

Univerzita Karlova v Praze
Matematicko - fyzikální fakulta

DIPLOMOVÁ PRÁCE



Věra Koudelková

Jak fungují věci

Katedra didaktiky fyziky

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Peter Žilavý, PhD.

Studijní obor: Učitelství fyziky v kombinaci s matematikou pro SŠ

Podpis vedoucí práce
Peter Žilavý
01. 04. 2011
diplomová práce
537

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce RNDr. Peteru Žilavému, PhD. za ochotu a vedení při vypracování diplomové práce.

Za tvorbu obrázků do brožury Hrátky s transformátorem velmi děkuji panu Vladimíru Chalupovi.

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci napsala samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce.

V Praze dne 10.8.2007

Věra Koudelková



Abstrakt

Název práce: Jak pracují věci

Autor: Věra Koudelková

Katedra: Katedra didaktiky fyziky

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Peter Žilavý, PhD.

E-mail vedoucího: Peter.Zilavy@mff.cuni.cz

Abstrakt: Diplomová práce má dvě části - brožuru Hrátky s transformátorem a písemnou část. Písemná část je v první polovině spíše teoretická - obsahuje teorii transformátoru z pohledů třech různých typů škol (gymnázií, středních průmyslových škol se zaměřením na elektroniku a elektrotechniku a základních fyzikálních kurzů vysokých škol), teorii transformátorového jádra a návrh transformátoru. V druhé polovině písemné části jsou uvedeny některé demonstrační pokusy a technické aplikace transformátoru. Brožura, která je součástí vzdělávacího programu ČEZ, a.s., Svět energie, obsahuje více než desítku pokusů vedoucích k lepšímu pochopení jevu elektromagnetické indukce a principu transformátoru.

Klíčová slova: transformátor, studijní text, aplikace, pokusy

Abstract

Title: How things work

Author: Věra Koudelková

Department: Department of physics education

Supervisor: RNDr. Peter Žilavý, PhD.

Supervisor's e-mail address: Peter.Zilavy@mff.cuni.cz

Abstract: The thesis focuses on electric transformer and possibilities how to present and explain this widely used device at various levels of physics education. The thesis consists of three main parts: the theoretical introduction presents the theory of transformers from three different viewpoints corresponding to gymnasium, secondary technical schools and introductory university level. In the following section some school demonstrational experiments and technical applications of transformers are described. The third part of the thesis is a booklet "Games with a transformer" that will be also published independently in a series of educational materials of the energy company ČEZ, a.s. The booklet offers more than ten experiments concerning electromagnetic induction and a principle and functioning of transformer that may be used both in formal and informal physics education.

Keywords: transformer, textbook, applications, experiments

Obsah

1 Úvod	6
2 Teorie transformátoru	7
2.1 Z vysokoškolského pohledu	7
2.1.1 Elektromagnetická indukce	7
2.1.2 Vlastní a vzájemná indukčnost smyček	8
2.1.3 Transformátor	9
2.1.4 Ideální transformátor	11
2.2 Z gymnaziálního pohledu	12
2.2.1 Ideální transformátor	12
2.2.2 Skutečný transformátor	13
2.3 Z pohledu průmyslových škol	14
2.3.1 Princip transformátoru	14
2.3.2 Převod ideálního transformátoru	15
2.3.3 Náhradní schéma ideálního transformátoru	15
2.3.4 Skutečný transformátor	16
2.3.5 Účinnost transformátoru	20
2.3.6 Rozdělení transformátorů	20
2.3.7 Trojfázový transformátor	21
3 Jádru transformátoru	24
3.1 Magnetické pole v látkovém prostředí	24
3.2 Materiálové vztahy	25
3.3 Magnetický obvod	27
3.4 Ztráty v jádře	29
3.5 Tvary a typy jader	30
3.5.1 Jádru UI	30
3.5.2 Jádru C	30
3.5.3 Jádru EI	31
3.5.4 Jádru EC	31
3.5.5 Jádru M	31
3.5.6 Hrníčkové jádru	31
3.5.7 Varianty hrníčkového jádra	32
3.5.8 Toroidní jádru	32
3.6 Materiály transformátorových jader	33
3.6.1 Feromagnetická jádra	33
3.6.2 Feritová jádra	35
3.6.3 Vzduchová jádra	35

4	Návrh transformátoru	36
4.1	Návrhy	36
4.1.1	Postup pro zájemce o elektroniku	36
4.1.2	Postup pro studenty UP Olomouc	37
4.1.3	Postup pro studenty průmyslových škol	37
4.2	Porovnání	38
4.3	Diskuze	40
5	Speciální typy transformátorů	44
5.1	Autotransformátory	44
5.2	Impulzní transformátory	45
5.3	Měřicí transformátory	45
5.4	Pecové transformátory	46
5.5	Ruhmkorffův transformátor	47
5.6	Sběračové transformátory	47
5.7	Svařovací transformátory	47
5.8	Teslův transformátor	47
6	Dostupné učebnice	49
6.1	Učebnice pro gymnázia	49
6.1.1	Slovní úloha	50
6.2	Učebnice pro průmyslové školy	51
6.3	Učebnice a skripta pro vysoké školy	52
6.4	Další studijní materiály	53
6.5	Sbírkky pokusů	54
7	Několik pokusů na závěr	56
7.1	Pokusy s velkým proudem	57
7.2	Pokusy s vysokým napětím	58
7.3	Přenosová soustava	59
7.4	Rozptyl magnetického pole	60
7.5	Jak se cívky navzájem ovlivňují?	61
8	Transformátor okolo nás	63
8.1	Nabíječka mobilních telefonů	63
8.2	Proudový chránič	65
8.3	Transformátor v mikrovlnné troubě	66
8.4	Transformátor v napájecích obvodech obrazovky	66
8.5	Zapalovací cívka	66
9	Slovníček nejběžnějších pojmů	68
10	Závěr	70

Kapitola 1

Úvod

Středoškolská fyzika má několik témat, která studenti označují jako obtížná, případně taková, která se, dle mého názoru, až příliš zjednodušují. Přivítala jsem proto možnost pokusit se v rámci své diplomové práce jedno z těchto témat - transformátor - podat přístupněji.

V první, teoretické, kapitole shrnuji poznatky o transformátoru z několika pohledů - tak, jak se učí na vysokých školách, gymnáziích a průmyslových školách¹. Následující kapitola obsahuje teorii transformátorového jádra, věnuji se zde také některým, v praxi používaným, tvarům a materiálům jader.

Kapitola Návrh transformátoru obsahuje několik postupů výpočtu konkrétního transformátoru včetně srovnání a diskuze těchto postupů.

Čtvrtá kapitola je věnována některým transformátorům se speciálními požadavky.

Teoretická část mé práce je uzavřena kapitolou Učebnice, ve které se věnuji tomu, jaké informace o transformátoru mohou studenti získat z různých informačních zdrojů. Velký důraz kladu na rozdíl v podání pro studenty průmyslových škol a pro studenty gymnázií.

Dvě kapitoly praktické části obsahují jednak některé pokusy s transformátorem vhodné na střední školy, které ale nesmí provádět sami studenti, a jednak některé aplikace transformátorů v každodenní praxi.

Součástí mé diplomové práce je i brožura Hrátky s transformátorem, kterou vydává ČEZ v rámci svého Vzdělávacího programu. Tato brožura je přiložena.

¹V celé práci jsou souslovím "Průmyslové školy" myšleny průmyslové školy se zaměřením na elektroniku a elektrotechniku, konkrétně odborné předměty těchto škol.

Kapitola 2

Teorie transformátoru

V této kapitole shrnuji poznatky o transformátoru. V první části se na transformátor dívám z pohledu vysokých škol (podkapitolu jsem zpracovala převážně podle [5]), v druhé části z pohledu gymnázií (zpracováno podle [1]). Poslední podkapitola je z pohledu odborných předmětů průmyslových škol, zpracovávala jsem ji hlavně podle [2] a [3].

2.1 Z vysokoškolského pohledu

2.1.1 Elektromagnetická indukce

Představme si vodivou uzavřenou smyčku tvořenou homogenním vodičem a umístěnou v magnetickém poli. Máme-li možnost měřit, zda touto smyčkou protéká proud, zjistíme, že protéká tehdy, jestliže:

- smyčka se bude vhodným způsobem pohybovat
- zdroje magnetického pole se budou vhodným způsobem pohybovat
- bude se měnit velikost magnetického pole uvnitř smyčky.

Po podrobnějším zkoumání jevu elektromagnetické indukce formuloval M. Faraday v roce 1831 zákon, který se dnes používá například ve formulaci: *„Velikost indukovaného elektromotorického napětí je rovna velikosti totální časové derivace celkového magnetického toku smyčkou. Směr indukovaného proudu ve smyčce je vždy takový, že magnetické pole vytvořené tímto proudem se vždy snaží kompenzovat změny toku odpovědné za vznik indukovaného proudu.”* ([5], str. 259)

Obvykle se řečený zákon elektromagnetické indukce vyjadřuje vzorcem:

$$\varepsilon_F(t) = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.1)$$

kde Φ je okamžitá hodnota zmiňovaného magnetického toku danou orientovanou plochou \vec{S} . Tento tok je definovaný vztahem

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}. \quad (2.2)$$

V případě zákona elektromagnetické indukce je S libovolná plocha ohraničená uzavřenou smyčkou (nezávislost na volbě plochy lze jednoduše ukázat z poznatku, že magnetický tok libovolnou uzavřenou plochou je roven nule).

2.1.2 Vlastní a vzájemná indukčnost smyček

Pro vodič zanedbatelného průřezu ve vakuu s homogenně rozloženým proudem I lze vyjádřit vektor magnetického pole $\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_l \frac{d\vec{l} \times \vec{R}}{R^3}$ z v. Biotova-Savartova vzorce:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_l \frac{d\vec{l} \times \vec{R}}{R^3}, \quad (2.3)$$

kde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$ je konstanta nazvaná permeabilita vakua a $\vec{R} = \vec{r} - \vec{r}'$ je rozdíl polohových vektorů od bodu, kde vyšetřujeme \vec{B} k elementu $d\vec{l}$. Pro bod na ose dlouhého tenkého solenoidu se tento vztah redukuje na tvar (pro velikost vektoru)

$$B = \mu_0 I n_l, \quad (2.4)$$

kde n_l je počet závitů na jednotku délky.

Poznámka: Obdobou Biotovu-Savartovu vzorce je tzv. Ampérův zákon:

$$\oint_l \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I. \quad (2.5)$$

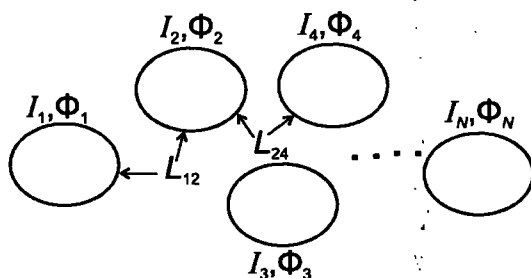
Křivkový integrál na levé straně počítaný přes libovolnou uzavřenou křivku l je vždy roven μ_0 -násobku proudu, který protéká plochou ohraničenou touto křivkou.

Představme si vodivou smyčku protékanou proudem a umístěnou ve vakuu. Z Biotova-Savartova vzorce 2.3 pro ni plyne, že vektor magnetické indukce $\vec{B}(\vec{r}, t)$ buzený touto smyčkou je lineární funkcí proudu $I(t)$. Dle vztahu 2.2 je tedy i magnetický tok touto smyčkou lineární funkcí proudu. Tato linearita bude zachována i v případě, že smyčka nebude umístěna ve vakuu, ale v nějakém hmotném prostředí s konstantní relativní permeabilitou μ_r .

Linearitu závislosti Φ na I můžeme vyjádřit:

$$\Phi = LI, \quad (2.6)$$

kde konstanta L je nazývána *vlastní indukčností smyčky* a závisí pouze na geometrii smyčky a permeabilitě prostředí. Vlastní indukčnost smyčky vyjadřuje schopnost smyčky vytvářet magnetické pole.



Obrázek 2.1: N vodivých smyček v prostoru

Uvažujme nyní N vodivých smyček rozmístěných v prostoru. Každou smyčkou nechť protéká proud I_1, \dots, I_N (viz obr. 2.1). Magnetický tok k -tou smyčkou obecně

závisí na proudech ve všech N smyčkách. Příspěvek proudu j -tou smyčkou k magnetickému toku k -tou smyčkou můžeme vyjádřit vztahem:

$$\Phi_k = L_{kj}I_j, \quad (2.7)$$

ve kterém se konstanta L_{kj} pro $k \neq j$ nazývá *vzájemnou indukčností* smyček k a j a vyjadřuje, jak proud j -tou smyčkou přispívá k celkovému toku k -tou smyčkou. Pokud $k = j$, je zřejmě L_{kj} vlastní indukčnost k -té (resp. j -té) smyčky. Ze symetričnosti situace plyne, že

$$L_{kj} = L_{jk}. \quad (2.8)$$

Tento vztah bývá často v literatuře nazýván "věta o vzájemnosti".

Pomocí zákona elektromagnetické indukce 2.1 lze vlastní a vzájemnou indukčnost L definovat "dynamicky":

$$\varepsilon_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt} = -L\frac{dI}{dt} \quad (2.9)$$

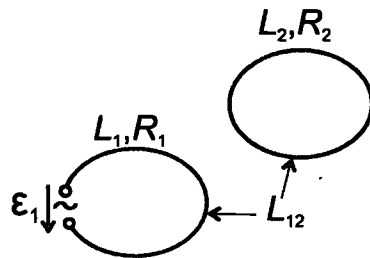
Pro uvažovanou soustavu N vodivých smyček bude elektromotorické napětí $\varepsilon_{ind,k}$ indukované v k -té smyčce:

$$\varepsilon_{ind,k} = -\frac{d\Phi_k}{dt} = -\sum_{j=1}^N L_{kj} \frac{dI_j}{dt}. \quad (2.10)$$

Vlastní indukčnost je vždy kladná, vzájemná indukčnost může být kladná nebo záporná v závislosti na orientaci příslušných ploch.

2.1.3 Transformátor

Uvažujme obecně dvojici vodivých smyček s vlastními indukčnostmi L_1, L_2 , odpory R_1, R_2 a vzájemnou indukčností L_{12} (viz obrázek 2.2). V první smyčce uvažujme také zdroj časově proměnného napětí $\varepsilon_1(t)$.

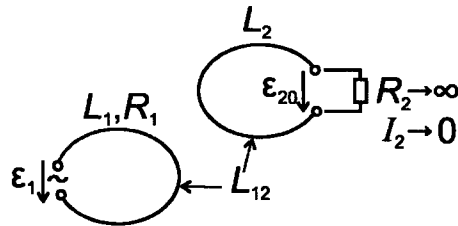


Obrázek 2.2: Transformátor tvořený dvěma smyčkami

Podle II. Kirchhoffova zákona a vztahů typu 2.9 platí pro obě smyčky:

$$\varepsilon_1(t) - L_1 \frac{dI_1}{dt} - L_{12} \frac{dI_2}{dt} = R_1 I_1 \quad \text{a} \quad (2.11)$$

$$-L_{12} \frac{dI_1}{dt} - L_2 \frac{dI_2}{dt} = R_2 I_2 \quad (2.12)$$



Obrázek 2.3: Transformátor naprázdno tvořený dvěma smyčkami

I pro takto obecný transformátor lze odvodit některé zcela konkrétní a známé závěry. Podívejme se nejdřív na případ, kdy je druhá smyčka rozpojená (transformátor naprázdno - viz obr. 2.3).

V takovém případě se rovnice 2.11 a 2.12 redukuje na tvar:

$$\varepsilon_1(t) - L_1 \frac{dI_1}{dt} = R_1 I_1 \quad \text{a} \quad (2.13)$$

$$-L_{12} \frac{dI_1}{dt} = \varepsilon_{20}(t) \quad (2.14)$$

Jestliže bude odpor první smyčky dostatečně malý, aby bylo možné člen na pravé straně rovnice 2.13 zanedbat, dostaneme vydělením rovnic 2.13 a 2.14:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{20}} \doteq \frac{L_1}{L_{12}} \quad (2.15)$$

Tato rovnice je nejen zdánlivě podobná tzv. rovnici transformátoru (viz 2.33).

Zajímavou otázkou je, jak ovlivňuje proud v sekundární smyčce parametry primární smyčky. Předpokládejme speciální případ, kdy je odpor R_2 dostatečně malý, abychom mohli v rovnici 2.12 v každém okamžiku položit pravou stranu přibližně rovnou nule. Potom z této rovnice (po integraci) plyne

$$\frac{I_1}{I_2} \doteq - \frac{L_2}{L_{12}} \quad (2.16)$$

Upravíme-li rovnici 2.12 na tvar:

$$\frac{dI_2}{dt} = - \frac{L_{12}}{L_2} \frac{dI_1}{dt} - \frac{R_2 I_2}{L_2} \quad (2.17)$$

a dosadíme-li za I_2 ze vztahu 2.16:

$$\frac{dI_2}{dt} = - \frac{L_{12}}{L_2} \frac{dI_1}{dt} + \frac{L_{12}}{L_2^2} R_2 I_1 \quad (2.18)$$

můžeme nakonec dosadit do rovnice 2.11:

$$\varepsilon_1(t) = L_1 \left(1 - \frac{L_{12}^2}{L_1 L_2} \right) \frac{dI_1}{dt} + \left(R_1 + \frac{L_{12}^2}{L_2^2} R_2 \right) I_1. \quad (2.19)$$

Z tohoto výsledku plyne zajímavý závěr: primární cívka se chová, jako by měla efektivní indukčnost

$$L_{1,ef} = L_1 \left(1 - \frac{L_{12}^2}{L_1 L_2} \right) \quad (2.20)$$

a odpor

$$R_{1,ef} = \left(R_1 + \frac{L_{12}^2}{L_2^2} R_2 \right)^{1/2}. \quad (2.21)$$

Člen $\frac{L_{12}^2}{L_1 L_2}$ v rovnici 2.20 bývá často značen k^2 , přičemž

$$k = \frac{|L_{12}|}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (2.22)$$

je tzv. *činitel vazby*. Rovnici 2.20 můžeme tedy pro názornost přepsat:

$$L_{1,ef} = L_1 (1 - k^2) \quad (2.23)$$

Vzhledem k tomu, že $L_{1,ef}$ je vlastní indukčnost primární cívky, musí pro ni platit $L_{1,ef} \geq 0$. Mezní případ $L_{1,ef} = 0$ nastane jedině tehdy, když $k^2 = 1$. Tento stav však nelze s reálnými smyčkami dosáhnout (znamenalo by to geometrické ztotožnění obou smyček). Pro reálné obvody vždy platí $k < 1$, tj. $L_{1,ef} < L_1$ (i když vhodnou konstrukcí lze dosáhnout k blízké jedné). Přítomnost sekundární smyčky tedy zmenšuje indukčnost smyčky primární na hodnotu $L_{1,ef}$.

Ze vztahu 2.21 plyne, že přítomnost sekundární smyčky zvětšuje efektivní odpor smyčky primární. To odpovídá skutečnosti, že zdroj musí dodávat i energii spotřebovanou při průchodu proudu sekundární smyčkou na výkon ztracený díky ohmickému odporu vinutí a ztrátám v jádře. Pochopitelně platí, že s rostoucím R_2 roste i efektivní odpor $R_{1,ef}$.

Soustava dvou a více cívek s libovolným počtem indukčně vázaných smyček se nazývá transformátor. Obecně mohou mít smyčky různé činitele vazby v závislosti na použití transformátoru.

2.1.4 Ideální transformátor

Pokud je $k = 1$, mluvíme o ideálním transformátoru. Pro něj je podstatné, že oběma smyčkami protéká stejný magnetický tok. Vedle těsné geometrie lze co nejvyšší činitel vazby dosáhnout i navinutím cívek na společné jádro s vysokou permeabilitou $\mu_r \gg 1$ tak, aby tvořilo uzavřený magnetický obvod s co nejmenším magnetickým odporem². Ve většině případů se používá tzv. "plášťová" nebo "jádrová" konstrukce jádra (viz kapitola 3).

Pro ideální transformátor lze obecné vztahy 2.15, 2.16 a 2.19 přepsat konkrétněji.

Pro jednoduchost uvažujme dlouhou tenkou cívku s N závitů. Každý závit této cívky přispívá k celkovému magnetickému toku Φ cívku příspěvkem

$$\Phi_i = BS \quad (2.24)$$

¹Srov. s obecným vztahem pro napětí na cívce o indukčnosti L a odporu R : $U(t) = L \frac{dI(t)}{dt} + RI$.

²Magnetický obvod je analogický elektrickému obvodu. V souladu s touto analogií se zavádí veličiny magnetický odpor a magnetická vodivost. Podrobněji je o magnetickém obvodu pojednáno v kapitole 3.3.

kde S je plocha jednoho závitů. Celkový tok touto cívku potom je

$$\Phi = \sum_{i=1}^N \Phi_i \quad (2.25)$$

Z definice vlastní indukčnosti a ze vztahu 2.4 pro velikost magnetické indukce v bodě na ose dlouhé cívky potom plyne $L = \frac{\Phi}{I} \approx N^2$. Z tohoto důvodu platí pro transformátor tvořený dvěma cívkami s N_1 a N_2 závitů $\frac{L_1}{L_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2}$. Za podmínky těsné vazby ($k = 1$, viz rovnice 2.22) je $|L_{12}| = \sqrt{L_1 L_2}$.

Proto platí:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\sqrt{L_1}}{\sqrt{L_2}} = \frac{|L_{12}|}{L_2} = \frac{L_1}{|L_{12}|} \quad (2.26)$$

a po dosazení do rovnic 2.15 a 2.16 dostaneme známé výsledky

$$\frac{|\varepsilon_1|}{|\varepsilon_2|} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.27)$$

$$\frac{|I_1|}{|I_2|} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.28)$$

Vztahy platí přesně pouze pro ideální transformátor. Pro reálný transformátor s dostatečně těsnou vazbou platí první vztah ve stavu naprázdno (pokud sekundárním obvodem teče zanedbatelný proud), druhý vztah ve stavu nakrátko (když je sekundární obvod zkratovaný).

Pokud dosadíme vztahy 2.26 do obecné rovnice transformátoru 2.19, dostaneme:

$$\varepsilon_1(t) = L_1 \left(1 - \frac{L_{12}^2}{L_1 L_2} \right) \frac{dI_1}{dt} + \left(R_1 + \frac{N_1^2}{N_2^2} R_2 \right) I_1 \quad (2.29)$$

Z této rovnice například plyne, že sekundární odpor R_2 se na primární straně projeví transformovaný v poměru druhých mocnin počtu závitů (tento závěr je důležitý při kreslení náhradních schémat transformátoru, viz kapitola 2.3). Současně je znovu vidět, že efektivní indukčnost ideálního transformátoru je nulová ($1 = \frac{L_{12}^2}{L_1 L_2}$), vůči zdroji se tedy ideální transformátor chová jako obvod s čistě ohmickým odporem $R_1 + \frac{N_1^2}{N_2^2} R_2$.

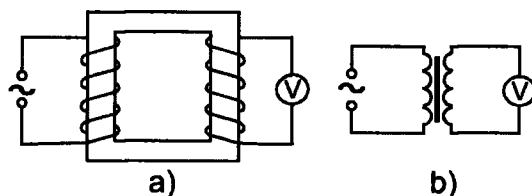
2.2 Z gymnaziálního pohledu

2.2.1 Ideální transformátor

Transformátor je netočivý elektrický stroj, jehož princip je založen na elektromagnetické indukci. Jeho základem jsou dvě cívky na společném ocelovém jádře (viz obrázek 2.4).

Jedna cívka (většinou je označována jako primární) je připojena ke zdroji střídavého napětí. V jejím okolí se vytváří proměnné magnetické pole, díky kterému se v každém závitě obou cívek indukuje střídavé napětí

$$u_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (2.30)$$



Obrázek 2.4: a) transformátor, b) schematická značka transformátoru

Vzhledem k tomu, že obě cívky jsou nasazeny na společném jádře, můžeme předpokládat, že magnetický tok Φ oběma cívkami stejný. Celkové indukované napětí na primární cívce s N_1 závitů bude ^{je}

$$u_1 = -N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2.31)$$

a na druhé cívce (označované jako sekundární) s N_2 závitů

$$u_2 = -N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (2.32)$$

Předpokládejme nejdříve, že transformátor nemá ztráty, tj. vinutí cívek má zanedbatelný odpor a můžeme zanedbat ztráty v jádře. Pro tento tzv. *ideální transformátor* platí, že napětí U_2 , které naměříme voltmetrem na sekundární cívce má stejnou velikost jako indukované napětí podle rovnice 2.32. Současně napětí indukované na primární cívce dle vztahu 2.31 je co do velikosti stejné jako napětí zdroje U_1 . Proto platí tzv. rovnice transformátoru:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \bar{p} \quad (2.33)$$

Číslo \bar{p} se nazývá transformační poměr transformátoru³. Jestliže má sekundární cívka víc závitů než primární, je $\bar{p} > 1$ a mluvíme o transformaci nahoru. Naopak, jestliže má víc závitů primární cívka, je $\bar{p} < 1$ a mluvíme o transformaci dolů.

Vzhledem k tomu, že jsme zanedbali všechny ztráty, je výkon transformátoru roven jeho příkonu. Proto:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad (2.34)$$

neboli

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.35)$$

Lze tedy říct, že proudy se v ideálním transformátoru transformují v obráceném poměru k počtu závitů.

2.2.2 Skutečný transformátor

Co se v předchozí úvaze změní, jestliže nezanedbáme ztráty? Rozlišme nejdříve jednotlivé druhy ztrát a způsoby jejich omezení: ztráty vlivem odporu vinutí (tzv.

³V gymnaziální výuce se obvykle transformační poměr značí k . Vzhledem k tomu, že k v celé práci značím vazbu mezi smyčkami, rozhodla jsem se transformační poměr označit stejným písmenem, jakým je obvykle značen tzv. převod transformátoru. Převod transformátoru tak, jak se zavádí na průmyslových školách, je převrácenou hodnotou transformačního poměru.

Jouleovy tepelné ztráty) lze omezit volbou většího průměru vodičů, ztráty vířivými proudy a hysterezní ztráty je možné zmenšit konstrukcí jádra z tenkých, vzájemně izolovaných plechů z vhodných materiálů.

Jouleovy ztráty závisí na druhé mocnině protékajícího proudu, ostatní ztráty zůstávají se změnou výkonu transformátoru přibližně konstantní. Tedy: čím větší proud transformátorem protéká, tím větší jsou celkové ztráty výkonu.

Pokud je sekundární cívka nezatížená (tj. neprotéká jí žádný proud), protéká primární cívkou proud jen na pokrytí ztrát. V tomto případě mluvíme o tzv. transformátoru naprázdno, pro který platí velmi přesně vztah 2.33.

Naopak, jestliže sekundární vinutí transformátoru zkratujeme, bude jím procházet mnohonásobně větší proud, než je jmenovitý (tj. proud odpovídající jmenovitému výkonu - výkonu uvedenému na štítku). V tomto případě mluvíme o transformátoru nakrátko. Vlivem Jouleových tepelných ztrát může dojít až k tepelné destrukci celého transformátoru.

Transformátory najdou využití všude, kde je třeba měnit velikost napětí - v televizi, rádiu, počítačích, adaptérech na mobilní telefony, stolní lampy a mnoha dalších. Nezastupitelnou úlohu mají také při transformaci napětí energetické sítě, kde se používají trojfázové transformátory - tři transformátory na společném jádře.

7 celky?

2.3 Z pohledu průmyslových škol

2.3.1 Princip transformátoru

Transformátor je netočivý elektrický stroj, který převádí střídavé napětí na napětí jiné hodnoty při stejné frekvenci. Pro jednoduchost předpokládejme uzavřený magnetický obvod s nekonečně velkou magnetickou vodivostí⁴. Na něm jsou dvě vinutí - primární s N_1 závitů a sekundární s N_2 závitů. Jestliže primární vinutí připojíme ke zdroji střídavého harmonického napětí o okamžité hodnotě u_1 , začne tímto obvodem procházet střídavý proud i_1 . Díky němu vznikne magnetický tok Φ_1 a podle indukčního zákona se v sekundární cívce indukuje napětí u_{i2} . Pokud sekundární cívku zatížíme odporem R , začne sekundárním obvodem procházet proud o okamžité hodnotě i_2 . Magnetický tok Φ_2 vytvořený díky proudu i_2 vznikl jako reakce a působí tedy proti smyslu toku Φ_1 .

Velikost indukovaného napětí je dána vztahem (srov. 2.1):

$$u = N \frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.36)$$

Pokud předpokládáme, že magnetický tok má sinusový průběh $\Phi = \Phi_{max} \sin \omega t$, pak dosazením do předchozí rovnice a zderivováním dostaneme vztah

$$u_i = N \Phi_{max} \omega \cos \omega t. \quad (2.37)$$

Nadále budeme vynechávat index "max" u magnetického toku, přestože stále budeme mluvit o maximální hodnotě.

⁴Magnetická vodivost magnetického obvodu je analogická elektrické vodivosti elektrického obvodu. Vyjadřuje, jak snadno magnetický tok protéká daným magnetickým obvodem (jádem transformátoru), přičemž platí, že čím větší permeabilita jádra, tím větší magnetická vodivost. V následujícím textu je použita i veličina magnetický odpor; v analogii s elektrickým odporem platí, že magnetická vodivost je převrácená hodnota magnetického odporu. Více o magnetické vodivosti a odporu v kapitole 3.3

*2. kladně $U_{max} \rightarrow U_{ef}$
 $U_{ef} = U$*

Maximum funkce 2.37 nastane pro $\cos \omega t = 1$, proto

$$U_{max} = N\omega\Phi. \quad (2.38)$$

Po úpravě využívající vztahy $U_{max} = \sqrt{2}U_{ef}$ a $\omega = 2\pi f$:

$$U_{ef} = \sqrt{2}\pi N f \Phi \doteq 4,44 N f \Phi \quad (2.39)$$

2.3.2 Převod ideálního transformátoru

Ideální transformátor je takový, který má nulové ztráty a jehož magnetický obvod má nekonečnou vodivost. Druhá podmínka znamená, že rozptylový tok magnetickým obvodem je nulový, tedy primární i sekundární cívkou protéká stejný magnetický tok Φ . Tato definice ideálního transformátoru je analogická definici vyslovené v kapitole 2.1.4. Z rovnice 2.39 potom plyne pro velikost indukovaného napětí v primární i sekundární cívce:

$$U_1 = U_{i1} = \sqrt{2}\pi f \Phi N_1 \quad (2.40)$$

$$U_2 = U_{i2} = \sqrt{2}\pi f \Phi N_2 \quad (2.41)$$

Pokud tyto vztahy vydělíme, dostaneme definiční vztah pro **převod transformátoru**:

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.42)$$

*transform. poměr
 (13) x kvadr.
 transform.
 (15)
 (stejně jako
 převod p)*

Vzhledem k tomu, že ideální transformátor nemá žádné ztráty, je jeho výkon roven příkonu: $U_1 I_1 = U_2 I_2$. Vztah pro převod bychom tedy měli doplnit na tvar:

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.43)$$

Napětí je přímo úměrné počtu závitů, proudy jsou v obráceném poměru k napětí i počtu závitů.

2.3.3 Náhradní schéma ideálního transformátoru

Z běžně používaného schématu transformátoru (viz obr. 2.5 a)) není jasné, jak se jednotlivá vinutí chovají k sobě navzájem a jak na sebe působí při zatížení. Proto se často používá tzv. náhradní schéma, ve kterém je primární i sekundární vinutí galvanicky spojeno (viz obr. 2.5 b)).

Poznámka: Šipky na obrázku 2.5 značí kladný směr proudu resp. kladný směr napětí.

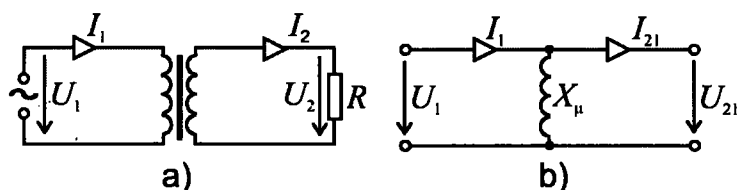
Aby bylo možné obě vinutí vodivě spojit, je potřeba přepočítat veličiny sekundární strany na primární stranu, tj. určit, jaké by měly hodnoty, kdyby byl transformační poměr 1 (srov. se závěrem na konci kapitoly 2.1.4). Hodnoty sekundárních veličin přepočítané na primární stranu budeme označovat indexem "21".

Pro přepočet sekundárního napětí na primární stranu platí:

$$U_{21} = U_2 \frac{N_1}{N_2}, \quad (2.44)$$

stejně tak pro přepočet proudu:

$$I_{21} = I_2 \frac{N_2}{N_1}. \quad (2.45)$$



Obrázek 2.5: Ideální transformátor: a) normální schéma, b) náhradní schéma

Z těchto rovnic a vztahů plynoucích z převodu transformátoru 2.43 plyne:

$$U_{21} = U_1 \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{N_1}{N_2} = U_1 \quad \text{a} \quad (2.46)$$

$$I_{21} = I_1 \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{N_2}{N_1} = I_1 \quad (2.47)$$

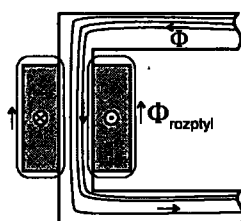
Pro ideální transformátor jsou přepočítané hodnoty rovny příslušným hodnotám primárního vinutí, pro skutečný transformátor už ale tato rovnost neplatí. Pro obecnou impedanci sekundárního obvodu platí:

$$Z_{21} = \frac{U_{21}}{I_{21}} = \frac{U_2}{I_2} p^2. \quad (2.48)$$

Symbol X_μ v náhradním schématu (obr. 2.5) značí tzv. vazební (magnetizační) reaktanci. Podrobněji o ní bude pojednáno v následující kapitole. Vazební reaktance ideálního transformátoru je nekonečně velká, aby jí netekl žádný proud.

2.3.4 Skutečný transformátor

Ve skutečném transformátoru se projevuje několik druhů ztrát - **Jouleovy ztráty** způsobené činným (ohmickým) odporem vinutí a tzv. **ztráty v železe** (ztráty vířivými proudy, hysterezní ztráty a další, viz kapitola 3.4). Vliv má také **rozptyl** magnetického toku.



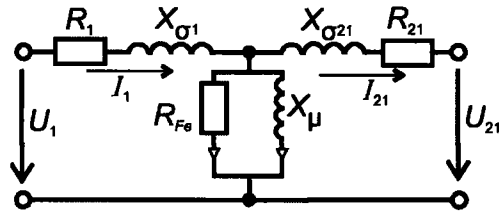
Obrázek 2.6: Rozptylový tok: $\Phi_{\text{celk.}} = \Phi + \Phi_{\text{rozptyl}}$

Jouleovy tepelné ztráty (ΔP_j) závisí na odporu drátů vinutí a na druhé mocnině proudu, který vinutím protéká:

$$\Delta P_j = RI^2, \quad (2.49)$$

Do náhradního schématu je zakreslíme pomocí rezistorů o velikostech odpovídajících odporu vinutí:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2.50)$$



Obrázek 2.7: Náhradní schéma skutečného transformátoru

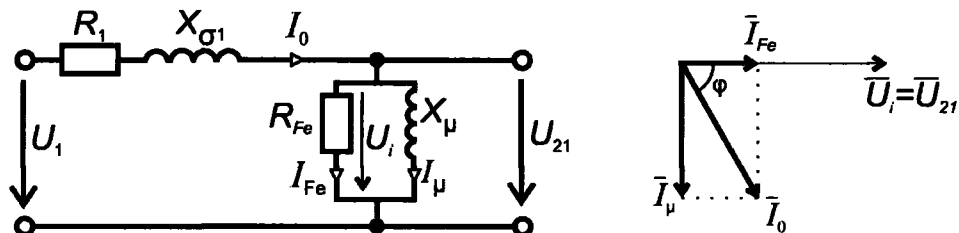
Ztráty v železe budeme značit ΔP_{Fe} , do náhradního schématu je zahrneme rezistorem R_{Fe} zařazeným paralelně k magnetizační reaktanci.

Část magnetického toku se neuzavírá jádrem, ale přímo okolo vlastního vinutí příslušné cívky (viz obr. 2.6). Tento rozptyl způsobí, že sekundární a primární cívku neprotéká stejný magnetický tok. Vliv rozptylu zahrneme do náhradního schématu reaktancemi X_σ zařazenými sériově k rezistorům R_1 a R_{21} .

Všechny sekundární veličiny je do náhradního schématu samozřejmě třeba přepočítat na primární stranu. Výsledné náhradní schéma je na obrázku 2.7.

Transformátor naprázdno

O chodu naprázdno mluvíme tehdy, jestliže transformátor je pod napětím, ale není zatížen, tedy sekundárním obvodem neprotéká žádný proud. Primárním obvodem protéká tzv. proud naprázdno I_0 , skládající se ze dvou složek - magnetizační proud I_μ a ztrátový proud I_{Fe} , které jsou vzájemně fázově posunuty o 90° (viz obrázek 2.8).



Obrázek 2.8: Skutečný transformátor ve stavu naprázdno - náhradní schéma a fázorový diagram

Vzhledem k tomu, že magnetický obvod skutečného transformátoru má konečnou vodivost, je na "protlačení" magnetického toku třeba buzení - z tohoto důvodu protéká primárním vinutím transformátoru naprázdno magnetizační proud. V náhradním schématu tento proud protéká fiktivní vazební reaktancí o hodnotě

$$X_\mu = \frac{U_i}{I_\mu}. \quad (2.51)$$

Velikost magnetizačního proudu závisí na hodnotě intenzity magnetického pole, délce vinutí a počtu závitů vinutí. V praxi se většinou počítá pomocí tzv. měrného budícího příkonu Δq , který udává příkon nutný k vybudování magnetického

toku v kilogramu železa v závislosti na magnetické indukci a který se pro konkrétní transformátorové plechy zjišťuje měřením. Magnetizační proud je potom roven:

$$I_{\mu} = \frac{m_{Fe} \Delta q}{U_i}, \quad (2.52)$$

kde m_{Fe} je hmotnost jádra transformátoru.

Ztrátový proud I_{Fe} kryje ztráty v železe ΔP_{Fe} :

$$I_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{U_i} \quad (2.53)$$

Velikost ztrátového výkonu závisí na typu transformátorového plechu a celkové hmotnosti jádra.

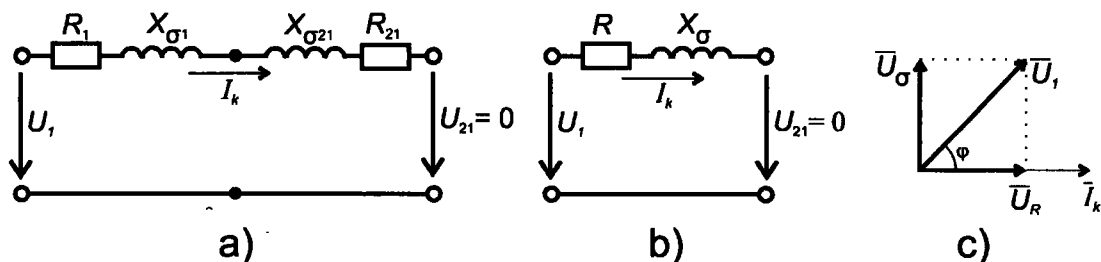
U energetických transformátorů se hodnota proudu naprázdno I_0 pohybuje okolo čtyř procent jmenovitého proudu.

Poznámka: vzhledem k tomu, že proud I_0 je obvykle velmi malý, lze zanedbat úbytek napětí na odporu R_1 a reaktanci X_{σ} . Proto ve stavu naprázdno přibližně platí $U_1 = U_i$.

Transformátor nakrátko

O transformátoru ve stavu nakrátko mluvíme tehdy, jestliže je sekundární vinutí zkratováno, tedy U_2 je rovno nule. Rozlišují se dva různé případy:

1. transformátor je napájen jmenovitým napětím. V tomto případě protéká vinutím tzv. zkratový proud I_k , který je u energetických transformátorů přibližně 25 násobkem jmenovitého proudu. Jouleovy tepelné ztráty, které jsou přibližně 625 násobkem jmenovitých ztrát, s velkou pravděpodobností způsobí zničení transformátoru.
2. tzv. měření nakrátko, při kterém je transformátor se zkratovaným sekundárním vynutím napájen napětím nakrátko, tj. napětím, při kterém vinutím protéká jmenovitý proud.



Obrázek 2.9: Náhradní schéma a fázorový diagram transformátoru ve stavu nakrátko

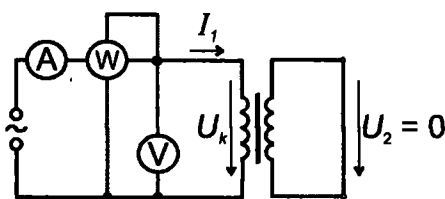
Ve stavu nakrátko zanedbáváme ztrátový proud I_{Fe} a magnetizační proud I_0 , protože jsou mnohonásobně menší než zkratový proud I_k . V důsledku toho se výrazně zjednoduší náhradní schéma (viz obr. 2.9a)). To lze ještě dále upravit zavedením celkového odporu vinutí $R = R_1 + R_{21}$ a celkové reaktance $X_{\sigma} = X_{\sigma 1} + X_{\sigma 21}$ (obr. 2.9b)).

Z druhého Kirchhoffova zákona potom plyne:

$$U_1 = I_k Z, \quad (2.54)$$

kde $Z = \sqrt{R^2 + X_\sigma^2}$ je celková impedancie transformátoru. Mezi napätím U_σ na celkovej rozptylovej reaktanci a napätím U_R na celkovom odporu vinutí je fázový posun 90° , jak je vidět z fázového diagramu 2.9c).

Ze vztahu 2.54 plyne způsob, jak změřit zkratový proud a fázový posun φ (resp. účinník $\cos \varphi$) mezi zkratovým proudem a napětím U_1 (měření nakrátko). Schema zapojení příslušného obvodu viz obrázek 2.10.



Obrázek 2.10: Měření zkratového proudu ve stavu nakrátko

Vstupní napětí postupně zvyšujeme, dokud ampérmetr neukazuje jmenovitý proud I_1 . Příslušné napětí nakrátko je podle rovnice 2.54 rovno

$$U_k = I_1 Z \quad (2.55)$$

Napětí nakrátko bývá zvykem uvádět v procentech jmenovitého napětí:

$$u_k = 100 \frac{U_k}{U_1} \quad (2.56)$$

Pro energetické transformátory je procentní napětí nakrátko předepsané, pohybuje se mezi hodnotami 4% - 11% podle velikosti transformátoru.

Ze vztahů 2.55 a 2.56 platí pro impedanci:

$$Z = \frac{U_k}{I_1} = \frac{u_k U_1}{100 I_1}, \quad (2.57)$$

tedy zkratový proud je z rovnice 2.54 roven

$$I_k = \frac{U_1}{Z} = \frac{100 I_1}{u_k}. \quad (2.58)$$

Pro účinník platí:

$$\cos \varphi = \frac{P_k}{U_k I_1}, \quad (2.59)$$

kde P_k je výkon nakrátko, který lze změřit wattmetrem zapojeným do obvodu na obrázku 2.10.

Čím větší je napětí nakrátko, tím menší je zkratový proud a naopak. Nevýhodou velkého zkratového proudu je velké mechanické a tepelné namáhání transformátoru, malé napětí nakrátko ale naopak znamená, že transformátor je tvrdý napěťový zdroj.

2.3.5 Účinnost transformátoru

Účinnost je obecně dána vztahem

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (2.60)$$

kde P_1 je příkon a P_2 výkon transformátoru. Na štítku transformátoru se obvykle udává zdánlivý výkon transformátoru S :

$$P_2 = S \cos \varphi.$$

Vztah pro účinnost potom bude mít tvar:

$$\eta = \frac{S \cos \varphi}{S \cos \varphi + \Delta P_0 + \Delta P_k}, \quad (2.61)$$

kde $\Delta P_0 = \Delta P_{Fe}$ jsou ztráty naprázdno a ΔP_k ztráty nakrátko.

V praxi pracuje transformátor při různém zatížení. Ztráty naprázdno na zatížení nezávisí, ztráty nakrátko závisí na druhé mocnině proudu, výkon je přímo úměrný zatížení. Zavádí se proto tzv. zatěžovatel:

$$i = \frac{I}{I_n}, \quad (2.62)$$

kde I je skutečný proud a I_n jmenovitý proud sekundární strany transformátoru.

Účinnost transformátoru proto při libovolném účinníku je v závislosti na velikosti zátěže dána vztahem:

$$\eta = \frac{Si \cos \varphi}{Si \cos \varphi + \Delta P_0 + \Delta P_k i^2} \quad (2.63)$$

Pokud výrobce účinnost transformátoru udává, většinou pro $\cos \varphi = 1$ nebo 0,8. Obecně bývají energetické transformátory navrhovány tak, aby neměly maximální účinnost při jmenovitém zatížení, protože se předpokládá, že většinou nebudou pracovat při maximální zátěži. Maximální účinnost mívají při výkonu okolo 75%.

2.3.6 Rozdělení transformátorů

Mluvíme-li o transformátorech, je vhodné je rozdělit na několik základních typů podle různých kritérií.

Podle počtu fází se transformátory dělí na:

- jednofázové
- trojfázové.

Jednofázové mívají obvykle malý výkon (do několika set wattů), používají se převážně k transformaci na nižší napětí. Jednofázové transformátory velkých výkonů se používají k sestavení trojfázové skupiny tam, kde není z konstrukčních důvodů možné použít trojfázový transformátor.

Podle způsobu chlazení lze transformátory rozlišit na:

- transformátory chlazené olejem

- transformátory chlazené vzduchem.

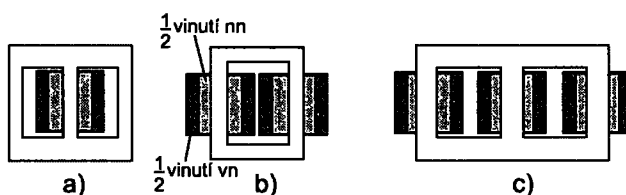
Menší transformátory se obvykle chladí pouze vzduchem, větší jsou umísťovány do nádob s transformátorovým olejem.

Magnetický obvod transformátoru se obvykle dělí podle provedení na (viz obr. 2.11):

- jádrový
- plášťový
- speciální

Nevýhodou plášťového provedení je větší hmotnost, výhodou je těsnější magnetická vazba. Transformátory s jádrovým provedením jsou lehčí, ale mají větší rozptylové toky. Pro transformátory nižších výkonů se používá většinou plášťové provedení, transformátory větších výkonů (hlavně trojfázové) bývají konstruovány jako jádrové.

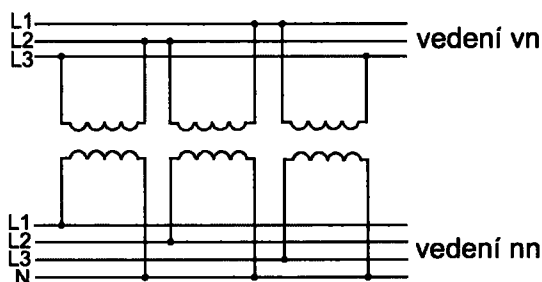
Poznámka: Cívky jednofázového jádrového transformátoru bývají většinou z důvodu co nejtěsnější vazby navinuty polovinou na každém sloupku (viz obr.2.11 b)).



Obrázek 2.11: a) plášťové provedení jednofázového transformátoru, b) jádrové provedení jednofázového transformátoru, c) jádrové provedení trojfázového transformátoru

2.3.7 Trojfázový transformátor

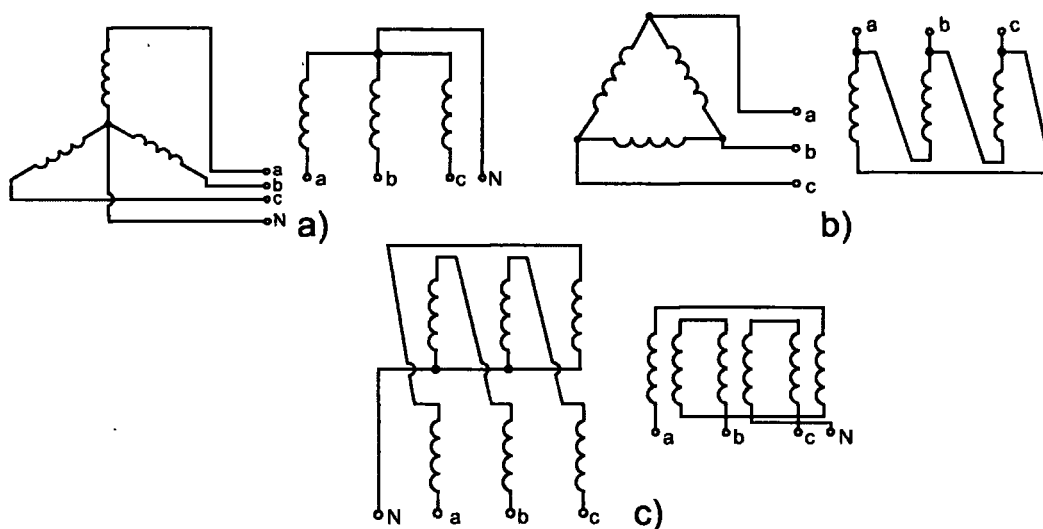
Pro transformaci trojfázového napětí jsou v podstatě dvě možnosti - buď zapojit tři jednofázové transformátory způsobem podle obrázku 2.12, nebo vyrobit trojfázový transformátor nasazením všech cívek na společné jádro. První typ je konstrukčně jednodušší, ale mnohem náročnější na materiál. Jeho výhodou je i možnost při poruše jednoho transformátoru nevyměňovat všechny cívky.



Obrázek 2.12: Tři jednofázové transformátory zapojené do skupiny

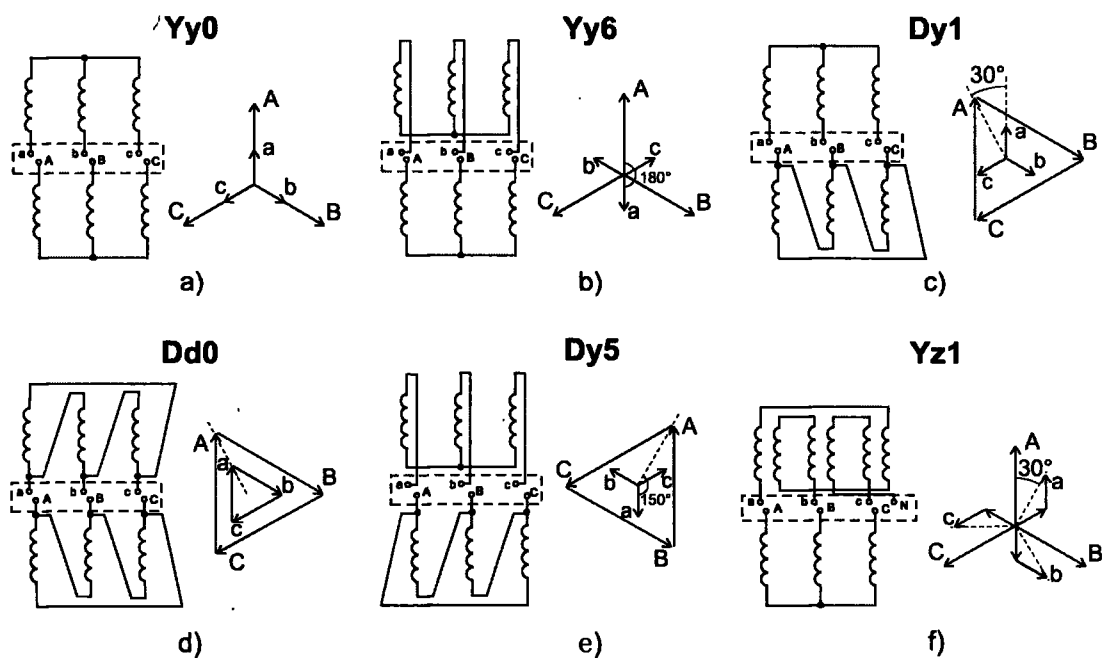
V praxi se ve většině případů používá z ekonomických důvodů druhý způsob. Magnetický obvod trojfázového transformátoru bývá obvykle proveden podle obrázku 2.11c).

Cívky sekundárního vinutí lze zapojit do "hvězdy" (obr. 2.13 a)), do "trojúhelníka" (obr. 2.13 b)) případně do "lomené hvězdy" (obr. 2.13 c)). Jednotlivá zapojení se často značí písmeny Y (hvězda), D (trojúhelník), či Z (lomená hvězda). Pro primární vinutí se používá pouze zapojení Y a D. Dle konvence se vinutí nižšího napětí značí malým písmenem, vinutí vyššího napětí velkým písmenem.



Obrázek 2.13: Základní typy zapojení: a) hvězda Y, b) trojúhelník D, c) lomená hvězda Z

Existují různé kombinace zapojení primárního a sekundárního vinutí (Yy, Dy, Dd, Yz,...). V závislosti na směru navinutí cívky a na pořadí propojení cívek trojúhelníku vznikají různé fázové posuny. *Hodinový úhel* charakterizuje posun mezi fázorem primárního a sekundárního napětí ve fázorovém diagramu. Měří se proti směru hodinových ručiček, 30° odpovídá jedné hodině. Velikost hodinového úhlu se píše za označení zapojení.



Obrázek 2.14: Příklady různých zapojení

Příklady různých zapojení i s příslušnými fázorovými diagramy a hodinovými úhly jsou na obrázku 2.14.

V technické praxi se z mnoha různých kombinací používají obvykle čtyři: Yy0, Dy1, Yz1 a Yd1. Zapojení Yy se používá tam, kde je zátěž sekundárního obvodu symetrická, zapojení Dy se používá pro nesymetrickou zátěž u transformátorů větších výkonů. Zapojení Yz bývá používáno pro transformátory s výrazně nesymetrickou zátěží sekundární strany, zapojení Yd je obvyklé pro transformátory s velkými výkony ve vysokonapěťovém vedení.

Kapitola 3

Jádro transformátoru

3.1 Magnetické pole v látkovém prostředí

V látkovém prostředí zůstávají některé zákonitosti magnetického pole stejné jako ve vakuu, jednou z nich je uzavřenost magnetických indukčních čar. Tok vektoru magnetické indukce libovolnou uzavřenou plochou bude vždy nulový, bez ohledu na to, zda daná plocha leží ve vakuu nebo v látkovém prostředí:

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0.$$

Současně bude pro libovolnou uzavřenou křivku platit Ampérův zákon (viz vztah 2.5) za předpokladu, že na pravé straně bude vystupovat celkový (tj. volný I i vázaný $^{(m)}I$) proud protékající plochou ohraničenou danou křivkou l :

$$\oint_l \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0(I + ^{(m)}I). \quad (3.1)$$

Vázaný, tzv. magnetizační proud $^{(m)}I$ určitým způsobem charakterizuje magnetické pole v daném materiálu. Platí

$$^{(m)}I = \oint_l \vec{M} \cdot d\vec{l}, \quad (3.2)$$

kde $\vec{M}(\vec{r})$ je vektor magnetizace, který makroskopicky popisuje rozložení magnetických dipólů v prostředí. Kromě vektoru magnetizace se často používá i analogický vektor magnetické polarizace $\vec{P}_m(\vec{r})$:

$$\vec{P}_m = \mu_0 \vec{M}. \quad (3.3)$$

Vzorec 3.1 lze použitím definice magnetické polarizace a vztahu 3.2 upravit na tvar

$$\oint_l (\vec{B} - \vec{P}_m) \cdot d\vec{l} = \mu_0 I,$$

který se výrazně zjednoduší zavedením veličiny

$$\vec{H}(\vec{r}) = \frac{\vec{B}(\vec{r}) - \vec{P}_m(\vec{r})}{\mu_0} \quad (3.4)$$

nazvané *intenzita magnetického pole*. Potom platí:

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad (3.5)$$

3.2 Materiálové vztahy

Hodnota vektoru magnetizace (resp. magnetické polarizace) závisí obecně i na vlastnostech látek, které se v daném magnetickém poli vyskytují. Pro popis těchto vlastností a jejich souvislostí s magnetickým polem se zavádí tzv. materiálové vztahy. Na rozdíl od obecných rovnic předchozí podkapitoly, které jsou exaktní a přesně odpovídají známým experimentálním výsledkům, popisují materiálové vztahy zpravidla jen přibližně chování daných látek.

Za běžných teplot lze látky podle chování v magnetickém prostředí rozdělit do dvou skupin - na látky slabě a silně magnetické. Magnetizace slabě magnetických látek dosahuje jen relativně malých hodnot. Jsou charakteristické lineární závislosti mezi intenzitou pole a magnetizací:

$$\vec{M}(\vec{r}) = \chi_m \vec{H}(\vec{r}). \quad (3.6)$$

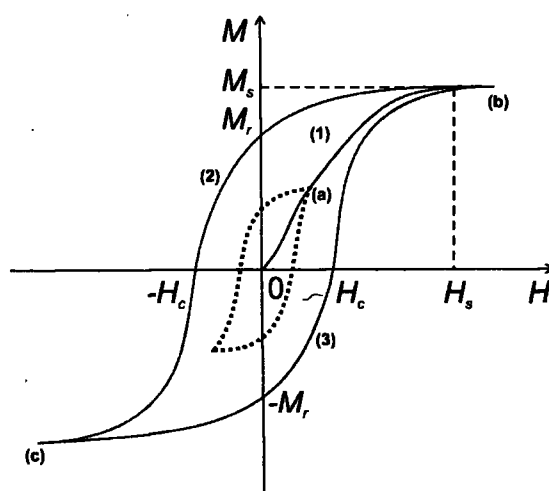
Konstanta úměrnosti χ_m se nazývá *magnetická susceptibilita* látky.

Vzhledem k definičnímu vztahu pro intenzitu magnetického pole 3.4 můžeme snadno popsat závislost mezi magnetickou indukcí a intenzitou pole:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \mu_0 \vec{H}(\vec{r}) + \vec{P}_m(\vec{r}) = \mu_0(1 + \chi_m) \vec{H}(\vec{r}), \quad (3.7)$$

kde veličina $\mu_0(1 + \chi_m)$ je nazývána *permeabilitou látky* μ , veličina $(1 + \chi_m)$ pak *relativní permeabilitou* μ_r .

Látky silně magnetické se vyznačují jednak mnohem větší velikostí magnetizace a jednak složitější závislostí magnetizace na intenzitě pole a na dalších parametrech. Závislost klasického představitel silně magnetických látek, látek feromagnetických, na intenzitě pole je dána tzv. *hysterezní smyčkou* (viz obrázek 3.1).



Obrázek 3.1: Hysterezní smyčka feromagnetika

Magnetizace materiálu, který byl v původním stavu nezmagnetovaný, roste se vzrůstající intenzitou pole podél křivky 0-(a)-(b), nazývané *křivka prvotní magnetizace*. Z obrázku je vidět, že do hodnoty intenzity H_s magnetizace relativně rychle

roste. Pokud intenzita pole překročí hodnotu H_s , roste magnetizace jen velmi pomalu. Proto se o feromagnetiku ve stavu $[H_s, M_s]$ hovoří jako o *magneticky nasyceném* materiálu. Hodnota magnetizace M_s se nazývá *spontánní magnetizací* feromagnetika. Tato hodnota závisí na teplotě, představuje jednu ze základních charakteristik daného materiálu.

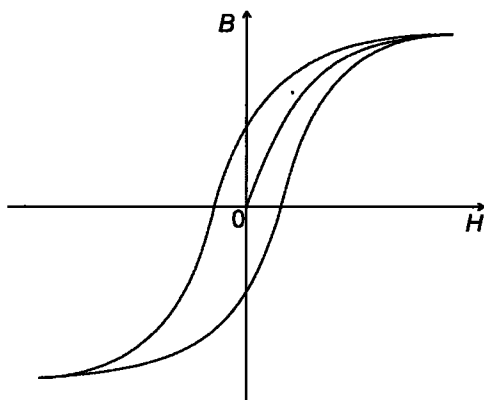
Z nasyceného stavu klesá při snižování intenzity pole magnetizace podél křivky (2). Hodnota magnetizace M_r , odpovídající nulové intenzitě pole, se nazývá *remanentní magnetizace*. Snižování magnetizace pod tuto hodnotu lze dosáhnout přiložením pole opačného směru. Velikost intenzity pole H_c , při níž magnetizace klesne na nulu, se nazývá *koercitivní pole*. Pokud se dále zvyšuje intenzita pole, má magnetizace opačný směr a vzrůstá do své maximální hodnoty (c). Při opětovném snižování intenzity pole se proces opakuje - magnetizace klesá podél křivky (3). Opakované cyklické změny intenzity pole vyvolávají cyklické změny magnetizace, nulové hodnotě intenzity už nebude odpovídat nulová magnetizace. Obdobný průběh bude mít průběh magnetizace i v případě, že vzorek nebyl nasycen (viz tečkovaná křivka na obrázku 3.1). Nezmagnetovaný stav, kdy nulové intenzitě odpovídá nulová magnetizace, lze dosáhnout cyklickým magnetováním s postupně klesající amplitudou pole - amplituda magnetizace bude klesat podél křivky prvotního magnetování.

Pro feromagnetické látky lze zavést pojem permeability μ a relativní permeability μ_r analogicky ke vztahu 3.7:

$$B = \mu H, \quad \mu = \mu_0 \mu_r, \quad (3.8)$$

přičemž ale požadujeme, aby magnetizace probíhala po křivce prvotní magnetizace. Takto definovanou permeabilitu lze tedy měřit pouze u vzorku, který byl ve výchozím stavu nezmagnetován. Relativní permeabilita feromagnetických látek je zpravidla značně větší než jedna.

Hysterezní smyčka se také často kreslí jako závislost $B(H)$ (viz obrázek 3.2). Z ní je například vidět, že relativní permeabilita feromagnetika je poměrně složitou funkcí intenzity pole H . Permeabilita odpovídající malým hodnotám pole se obvykle nazývá *počáteční permeabilita*, druhou důležitou hodnotou je maximální permeabilita a jí odpovídající velikost pole.



Obrázek 3.2: Příklad závislosti magnetické indukce feromagnetika na intenzitě magnetického pole

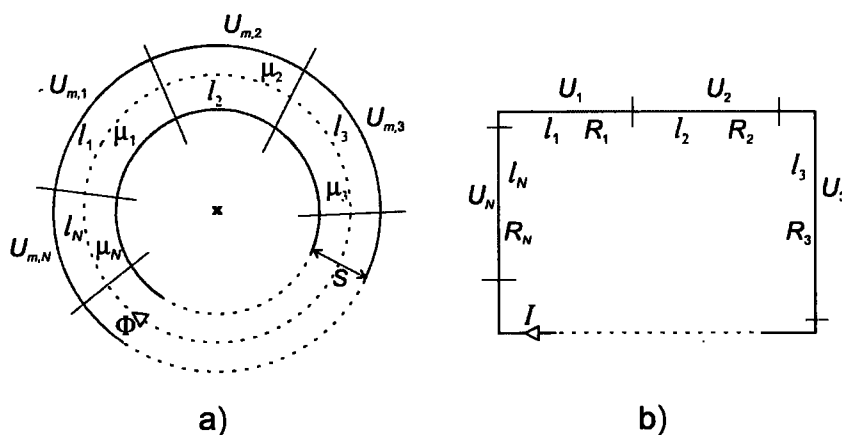
V jádrech transformátoru se používají materiály s nízkým koercitivním polem a vysokou hodnotou permeability - tzv. magneticky měkká feromagnetika. Podle [5] se za magneticky měkká považují feromagnetika, pro která je $H_c < 100 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$.

Kromě feromagnetických materiálů se v transformátorových jádrech používají také další silně magnetické materiály - ferity. Jejich vlastnosti lze popsat hysterezní smyčkou podobnou smyčce feromagnetik, ač je podstata jejich magnetismu dost odlišná.

3.3 Magnetický obvod

Pokud je prostředí, ve kterém uvažujeme magnetické pole, homogenní, lineární a izotropní, je problém výpočtu tohoto pole velmi jednoduchý - platí Ampérův zákon ve tvaru 3.5, z kterého jednoduchou úpravou dostaneme (pomocí 3.7 resp. 3.8):

$$\oint_l \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu I. \quad (3.9)$$



Obrázek 3.3: a) magnetický obvod, b) analogický elektrický obvod

Jestliže však tyto předpoklady nejsou splněny, je dobrou pomůckou k výpočtu magnetického pole pojem *magnetického obvodu*. Tato představa vychází z toho, že magnetické indukční čáry jsou uzavřené křivky podobně jako proudové čáry elektrického obvodu. Magnetickým obvodem dle definice rozumíme část prostoru vymezenou magnetickou tokovou trubici (tj. trubicí, ve které je uzavřen magnetický tok). Konkrétně, u transformátoru, je magnetický obvod ohraničen povrchem jádra. Pomocí magnetického obvodu lze definovat analogické veličiny a zákonitosti jako pro obvod elektrický.

Představme si jednoduché uzavřené toroidní jádro průřezu S znázorňující tokovou trubicí. Předpokládejme, že jádro je dostatečně tenké, aby bylo možno magnetické pole uvnitř něj považovat za homogenní (viz obrázek 3.3). Současně předpokládejme, že vektor magnetické indukce je kolmý na plochu S . Pro magnetický tok potom platí

$$\Phi = B \cdot S .$$

Pokud si v jádře vybereme některou indukční čáru l , bude platit Ampérův zákon ve tvaru 3.5. Magnetický tok je podél celého obvodu jádra konstantní, proto pro libovolný úsek l_i jádra platí (s využitím vztahu 3.8 a definice magnetického toku):

$$\int_{l_i} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_{l_i} \frac{B}{\mu_i} dl = \Phi \int_{l_i} \frac{dl}{\mu_i S} \quad (3.10)$$

Integrál na pravé straně rovnosti 3.10 je navenek podobný vztahu pro elektrický odpor části vodiče:

$$R = \frac{\rho l}{S},$$

nazveme ho proto *magnetickým odporem* R_m :

$$R_m = \int_{l_i} \frac{dl}{\mu_i S}. \quad (3.11)$$

Permeabilita daného úseku l_i odpovídá převrácené hodnotě měrného odporu ρ , tj. měrné vodivosti.

Zavedeme-li veličinu *magnetické napětí* úseku l_i vztahem:

$$U_{m,i} = \int_{l_i} \vec{H} \cdot d\vec{l}, \quad (3.12)$$

můžeme rovnici 3.10 přepsat do tvaru "magnetického Ohmova zákona" pro část elektrického obvodu:

$$U_{m,i} = \Phi R_m. \quad (3.13)$$

Magnetický tok odpovídá v této analogii elektrickému proudu.

Rovnice 3.13 bývá obvykle nazývána Hopkinsonovým zákonem.

"Magnetický Ohmův zákon" pro celý obvod bude mít potom tvar:

$$\sum_{i=1}^N U_{m,i} = \sum_{i=1}^N \Phi \int_{l_i} \frac{dl}{\mu_i S}, \quad (3.14)$$

tj.

$$\varepsilon_m = \Phi R_{m,1} + \Phi R_{m,2} + \dots + \Phi R_{m,N}, \quad (3.15)$$

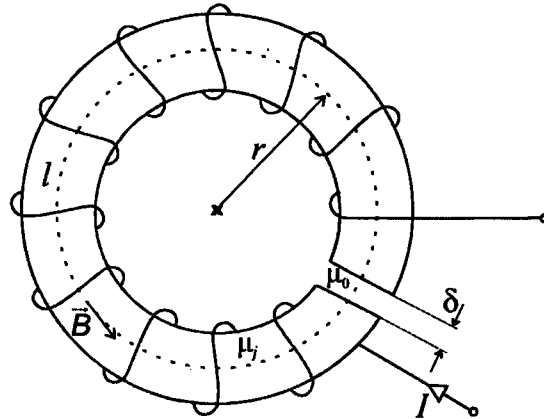
kde veličina ε_m se obvykle nazývá *magnetomotorické napětí* obvodu.

Obdobně lze pro magnetický obvod formulovat i další zákonitosti analogické k elektrickému obvodu. Například pro rozvětvený magnetický obvod platí pravidla analogická ke Kirchhoffovým zákonům atd.

Uvažujme konkrétně jádro tvaru toroidu o poloměru r a průřezu S s úzkou mezerou šířky δ způsobenou například nedoléháním dvou částí jádra apod. Předpokládejme, že jádro má permeabilitu $\mu_j = \mu_0 \mu_r$, vzduchová mezeza má permeabilitu μ_0 (viz obrázek 3.4). Současně pro zjednodušení předpokládejme, že šířka mezery je natolik malá, že magnetický tok teče plochou S i v této mezeře.

Magnetické odpory takového toroidu jsou potom podle definice 3.11 rovny:

$$R_{m,v} = \frac{\delta}{\mu_0 S} \quad \text{a} \quad R_{m,j} = \frac{2\pi r - \delta}{\mu_j S}.$$



Obrázek 3.4: Toroidální jádro s namotanou cívkou se z závitů

Ze vztahů 3.14 a 3.15 $\int U_{m,j} + U_{m,v} = \Phi R_{m,j} + \Phi R_{m,v}$.

$$U_{m,j} + U_{m,v} = \Phi R_{m,j} + \Phi R_{m,v}. \quad (3.16)$$

Dosadíme-li za magnetická napětí z definice 3.12 a využijeme-li Ampérův zákon 3.5, získáme úpravou vztah pro magnetický tok:

$$\Phi = \frac{I^*}{R_{m,j} + R_{m,v}}, \quad (3.17)$$

kde I^* je celkový proud protékající plochou ohraničenou křivkou l . Pokud je na uvažovaném jádře navinuta cívka se z závitů, kterou protéká proud I , platí $I^* = zI$.

Pokud označíme B_j resp. B_v velikost magnetické indukce v jádře resp. v mezeře a podobně H_j resp. H_v velikost intenzity magnetického pole v jádře resp. v mezeře, bude pro tyto veličiny platit:

$$B_j = B_v = \frac{\Phi}{S}, \quad B_j = \mu_j H_j = \mu_0 \mu_r H_j, \quad B_v = \mu_0 H_v. \quad (3.18)$$

Z těchto výsledků plyne několik zajímavých faktů: magnetická indukce je stejná v jádře i v mezeře, ale intenzita magnetického pole je v jádře μ_r -krát menší. Současně je vidět, proč se jádra transformátorů dělají z materiálu o co největší permeabilitě - magnetický odpor je nepřímo úměrný permeabilitě, tj. zvyšováním permeability se zvyšuje tok jádrem.

3.4 Ztráty v jádře

Jádro ideálního transformátoru má nulový magnetický odpor (tj. nekonečnou permeabilitu) a přeneše všechnu výkon, který je mu dodán. V reálném transformátoru však dochází k několika typům ztrát, z nichž k většině dochází právě v jádře. Jednotlivé typy ztrát se většinou navenek projevují tepelným vyzařováním jádra.

Ztráty vířivými proudy

Ve feromagnetickém materiálu dochází k tzv. vířivým (Foucaultovým) proudům - střídavé magnetické pole způsobuje pohyb elektronů uvnitř materiálu, což vede v

jádře transformátoru k tepelným ztrátám. Vířivé proudy lze částečně omezit tvorbou jader z mnoha plechů oddělených izolační vrstvou, používají se i tzv. feromagnetické materiály. Výkon ztracený vířivými proudy je úměrný druhé mocnině magnetické indukce a druhé mocnině frekvence, na které jádro transformátoru pracuje.

Hysterezní ztráty

Při každém cyklu intenzity magnetického pole dochází k malé ztrátě energie způsobené tím, že ne všechna energie magnetického pole se změní na magnetizaci jádra. Hysterezní ztráty jsou pro většinu materiálů úměrné druhé mocnině magnetické indukce a první mocnině frekvence. Jednoduše lze říct, že hysterezní ztráty odpovídají obsahu plochy hysterezní smyčky příslušného feromagnetika.

Magnetostrikce

Feromagnetické materiály mají krystalickou strukturu, která je uspořádána do domén. Každá změna magnetického pole způsobí jemné přeuspořádání těchto domén, což se navenek projeví malou oscilací rozměrů materiálu. Tento efekt poprvé popsal anglický fyzik J. Joule v roce 1842 na vzorku niklu. Podle [29] je důsledkem tohoto jevu například bzučivý zvuk velkých transformátorů, další energie se ztratí třením způsobeným změnami rozměrů jádra.

Mechanické ztráty

Střídavé magnetické pole způsobuje kromě jiného i fluktuaci elektromagnetických sil mezi primární a sekundární cívkou. To způsobuje v jádře vibrace, které se projevují jednak bzučivým zvukem a jednak tepelným zářením.

3.5 Tvary a typy jader

jádra transformátorů pro většinu technických aplikací musí splňovat několik kritérií - co nejmenší rozptyl, malé rozměry jádra vzhledem k požadovanému výkonu transformátoru, dostatek místa na vinutí cívek. Současně je třeba brát ohled na náročnost výroby daného jádra a z toho odvozenou cenu. V praxi se používá několik typů jader, z nichž jsem vybrala nejběžnější.

3.5.1 Jádro UI

Má velké okénko pro vinutí. Díky pravoúhlému průřezu jádra je lze skládat k sobě pro získání většího výkonu. Nevýhodou jádra UI je malá vazba mezi cívkami. Proto, je-li to možné, vinou se cívky polovinou na každém sloupcu.

Podle [13] se používají často pro řádkovací televizní transformátory, protože dovolují dobré elektrické oddělení vinutí. Současně je to nejběžnější používané jádro ve školním rozkladném transformátoru.

3.5.2 Jádro C

Největší rozdíl od jádra UI je v umístění vzduchové mezery. Pro zlepšení vazby se ve většině případů vine primární a sekundární cívka polovinou na každém sloupcu. Pokud se vinutí rozdělí, tj. navine se na každý sloupek jedna cívka, má výsledný

transformátor větší rozptyl, ale dosáhne se současně lepšího elektrického oddělení vinutí a tedy větší dolnosti vůči zkratu.

V případě potřeby lze jádra C spojit a vyrobit tak jádro plášťového typu (tvarově podobného jako jádro EI).

Podle [13] jsou transformátory s jádry C výrazně dražší než transformátory s jádry EI, ale za to je ke stavbě transformátoru s jádrem C potřeba méně materiálu než pro stavbu transformátoru s jádrem EI stejného výkonu.

3.5.3 Jádro EI

Název popisuje tvar jádra - jádro tvaru E s pravoúhlým středním sloupkem je přikryto jádrem I. Střední sloupek má dvojnásobný průměr oproti krajním sloupkům.

Pravoúhlý sloupek způsobuje horší plnění vodiči o větším průměru, kvůli čemuž mají tato jádra relativně větší rozptyl. Mezi další nevýhody patří také jeho velké rozměry. Proto se tam, kde je třeba co nejvíce zmenšit prostor, který jádro zabírá, používají spíše jádra EC nebo X. Výhodou jádra EI je naopak velmi snadná výroba a tedy velice nízká cena.

3.5.4 Jádro EC

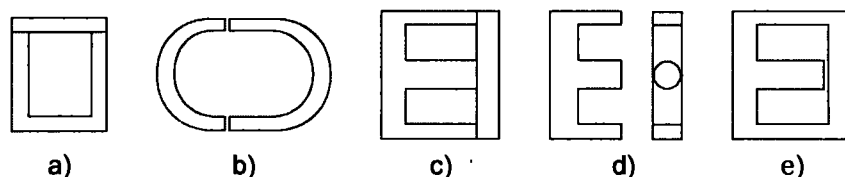
Od jádra E se liší jen kruhovým středním sloupkem. Díky tomu lze hustěji vinout i cívky s větším průměrem vodičů a tedy zmenšit rozptyl magnetického toku. Magnetický obvod se obvykle skládá ze dvou jader EC.

Podle [13] mají tato jádra homogenní magnetický obvod. Vzhledem ke své variabilitě se využívají v širokém spektru transformátorů, jsou však dražší než EI jádra.

$2 \times E \text{ nebo } EI$

3.5.5 Jádro M

Jádro M je svým tvarem velmi podobné jádru EI, liší se jen umístěním vzduchové mezery, která je u jádra M na prostředním sloupku.



Obrázek 3.5: Jádra transformátoru: a) jádro UI, b) jádro C, c) jádro EI, d) jádro EC, e) jádro M

3.5.6 Hrníčkové jádro

Vzhledem k uzavřenému tvaru magnetického obvodu mají hrníčková jádra velmi malý rozptyl magnetického toku. Podle počtu otvorů v plášti jádra se dělí na dvou-otvorové a čtyřotvorové. Vzhledem k poměru výšky a šířky okénka pro vinutí se používají pro transformátory spíše okrajově. Lze je však nalézt v impulzních a sdělovacích transformátorech.

3.5.7 Varianty hrníčkového jádra

Jádro PM

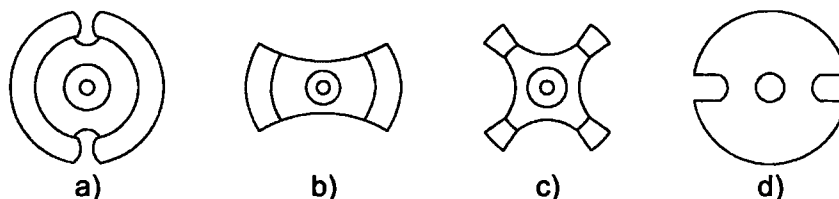
Velmi hmotná jádra, typicky obsahují pouze malý počet závitů. Tvar jádra umožňuje dosáhnout velmi malého rozptylu. Využívají se například pro impulzní transformátory a pro zapalovací cívky do automobilů. Název jádra pochází z anglického "Potcore Modul".

Jádro X

Pro svůj tvar bývá nazýváno i křížové jádro. Prostor na vinutí cívky je čtvercový. Používají se pro sdělovací transformátory, pro jiné nejsou vhodné vzhledem k poměru výšky a šířky okénka pro vinutí.

Jádro CC

Má tvar hrníčkového jádra, které se přikrývá víkem. Název pochází z anglického "Cap-Cup-Core".



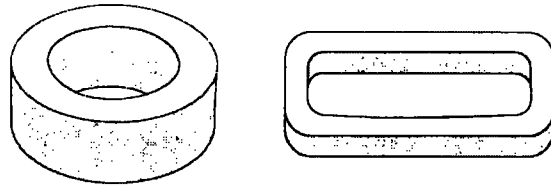
Obrázek 3.6: Hrníčkové jádro a jeho varianty: a) hrníčkové jádro, b) jádro PM, c) jádro X, d) jádro CC

3.5.8 Toroidní jádro

Primární a sekundární cívka bývají vinuty soustředně po celém obvodu jádra, díky čemuž lze dosáhnout těsnější vazby. Příčný průřez má obvykle čtvercový nebo obdélníkový tvar, vyrábějí se i jádra s odstupňovaným průřezem, výjimečně i s kruhovým.

Výhodou toroidních jader je menší rozptyl, menší rozměry (a tedy menší hmotnost), větší variabilita tvarů. Současně nemusí mít na rozdíl od jader skládaných z několika dílů (EI, UI, EC, hrníčkové a jeho varianty) vzduchovou mezeru (i když pro některé aplikace se vyrábí i se vzduchovou mezerou). Díky menším ztrátám jsou tišší než jádra EI či UI. Nevýhodou je relativně vyšší cena a náročnější technologie navíjení cívky.

Toroidní jádra se používají například pro výkonové transformátory, měřicí transformátory, regulační transformátory a mnoho dalších aplikací. Podle [13] se toroidní jádra používají i na nízkonapěťové transformátory pro osvětlovací techniku, protože dosahují nízký úbytek napětí při zatížení, což zvyšuje životnost halogenových žárovek. Feritová toroidní jádra se často používají pro transformátory pracující na vysokých frekvencích.



Obrázek 3.7: Různé varianty toroidních jader

3.6 Materiály transformátorových jader

Pro transformátorová jádra jsou vhodná jádra z materiálů s úzkou hysterezní smyčkou (tj. nízkou hodnotou koercitivního pole H_c - viz. kapitola 3.2), vysokou relativní permeabilitou μ_r a co nejnižšími ztrátami. Až na výjimky se proto používají magneticky měkké feromagnetny a ferimagnetny.

3.6.1 Feromagnetická jádra

Kvůli snížení ztrát vířivými proudy se jádra vyrábí z mnoha tenkých plechů oddělených navzájem izolací (papírem, tenkou vrstvou pryskyřice, lakováním apod.). Jednotlivé typy plechů se liší konkrétním postupem zpracování (válcování za studena či za tepla, žíhání, povrchová úprava apod.), podle toho se označují (například Et, Ei, Eo atd.).

Běžně používané ocelové slitiny

- **Fe-Si**

Nejběžnější materiál - ocel s různým obsahem křemíku (obvykle mezi 1% a 5%), případně i dalších prvků. S rostoucím obsahem křemíku klesá elektrická vodivost (tj. ztráty vířivými proudy). Současně ale klesá permeabilita, roste hodnota koercitivního pole a roste křehkost materiálu.

- **karbonylová ocel**

Velmi čistá ocel (až 99,5% Fe) připravovaná ze sloučeniny $\text{Fe}(\text{Co})_5$. Vyznačuje se vysokou teplotní a frekvenční stabilitou a velmi malou závislostí na velikosti magnetického toku. Používá se hlavně pro jádra širokopásmových cívek.

- **Fe-Co**

Ocel s příměsí kobaltu (35% nebo 49%) a případně i vanadu (2%) se používá pro některé typy miniaturních výkonových transformátorů. Vyznačuje se permeabilitou v řádech desítek tisíc $\frac{\text{H}}{\text{m}}$ a koercitivním polem $H_c = 0,4 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$. Velkou předností je vysoká hodnota nasycení. Nevýhodou je nízký měrný elektrický odpor, který lze zvýšit příměsí vanadu.

Z materiálů na bázi oceli se dělají převážně jádra UI, EI, C, M, EC a toroidy. Je-li potřeba nastavit pro dané jádro konkrétní hodnotu permeability, dělá se to pomocí změny velikosti vzduchové mezery jádra.

Permalloye

Jako permalloye jsou nazývány slitiny železa s niklem a případně dalšími prvky (např. Mo, Cu, Cr, Al, V). Obecně lze říct, že například příměs molybdenu či mědi zvyšuje permeabilitu, molybden ale snižuje hodnotu nasycení. Měď navíc přispívá ke snadnějšímu zpracování materiálu. Velkou nevýhodou permalloyových jader je jejich velká závislost magnetických vlastností na mechanickém napětí. Některé permalloye už mají spíše historický význam, jejich vlastnosti byly překonány feritovými materiály.

Podle [13] se pro sdělovací transformátory nejběžněji používal materiál PY 36, který obsahuje 36% niklu, 64% železa s počáteční permeabilitou 2000. Vyznačuje se malým vzestupem permeability. *-relativně*

Materiál PY 50H (50% niklu, 50% železa) dosahuje z permalloyů nejvyšší hodnoty nasycení, vyznačuje se pravoúhloú hysterezní smyčkou. Slouží pro jádra některých výkonových transformátorů.

Mezi další permalloye patří například PY 78M (78,5% niklu, 21,5% železa), PY 76 Cu (76% niklu, 2% chromu, 5% mědi, 17% železa).

Z permalloyů se vyrábějí převážně toroidní jádra a jádra tvaru M.

Kovová skla

Pokud se tavenina velmi rychle ochladí (řádově rychlostí stovek tisíc stupňů za sekundu), nestihnou se v ní vytvořit krystalické struktury. Takto vzniklé amorfní materiály se často označují také jako amorfní skla. Dostatečně rychlého ochlazení se dosahuje stříkáním taveniny na rychle rotující chladný válec, výsledkem jsou velmi tenké kovové pásy.

Mezi hlavní rozdíly od krystalických kovových látek patří například nízká tepelná stabilita, nízká (případně žádná) magnetostrikce, velká koroziodolnost a velká pevnost. Podle [19] jsou kovová skla asi o čtvrtinu dražší než křemíkové oceli, ale mají o 60% nižší ztráty. Vyznačují se také vysokou permeabilitou a nízkou hodnotou koercitivního pole. Využití proto najdou hlavně u silových transformátorů velkých výkonů, používají se také pro měřicí transformátory proudu a pro transformátory v měničích malých výkonů. Vzhledem k nulové magnetostrikci, díky které kovová skla snesou mnohem větší mechanické namáhání bez vlivu na magnetické vlastnosti, se podle [13] uvažuje i o využití pro jádra ohebných transformátorů v lékařství.

V jádrech transformátorů se používá například amorfní slitina $\text{Fe}_{92}\text{Si}_5\text{B}_3$, CoFeSiB a další.

Železoprachové materiály

Železoprachová (nebo též železová) jádra jsou tvořena jemnými zrnky kovového prášku spojenými nevodivým pojivem. Jejich nevýhodou je nízká permeabilita, výhodou je naopak velká hodnota nasycení.

Materiálem pro výrobu železových jader je kromě čistého železa například také slitina "Alsifer" (4-8% hliníku, 9-11% křemíku, zbytek železo).

V dnešní době je většina vlastností železoprachových materiálů překonány feritovými materiály. Železoprachová jádra se používají spíše výjimečně, vyrábějí se z nich ladící jádra feritových hrníčkových jader a pro některé účely i kruhová jádra.

3.6.2 Feritová jádra

Ferity (ferimagnetické materiály) jsou materiály na keramické bázi. Pro jádra transformátorů jsou vhodné magneticky měkké ferimagnety, používají se například oxidy Fe_2O_3 , NiZn , MnZn a další. Vyznačují se vysokým měrným odporem a značnou tvrdostí, jejich permeabilita se pohybuje v rozsahu několika řádů v závislosti na konkrétním materiálu a způsobu jeho zpracování. Permeabilita potřebná na konkrétní jádro se obvykle nastavuje ladícím prvkem - nejčastěji zasouváním ferit- nebo feromagnetické tyčky do osy jádra. Velkou výhodou ferimagnetických materiálů je velmi úzká hysterezní smyčka a z toho vyplývající velmi malé hysterezní ztráty.

Feritové materiály se používají k výrobě velkého množství tvarů jader, těžiště je však u výroby hrníčkových jader i jejich variant a toroidů. Způsob výroby umožňuje i tvorbu speciálních tvarů jader pro konkrétní účel.

Vzhledem k velké variabilitě parametrů mají feritová jádra velmi široké použití. Protože jejich výroba je poměrně jednoduchá (a tedy levná), vytlačily ferity z mnoha aplikací jádra z jiných, dříve používaných materiálů (permalloye, železoprachová jádra). Díky vysoké elektrické rezistivitě mají feritová jádra velmi nízké ztráty vířivými proudy, jsou proto vhodná i pro transformátory pracující na vysokých frekvencích (viz kapitola 3.4).

3.6.3 Vzduchová jádra

Pro jádra transformátorů, pracujících na vysokých a velmi vysokých frekvencích, nelze použít feromagnetické materiály (a na velmi vysokých frekvencích ani ferimagnetické), protože by tyto transformátory měly neúměrné ztráty vířivými proudy. Cívky takových transformátorů se proto vinou bezjaderné - se vzduchovým jádrem.

Nevýhodou vzduchových jader je relativně nízká permeabilita, těsnější vazby se dosahuje zkroucením vodičů primárního a sekundárního vinutí a velmi malými mezerami mezi vodiči. Přesto se nelze vyhnout velkým rozptylům magnetického toku. Podle [13] lze jen velmi nepřesně vypočítat konečnou indukčnost takové cívky, příslušné vztahy jsou empiricky odvozené a pouze přibližné. Současně závisí indukčnost cívky na konkrétním navinutí závitů, velký vliv má i teplotní roztažnost vodičů. Vzduchové cívky se proto vinou s až o 10% více závitů, než bylo vypočteno, aby bylo možno v případě potřeby přebývajících závitů odmotat.

Kromě zanedbatelných ztrát vířivými proudy (nenulovými, protože vířivé proudy vznikají i v měděných vodičích) patří mezi výhody transformátorů se vzduchovým jádrem i velmi malá hmotnost a objem.

Výjimečně se podle [13] používají vzduchová jádra i na nižších frekvencích, v případech, kdy je pro daný transformátor nepřijatelné magnetické jádro kvůli nelineární charakteristice.

Konkrétním příkladem transformátoru se vzduchovým jádrem je tzv. Rogowského cívka, která je podrobněji rozepsána v kapitole 5.

Kapitola 4

Návrh transformátoru

V technické literatuře, návodech pro kutily - amatéry apod. se čtenář setká s výpočtem parametrů transformátoru pomocí několika daných vzorců a několika empirických konstant. V dnešní době lze z internetu získat i několik programů, které výpočet po zadání parametrů provedou sami. Studenti průmyslových škol se většinou seznamují i s některým postupem výpočtu, případně i s příslušným softwarem.

Způsobů návrhu transformátoru lze v literatuře nalézt mnoho, vybrala jsem jen tři. První dva postupy jsou si podobné, třetí postup jsem vybrala jako velmi odlišný. Na konci kapitoly je uvedeno porovnání výsledných hodnot pro jednotlivé postupy a diskuze uvedených empirických (či částečně empirických) konstant a vzorců.

4.1 Návrhy

U všech způsobů výpočtu budu předpokládat, že známe požadovanou efektivní hodnotu vstupního a výstupního napětí transformátoru (U_1 resp. U_2) a požadovanou efektivní hodnotu výstupního proudu (I_2).

Poznámka: Některé dále uvedené vztahy nesedí rozměrově. Je to způsobeno tím, že obsahují empirické číselné konstanty.

4.1.1 Postup pro zájemce o elektroniku

Tento postup jsem zpracovala podle [14].

1. Výkon a příkon transformátoru

Zdánlivý výkon transformátoru vypočítáme jako prostý součin sekundárního napětí a proudu: $P = U_2 \cdot I_2$

Započítáme účinnost η (u malých transformátorů 80 %) a spočteme příkon:

$$P_1 = \frac{P_2}{0,80}$$

2. Průřez jádra v cm^2

$Q = 1,2\sqrt{P_1}$, kde konstanta 1,2 je empirická konstanta zohledňující tloušťku izolace mezi jednotlivými plechy a další ztráty při skládání jádra

3. Počet závitů na volt

$$\tilde{N} = \frac{45}{Q}, \quad (4.1)$$

kde 45 je konstanta a Q dosazujeme v cm^2 .

4. Počet závitů cívek

$$N_1 = 0,95 \cdot \tilde{N} \cdot U_1$$

$$N_2 = 1,05 \cdot \tilde{N} \cdot U_2$$

Konstanty 0,95 resp. 1,05 zohledňují ohmický odpor vinutí.

5. Primární proud

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1}$$

6. Průměr drátu v mm

$$d = \sqrt{\frac{I}{2}}$$

4.1.2 Postup pro studenty UP Olomouc

Zpracováno převážně podle [27].

1. Výkon a příkon transformátoru

Zdánlivý výkon transformátoru v jednotkách VA je prostý součin sekundárního napětí a proudu: $P = U_2 \cdot I_2$

S ohledem na účinnost zvětšíme příkon koeficientem 1,18:

$$P_1 = 1,18 \cdot P$$

2. Průřez jádra v cm²

$$Q = \sqrt{P_1}$$

3. Počet závitů

Počet závitů primárního vinutí: $N_1 = 38 \frac{U_1}{Q}$

Počet závitů sekundárního vinutí: $N_2 = 42 \frac{U_2}{Q}$,

kde 38 resp. 42 jsou empirické konstanty.

4. Průměr drátu v mm

Předpokládáme-li měděné vinutí se zatížením proudovou hustotou $I = 2,55 \text{ A/mm}^2$, je průměr vodičů $d = 0,7\sqrt{I}$

4.1.3 Postup pro studenty průmyslových škol

Zpracováno podle [2].

1. Výkon transformátoru

Výkon vypočteme jako prostý součin sekundárního napětí a proudu: $P = U_2 \cdot I_2$

2. Jmenovité proudy

Z výkonu a fázové hodnoty sekundárního napětí vypočteme fázovou hodnotu jmenovitého proudu: $I_2 = \frac{P}{U_2}$. Normy předepisují pro jednotlivé výkony hodnotu výkonu ztraceného v železe ΔP_{Fe} a výkonu ztraceného ve vinutí ΔP_k (viz kapitola 2.3). Zvětšíme-li o tyto hodnoty výkon transformátoru, dostaneme jeho příkon. Pro malé transformátory je příkon přibližně o 20% větší než výkon. Jmenovitou hodnotu primárního proudu spočteme jako podíl příkonu a jmenovité hodnoty primárního napětí: $I_1 = \frac{P_1}{U_1}$

3. Průřez jádra

Aktivní průřez jádra v metrech čtverečných vypočteme ze vztahu

$$S_{Fe} = C \cdot \sqrt{\frac{P}{kf}} \cdot 10^{-4}, \quad (4.2)$$

kde výkon se dosazuje v kVA (stejně jako v dalších vztazích). Konstanta $k = 1$ je pro jednofázový plášťový transformátor, $k = 2$ pro jednofázový jádrový transformátor a $k = 3$ pro trojfázový jádrový transformátor. Konstanta C přímo ovlivňuje průřez jádra a tedy velikost magnetického toku. Je-li C menší, je menší magnetický tok a současně větší počet závitů. Proto jsou menší ztráty v železe a současně větší ztráty způsobené odporem vodičů. To je výhodné u transformátorů, které často pracují naprázdno. Většinou se volí hodnoty $C = 4$ až 6 pro transformátory chlazené olejem a $C = 6$ až 8 pro transformátory chlazené vzduchem.

Vzhledem k tomu, že mezi jednotlivými plechy jádra je izolace, je geometrický průřez jádra větší než aktivní průřez:

$$Q = \frac{S_{Fe}}{\alpha}, \quad (4.3)$$

kde α je tzv. konstanta plnění. Podle zpracování plechů a druhu izolace se volí $\alpha = 0,87 - 0,94$.

4. Magnetická indukce a magnetický tok

Magnetická indukce je závislá na výkonu transformátoru. Podle [2] ji lze určit z empirického vztahu $B = 1,1 + 0,14 \log P$ (výkon se dosazuje v kVA), který platí pro transformátory s výkonem do 5 MVA.

Magnetický tok vypočteme z definičního vztahu: $\Phi = BS_{Fe}$

5. Počet závitů

Počet závitů sekundární cívky vypočteme z napětí indukovaném na jednom závitě: $U_{iz} = 4,44\Phi f$. Potom $N_2 = \frac{U_2}{U_{iz}}$ a $N_1 = N_2 \frac{U_1}{U_2}$. Oba počty závitů samozřejmě zaokrouhlíme na celé číslo.

6. Průřezy vodičů

Přípustná proudová hustota je pro olejové transformátory: $\sigma = (1,65 + 0,82 \log P) \cdot 10^6$ a pro transformátory chlazené vzduchem: $\sigma = (1,2 + 0,4 \log P) \cdot 10^6$. Průřezy vodičů potom jsou (v m²): $S_1 = \frac{I_1}{\sigma}$ resp. $S_2 = \frac{I_2}{\sigma}$.

4.2 Porovnání

Pro konkrétní příklad výpočtu transformátoru a srovnání výsledků jednotlivých výpočtů můžeme využít hodnoty z úlohy za kapitolou o transformátoru z učebnice [1], nebudeme ale zanedbávat ztráty.

"Určete transformační poměr transformátoru, který připojíme na síťové napětí a ze sekundárního vinutí chceme odebírat napětí 10V a proud 2A. Jaký proud prochází primárním vinutím transformátoru? Ztráty neuvažujeme, sekundární vinutí je

zatíženo rezistorem.” ([1], str.214)

V následující tabulce jsou vypočítané hodnoty pro jednotlivé způsoby výpočtu. V prvním sloupci jsou hodnoty podle postupu pro amatérské kutily, druhý sloupec obsahuje hodnoty podle materiálu pro studenty UP Olomouc, v třetím sloupci jsou hodnoty podle středoškolské učebnice pro SPŠE. Z tabulky je vidět, že výsledky v prvních dvou sloupcích se téměř neliší.

Text pro studenty UP Olomouc počítá s nepatrně menšími ztrátami, proto je odpovídající příkon o něco menší. Na výsledné počty závitů to však nemá výrazný vliv.

Při návrhu konkrétního transformátoru je nezbytné vzít v úvahu, v jakém režimu bude transformátor obvykle pracovat a příslušné hodnoty navíc přizpůsobit vyráběným rozměrům jader a drátů.

	první postup	druhý postup	třetí postup
příkon (VA)	25	23,6	25
primární proud (A)	0,109	0,103	0,109
průřez jádra (cm ²)	6,000	4,858	3,459
počet závitů primární cívky	1639	1799	2581
počet závitů sekundární cívky	79	86	112
průměr drátu primární cívky (mm)	0,233	0,224	0,209
průměr drátu sekundární cívky (mm)	1,000	0,990	3,843

Tabulka 4.1: Srovnání výsledků výpočtu transformátoru

Ve třetím sloupci tabulky jsou uvedeny výsledky výpočtu podle učebnice pro SPŠE. Pro výpočet jsem předpokládala průměrný jednofázový jádrový transformátor chlazený vzduchem, s průměrnou konstantou plnění. Proto $C = 7$, $k = 2$, $\alpha = 0,92$.

Tento postup výpočtu je mnohem náročnější než předchozí dva postupy, navíc má velmi rozdílné výsledky. Myslím si, že rozdíly jsou způsobené hlavně tím, že postup pro studenty SPŠE je určen spíše pro výpočet síťových transformátorů větších výkonů.

Zajímavější proto je, použít tento postup výpočtu pro odhad počtu závitů velkých trojfázových transformátorů. Předpokládejme transformátor 110/22 kV o výkonu 40 MVA a o výkonu 63 MVA. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.2:

	Výkon 40 MVA	Výkon 63 MVA
primární napětí (kV)	110	110
sekundární napětí (kV)	22	22
příkon (MVA)	47,2	74,3
primární proud (A)	429,1	675,8
průřez jádra (dm ²)	28,2	35,8
počet závitů primární cívky	887	698
počet závitů sekundární cívky	177	140

Tabulka 4.2: Výpočet síťového transformátoru

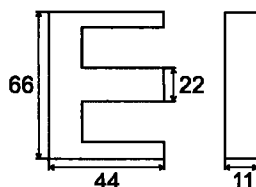
Podle údajů získaných z ČVUT má transformátor 40 MVA obvykle 765 a 160 závitů, transformátor 63 MVA 612 a 128 závitů. Myslím si, že velká nepřesnost při odhadu vznikla při výpočtu magnetické indukce. Uvedený vztah $B = 1,1 + 0,14 \log P$ je zcela empirický, konstanty, které jsou v něm uvedené, mají velký vliv na výsledný počet závitů.

4.3 Diskuze

V návrzích transformátorů se používá velké množství empirických konstant. Pokuším se nyní objasnit, kde mají tyto konstanty původ. V celé diskuzi budu předpokládat transformátor s jádrem tvaru EI, který se obvykle používá pro transformátory malých výkonů, s plechy označení Ei 40¹ tloušťky 0,5 mm. Současně budu předpokládat, že transformátor pracuje na síťové frekvenci 50 Hz a je konstruován pro magnetickou indukci 1 T, jak je pro malé transformátory obvyklé. Konkrétní údaje o vyráběných typech plechů jsem čerpala převážně z knihy [13].

Izolace plechů

První postup zohledňuje izolaci přímo konstantou 1,2, v druhém postupu ji autor započítává do konstanty 38 resp. 42 při výpočtu počtu závitů. Plechy Ei jsou obvykle izolovány vrstvou laku o tloušťce 5 μm na každé straně. Jestliže aktivní průřez jádra (tj. průřez železa bez izolace) předpokládáme přibližně čtvercový, je pro výkon 20 VA (tj. aktivní průřez 4,5 cm^2) z výše uvedeného příkladu nejvhodnější skládat jádro z výlisků označení EI 66 (rozměry viz obrázek 4.1)². Na daný průřez v tom případě použijeme u obou postupů 45 plechů, tj. tloušťka jádra se zvětší o 0,45 mm.



Obrázek 4.1: Rozměry jádra EI 66

Kromě izolace jsou do průřezu jádra počítány také vzduchové mezery vzniklé nedokonalým spojením plechů.

Jiným způsobem, kterým lze započítat izolaci a vzduchové mezery mezi plechy jádra je tzv. konstanta plnění, kterou používá třetí postup. Ta je udávána pro jednotlivé plechy výrobcem, zahrnuje v sobě kromě izolace také jakost daného plechu - jak přesně je vyválcován, tedy jaká je minimální velikost vzduchových mezer. Učebnice [2] hovoří v doprovodném textu ke vztahu 4.3 o plechu válcovaném za tepla. Pro tento plech označení Et se dnes udává konstanta plnění 92%.

¹Plech Ei 40 je označení magneticky izotropního plechu válcovaného za studena. Obvykle se dodává v tloušťce 0,5 nebo 0,65 mm. Číslo v označení plechu vyjadřuje jeho jakost - znamená ztráty v desetinách wattu na kilogram plechu při magnetické indukci 1,5 T a frekvenci 50 Hz.

²Číslo 66 za označením typu jádra značí délku nejdelší strany.

Průřez jádra

Všechny tři postupy počítají průřez jádra transformátoru jako odmocninu z jeho příkonu. Zdánlivý příkon transformátoru je součin primárního napětí a proudu:

$$P_1 = U_1 I_1.$$

Za napětí U_1 dosadíme z rovnice 2.39. Proud vinutím je roven součinu proudové hustoty σ a průřezu vodiče S . Po dosazení dostaneme:

$$P_1 = 4,44 N f B Q \sigma S. \quad (4.4)$$

Počet závitů je však omezen velikostí okénka pro vinutí S_v , které je v daném transformátoru k dispozici:

$$N S \approx S_v.$$

Jestliže zvětšíme okénko pro vinutí, roste současně i průřez jádra. Lze proto psát

$$S_v \approx Q,$$

což po dosazení do rovnice 4.4 znamená:

$$P_1 \approx Q^2. \quad (4.5)$$

Počet závitů na volt

Konstanta 45 ve vztahu 4.1 pro počet závitů na jeden volt plyne z rovnice 2.39 a definice magnetického toku: napětí na primární cívice je přímo úměrné magnetické indukci, frekvenci, počtu závitů a průřezu jádra. Pokud za magnetický tok dosadíme z definice a vztah upravíme, dostaneme:

$$\frac{N}{U} = \tilde{N} = \frac{1}{4,44 f B Q}, \quad (4.6)$$

kde na levé straně je hledaný počet závitů na jeden volt. Jestliže dosadíme číselné hodnoty konstant na pravé straně rovnice, dostaneme po úpravě a zaokrouhlení:

$$\tilde{N} Q = 4,5 \cdot 10^{-3}. \quad (4.7)$$

Řádový rozdíl mezi konstantou ze vztahu 4.1 a konstantou na pravé straně předchozí rovnice je způsoben dosazováním průřezu jádra v jiných jednotkách - ve vztahu 4.1 je dosazován v cm^2 , ve vztahu 4.7 v m^2 .

Odpor vinutí

Autoři v prvních dvou postupech zahrnují v počtu závitů cívek ohmický odpor vinutí. Pro výkon ztracený ve vinutí platí $P_z = R I^2$ (viz náhradní schéma v kapitole 2.3.4). Napětí na sekundární straně bude proto menší o hodnotu

$$U_z = R_1 I_1 \frac{U_2}{U_1} + R_2 I_2. \quad (4.8)$$

První člen na pravé straně zohledňuje ztráty na primárním vinutí, které jsou přepočítány na sekundární stranu, druhý člen zahrnuje ztráty na sekundárním vinutí. Poměrný úbytek napětí na sekundární straně tedy je:

$$\frac{U_z}{U_2} = R_1 \frac{I_1}{U_1} + R_2 \frac{I_2}{U_2} = k_{u1} + k_{u2} = k_u, \quad (4.9)$$

kde k_{u1} resp. k_{u2} označíme poměrné úbytky napětí v primárním resp. sekundárním vinutí. Vzhledem k malým hodnotám k_{u1} a k_{u2} lze bez újmy na přesnosti předpokládat $k_{u1} = k_{u2} = \frac{k_u}{2}$. Na primární straně je tedy napětí

$$U_1 \left(1 - \frac{k_u}{2} \right). \quad (4.10)$$

Má-li být na zátěži napětí U_2 , musí být na vinutí napětí naprázdno

$$U_2 \left(1 + \frac{k_u}{2} \right). \quad (4.11)$$

Pro počty závitů tedy platí:

$$N_1 = U_1 \tilde{N} \left(1 - \frac{k_u}{2} \right) \quad \text{resp.} \quad N_2 = U_2 \tilde{N} \left(1 + \frac{k_u}{2} \right). \quad (4.12)$$

Poměrný úbytek napětí je opět konstanta, kterou udává výrobce příslušného jádra (např. pro předpokládané jádro EI je podle [13] $k_u = 0,13$). Zajímavější však je se podívat na původ této hodnoty, tj. odhadnout odpor vinutí příslušného transformátoru.

Pro odpor ve vodiči platí:

$$R = \frac{\rho l}{S}, \quad (4.13)$$

kde ρ je měrný odpor drátu, l je jeho délka a S průřez. Měrný odpor mědi je $\rho = 17,8 \text{ n}\Omega\text{m}$, délku vinutí lze přibližně odhadnout jako součin počtu závitů a délky jednoho závitu. Pro délku jednoho závitu můžeme udělat odhad:

$$o = 4\sqrt{Q + \varepsilon}, \quad (4.14)$$

kde hodnota ε v sobě odráží zvětšení obvodu "středního" závitu oproti obvodu jádra. Současně, dosadíme-li za průřez S do rovnice 4.13 výraz

$$S = \frac{\pi d^2}{4},$$

kde d je průměr vodiče, dostaneme:

$$R = \frac{\rho l}{\frac{\pi d^2}{4}}. \quad (4.15)$$

Jestliže vztahy 4.14 a 4.15 dosadíme do rovnice 4.9, získáme vzorec:

$$k_u = k_{u1} + k_{u2} = \frac{4\rho N_1 \sqrt{Q + \varepsilon}}{\frac{\pi d_1^2}{4}} \frac{I_1}{U_1} + \frac{4\rho N_2 \sqrt{Q + \varepsilon}}{\frac{\pi d_2^2}{4}} \frac{I_2}{U_2}. \quad (4.16)$$

Výraz $\frac{N_1}{U_1}$ resp. $\frac{N_2}{U_2}$ je roven počtu závitů na volt \tilde{N} . Dosadíme-li do rovnice 4.16 za průměr d_1 resp. d_2 výraz podle prvního nebo druhého postupu návrhu:

$$d \doteq 0,7\sqrt{I}$$

a rovnici upravíme, získáme konečný vzorec:

$$k_u = \frac{4\rho\tilde{N}\sqrt{Q+\varepsilon}I_1}{\frac{\pi}{4}0,7^2I_1} + \frac{4\rho\tilde{N}\sqrt{Q+\varepsilon}I_2}{\frac{\pi}{4}0,7^2I_2} \doteq 20\rho\tilde{N}\sqrt{Q+\varepsilon}. \quad (4.17)$$

Jedinou neznámou je hodnota ε , kterou je třeba odhadnout podle výšky jádra a předpokládaných vrstev vinutí.

Průměr vodiče

Proud ve vodiči je součinem proudové hustoty a průřezu vodiče:

$$I = \sigma S = \sigma \frac{\pi d^2}{4}, \quad (4.18)$$

kde S je průřez vodiče a d jeho průměr. Pro měděné vinutí malých transformátorů se proudová hustota pohybuje okolo do hodnoty $\sigma = 3 \frac{A}{mm^2}$ v závislosti na povoleném oteplení transformátoru. Ze vztahu 4.18 plyne vztah pro průměr drátu v prvním i druhém postupu:

$$d = \sqrt{\frac{4}{\pi\sigma}I} \quad (4.19)$$

Proudová hustota je u druhého postupu zadaná, po jejím dosazení vyjde vztah pro průměr vodiče: $d = 0,7\sqrt{I}$, což odpovídá prvnímu i druhému postupu návrhu.

Magnetická indukce

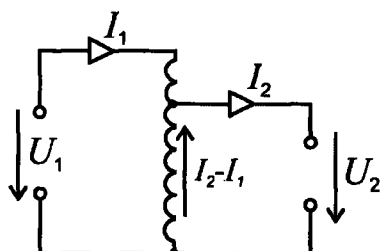
Vzorec pro magnetickou indukci, který je uveden v postupu pro SPŠE podle [2] je typickým příkladem empirického vzorce. Podle mého názoru vznikl tak, že na známé hodnoty byla nafiťována funkce, která jim nejlépe odpovídá. Bohužel autor postupu neuvedl, z kterých hodnot vycházel. Konstanty 1,1 a 0,14, které jsou ve vztahu uvedeny, mají velký vliv na výsledný počet závitů, nelze však určit, jak přesné jsou.

Kapitola 5

Speciální typy transformátorů

5.1 Autotransformátory

Autotransformátor je transformátor, který má jen jedno vinutí - primární a sekundární strana jsou galvanicky spojeny. U snižovacího transformátoru je primární napětí připojeno k celému počtu závitů, sekundární napětí se odvádí z odbočky na menším počtu závitů (viz obrázek 5.1). Zvyšovací transformátor je zapojen opačně. Z obrázku je zřejmé, že část vinutí transformátoru, z které se odebírá sekundární napětí, protéká pouze proud $I_2 - I_1$.



Obrázek 5.1: Snižovací autotransformátor

Výhodou autotransformátoru je jeho nižší cena - na jeho výrobu lze použít vodič menšího průřezu, kterého navíc stačí menší množství. Úspora je tím větší, čím menší je rozdíl mezi primárním a sekundárním napětím. Autotransformátor lze dimenzovat pouze na tzv. *typový výkon* P_t , tj. výkon odpovídající rozdílu napětí $|U_2 - U_1|$:

$$P_t = I_1 \cdot |U_2 - U_1| = \frac{P}{U_1} |U_2 - U_1|, \quad (5.1)$$

kde $P = U_1 I_1 = U_2 I_2$ je jmenovitý výkon transformátoru. Po úpravě (pro snižovací transformátor):

$$P_t = P \left(1 - \frac{U_2}{U_1} \right) \quad (5.2)$$

Nevýhodou autotransformátoru je galvanické spojení primární a sekundární strany, proto ho nelze použít jako izolační transformátor mezi sítí vysokého a nízkého napětí. Naopak se často využívá ve velkých rozvodných sítích na zvyšování napětí na konci vedení, při vzájemném spojování sítí s různým napětím, na plynulou regulaci napětí na tramvajové lokomotivě apod.

5.2 Impulzní transformátory

Obvykle přenášejí pravoúhlé impulzy jednosměrné nebo obousměrné polarity. Požadavek na přenos nezkraslených impulzů výrazně ovlivňuje výběr materiálů transformátoru a jeho konstrukci. Nejvhodnější tvarem jader impulzních transformátorů jsou feritové toroidy, i když se používají i feritová hrníčková jádra a toroidy z kovových pásků. Kvůli požadavku na nezkraslený přenos bývá vinutí pouze jednovrstvé. Důsledkem toho je jednak robustnější jádro a jednak horší možnost ochlazování transformátoru.

Impulzní transformátory slouží například k přizpůsobení spotřebičů k tranzistorům, ke galvanickému oddělení částí zařízení (např. u spínaných zdrojů), případně ke změně polarity impulzů.

5.3 Měřicí transformátory

Měřicí transformátory umožňují měřit napětí resp. proud bez nutnosti přímo zařazovat měřicí přístroj do příslušného obvodu. Hlavním motivem k jejich používání je nutnost přizpůsobit hodnotu měřeného napětí resp. proudu rozsahu měřicího přístroje.

Používají se mimo jiné například pro měření na vedení vysokého napětí.

Měřicí transformátor napětí

Jde o transformátor o malém výkonu ve stavu naprázdno. Díky velmi malým rozptylovým tokům má malé napětí nakrátko a malé ztráty naprázdno. Tím je zajištěna velká přesnost měření.

Vzhledem k tomu, že jde o velmi tvrdý zdroj, nesmí se zkratovat. Z tohoto důvodu se primární i sekundární obvod jistí pojistkami.

Měřicí transformátor proudu

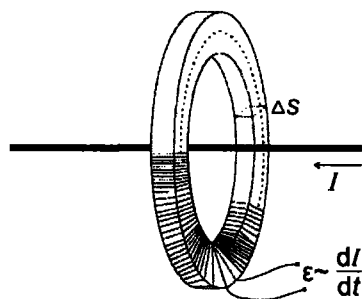
Jde o transformátor ve stavu nakrátko. Primární vinutí je tvořeno několika závitů silného vodiče. Připojí se do série s měřeným obvodem, na sekundární vinutí se připojí ampérmetr. Vzhledem k tomu, že sekundární vinutí je zkratováno, nelze do něj zařadit pojistky a není možné ho rozpojit.

Rogowského cívka

V dnešní době se princip Rogowského cívky používá místo transformátoru proudu. Zařadila jsem ji proto mezi měřicí transformátory. Umožňuje měřit velikost proudu pouze z jeho magnetických vlastností, bez nutnosti zařazovat měřicí přístroj do obvodu.

Předpokládejme cívku o velkém počtu závitů navinutou na jádře malého průřezu ΔS tvaru smyčky (viz obr. 5.2)¹. Plocha každého závitu bude přibližně kolmá ke směru křivky v daném místě. Jestliže tuto smyčku vložíme do magnetického pole,

¹Obvykle jsou Rogowského cívky navinuty bez jádra, tj. se vzduchovým jádrem. Pro jednoduchost budeme i nadále hovořit o cívce navinuté na jádře, permeabilitu jádra však budeme uvažovat μ_0 . Podrobněji je o vzduchových jádrech pojednáno v kapitole 3.6.



Obrázek 5.2: Rogowského cívka

bude se v cívce indukovat napětí. Okamžitá hodnota magnetického toku tekoucího každým závitem je $\Delta\Phi = \vec{B} \cdot \Delta\vec{S}$, kde $\Delta\vec{S} = \vec{n} \cdot \Delta S$ je orientovaná plocha. Celkový magnetický tok tekoucí cívkou bude součtem těchto "diferenciálních" toků přes všechny závity:

$$\Phi = z_0 \Delta S \oint_l \vec{B} \cdot \vec{n} dl = z_0 \Delta S \oint_l \vec{B} \cdot d\vec{l}, \quad (5.3)$$

kde z_0 je počet závitů na jednotku délky. Pokud se bude magnetické pole měnit, bude se v cívce indukovat elektromotorické napětí

$$\varepsilon_F(t) = -z_0 \Delta S \frac{d}{dt} \oint_l \vec{B} \cdot d\vec{l} \quad (5.4)$$

Dosadíme-li do předchozí rovnice z Ampérova zákona 2.5, dostaneme, že:

$$\varepsilon_F(t) = -z_0 \mu_0 \Delta S \frac{di}{dt}. \quad (5.5)$$

Napětí indukované v Rogowského cívce obepínající vodič je tedy přímo úměrné derivaci proudu, která tímto vodičem teče.

Předpokládejme konkrétně proud harmonického průběhu

$$i = I_{max} \sin \omega t.$$

Indukované napětí potom bude mít okamžitou hodnotu:

$$\varepsilon_F(t) = -z_0 \mu_0 \Delta S I_{max} \omega \cos \omega t = U_{max} \cos \omega t. \quad (5.6)$$

Efektivní hodnota napětí indukovaného v cívce je tedy:

$$U_{ef} = z_0 \mu_0 \Delta S \omega I_{ef}, \quad (5.7)$$

kde $I_{ef} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$ je efektivní hodnota proudu tekoucího vodičem.

5.4 Pecové transformátory

Slouží na napájení obloukových pecí převážně v metalurgii. Pro pecové transformátory je typický velký sekundární proud při relativně nízkém sekundárním napětí. Současně mají pecové transformátory velké napětí nakrátko.

Do této skupiny patří i tzv. indukční pece - transformátory, jejichž sekundární vinutí je tvořeno nevodivým (např. keramickým) žlabem s taveninou. Model indukční pece viz kapitola 7.

5.5 Ruhmkorffův transformátor

Ruhmkorffův transformátor (v [6] zvaný též Ruhmkorffův induktor) je transformátor s otevřeným jádrem. Primární cívka má malý počet závitů z tlustého drátu, sekundární cívka obsahuje velký počet závitů z tenkého drátu. Primární cívka se napájí stejnosměrným napětím, které je přerušováno přerušovačem (obvykle Wagnerovým kladívkem). Při přerušení proudu do primární cívky se v sekundární cívce díky velké změně magnetického toku indukuje velké napětí, při zapnutí proudu probíhá změna pomaleji, proto indukované napětí je menší. Konce obou cívek jsou vyvedeny na jiskřiště (obvykle nesymetrické - hrot a destička). Rozdíl potenciálů při vybití se vyrovná jiskrou, při nabíjení je však rozdíl příliš malý k výboji. Ruhmkorffův transformátor tedy slouží jako zdroj vysokého stejnosměrného pulzního napětí.

Wagnerovo kladívko je elektromagneticky rozkmitávané zařízení, pracující na stejném principu jako kladívko ve zvonku. Při zapnutí proudu se kladívko přitáhne k železnému jádru transformátoru, čímž se proud přeruší, kladívko se vrátí zpět do výchozí polohy a celý cyklus se opakuje.

Pro školní účely je Ruhmkorffův transformátor navíc vybaven kondenzátorem připojeným paralelně ke kontaktům přerušovače, jehož úkolem je zabránit jiskření mezi kontakty přerušovače.

Na stejném principu jako Ruhmkorffův transformátor pracuje také zapalovací cívka v automobilech (viz kapitola 8).

5.6 Sběračové transformátory

Jde o transformátory, které mají téměř plynulou možnost řízení napětí. Sekundární vinutí bývá jen v jedné vrstvě, napětí je z něj vyvedeno pomocí pohyblivých kontaktů, které kloužou po obnažených závitech. Často se používají sběračové auto-transformátory - například jako děliče napětí, které umožňují řízení napětí sekundární strany z nuly až na primární napětí. Sběračové transformátory se využívají například k plynulému řízení rychlosti otáček motorů apod.

5.7 Svařovací transformátory

Ke svařování materiálů je třeba poměrně malé napětí, ale velký proud. Svařovací transformátory proto transformují napětí ze síťového (230 V nebo 400 V) na napětí naprázdno okolo 60 V. Svařovací transformátor je měkký zdroj, sekundární napětí při zatížení tedy výrazně klesá. Sekundární proud dosahuje hodnot desítek či stovek ampér, obvykle ho lze regulovat. Pokus demonstrující princip svařovacího transformátoru je v kapitole 7.

5.8 Teslův transformátor

Teslův transformátor je zařízení sloužící jako zdroj vysokého napětí vysoké frekvence. Je tvořen dvěma souosými vzduchovými cívkami, ke své práci využívá rezonanci ve dvou kmitavých obvodech. První obvod, primární, obsahuje kromě primární cívky s několika málo závitů silného drátu také kondenzátor (Leydenskou láhev).

Druhý obvod, sekundární, je tvořen sekundární cívkou s mnoha závitů tenkého drátu, která má kromě indukčnosti také nezanedbatelnou vlastní kapacitu.

Na primární stranu transformátoru se přivádí vysoké napětí, které se vybíjí na jiskřišti. Kondenzátor je tak periodicky nabíjen a vybíjen, v primárním obvodu tedy vznikají pravidelné tlumené kmity vysoké frekvence. V sekundárním obvodu se tak indukuje vysoké napětí velké frekvence, které se ještě násobí díky rezonanci, jsou-li oba kmitavé obvody naladěny na stejnou frekvenci.

Na pólech sekundární cívky lze pozorovat trsovité výboje. Sekundární cívka je současně otevřený kmitavý obvod, slouží proto také jako anténa, ze které se šíří elektromagnetické vlnění vysoké frekvence. Důsledkem je například možnost výboje v zářivce vzdálené několik desítek centimetrů apod.

Pro školní účely se jako zdroj vysokého napětí do primárního obvodu používá Ruhmkorffův transformátor, ladění se provádí změnou počtu závitů sekundární cívky.

Vynálezce Teslova transformátoru, N. Tesla, zamýšlel použít ho k přenosu elektrické energie na velké vzdálenosti. Vzhledem k velkým technologickým problémům se však tento princip přenosu nevyužívá.

Kapitola 6

Dostupné učebnice

Na českém trhu je dostupných několik učebnic a studijních textů, které pojednávají o transformátoru. V následujícím textu je vždy stručně shrnut obsah příslušné kapitoly, učebnice či článku, následuje můj názor. První část se věnuje učebnici pro gymnázia, následují odborné učebnice pro průmyslové školy, nakonec jsou zařazena některá vysokoškolská skripta a další dostupné učebnice a studijní materiály.

6.1 Učebnice pro gymnázia

Pro gymnázia je v dnešní době široce dostupná jen učebnice [1]. Autoři v učebnici pomocí vztahu

$$u_1 = -N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \text{resp.} \quad u_2 = -N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (6.1)$$

pro napětí na primární cívce s N_1 závity resp. sekundární cívce s N_2 závity odvozují tzv. *rovnici transformátoru* pro poměr efektivních hodnot indukovaných napětí

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = k. \quad (6.2)$$

Za rovnicí obsahuje kapitola informaci, že při odvození nebyly uvažovány ztráty v jádře a ve vinutí.

Následuje zmínka o účinnosti malých a velkých transformátorů a odvození transformace proudů z rovnosti výkonu a příkonu (při zanedbatelných ztrátách):

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} \quad (6.3)$$

Autoři učebnice zmiňují i rozdělení transformátorů a jednofázové a trojfázové a velmi krátce komentují možnosti jejich využití.

Na konci kapitoly jsou tři otázky:

- na výpočet sekundárního napětí transformátoru ze zadaných počtů závitů obou cívek a primárního napětí
- na výpočet proudu sekundárním vinutím, zadán je příkon a účinnost transformátoru a sekundární napětí
- na výpočet transformačního poměru ze zadaného primárního napětí a primárního a sekundárního proudu.

Poslední úloze se věnují detailněji, proto je dále odcitována.

V textu postrádám hlubší diskuzi transformátoru naprázdno a při zatížení, zcela chybí informace o transformátoru nakrátko a skutečném (neideálním) transformátoru. Podle mého názoru by bylo vhodné zmínit se i o ztrátách v jádře a ve vinutí a podrobněji rozepsat využití transformátoru v praxi.

Zaujalo mě, že kapitola je zařazena v části "Střídavý proud v energetice", přestože o energetických (tj. hlavně silových trojfázových) transformátorech autoři píšou pouze v jednom odstavci.

První dvě úlohy na konci kapitoly jsou jen na mechanické dosazení do odvozeného vzorce, případně (v druhém případě), na kombinaci několika vzorců.

6.1.1 Slovní úloha

"Určete transformační poměr transformátoru, který připojíme na síťové napětí a ze sekundárního vinutí chceme odebírat napětí 10 V a proud 2 A. Jaký proud prochází primárním vinutím transformátoru? Ztráty neuvažujeme, sekundární vinutí je zatíženo rezistorem." ([1], str.214)

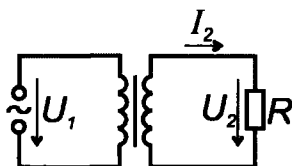
Na první pohled úloha vypadá podobně jako předchozí příklady - stačí jen dosadit do příslušného vzorce. Předpokládám, že autoři očekávali toto řešení:

Podle rovnice 6.2 je transformační poměr roven poměru sekundárního a primárního napětí, proto po zaokrouhlení je $k \doteq 4,3 \cdot 10^{-2}$.

Podle rovnice 6.3 se proudy transformují v obráceném poměru než napětí. Proto je po zaokrouhlení $I_1 \doteq 90$ mA.

Tyto výsledky odpovídají výsledkům uvedeným na konci učebnice.

Rozhodla jsem se však úloze věnovat hlouběji. Schéma zapojení obvodu podle zadání je na obr. 6.1.



Obrázek 6.1: schéma zapojení

Parametry takového transformátoru, pokud bychom nezanedbali ztráty, jsou spočteny v tabulce 4.1 (kap. 4). Jestliže zanedbáme ztráty, potom:

- Příkon, stejně jako výkon transformátoru je $P_1 = 20$ VA
- Minimální průřez jádra je $Q = \sqrt{P_1} \doteq 4,5$ cm²
- Počet závitů primární a sekundární cívky je v závislosti na různém způsobu výpočtu 2185 a 105 závitů (při použití prvního postupu uvedeného v kapitole 4) resp. 1942 a 93 (při použití druhého postupu z kapitoly 4)¹

¹Výsledné počty závitů se u jednotlivých postupů liší z důvodu používání empirických konstant, které v sobě částečně ztráty zahrnují a tedy je nelze zcela odstranit. Podrobnější diskuze postupů je v kapitole 4.3. Třetí postup zde není uveden, protože pro malé transformátory se příliš nehodí.

- Minimální průměr drátu primárního vinutí je $d_1 = 0,2$ mm
- Minimální průměr drátu sekundárního vinutí je $d_2 = 1$ mm

Z porovnání výsledných hodnot při výpočtu se zanedbáním a nezanedbáním ztrát je vidět, že jestliže zanedbáme ztráty, bude mít primární cívka výsledného transformátoru až o několik desítek procent více závitů. Podle mého názoru je tento rozdíl příliš velký na to, abychom si mohli dovolit ztráty zanedbat. Současně rezistor, který zatěžuje sekundární stranu má odpor přibližně 5Ω (za předpokladu, že transformátor je konstruován pro hodnoty uvedené v zadání úlohy), což v žádném případě neodpovídá (skutečnému) transformátoru ve stavu naprázdno, pro který platí rovnice 6.2.

Proto si myslím, že hodnoty v úloze nejsou vhodně zvoleny. Samozřejmě lze vyrobit transformátor zadaných parametrů, který bude mít zanedbatelné ztráty (například s větším jmenovitým výkonem). Nemyslím si však, že by návrh takového transformátoru byl cílem dané úlohy.

Úloha by naopak mohla být vhodná pro studenty SPŠE jako problémová: "Navrhnete síťový transformátor, který bude mít při sekundárním napětí 10 V a proudu 2 A zanedbatelné ztráty. Jaký bude primární proud?" Pro studenty SPŠE současně připadá v úvahu i návrh parametrů jádra takového transformátoru.

6.2 Učebnice pro průmyslové školy

V dnešní době neexistuje široce rozšířená odborná učebnice pro průmyslové školy se zaměřením na elektroniku a elektrotechniku, ve které by bylo téma transformátoru zpracované. Podle informací od vyučujících průmyslových škol se studenti věnují hlavně následujícím tématům: Princip transformátoru, ideální transformátor, náhradní schéma; výkonová bilance, ztráty a účinnost; transformátor naprázdno, při zatížení a nakrátko; hodinové úhly trojfázového transformátoru, nejpoužívanější spojení transformátorů; paralelní chod transformátorů; přechodové jevy; speciální typy transformátorů (autotransformátor, přístrojové, rozptylové a sběračové, svařovací, měřicí); konstrukce vysokonapěťových a nízkonapěťových vinutí; tlumivky. Ve cvičeních se studenti učí transformátor počítat, na některých školách v rámci praktické výuky navrhují konstrukci vlastního silového transformátoru.

Při výuce školy vycházejí z vysokoškolských skript, praktických příruček pro elektrikáře ([13], [15]), z velmi staré slovenské učebnice [2], případně z vlastních studijních textů ([3], [4]).

V učebnici Elektrické stroje a přístroje ([2]) je transformátoru věnováno přibližně 150 stran, na kterých je velmi podrobně rozepsán ideální i skutečný transformátor, chod transformátoru nakrátko, naprázdno i při zatížení; trojfázový transformátor, některé speciální transformátory, atd. Jedna kapitola je věnována i tlumivkám.

Velký důraz je kladen na náhradní schémata, která jsou ale velmi dobře vysvětlena. Na několika místech autor používá při odvození vztahů derivace, což může činit potíže většině dnešních středoškoláků. Myslím si, že učebnice je dobře srozumitelná a velice čtivá, bohužel v dnešní době v podstatě nedostupná. Jako její nevýhodu vidím zastarání některých uvedených údajů a bariéru pro některé dnešní středoškoláky způsobenou slovenským jazykem. Podle mého názoru by bylo vhodné ji aktualizovat a znovu vydat, pokud možno v češtině.

[3] je elektronický studijní materiál určený pro předmět Elektrické stroje na VOŠ a SPŠE Fr. Křižíka, Praha. Autor v textu odvozuje princip transformátoru od ideálního po skutečný. Základem výkladu jsou náhradní schémata. Dále jsou v textu zmíněna různá dělení transformátorů a výpočet účinnosti transformátorů včetně několika energetických aplikací. Na konci materiálu je několik úloh pro samostatné opakování studentů.

Podle mého názoru je text srozumitelný pro pokročilejší středoškolské studenty a to včetně studentů gymnázií, kteří nejsou zvyklí s náhradními schématy pracovat. Jako jeho nevýhodu vidím několik drobných faktických chyb. Myslím si, že by v textu mělo být více konkrétních příkladů a aplikací.

Elektronický studijní text Střední elektrotechnické školy Ostrava [4] obsahuje kromě kapitoly o transformátoru také teorii točivých elektrických strojů (dynama, synchronní a asynchronní motory a další), vysokonapěťových přístrojů atd. Kapitola o transformátoru obsahuje kromě poměrně stručného vysvětlení principu transformátoru také náhradní schémata a fázorové diagramy transformátoru nakrátko, naprázdno a při zatížení. Autor se zabývá i konstrukcí transformátoru, magnetickým obvodem a specifiky trojfázového transformátoru.

Text je podle mého názoru velmi dobře čitelný, studentům gymnázií budou nejspíše dělat problémy náhradní schémata, u kterých chybí podrobnější vysvětlení. Celý text obsahuje velké množství zajímavých informací a odkazů do praxe, je doplněn mnoha obrázky. Za drobnou vadu bych označila nedodržování typografických pravidel a nepřehlednost některých schémat.

6.3 Učebnice a skripta pro vysoké školy

Z množství různých vysokoškolských skript, učebnic a elektronických studijních textů jsem vybrala pouze některé. Jedna skupina skript a učebnic se transformátoru věnuje spíše okrajově v rámci tématu kvazistacionárního elektrického pole, druhá skupina, skripta zaměřená na elektroniku, dávají větší důraz i na konstrukci transformátoru a magnetický obvod.

- [5] V dnešní době běžně používaná vysokoškolská učebnice elektřiny a magnetismu. Základní vztahy transformátoru jsou zde odvozeny z obecných vzorců platných pro několik indukčně vázaných smyček.

Podle mého názoru je příslušná kapitola srozumitelná i pro pokročilejší středoškolské studenty, kterým může nabídnout větší nadhled nad problematikou transformátoru.

- [6] Více než čtyřicet let stará skripta pro úvodní kurz fyziky na vysokých školách a pro studenty studující při zaměstnání. Kapitola o transformátoru obsahuje odvození vztahu pro transformátor naprázdno, nakrátko i pro zatížený transformátor. Autoři se zabývají i konstrukcí transformátorů, rozdílem mezi jednofázovým a třífázovým transformátorem a ztrátami při přenosu elektrické energie.

Myslím si, že kapitola je v dnešní době kromě studentů nižších ročníků vysokých škol srozumitelná i pro pokročilé středoškolské studenty.

Potěšilo mě, že autoři zmiňují i několik speciálních typů transformátoru včetně Ruhmkorffova induktoru. Z tohoto důvodu je podle mého názoru kapitola vhodná i jako doplnění ve vyšších ročnících VŠ a k opakování ke státním zkouškám.

- [7] V relativně starých skriptech Elektřiny a magnetismu autoři věnují transformátoru šest stránek. Velký důraz je kladen na vzájemné fázové posuny sekundárních a primárních proudů v jednotlivých režimech práce.
- [25] Studijní text k přednášce Elektrické stroje na Technické univerzitě Liberec. Část o transformátoru obsahuje základní teorii jednofázového i trojfázového transformátoru, náhradní schémata, účinnost transformátoru a další. Text je podle mého názoru psán srozumitelně i pro pokročilejší středoškolské studenty.
- [26] Text k přednášce Elektrické stroje a pohony na Univerzitě Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem. Materiál obsahuje základní informace o transformátoru (princip transformátoru, konstrukce, magnetický obvod, náhradní schéma, trojfázový transformátor, speciální transformátory a další), ale bohužel zde chybí podrobnější vysvětlení. Podle mého názoru je materiál nesrozumitelný pro kohokoliv bez předchozích hlubších znalostí.
- [27] Prezentace k přednášce Elektrické stroje na Univerzitě Palackého Liberec. Kromě základní teorie jednofázového transformátoru (ideální, skutečný transformátor, náhradní schéma, stavy nakrátko a naprázdno, účinnost, konstrukce transformátoru) a příkladů zapojení trojfázového transformátoru obsahuje také informace o transformátoru proudu a výpočet síťového transformátoru.

6.4 Další studijní materiály

Středoškolským studentům je dostupné velké množství dalších materiálů, které nelze jednoduše zařadit mezi učebnice či skripta pro daný stupeň škol. Velká část těchto materiálů je dostupná na internetu. Zařadila jsem sem i některé zahraniční studijní texty:

- [8] Americká učebnice určená pro základní kurz vysokých škol popisuje transformátor naprázdno, transformátor při zatížení, odvozuje i rovnice pro transformaci napětí a proudu u ideálního transformátoru. V praktických aplikacích uvádí i využití transformátoru k impedančnímu přizpůsobení. Na rozdíl od českých učebnic dává větší důraz na účinník. Zaujala mě motivace v úvodu kapitoly, která obsahuje nejen úvahu o energetických ztrátách při přenosu elektřiny při nízkém napětí včetně výpočtu, ale i poznámku o bezpečnosti jako jednom z důvodů, proč se v domácnostech nepoužívá vysoké napětí.
Myslím si, že kapitola je bez problémů srozumitelná pro středoškolské studenty, kterým může poskytnout jiný pohled na danou problematiku.
- [13] Příručka je dle autora určena pro projektanty, konstruktéry a studenty odborných škol. Tomuto zaměření také odpovídá její odbornost a hloubka. Zaujala mě velkým množstvím konkrétních technických údajů. Přes značný

počet obrázků, grafů a tabulek je podle mého názoru přístupná jen pro velmi malé procento středoškoláků.

- [14] V knize určené zájemcům o elektrotechniku je transformátoru věnována jedna kapitola. Autor se zaměřuje hlavně na praktické aspekty - návrh a konstrukci transformátoru. Princip transformátoru není popsán příliš do hloubky, ale přesto pro praktickou konstrukci dostatečně. Výklad je doplněn velkým množstvím konkrétních příkladů a obrázků. Kniha je podle mého názoru srozumitelná pro všechny středoškoláky, k jejímu většímu využití při výuce však podle mého názoru brání nedostatečná hloubka výkladu.
- [15] Kniha o elektronice obsahuje v kapitole o transformátoru kromě odvození transformační rovnice například také diskuzi ztrát v jádře včetně konkrétních příkladů. Zaujala mě zmínka o využití transformátoru k impedančnímu přizpůsobení zdrojů signálu. V dnešní době je tato publikace k dostání i v novějším vydání.
- [16] Poměrně stará učebnice elektrotechniky se věnuje hlavně technickým aspektům - konstrukci transformátoru, spojování vinutí trojfázových transformátorů, účinnost transformátorů a další. Text je doplněn mnoha obrázky a schémata. Nevýhodou publikace je zastaralost některých uvedených údajů.
- [23] Anglická učebnice poskytuje na deseti stranách teorii transformátoru na úrovni přibližně mezi naší střední a vysokou školou. Text je velice srozumitelný, je doplněn mnoha obrázky a grafy. Jako velkou nevýhodu však vidím odlišné značení některých základních veličin.
- [29] Poměrně rozsáhlý text na anglické mutaci encyklopedie Wikipedia obsahuje kromě základního principu transformátoru i například historickou poznámku o konstrukci prvního transformátoru, náhradní schémata, konstrukci různých typů transformátoru apod. Na dalších stránkách jsou potom obsaženy informace o jádrech transformátorů včetně ztrát a materiálů používaných na jádra, hysterezní smyčka a další.

Podle mého názoru je text velmi srozumitelný pro studenty SŠ, obsahuje poměrně málo vzorců. Jako jeho nevýhodu vidím odlišné značení některých fyzikálních veličin. Mohu ho doporučit jako doplňkový zdroj informací, které nejsou dostupné v češtině.

- [31] Tento text je součástí volně dostupné "encyklopedie", jejímž autorem je Dr. J.B. Calvert z University of Denver. Kromě základního principu ideálního transformátoru dává autor velký důraz na teorii jádra a magnetického pole transformátoru. Současně text obsahuje i konstrukci transformátoru, některá praktická využití a odstavec o autotransformátoru. Zaujalo mě, že autor uvádí i jeden postup návrhu transformátoru. Bohužel je dle mého názoru text místy špatně srozumitelný.

6.5 Sbírký pokusů

- [9] Velmi stará a dnes již velmi těžko dostupná příručka ke školní soupravě rozkladného transformátoru, která obsahuje velké množství pokusů se soupra-

vou. Pokusy jsou popsány srozumitelně včetně vysvětlení, jsou doplněny množstvím obrázků. Z této příručky jsem čerpala některé pokusy do brožury Hrátky s transformátorem i do kapitoly 7 této práce.

- [10] Další z velmi starých a tedy dnes v podstatě nedostupných sbírek pokusů s rozkladným transformátorem.
- [11] a [12] Velmi dobře známá skripta s množstvím kvalitně popsaných pokusů. Kapitoly o transformátoru obsahují více než desítku základních pokusů demonstrujících princip transformátoru i některé aplikace. Z těchto skript jsem se inspirovala některými pokusy do brožury Hrátky s transformátorem, čerpala jsem z nich i při psaní kapitoly 7 této práce.
- [22] Sbíрка více než desítky jednoduchých pokusů z elektřiny a magnetismu (výroba elektromagnetu, elektrolýza, výroba elektroskopu...) s důrazem na vlastní tvořivou práci čtenářů. Podle mého názoru je sbírka určena především dětem ve věku našich žáků základních škol, postrádám v ní podrobnější vysvětlení jednotlivých pokusů.

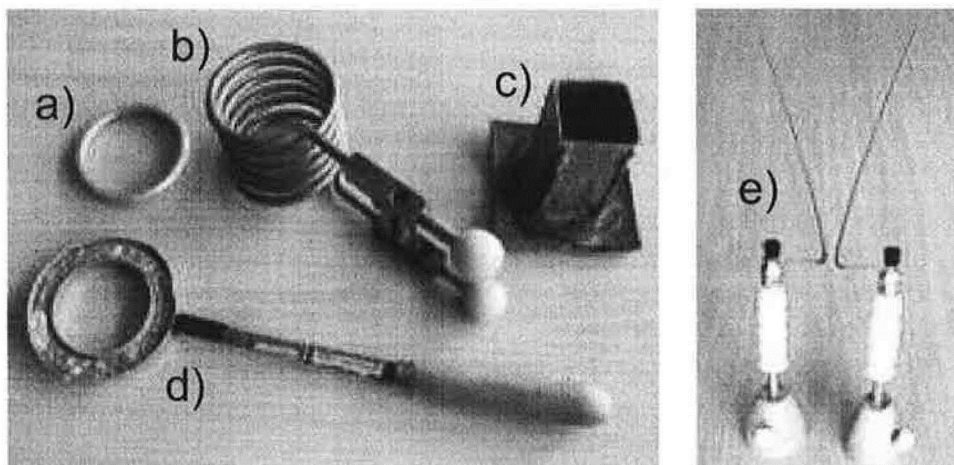
Kapitola 7

Několik pokusů na závěr

Do této kapitoly jsem se rozhodla shrnout některé pokusy, které z důvodu bezpečnosti nebylo vhodné zařadit do brožury Hrátky s transformátorem. Vzhledem k jejich atraktivitě si myslím, že by je bylo škoda zcela vypustit, nikdy by je však neměl student provádět sám bez dozoru vyučujícího. U všech uvedených pokusů je velmi důležité dbát na bezpečnost!

Experimenty jsem čerpala převážně z sbírky pokusů ke školnímu rozkladnému transformátoru [9] a skript [10], [11] a [12]. Současně jsem se pokusila každý pokus doplnit dalšími informacemi či náměty.

Pokusy doporučuji provádět se školní soupravou rozkladného transformátoru. Některé pomůcky potřebné k pokusům jsou na obrázku 7.1. Není-li souprava rozkladného transformátoru k dispozici, lze samozřejmě pomůcky nahradit jinými.



Obrázek 7.1: Některé pomůcky potřebné k pokusům: a) hliníkový kroužek, b) cívka 6 závitů, c) papírový obal na jádro d) žlábek s cínem, e) růžková bleskojistka v Holtzových svorkách

7.1 Pokusy s velkým proudem

Bodové svařování

Pomůcky: lístkové jádro U a I, upínací zařízení, cívky 600 a 6 závitů, vodiče, dvě žiletky nebo jiné tenké plíšky kovu, papírový obal na jádro

Postup: Obě cívky nasadíme na uzavřené jádro a upneme do upínacího zařízení. Primární cívku 600 závitů připojíme na síťové napětí 230 V. Pod vinutí sekundární cívky nasadíme na jádro papírový obal. Mezi její vývody upevníme do svářecích kleští žiletky nebo jiné tenké plíšky. Po zapojení proudu kleště stiskneme, dokud se u hrotů kleští plíšky neroztaví. V tu chvíli stiskneme kleště silně, dokud se plíšky nespojí.

Výsledky: Transformátor je ve stavu nakrátko, takže sekundární cívkou protéká velký proud, díky kterému se plíšky roztaví.

Něco navíc: Problémovou úlohou pro některé studenty může být, proč se nejvíce zahřívají plíšky a ne jiné místo v obvodu.

Pokus je demonstrací principu svařovacího transformátoru (viz kapitola 5).

Tavení cínu - indukční pec

Pomůcky: lístkové jádro U a I, cívka 600 závitů, vodiče, upínací zařízení, deska z nehořlavého materiálu, kruhový závit - žlábek s cínem

Poznámka: místo cínu lze použít i například olovo nebo žlábek naplnit vodou.

Postup: Jako primární cívku použijeme cívku 600 závitů, místo sekundární cívky nasadíme na jádro U žlábek s cínem. Jádro U uzavřeme krátkým jádrem I a upneme do upínacího zařízení. Primární cívku připojíme na síťové napětí 230 V.

Výsledky: Vzhledem k tomu, že žlábek slouží jako jeden uzavřený závit, je transformátor ve stavu nakrátko. Protože sekundárním obvodem protéká značný proud, roztaví se cín Jouleovým teplem.

Něco navíc: Tento princip se v praxi používá k tavení rud v hutnictví, teplota se reguluje primárním proudem. Viz také kapitola 5.

Pokusu lze využít při výuce kalorimetrické rovnice - studenti mohou odhadnout, jaký je výkon takovéto pece a jak dlouho by trvalo ohřátí daného množství vody. V našem pokusu se 10 ml vody ohřálo do varu za 30 s. Výkon naší pece tedy je přibližně 110 W. Při srovnání s běžnou varnou konvicí vychází, že v této indukční peci by se litr vody ohříval 50 min, tj. asi osmnáctkrát déle.

Žhavení kovů

Pomůcky: lístkové jádro U a I, cívka 600 závitů, cívka 6 závitů, vodiče, upínací zařízení, železný hřebík nebo silný drát (průměr cca 2 mm) délky 9 cm, obal na jádro z tvrdého papíru

Postup: Obě cívky nasadíme na jádro U, uzavřeme jádrem I a upneme do upínacího zařízení. Mezi jádro a sekundární cívku se šesti závity vložíme papírový obal, aby nevznikl zkrat. Svorčky sekundární cívky spojíme hřebíkem nebo drátem. Primární cívku 600 závitů připojíme na síťové napětí 230 V.

Výsledky: Transformátor je ve stavu nakrátko, sekundární cívku protéká značný proud, díky kterému se zahřívá hřebíkaž do oranžového žáru, může se i přepálit.

Něco navíc: Podle [10] se v praxi tímto způsobem rozžhavují nýty.

Vzhledem k tomu, že při tavení hřebíku je velmi dobře vidět posun barvy z tmavé přes červenou až po světle oranžovou, lze se studenty diskutovat o měření teploty taveniny v hutnictví, o principu pyrometru apod. Pro studenty vyšších ročníků lze také odkázat na Wiennův posunovací zákon.

Na stejném principu pracují elektrické pojistky v některých zařízeních. Otázkou pro studenty může být vysvětlit jejich princip a objasnit, proč se pojistka přepálí jako první.

7.2 Pokusy s vysokým napětím

Růžková bleskojistka

Pomůcky: Lístkové jádro U a I, cívky 12 000 závitů a 600 závitů, upínací zařízení, dvě Holtzovy svorčky, vodiče, dva dráty růžkové bleskojistky, svíčka, zápalky

Postup: Při pokusu je velmi třeba dbát na bezpečnost - vodiče vedoucí k bleskojistce by měly být co nejkratší, nesmí se dotýkat stolu ani jiného zařízení. Vyučující by měl mít bleskojistku blíže k sobě, transformátor dál od sebe.

Primární cívku transformátoru je cívka 600 závitů, sekundární cívka má 12 000 závitů. Obě cívky nasadíme na uzavřené jádro a upneme do upínacího zařízení. Růžkovou bleskojistku tvoří dva silné zahnuté dráty. Upevníme je svisle do Holtzových svorek, vzdálenost mezi dráty necháme přibližně 0,5 cm. Na Holtzovy svorčky připojíme sekundární vinutí transformátoru. Primární cívku připojíme k síťovému napětí 230 V.

Pod dráty bleskojistky postavíme zapálenou svíčku - vznikne výboj, který postupuje po drátech směrem nahoru až se přetrhne.

Poté upevníme dráty bleskojistky vodorovně. Vzniklý výboj zůstává na místě a nepřetrhne se.

Výsledky: Po připojení primární cívky ke zdroji napětí se v sekundární cívce indukuje velké napětí. Jestliže k bleskojistce přiblížíme svíčku, vzduch nad plamenem se ionizuje - stane se vodivým. V tu chvíli vznikne mezi dráty bleskojistky výboj, který je díky tepelnému proudění vynášen vzhůru, dokud jeho délka není příliš velká vzhledem k napětí. Pokud umístíme dráty bleskojistky vodorovně, není výboj unášen vzhůru, setrvává proto na místě.

Poznámka: Pokud růžky bleskojistky k sobě přiblížíme na menší vzdálenost (přibližně 1 mm) vznikne výboj bez nutnosti ionizace vzduchu.

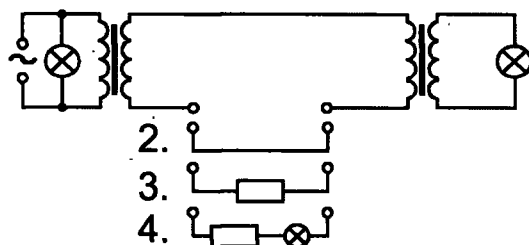
Něco navíc: V praxi je jeden růžek bleskojistky upevněn k venkovnímu elektrickému vedení, druhý konec je uzemněn. Vzdálenost mezi růžky je tak velká, že při síťovém napětí výboj nevznikne. Pokud ale do vedení udeří blesk, vznikne ve vodičích vysokonapěťový impuls, v bleskojistce se zapálí výboj a náboj se odvede do země. Mezi nevýhody takového způsobu odvedení vysokonapěťového impulsu patří například velká závislost elektrické pevnosti na počasí. Dnes se tento typ bleskojistky používá spíše výjimečně, podle [4] bývá využíván spíše jen jako záložní ochrana k jinému typu bleskojistky. Některé firmy ji nabízí také jako přepěťovou ochranu pro tramvajové troleje.

7.3 Přenosová soustava

Pomůcky: dvě cívky 600 závitů, dvě cívky 12000 závitů, dvě jádra U, dvě jádra I, dvě upínací zařízení, vodiče, rezistor 10 k Ω /10 W, dvě žárovky 230 V/100 W v objímkách, malá žárovka (například 3,5 V/0,2 A) v objímce

Postup:

1. Připojíme-li žárovku 230 V na síťové napětí, žárovka se rozsvítí. Pokud k ní připojíme do série rezistor 10 k Ω , jas se výrazně sníží.
2. Zapojíme dva transformátory - jeden nahoru s primární cívkou 600 závitů, sekundární 12 000 závitů, druhý dolů. Oba transformátory nasadíme na uzavřené jádro a upneme do upínacího zařízení, poté je spojíme vodiči simulujícími dálkové vedení vysokého napětí. Primární cívku zvyšovacího transformátoru připojíme na síťové napětí, paralelně zapojíme žárovku 230 V. Jako zátěž sekundární cívky druhého transformátoru připojíme druhou žárovku 230 V (schéma zapojení viz obrázek 7.2).
POZOR, mezi oběma transformátory je vysoké napětí!
Po připojení napětí budou obě žárovky svítit přibližně stejně.
3. Mezi oba transformátory připojíme sériově mezi Holtzovy svorky rezistor 10 k Ω , simulující odpor vodičů dálkového vedení. Po připojení napětí budou obě žárovky svítit přibližně stejně. Pokud místo rezistoru použijeme reostat, můžeme současně ukázat, že jas obou žárovek závisí jen velmi málo na odporu vedení. Tj. na ztráty na vedení jeho délka jen malý vliv.
4. Mezi oba transformátory připojíme sériově k rezistoru mezi Holtzovy svorky malou žárovku. Po připojení napětí se tato žárovka nerozsvítí.



Obrázek 7.2: Model přenosové soustavy

Výsledky:

1. Rezistor simuluje odpor vedení. Pokud bychom vedli elektřinu při nízkém napětí, vznikají ve vedení velké ztráty, takže se žárovka rozsvítí slaběji.
2. V transformátorech vznikají pouze poměrně malé ztráty, jas žárovek se proto v podstatě nezmění.
3. Přestože mezi transformátory vložíme rezistor simulující odpor vedení, žárovky svítí přibližně stejně - ve vedení vysokého napětí vznikají mnohem menší ztráty.
4. Malá žárovka ve vedení vysokého napětí nesvítí, procházející proud je příliš malý.

Něco navíc: Podle mého názoru je téma přenosové soustavy vhodné pro laboratorní práci, při které mohou studenti odhadnout ztráty na vedení při nízkém a vysokém napětí, odhadnuté hodnoty pak lze ověřit pokusem. Pokusy z bezpečnostních důvodů však musí provádět učitel.

Příklad takového výpočtu je uveden v brožuře Hrátky s transformátorem.

7.4 Rozptyl magnetického pole

Pomůcky: Cívky 1200 závitů a 600 závitů, žárovka 3,5 V/0,2 A, dlouhé a krátké lístkové jádro I, vodiče, zdroj napětí

Postup: Na krátké jádro nasadíme cívku 1200 závitů jako primární, na ni sekundární cívku 600 závitů. Krátké jádro prodloužíme ještě dlouhým tak, aby byly plechy jader rovnoběžné, nekřížily se. Primární cívku připojíme ke zdroji napětí cca 16 V, na sekundární zapojíme žárovku. Žárovka jasně svítí. Poté sekundární cívku postupně oddalujeme.

Výsledky: Při oddalování svítí žárovka stále méně, až úplně zhasne. Magnetický tok vytvořený primární cívkou jde částečně jádrem, částečně se rozptyluje vzduchem. Při oddalování se zmenšuje tok sekundární cívkou, kterou tedy teče menší proud.

7.5 Jak se cívky navzájem ovlivňují?

Thompsonův pokus

Pomůcky: Cívka 600 závitů, dlouhé jádro I, tři hliníkové kroužky (dva celistvé, jeden naříznutý), vodiče, zdroj střídavého napětí 42 V

Postup: Na jádro nasadíme cívku a na ni celistvý kroužek. Cívku, primární vinutí transformátoru, nasadíme na jádro a připojíme ke zdroji napětí. Po zapnutí proudu se kroužek vznesse cca 1 cm nad cívku.

Jestliže na jádro nasadíme dva celistvé kroužky, tj. dvě sekundární vinutí, bude oběma téct proud stejného směru - budou se přitahovat. V důsledku toho budou oba kroužky levitovat výš než jeden samotný.

Výsledky: V sekundárním vinutí transformátoru - v hliníkovém kroužku - se indukuje napětí a protéká jím proud. Tento proud má opačný směr než proud v primární cívce, pokusem tak lze ukázat, že vodiče s proudy tekoucími opačnými směry se odpuzují. Pokud místo celistvého kroužku nasuneme na jádro naříznutý, nic se nestane, protože se v něm sice indukuje napětí, ale neteče v něm proud.

Poznámka: Místo druhého kroužku lze použít i žlábek s cínem nebo vodou. Pokud ho stlačíme dolů, začne se silně zahřívát.

Něco navíc: Pokus je vhodný k diskuzi o levitaci, případně k vyřešení otázky, jaké by musely být parametry transformátoru, aby to uzvedlo člověka apod. Místo dlouhého jádra I lze použít i dvě jádra U.

Stínění cívkou nakrátko

Pomůcky: Dvě cívky se 300, cívka se 600 závitů, dlouhé a krátké lístkové jádro, vodiče, zdroj střídavého napětí 16 V, žárovka 3,5 V/0,2 A

Postup: Obě cívky se 300 závitů postavíme na cívku se 600 závitů a provlékneme jimi krátké jádro prodloužené dlouhým (je třeba, aby plechy jader byly rovnoběžné a nekřížily se). Spodní cívku se 600 závitů připojíme na zdroj střídavého napětí. K horní cívce, sloužící jako sekundární, připojíme žárovku. Po zapnutí proudu žárovka jasně svítí. Prostřední cívku zkratujeme vodičem - žárovka zhasne.

Výsledky: Dokud není střední cívka zkratována, jde o uspořádání transformátoru na otevřeném jádře. Po jejím zkratování jí začne protékat značný proud, jehož důsledkem je sekundární magnetický tok opačného směru. Tok, který zbude po odečtení toků vzniklých od obou cívek, nestačí k indukování dostatečně velkého proudu v sekundární cívce.

Stínění vodivou deskou

Pomůcky: Dvě lístková jádra I, cívky se 300 a 1200 závitů, měděná či jiná vodivá deska, žárovka 3,5 V/0,2 A, zdroj střídavého napětí přibližně 16 V

Postup: Cívky nasuneme na jádra a položíme je vodorovně (aby osy cívek byly v jedné přímce). Mezi jádry by měla být mezera cca 1 cm. Jako primární cívku použijeme cívku 300 závitů, připojíme ji ke zdroji napětí. K cívce 1200 závitů připojíme žárovku. Zapneme proud a upravíme vzdálenost jader tak, aby žárovka jasně svítila. Mezi jádra cívek vložíme desku.

Výsledky: Po vložení desky žárovka téměř zhasne. Měděná deska funguje jako stínění magnetického toku, který se uzavře přes ni.

Něco navíc: Je-li k dispozici několik desek různé tloušťky, lze ukázat závislost jasu žárovky na tloušťce stínění. Stejně tak je dobře vidět postupné klesání jasu při zasouvání desky.

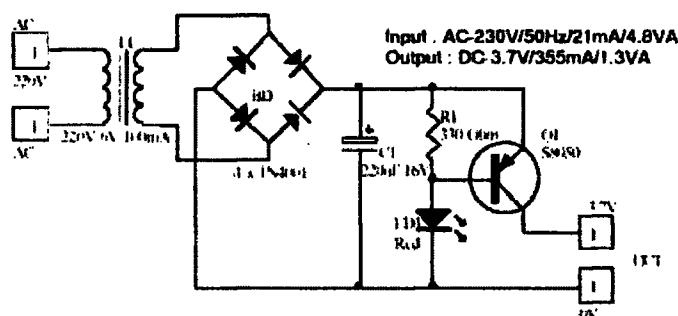
Kapitola 8

Transformátor okolo nás

8.1 Nabíječka mobilních telefonů

Účelem nabíječek je jednak transformace napětí ze síťového střídavého 230 V na nižší, jednak také jeho usměrnění. Výstupní (stejnosemné) napětí bývá podle typu telefonu v jednotkách voltů, výstupní proud je obvykle 300-700 mA.

V dnešní době se používají dva typy nabíječek - transformátorové a se spínaným zdrojem.



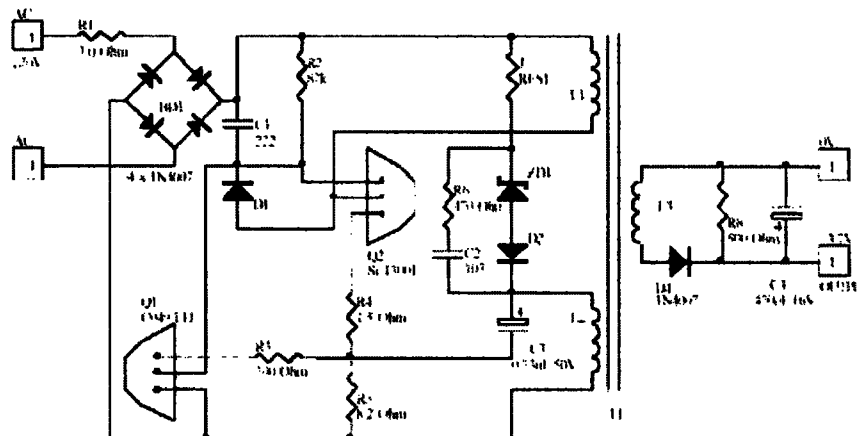
Obrázek 8.1: Nabíječka transformátorového typu

První, starší typ, obsahuje běžný transformátor na listkovém jádře. Příklad zapojení viz obr. 8.1. Počet závitů cívek se řídí vstupním a výstupním napětím, za transformátorem je zařazen dvoucestný usměrňovač a vyhlazovací kondenzátor.

Tyto nabíječky se používají pouze pro starší přístroje. Mezi jejich velké nevýhody patří například velká hmotnost a neschopnost si poradit s jiným než předepsaným napětím a frekvencí sítě (což způsobuje problémy jednak při kolísání napětí, jednak při použití v síti s jinými jmenovitými hodnotami).

Ve většině dnešních nabíječek je spínaný zdroj. Příklad schématu zapojení takového nabíječky je na obrázku 8.2¹. Na rozdíl od "transformátorových" nabíječek, spínaný zdroj obsahuje pouze malý transformátor s feritovým jádrem pracující na vysoké frekvenci (desítky až stovky kHz), je proto mnohem lehčí.

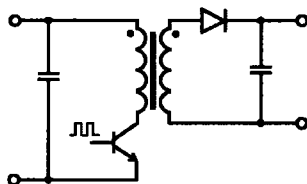
¹Obě schémata pochází ze amerického zdroje [32], proto se liší značení rezistorů a tranzistorů od naší normy.



Obrázek 8.2: Nabíječka se spínaným zdrojem

Princip spínaného zdroje

Základní princip spínaného zdroje je vidět na obrázku 8.3. Na bázi tranzistoru je přiváděno napětí pravoúhlého průběhu vysoké frekvence, díky čemuž pracuje tranzistor jako spínač. Je-li sepnutý, napájí se primární vinutí transformátoru z kondenzátoru. Jsou-li obě vinutí vinuta souhlasně jako na uvedeném obrázku (směr vinutí značí poloha teček u vinutí), "přelévá" se současně energie i do sekundárního vinutí a odtud dále do usměrňovací diody a filtračního kondenzátoru. Díky tomu, že proud do primární cívkky je s vysokou frekvencí přerušován, napětí indukované na sekundární cívkce se snadno usměrňuje a vyhlazuje.



Obrázek 8.3: Princip spínaného zdroje

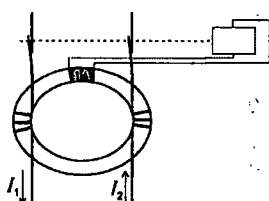
Kromě tohoto typu spínaného zdroje existují i spínané zdroje s nesouhlasně zapojeným vinutím.

Ve schématu nabíječky 8.2 je vlevo nahoře dvoucestný usměrňovač. Primární cívkka transformátoru je nakreslena nahoře, spíná ji tranzistor Q2 nakreslený uprostřed schématu. Úkolem druhého tranzistoru a spodní cívkky je "vyrobit" napětí pravoúhlého průběhu, které je přiváděno na bázi spínacího tranzistoru. Za sekundární cívkou je zapojena usměrňovací dioda a vyhlazovací kondenzátor.

Na podobném principu jako nabíječky mobilních telefonů pracují i nabíječky akumulátorových článků, transformátory ve stolních lampičkách, nabíječky notebooků, PC zdroje a další.

8.2 Proudový chránič

Proudový chránič je zařízení, jehož úkolem je přerušit elektrický obvod v případě, že do zátěže teče větší proud než ze zátěže vytéká. Princip ochrany proudovým chráničem je tedy založen na prvním Kirchhoffovu zákonu - součet proudů vstupujících do uzlu je stejný jako součet proudů z uzlu vystupujících.



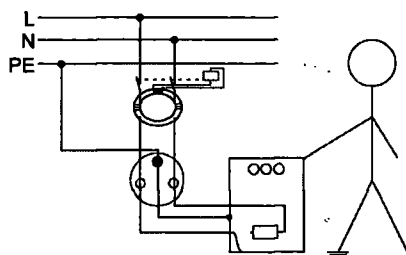
Obrázek 8.4: Princip proudového chrániče

Princip proudového chrániče je vidět na obrázku 8.4. Mezi jeho hlavní součásti patří diferenciální transformátor na toroidním jádře a citlivé elektromagnetické relé. Proud v pracovních vodičích protéká primárním vinutím transformátoru (na obrázku dvě cívky na stranách). Za normálních okolností je výsledné magnetické pole od obou cívek rovno nule, v sekundárním vinutí (na obrázku cívka nahoře) se neindukuje žádné napětí. Jestliže však vznikne rozdíl mezi okamžitou hodnotou proudu v jedné a druhé cívce (tzv. reziduální proud), indukuje se v sekundárním vinutí transformátoru napětí, které je přivedeno na relé. To způsobí rozpojení kontaktů.

Jeden ze základních požadavků na diferenciální transformátor proudového chrániče je jeho velká přesnost - obvykle je konstruován, aby vypnul při reziduálním proudu větším než 15 mA. V pracovních vodičích přitom mohou téct proudy až desítky ampér. Obvyklá doba vypnutí při vzniku poruchy je do 0,2 s. Primární vinutí má několik závitů tlustého drátu, má tedy velmi malý odpor. Sekundární vinutí je naopak tvořeno velkým počtem závitů, aby se v něm indukovalo dostatečně velké napětí.

Z principu proudového chrániče je vidět, že nevypne při nadproudu způsobeném například zkratem. Jeho funkce je pouze doplňková, nemůže nahradit jističe či pojistky. Používá se hlavně v prostorech s větším nebezpečím - koupelny, bazény apod.

V trojfázové soustavě jsou jako pracovní označovány fázový a střední vodič, ochranný vodič prochází mimo proudový chránič.



Obrázek 8.5: Příklad ochrany proudovým chráničem

Typický příklad, ve kterém by měl proudový chránič zareagovat, je vidět na obrázku 8.5. Pokud například v pračce vyteče voda a vodivě spojí fázový vodič s

kostrou, je ohrožen každý, kdo se pračky dotkne. Přes tuto osobu se proud uzemní, proud ve středním vodiči bude menší než proud ve fázovém vodiči a proudový chránič vypne.

8.3 Transformátor v mikrovlnné troubě

Hlavním úkolem transformátoru v mikrovlnné troubě je napájení magnetronu. Potřebné výstupní napětí je jednak několik kV, které se přivádí na anodu a jednak cca 3 V, kterým se napájí katoda. Magnetron - vysokofrekvenční elektronka - využívá magnetického pole silných feritových magnetů a dutinových rezonátorů ke generování elektromagnetického záření o frekvenci přibližně 2,4 GHz.

Pokud na mikrovlnné troubě nenastavíme maximální výkon, není magnetron napájen trvale. Transformátor má proto před primárním vinutím elektronicky řízený spínač, kterým se reguluje proud do transformátoru.

8.4 Transformátor v napájecích obvodech obrazovky

Různé obvody v televizní obrazovce či CRT monitoru mají různé požadavky na napájecí napětí. Například žhavicí napětí katody je několik volt, elektrony jsou urychlovány napětím řádu jednotek či desítek kV, na vychylování svazku se používá napětí několik desítek či stovek volt atd. Příslušný napájecí zdroj proto obsahuje transformátor s velkým počtem odboček či několik transformátorů. Obvykle se pro jednotlivé typy TV či monitorů dodává "transformátor", u kterého jsou kromě připravených odboček zapojeny i usměrňovací obvody.

8.5 Zapalovací cívka

Účelem zapalovací cívky je vyrobit vysokonapěťový impuls, který je převeden na zapalovací svíčku - jiskřiště. Princip je velmi podobný principu Ruhmkorffova transformátoru (viz kapitola 5). Na primární cívku s malým počtem závitů se přivede stejnosměrné napětí několik volt, proud procházející primární cívkou je přerušován přerušovačem. Sekundární cívka má velký počet závitů, díky přerušování proudu se na ní indukují vysoké napětí (desítky kV).

Jedním z nejdůležitějších požadavků na celé zapalování v automobilu je, aby se jiskra zapálila při každém cyklu motoru což se stává problematické hlavně u vyšších otáček. Je proto nezbytné, aby jednak přerušovač přerušoval dostatečně rychle, ale také, aby se cívka stačila dostatečně rychle "nabít" (při vyšších otáčkách nejde o ustálený stav cívky, ale spíš o přechodový jev) a dostatečně rychle "vybit".

Důsledkem těchto požadavků je primární cívka o poměrně velké indukčnosti, ale malém odporu. Často se proto před primární cívku ještě přidává předřadný rezistor, který zvýší odpor cívky aniž by zvýšil její indukčnost. Podle článku [33] se u automobilů Škoda pohybuje indukčnost primární cívky okolo hodnoty 10 mH, odpor primárního vinutí bývá jednotky Ω .

Vzhledem k tomu, že k indukování vysokonapěťového pulzu dochází při vybíjení primární cívky, není nezbytný až tak velký poměr závitů. Podle [33] je obvyklý poměr 1:80, výjimečně 1:100, konkrétně se používají transformátory s 120-400 závitů

na primární straně a 25 000 na sekundární straně. Indukovaný napěťový impuls na sekundární cívce je potom několik kV.

Podle typu automobilu se liší typ přerušovače - kromě přerušování kontakty podobně jako v Ruhmkorffově transformátoru se používá také elektronické zapalování, kde přerušování řídí tranzistor, případně se využívá i Hallova jevu.

Průběh zapalování, tj. časový sled "nabíjení" a "vybíjení" cívky, přerušování přerušovačem atd. dnes obvykle řídí počítač.

Kapitola 9

Slovníček nejběžnějších pojmů

S transformátorem souvisí několik sousloví, která se běžně používají a která i já používám v tomto textu. Ráda bych je zde proto stručně shrnula a objasnila. U každého pojmu je také odkaz na kapitolu (příp. kapitoly), kde se pojmu věnuji podrobně.

- **Hysterezní smyčka** (3.2) je grafické vyjádření závislosti magnetizace (resp. magnetické indukce) na intenzitě magnetického pole.
- **Ideální transformátor** (2.1.4, 2.3.2) je transformátor, u něhož zanedbáme všechny ztráty a rozptyl magnetického toku. Podle analogické definice má ideální transformátor těsnou vazbu.
- **Magnetický odpor** (3.3) je analogický elektrickému odporu v elektrickém obvodu. Vyjadřuje, jak velký odpor klade dané prostředí magnetickému toku.
- **Jmenovité napětí** je napětí uvedené na štítku transformátoru.
- **Jmenovitý proud** je proud, který odpovídá jmenovitému výkonu transformátoru (výkonu uvedenému na štítku).
- **Jádro UI, EI, MI a další** (3.5) Jednotlivé tvary jader se často označují písmeny abecedy, která připomínají.
- **Jádrový a plášťový transformátor** (2.3.6) Liší se vzájemnou polohou mezi cívkami a jádrem. Jádro plášťového transformátoru obklopuje cívky ze čtyř stran. Jeho výhodou je těsnější vazba, nevýhodou větší spotřeba materiálu.
- **Magnetizační reaktance** (2.3.4) je fiktivní reaktance v náhradním schématu. Zahrnuje v sobě vliv konečné magnetické vodivosti skutečného transformátoru.
- **Náhradní schéma transformátoru** (2.3) Způsob kreslení transformátoru, ve kterém jsou zahrnuty i jednotlivé typy ztrát. Slouží k podrobnějšímu popisu dějů v transformátoru, používá se hlavně na průmyslových školách.
- **Napětí nakrátko** (2.3.4) je napětí, které vstupním vinutím transformátoru protlačí jmenovitý proud, jestliže je sekundární vinutí zkratováno.

- **Plné a lístkové jádro (3.6)** jsou pojmy, které mají význam spíše ve školní fyzice než v praxi. Lístkové jádro je složeno z mnoha tenkých plechů, plné jádro je z jednoho kusu železa. Kromě železných jader se často používají také jádra z dalších materiálů.
- **Proud nakrátko (2.3.4)** je proud, který protéká transformátorem, jestliže je sekundární vinutí zkratováno a primární vinutí napájíme jmenovitým napětím.
- **Transformátor ve stavu nakrátko (2.3.4)** je transformátor, který má zkratované sekundární vinutí.
- **Transformátor ve stavu naprázdno (2.3.4)** je transformátor, ve kterém sekundárním vinutím neteče žádný proud.
- **Účinitel $\cos \varphi$** je fázový posun mezi napětím a proudem ve střídavém obvodu.
- **Vířivé proudy (3.4)** jsou v transformátoru velmi nežádoucím jevem, je to jeden ze zdrojů ztrát v jádře. Kvůli jejich omezení se používají lístková nebo feritová jádra.
- **Zdánlivý a činný výkon.** Zdánlivý výkon je součin sekundárního proudu a napětí na sekundární cívce. Činný výkon je práce vykonaná transformátorem za jednotku času, tj. zdánlivý výkon násobený účinitkem. Na štítku transformátoru se udává zdánlivý výkon.

Kapitola 10

Závěr

V rámci mé diplomové práce byl vytvořen studijní text o transformátoru. Diplomová práce má dvě části - brožuru Hrátky s transformátorem a písemnou část. V písemné části je nejdříve shrnuta teorie transformátoru a transformátorového jádra včetně návrhu transformátoru, poté následuje stručné shrnutí studijních materiálů, které se problematice transformátoru věnují. V druhé polovině práce se věnuji transformátorům se speciálními požadavky, některým demonstračním pokusům s transformátorem a několika aplikacím transformátoru v běžném životě.

Brožura obsahuje více než desítku pokusů s elektromagnetickou indukcí a transformátorem, je určena pro všechny zájemce o danou problematiku, převážně z řad studentů středních škol. Vzhledem ke své relativní nenáročnosti je však vhodná i pro laiky. Tato brožura je součástí vzdělávacího programu ČEZ, a.s., Svět energie.

Využití písemné části diplomové práce je několik. Studenti závěrečných ročníků VŠ ji mohou využít pro opakování ke státním závěrečným zkouškám, učitelé z praxe v ní mohou nalézt inspiraci a praktické aplikace do výuky.

Pro mě osobně bylo velkým přínosem diplomové práce zopakování a mnohem hlubší pochopení dotčených témat. Zajímavé pro mě bylo seznámení s technickými detaily výroby a konstrukce transformátoru, protože s tím jsem dosud neměla možnost se setkat. Předpokládám, že některé části diplomové práce využiji při své učitelské práci jako zdroj praktických příkladů a technických aplikací.

Existuje samozřejmě mnoho možností, jak diplomovou práci vylepšit. Osobně bych ráda dále pracovala na podrobnějším zpracování dalších aplikací transformátoru v běžném životě. Podle mých zkušeností je v tomto ohledu v dostupné literatuře velká mezera. Ráda bych se také podívala do provozu, kde se transformátory vyrábí. Další možností vylepšení je dotažení některých známých a běžně používaných demonstračních pokusů dál, než se mi zatím povedlo.

Literatura

- [1] Lepil, O., Šedivý, P.: Fyzika pro gymnázia, Elektřina a magnetismus. Prometheus, Praha, 1995
- [2] Mravec, R.: Elektrické stroje a přístroje I. Alfa, Bratislava, 1975
- [3] Koniček, V.: Elektrické stroje. [online]. [cit.26.3. 2007].
URL: <<http://spse.asnmnet.cz/09studium/sps-vos.es/transformatory.pdf>>
- [4] Vavříňák, P.: Elektrické stroje a přístroje. [online]. [cit.3.8. 2007].
URL: <<http://sse-de.wz.cz/web%20ISS/studmat/el%20stroje%20a%20pristroje%20bez%20hesla.pdf>>
- [5] Sedlák, B., Štoll, I.: Elektřina a magnetismus. Academia, Praha, 2002
- [6] Fuka, J., Havelka, B.: Elektřina a magnetismus. SPN, Praha, 1965
- [7] Houdek, V.: Obecná fyzika II. - Elektřina a magnetismus. SPN, Praha, 1984
- [8] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.: Fyzika. Vysokoškolská učebnice obecné fyziky, část 3, VUTIUM, Brno, 2000
- [9] Fuka, J.: Rozkladný transformátor ve školní praxi. SPN, Praha, 1958
- [10] Hlavička, A.: Pokusy z elektřiny I. SPN, Praha, 1956
- [11] Svoboda, M. a kol.: Praktikum školních pokusů II.; Karolinum, Praha, 1996
- [12] Svoboda, M. a kol.: Praktikum školních pokusů III.; Karolinum, Praha, 1995
- [13] Faktor, Z.: Transformátory a cívky. BEN-technická literatura, Praha, 1999
- [14] Malina, V.: Poznáváme elektroniku II. KOPR, České Budějovice, 2002
- [15] Mařátko, J.: Elektronika. SNTL, Praha, 1987
- [16] Voženílek, L.: Kurs elektroniky. SNTL, Praha, 1988
- [17] Mikulčák, J. a kol.: Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro SŠ. SPN, Praha, 1970
- [18] Arendáš, M., Ručka, M.: Amatérské elektronické konstrukce a zapojení. KOPP, České Budějovice, 1997
- [19] Raab, M.: Materiály a člověk (Netradiční úvod do současné materiálové vědy). Encyklopedický dům, spol. s r.o., Praha, 1999

- [20] Žilavý, P.: Tajemství ochranného kolíku. In: Dílny Heuréky 2005. Prometheus, Praha, 2006
- [21] Krejčířík, A.: Napájecí zdroje I. BEN - technická literatura, Praha, 1998
- [22] Chultz, R.F.: Simple experiments on Magnetism and Elektriciry. .from Edison. Edison electric institute, Washington, D.C, 1990
- [23] Cantor, L.M. at al.: Electrical fields and devices. School council Longhborough. University of technology. Engineering science project; Macmillan education, London, 1975
- [24] Vanderkooy, J., Lowe, J.: A magnetic circuit demonstration. *American Journal of Physics*, June 1995, vol. 63, no. 6, s. 570-571
- [25] Konečná, E., Richter, A.: Elektrické stroje. učební text, Technická univerzita Liberec. Liberec, 2000. [online]. [cit.5.6.2007].
URL: <http://www.fm.vslib.cz/~kel/subjects/Common/El_Str1_h.pdf>
- [26] Šípál, J.: Elektrické stroje a pohony. studijní text k přednášce na Univezitě J.E.Purkyně, Ústí nad Labem. [online]. [cit.5.6.2007].
URL: <<http://sipal.utrv.ujep.cz/EsPo/EsPo.03.transf.pdf>>
- [27] Serafín, Č.: Transformátory. výukový materiál pro studenty univerzity Palackého Olomouc. [online]. [cit.5.6.2007].
<URL: http://www.kteiv.upol.cz/modules.php?name=Downloadsd_op=getitlid=74>
- [28] Mapa české distribuční sítě, ČEPS, a.s. [online]. [cit.17.4.2007]. URL:
<<http://www.ceps.cz/detail.asp?cepsmenu=3IDP=40PDM2=0PDM3=0PDM4=0>>
- [29] Wikipedia. [online]. [cit.16.5.2007]. URL: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Transformer>>
- [30] 3 Phase Transformers. [online]. [cit.5.6.2007].
URL: <<http://www.3phasepower.org/3phasetransformers.htm>>
- [31] Inside Transformers. [online]. [cit.5.6.2007].
URL: <<http://www.du.edu/~jcalvert/tech/transfor.htm>>
- [32] Atmaja, D. S.: Electronics cook book. [online]. [cit. 4.8.2007]. URL:
<<http://www.geocities.com/dsaproject/electronics/cook-book/cook-book.html>>
- [33] Čech, J.: Zapalování. [online]. [cit.5.6.2007]. URL:
<<http://skoda.panda.cz/clanek.php3?id=384>>