	2,5	0,44	0,30	0,23	26
	12,5*	25	35	3	1,19	1,06	37,8	42,5	47	56	62	50%	abs	12,5	10	9	3,5	3	2,5	0,44	0,30	0,23	29
	16*	32	45	4	1,52	1,36	29,6	33,1	54	63	69	50%	abs	12,5	10	9	3,5	3	2,5	0,44	0,30	0,23	33
EI 12	10*	20	28	3	1,14	1,02	39,4	44,0	46	58	66	50%	abs	16,5	14	13	5	4	3,5	0,82	0,56	0,46	38
	12,5*	25	35	4	1,43	1,28	31,5	35,2	51	63	71	50%	abs	16,5	14	13	5	4	3,5	0,82	0,56	0,46	42
	16*	32	45	5	1,82	1,63	24,8	27,6	58	70	78	50%	abs	16,5	14	13	5	4	3,5	0,82	0,56	0,46	46
	20*	40	55	6	2,28	2,04	10,7	22,1	67	79	87	50%	abs	16,5	14	13	5	4	3,5	0,82	0,56	0,46	52
EI 16	12,5*	25	35	5	1,90	1,70	23,7	26,5	63	73	83	50%	abs	22,5	20	19	6,5	5,5	5	1,46	1,10	0,95	60
	16*	32	45	6	2,43	2,18	18,5	20,6	70	80	90	50%	abs	22,5	20	19	6,5	5,5	5	1,46	1,10	0,95	66
	20*	40	55	8	3,04	2,72	14,8	16,5	79	90	99	50%	abs	22,5	20	19	6,5	5,5	5	1,46	1,10	0,95	73
	25*	50	69	10	3,80	3,40	11,85	13,3	90	100	110	50%	abs	22,5	20	19	6,5	5,5	5	1,46	1,10	0,95	82
EI 20	16*	32	45	8	3,04	2,72	14,80	16,5	78	91	104	50%	abs	27,5	24	22	8,5	7,5	6,5	2,34	1,80	1,43	95
	20*	40	55	10	3,80	3,40	11,85	13,3	87	100	113	50%	abs	27,5	24	22	8,5	7,5	6,5	2,34	1,80	1,43	104
	25*	50	69	20	4,70	4,40	9,58	10,2	98	111	124	50%	abs	27,5	24	22	8,5	7,5	6,5	2,34	1,80	1,43	115
	32	64	89	30	6,10	5,40	7,36	8,35	112	125	138	50%	abs	27,5	24	22	8,5	7,5	6,5	2,34	1,80	1,43	130
EI 25	20*	40	55	20	4,70	4,40	9,58	10,2	97	114	131	50%	abs	34,5	30,5	28,5	10,5	9	8	3,63	2,74	2,30	148
	25*	50	69	40	5,90	5,30	7,66	8,5	108	125	142	50%	abs	34,5	30,5	28,5	10,5	9	8	3,63	2,74	2,30	162
	32	64	89	60	7,60	6,80	5,92	6,6	122	139	156	50%	abs	34,5	30,5	28,5	10,5	9	8	3,63	2,74	2,30	181
	40	80	111	80	9,50	8,50	4,74	5,3	139	156	173	50%	abs	34,5	30,5	28,5	10,5	9	8	3,63	2,74	2,30	203
EI 32	25*	50	69	60	7,60	6,80	5,92	6,60	122	145	168	50%	abs	44,5	40,5	38,5	14,0	12,5	11,5	6,25	5,10	4,45	242
	32	64	89	100	9,70	8,70	4,64	5,17	136	159	182	50%	abs	44,5	40,5	38,5	14,0	12,5	11,5	6,25	5,10	4,45	268
	40	80	111	150	12,20	10,90	3,69	4,12	153	176	199	50%	abs	44,5	40,5	38,5	14,0	12,5	11,5	6,25	5,10	4,45	295
	50	100	139	200	15,20	13,60	2,96	3,30	174	197	220	50%	abs	44,5	40,5	38,5	14,0	12,5	11,5	6,25	5,10	4,45	330
EI 40	32*	64	89	150	12,20	10,90	3,69	4,12	157	184	211	50%	abs	55,5	50	48	17,25	16	15	9,55	8,00	7,2	381
	40	80	111	200	15,20	13,60	2,96	3,30	174	197	220	50%	abs	55,5	50	48	17,25	16	15	9,55	8,00	7,2	416
	50	100	139	350	19,00	17,00	2,37	2,65	195	222	249	50%	abs	55,5	50	48	17,25	16	15	9,55	8,00	7,2	460
	64	128	178	500	24,40	21,80	1,84	2,06	224	251	278	50%	abs	55,5	50	48	17,25	16	15	9,55	8,00	7,2	520
EI 50	40*	80	111	350	19,00	17,00	2,37	2,65	194	229	264	50%	abs	70,0	65,5	63,5	22	20,5	19,5	15,4	13,3	12,4	595
	50	100	139	500	23,80	21,80	1,80	2,12	215	250	285	50%	abs	70,0	65,5	63,5	22	20,5	19,5	15,4	13,3	12,4	650
	64	128	178	800	30,20	27,20	1,48	1,65	244	279	314	50%	abs	70,0	65,5	63,5	22	20,5	19,5	15,4	13,3	12,4	727
	80	160	224	1300	38,00	34,00	1,18	1,32	278	313	348	50%	abs	70,0	65,5	63,5	22	20,5	19,5	15,4	13,3	12,4	815
EI 64	50*	100	139	800	30,20	27,20	1,48	1,65	247	291	335	50%	abs	91,0	85	83,0	28	26	25	25,4	21,1	20,7	966
	64	128	178	1500	39,00	34,80	1,15	1,29	276	320	364	50%	abs	91,0	85	83,0	28	26	25	25,4	21,1	20,7	1065
	80	160	224	2100	48,50	43,50	0,93	1,03	310	354	398	50%	abs	91,0	85	83,0	28	26	25	25,4	21,1	20,7	1176
	100	200	278	3200	60,80	54,40	0,74	0,83	352	396	440	50%	abs	91,0	85	83,0	28	26	25	25,4	21,1	20,7	1318