

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Nelineární model transformátoru**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2012/2013

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin ZAPALAČ**  
Osobní číslo: **E10B0678P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Nelineární model transformátoru**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište transformátory z hlediska principu funkce a konstrukce.
2. Zpracujte problematiku nelinearity magnetického obvodu transformátoru.
3. Odvoďte a vypočítejte pasivní parametry náhradního schématu pro vybrané transformátory.
4. Vytvořte model nelineárního magnetického obvodu jednofázového a trojfázového transformátoru v simulačním systému DYNAST.
5. Pro používané materiály zpracujte přehled magnetizačních charakteristik transformátorových plechů a vytvořte knihovnu transformátorů s respektováním nelinearity magnetického obvodu pro využití v simulačním systému DYNAST.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Kersting W. H.: Distribution system modeling and analysis. Boca Raton, CRC Press, 2007.
2. Bašta J. a kol.: Teorie elektrických strojů. SNTL, Praha, 1968.
3. Petrov G. N.: Elektrické stroje 1. Academia, Praha, 1980.
4. Mentlík V.: Elektrotechnické materiály. ZČU. Plzeň, 1995.
5. Mann H., Ševčenko M.: Snadné počítačové modelování dynamických soustav. ČVUT, Praha, 2008.


Vedoucí bakalářské práce: Ing. Vladislav Sifař  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2012

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2013

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



  
Prof. Ing. Václav Kús, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Anotace**

Předkládaná bakalářská práce se zabývá simulací dvou vybraných transformátorů, jednoho jednofázového a druhého třífázového. Transformátory jsou zpracovány v simulačním programu DYNAST v němž jsou respektovány nelinearity magnetických obvodů. Transformátory jsou nasimulovány pro všechny provozní stavy.

## **Klíčová slova**

Transformátor, magnetizační charakteristika, magnetický obvod, výpočet transformátoru, DYNAST, pasivní parametry, 3-f transformátor, 1-f transformátor, ...

**Abstract**

The present thesis deals with the simulation of two selected transformers, single-phase and three-phase. Transformers are processed in the simulation program DYNAST in which respect the non-linearity of magnetic circuits. Transformers are simulated for all operating conditions.

**Key words**

Transformer, magnetization characteristic, the magnetic circuit, calculating transformer, DYNAST, passive data, three-phase transformer, single-phase transformer, ...

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce. Dále prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této bakalářské, je legální.

V Plzni dne 6.6.2013

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Vladislavu Sít'ářovi za pomoc při modelování v simulačním systému DYNAST a cenné rady ohledně zpracování bakalářské práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>11</b>
<b>1 POPIS TRANSFORMÁTORU</b> .....	<b>13</b>
1.1 ÚČEL A UŽITÍ TRANSFORMÁTORŮ .....	13
1.2 PRINCIP ČINNOSTI TRANSFORMÁTORU .....	13
1.3 ODVOZENÍ INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ .....	14
1.4 NÁHRADNÍ SCHÉMA TRANSFORMÁTORU .....	15
1.5 ROZDĚLENÍ TRANSFORMÁTORŮ Z HLEDISKA PRINCIPU FUNKCE A KONSTRUKCE .....	16
1.5.1 Rozdělení dle počtu fází .....	16
1.5.2 Dle konstrukce magnetického obvodu .....	18
1.5.3 Dle principu funkce .....	19
1.5.4 Dle způsobu chlazení .....	20
1.6 ZAPOJENÍ VINUTÍ TROJFÁZOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ .....	21
1.6.1 Hodinové číslo .....	22
1.7 ZÁKLADNÍ ÚDAJE TRANSFORMÁTORU .....	23
<b>2 NELINEARITA MAGNETICKÉHO OBVODU</b> .....	<b>24</b>
2.1 MAGNETICKÉ JÁDRO .....	24
2.1.1 Slitiny železa .....	24
2.1.2 Elektrotechnické oceli .....	25
2.1.3 Amorfni kovové sloučeniny .....	26
2.1.4 Ferity .....	26
2.2 MAGNETISMUS .....	26
2.2.1 Dělení magnetických materiálů .....	27
2.2.2 Diamagnetismus .....	28
2.2.3 Paramagnetismus .....	28
2.2.4 Feromagnetismus .....	29
2.3 HYSTEREZNÍ KŘIVKA .....	31
2.3.1 Magneticky měkké materiály .....	32
2.3.2 Magneticky tvrdé materiály .....	32
<b>3 VÝPOČET PASIVNÍCH PARAMETRŮ TRANSFORMÁTORŮ</b> .....	<b>33</b>
3.1 ZÁKLADNÍ ÚDAJE VYBRANÝCH TRANSFORMÁTORŮ .....	33
3.2 VÝPOČET PASIVNÍCH PARAMETRŮ JEDNOFÁZOVÉHO TRANSFORMÁTORU 220/40 V .....	34
3.2.1 Výpočet příčných parametrů náhradního schématu .....	34
3.2.2 Výpočet podélných parametrů primární strany .....	35
3.2.3 Výpočet podélných parametrů sekundární strany .....	36
3.3 VÝPOČET PASIVNÍCH PARAMETRŮ TŘÍFÁZOVÉHO TRANSFORMÁTORU 35/0,42 kV .....	37
3.3.1 Výpočet příčných parametrů náhradního schématu .....	37
3.3.2 Výpočet podélných parametrů primární strany .....	39
3.3.3 Výpočet podélných parametrů sekundární strany .....	40
<b>4 MODEL Y TRANSFORMÁTORŮ V SYSTÉMU DYNAST</b> .....	<b>41</b>
4.1 ZPŮSOBY MODELOVÁNÍ TRANSFORMÁTORŮ .....	41
4.2 MODEL JEDNOFÁZOVÉHO TRANSFORMÁTORU 220/40 V .....	42
4.2.1 Transformátor při zatížení .....	43
4.2.2 Transformátor ve stavu na prázdno .....	44
4.2.3 Transformátor ve stavu na krátko .....	45
4.3 MODEL TROJFÁZOVÉHO TRANSFORMÁTORU 35/0,42 kV .....	46



4.3.1	<i>Transformátor při zatížení</i> .....	47
4.3.2	<i>Transformátor ve stavu na prázdko</i> .....	49
4.3.3	<i>Transformátor ve stavu na krátko</i> .....	51
<b>5</b>	<b>PŘEHLED MAGNETIZAČNÍCH CHARAKTERISTIK</b> .....	<b>53</b>
	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>55</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>56</b>
	<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>

## Úvod

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na transformátory a jejich simulaci v programu DYNAST. Celá bakalářská práce je rozdělena do pěti kapitol. První kapitola je věnována obecnému popisu a dělení transformátorů podle základních parametrů. Druhá kapitola se zabývá nelinearitou magnetického obvodu transformátoru, tedy hystereze. Ve třetí kapitole jsou uvedeny výpočty pasivních parametrů dvou konkrétních transformátorů. Ve čtvrté kapitole je zhodnocení namodelovaných výsledků pomocí programu DANAST. V poslední kapitole jsem uvedl příklady magnetizačních charakteristik vypsanych do tabulky, které je možno použít pro simulaci.

## Seznam symbolů a zkratek

$U$ .....	Napětí [V]
$I$ .....	Proud [A]
$N_1$ .....	Počet závitů primární strany transformátoru
$N_2$ .....	Počet závitů sekundární strany transformátoru
$U_i$ .....	Indukované napětí [V]
$\Phi$ .....	Magnetický tok [Wb]
$f$ .....	Frekvence [Hz]
$\Delta P_{Fe}$ .....	Ztráty v železe [W]
$R_{FE}$ .....	Odpor respektující ztráty v železe [ $\Omega$ ]
$I_{FE}$ .....	Proud na krytí ztrát v železe [A]
$X_\sigma$ .....	Rozptylová reaktance vedení [ $\Omega$ ]
$X_\mu$ .....	Magnetizační reaktance [ $\Omega$ ]
$I_\mu$ .....	Magnetizační proud [A]
$R$ .....	Odpor vinutí cívky [ $\Omega$ ]
$I_0$ .....	Proud příčnou větví transformátoru [A]
$G$ .....	Generátor střídavého napětí [V]
$L_1, L_2, L_3$ .....	Označení fázových vodičů
$I_K$ .....	Proud při stavu na krátko [A]
$I_N$ .....	Jmenovitý proud [A]
$B$ .....	Magnetická indukce [T]
$H$ .....	Intenzita magnetického pole [A/m]
$H_S$ .....	intenzita nasycení [A/m]
$H_C$ .....	koercitivní síla [A/m]
$B_r$ .....	remanentní indukce [T]
$M$ .....	Magnetizace
$\mu$ .....	Magnetický moment
$P_0$ .....	Ztráty na prázdno [W]
$P_K$ .....	Ztráty na krátko [W]
$i_0$ .....	Proud na prázdno [%]
$u_k$ .....	Napětí na krátko [%]
$S$ .....	Jmenovitý zdánlivý výkon [VA]

$\cos\varphi_0$ .....	Účíník na prázdno
$\cos\varphi_K$ .....	Účíník na krátko
$Z_K$ .....	Impedance vedení na krátko [ $\Omega$ ]
$L_{\sigma 1}$ .....	Rozptylová indukčnost [H]

# 1 Popis transformátoru

## 1.1 Účel a užití transformátorů

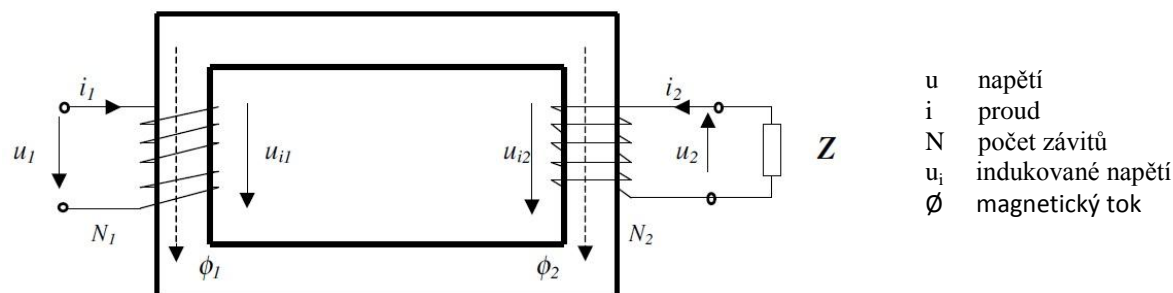
Transformátor je elektrický netočivý stroj, který umožňuje přenášet energii z jednoho magnetického obvodu do druhého magnetického obvodu pomocí magnetické indukce. Zjednodušeně řečeno je to měnič střídavého proudu, který se v elektrotechnických zařízeních používá velmi často.

Transformátory se zvyšuje i snižuje napětí, mění se počet fází a v některých případech se mění i kmitočet střídavého proudu.

Transformátory se používají pro přenos i rozvod elektrické energie a také pro přeměnu elektrického proudu v průmyslových zařízeních, galvanickému oddělení obvodů, spojích, radiotechnice, automatizačních a regulačních zařízeních atd. Jmenovité výkony a napětí transformátorů se proto pohybují ve velice širokých mezích od zlomků voltampéru a voltů až do stovek megavoltů a stovek kilovoltů. Na výkonu, napětí a účelu transformátoru závisí i jeho konstrukce. Transformátor se staví na kmitočet 50 Hz anebo i jiné kmitočty – to závisí na jejich použití [1].

## 1.2 Princip činnosti transformátoru

Princip činnosti transformátoru je založen na principu elektromagnetické indukce, tj. magnetický tok vybuzený primárním vynutím indukuje napětí ( $u_i$ ) v sekundárním vinutí. Magnetický tok vzniklý v primárním vedení je veden magnetickým obvodem do vedení sekundárního. [2]



Obr. 1.1 Princip transformátoru [3]

Z obr. 1.1 je patrné, že jakmile připojíme na primární stranu transformátoru střídavé sinusové napětí o okamžité hodnotě  $u_{i1}$  začne primárním vinutím protékat proud  $i_1$ . Vytvoří nám zde magnetický tok  $\Phi_1$  z toho nám plyne, že podle Faradayova indukčního zákona nám vznikne napětí  $u_{i2}$ . Jakmile zapojíme na sekundární stranu transformátoru zátěž  $Z$ , začne nám zde procházet proud  $i_2$ . [2]

### 1.3 Odvození indukovaného napětí

Následující odvození je dle publikace [2].

Vycházíme z Faradayova indukčního zákona:

$$u_i = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (101)$$

Vycházíme-li z předpokladu, že magnetický indukční tok se bude měnit sinusově, dostáváme tuto okamžitou hodnotu:

$$\Phi = \Phi_{max} \sin \omega t \quad (102)$$

Po dosazení do rovnice (101) dostáváme:

$$u_i = N \frac{d(\Phi_{max} \sin \omega t)}{dt} \quad (103)$$

Derivací rovnice (103) dostáváme:

$$u_i = N \omega \Phi_{max} \cos \omega t \quad (104)$$

V elektrotechnice se většinou pracuje s efektivními hodnotami. Víme, že maximální a efektivní hodnota u sinusových průběhů spolu souvisí přes  $\sqrt{2}$ . Funkce (1.4) má své maximum pro  $\cos \omega t = 1$  z tohoto můžeme psát tvar rovnice pro maximální hodnotu:

$$U_{max} = N \omega \Phi_{max} \quad (105)$$

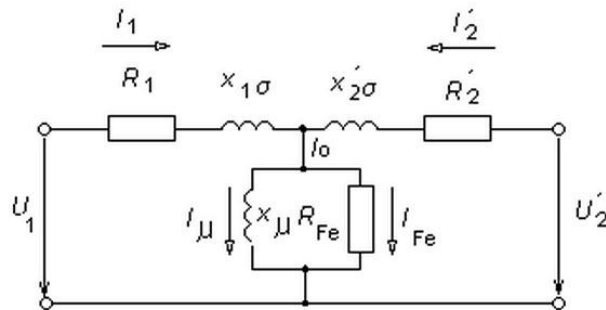
Vztah pro úhlovou frekvenci známe  $\omega=2\pi f$ . Po dosazení úhlové frekvence a přechodu na efektivní hodnoty dostáváme vzorec:

$$U_i = \sqrt{2}\pi f N \Phi \quad (106)$$

Po menší matematické úpravě to je vynásobením součinu  $\sqrt{2}\pi$  a dostáváme již známý vzorec:

$$U_i = 4,44 N f \Phi \quad (107)$$

#### 1.4 Náhradní schéma transformátoru



Obr. 1.2 Náhradní schéma transformátoru [2]

$U_1$	napájecí napětí primární strany transformátoru
$I_1$	primární proud
$R_1$	odpor vinutí primární cívky
$X_{1\sigma}$	rozptylová reaktance primárního vedení
$I_0$	proud příčnou větví
$I_\mu$	magnetizační proud
$X_\mu$	magnetizační reaktance
$I_{Fe}$	proud na krytí ztrát v železe
$R_{Fe}$	odpor zahrnující ztráty v železe
$X_{2\sigma}$	rozptylová reaktance sekundárního vnutí přepočtená na primární stranu
$R_2$	odpor vinutí sekundární cívky přepočtený na primární stranu
$I_2$	sekundární proud přepočtený na primární stranu
$U_2$	svorkové napětí sekundární strany přepočtené na primární stranu

Náhradní schéma na obr. 1.2 je korigované schéma, ve kterém je zahrnut i odpor  $R_{Fe}$  v příčné větvi, který reprezentuje ztráty v železe. Veličiny na sekundární straně jsou přepočítány na primární stranu z důvodu jednotkového převodu. Dále je zde proud  $I_\mu$ , který je proud magnetizační vytvářející hlavní tok,  $I_{Fe}$  reprezentuje ztráty v železe dle vztahu [2]:

$$\Delta P_{Fe} = I_{Fe}^2 R_{Fe} = \frac{U_i^2}{R_{Fe}} \quad (108)$$

Pro proudy zavedené v náhradním schématu platí:

$$\vec{I}_1 + \vec{I}_2 = \vec{I}_0, \vec{I}_0 = \vec{I}_{Fe} + \vec{I}_\mu$$

(109)

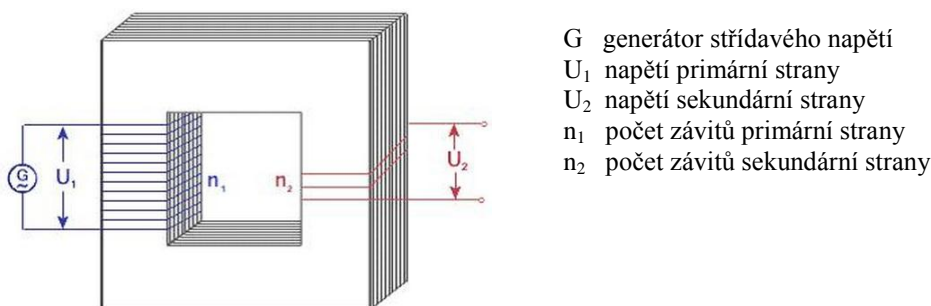
## 1.5 Rozdělení transformátorů z hlediska principu funkce a konstrukce

Dle publikace [4] se transformátory dělí následovně:

### 1.5.1 Rozdělení dle počtu fází

#### a) Jednofázový transformátor

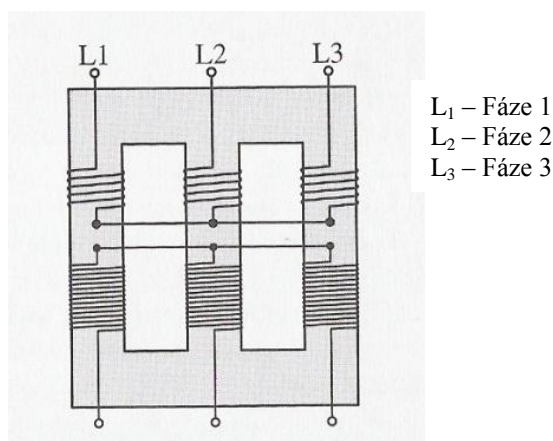
Jednofázové transformátory nacházejí největší uplatnění v oblastech malých výkonů (desítek až stovek voltampérů). Obvykle je jejich úkolem transformace na nižší napětí (též z důvodu ochrany před úrazem elektrickým proudem).



Obr. 1.3 Jednofázový transformátor [5]

#### b) Třífázový transformátor

Třífázové transformátory nacházejí užití především pro přenos a distribuci elektrické energie. Jejich výkon dosahuje hodnot až stovek megavoltampérů. Na obr. 1.4 je znázorněn třífázový transformátor s vinutím spojeným do hvězdy.



Obr. 1.4 třífázový transformátor [6]



### c) Vícefázové (Speciální) transformátory

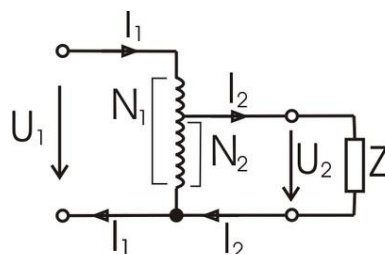
Následující rozdělení je dle publikace [17]:

Obsahují 2 a více fází mohou být např. šesti fázové, dvanácti fázové s různým počtem fází. Většinou slouží jako měniče počtu fází. Od klasických transformátorů se liší tvarem a uspořádáním magnetického obvodu, způsobem řízení napětí a některými specifickými pracovními podmínkami. Za speciální transformátory považujeme například:

- **Autotransformátor**

Autotransformátor má na magnetickém obvodu umístěno jedno vinutí kde jsou jeho vstupní a výstupní vinutí galvanicky propojena. Autotransformátor se používá při spouštění asynchronních motorů, jako děliče napětí v laboratořích pro plynulé řízení napětí. V energetice nacházejí uplatnění ve vedeních VVN při vzájemném propojení sítí s různým napětím. Jelikož tento typ transformátoru má menší počet závitů a část vinutí může mít menší průřez, nazývá se úsporným transformátorem. Rozlišujeme dva druhy autotransformátorů:

- ◆ Snižovací – kde platí  $N_1 > N_2$  a  $U_1 > U_2$
- ◆ Zvyšovací – kde platí  $N_1 < N_2$  a  $U_1 < U_2$
- ◆ Řiditelné



$I_1$  – proud primárního vinutí  
 $I_2$  – proud sekundárního vinutí  
 $N_1$  – počet závitů primárního vinutí  
 $N_2$  – počet závitů sekundárního vinutí  
 $U_1$  – napětí primárního vinutí  
 $U_2$  – napětí sekundárního vinutí

Obr. 1.5 autotransformátor [7]

- **Svařovací transformátory**

Užívají se pro obloukové svařování. Využívá se jednofázových svařovacích transformátorů s možností řízení svařovacího proudu v rozsahu 20 až 700 A.

Výstupní napětí na prázdko je u těchto transformátorů 65 – 100 V. Pracovní napětí je pak 15-30 V. Svařovací proud se řídí přepínáním odboček vinutí transformátoru nebo polovodičovými součástkami. Tyto transformátory by měli mít velkou impedanci nakrátko, aby platil vztah:

$$I_K \doteq I_N$$

(110)

Transformátory pro odporové svařování mají výstupní napětí 10 V a proud až 100 kA. Výstupní vinutí je zde tvořeno jedním závitem, který je chlazen vodou.

- ***Pecový transformátor***

Tyto typy transformátorů se používají pro napájení pecí, které slouží k tepelnému zpracování kovových materiálů. Užívá se jednofázové nebo trojfázové provedení s výkonem řádově MVA. Vstupní napětí je zde VN výstupní NN (do 100V).

- ***Usměrňovačové transformátory***

Používají se pro napájení usměrňovačů střídavého napětí vhodné velikosti, počtu fází a fázového posunu. Na výstupní stranu transformátoru se zapojuje usměrňovač, který způsobuje nesouměrné zatížení transformátoru. Tento typ transformátoru má pár zvláštností, které u běžných transformátorů nejsou a to například:

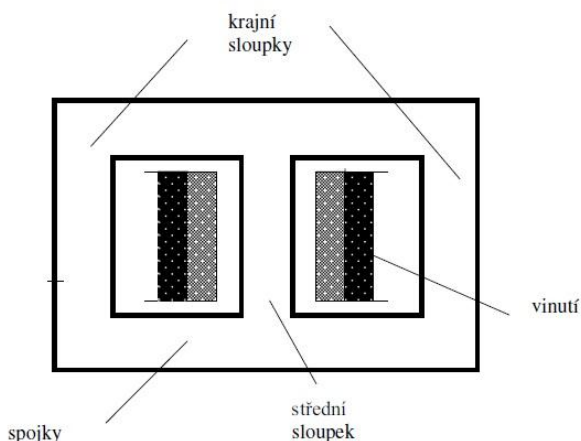
- ***Výstupním vinutím se uzavírá stejnosměrná složka proudů***
- ***Zdánlivý výkon není shodný s výkonem usměrňovače***
- ***Počet fází na výstupu může být větší než tři***
- ***V obvodu jsou zapojeny i tlumivky***
- ***Nesinusové průběhy proudů***

### **1.5.2 Dle konstrukce magnetického obvodu**

Úkolem magnetického obvodu je usměrnit magnetický tok takovým způsobem, aby jeho maximální část byla tokem činným. Bereme v úvahu, že určitý rozptylový tok je nezbytný z hlediska vhodné velikosti napětí na krátko  $u_k$ . Používáme magnetický materiál, který musí dovolit velké sycení až 1,7 T při měrných ztrátách 1,1 W/kg. Magnetický obvod transformátoru se skládá z plechů tloušťky 0,35 až 0,5mm, které jsou od sebe vzájemně odizolovány. Zásadně rozlišujeme dva typy magnetického obvodu transformátoru a to plášťový a jádrový typ.

#### ***a) plášťový typ***

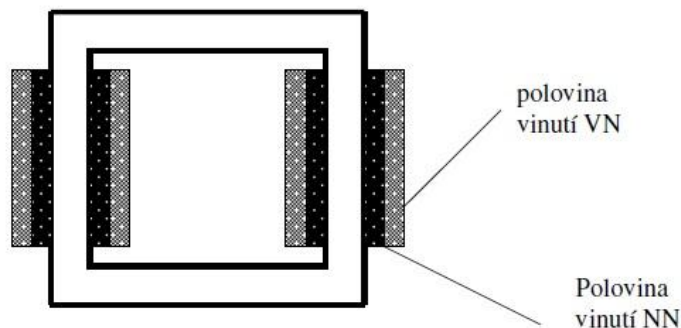
Transformátory plášťové konstrukce mají rozvětvený magnetický obvod, který částečně zakrývá vinutí. Magnetický tok ve středním pracovním jádru je dvakrát větší než ve vedlejších jádrech, které mohou mít z tohoto důvodu dvakrát menší průřez. Nevýhodou plášťového provedení je větší hmotnost, výhodou je naopak pevnější magnetická vazba. Z obr. 1.6 je patrné uspořádání vnutí.



Obr. 1.6 Jednofázový plášťový typ transformátoru [3]

### b) Jádrový typ

Jádrový typ transformátoru je zobrazen na obr. 1.6. Vinutí jsou zde umístěna na dvou jádrech a zapojují se paralelně nebo sériově. Toto zapojení se provádí z důvodu pevnější magnetické vazby, tedy z důvodu omezení magnetických toků, které mají magnetickou vazbu pouze s jedním vinutím. Transformátory jádrového typu vycházejí hmotnostně lehčí, jejich nevýhodou jsou větší rozptylové toky.



Obr. 1.7 Jednofázový jádrový typ transformátoru [3]

### 1.5.3 Dle principu funkce

Transformátory se dle principu funkce se dělí na:

➤ **Energetické**

Takzvaný blokový transformátor. Slouží k transformaci vyrobené energie na hodnotu VVN.

➤ **Distribuční**

Transformuje z vedení VVN na VN ke spotřebiteli.

➤ **Napájecí**

Slouží k transformaci NN na malé napětí. Užití v nabíjecích adapterech.

➤ **Bezpečnostní**

Stejná funkce jako napájecí transformátory. Navíc je zde zajištěná izolační pevnost. Užití ve zdravotnictví v hračkách apod.

➤ **Rozptylové**

Transformátor s magnetickým bočником, který se používá pro svařování, speciální aplikace a napájení výbojek.

➤ **Regulační**

Autotransformátory ( transformátor u kterého je pro primární i sekundární vinutí používaná stejná cívka – v principu jde o cívku na železném jádře s odbočkami pro primární a sekundární vinutí), ferorezonanční stabilizátory

➤ **Měřicí**

Buďto proudové, napět'ové nebo kombinované. Využívají se pro měření proudu a napětí na VN, VVN kde transformuju napětí nebo proud na normalizovanou hodnotu a to u proudového na 5A nebo 1A a u napět'ového na 100V

#### 1.5.4 Dle způsobu chlazení

Způsob chlazení u transformátoru se označuje značkou, která udává druh chladicího média a zda je jeho cirkulace přirozená (tzn. komínovým tahem), nebo nucená (s ventilátorem, nebo čerpadlem).

U transformátorů bez skříně (rozumí se tím transformátor s uzavřenou skříní, přes jejíž stěny neprochází chladicí médium) má značka dvě písmena. U provedení transformátorů se skříní má čtyři písmena. Pokud je transformátor provozován s různým způsobem chlazení (např. při vyšším zatížení se zapíná přídavný ventilátor), uvádí se tyto způsoby oddělené lomítkem.

Tab. 1.1 Značky pro chladicí médium

Druh chladicího média	Značka
vzduch	A
plyn	G
voda	W
olej (bod vzplanutí $\leq 300^{\circ}\text{C}$ )	O
jiná kapalina (bod vzplanutí $\leq 300^{\circ}\text{C}$ )	K
jiná kapalina (neměřitelný bod vzplanutí)	L

Tab. 1.2 Značky pro způsob cirkulace

Způsob cirkulace	Značka
přirozená	N
nucená (ventilátor nebo čerpadlo)	F
nucená s usměrněným prouděním	D

Příklady značení chlazení transformátorů:

AN – transformátor s přirozeným chlazením (může být i ve skříní, např. IP23 či IP44, ale chladicí vzduch prochází přímo otvory skříně)

AN/AF – transformátor s přirozeným chlazením a s pomocným ventilátorem, který se zapíná pouze při přetížení

AFAW – transformátor se skříní a tepelným výměníkem vzduch/voda. Chladicí vzduch cirkuluje uvnitř skříně (obvykle provedení IP54 nebo IP55) pomocí ventilátoru a přitom prochází přes výměník tepla. Ve výměníku se teplým vzduchem ohřívá voda, která odvádí teplo. Cirkulace vody je pomocí čerpadla

ONAF – transformátor s olejovým chlazením v uzavřené nádobě, která je ochlazována vzduchem za pomoci ventilátoru

## 1.6 Zapojení vinutí trojfázových transformátorů

Jelikož je elektrizační trojfázový systém sdruženým systémem všech tří fází, můžeme trojfázové vinutí transformátorů zapojit do hvězdy, trojúhelníka nebo do lomené hvězdy (viz. Tab. 1.3). Každá strana transformátoru může být zapojena kterýmkoliv z uvedených možností. Pro praxi se však hodí jen některá zapojení se zřetelem na vlastnosti a na vhodnost pro daný účel. Směry indukovaných napětí závisí na druhu a uspořádání vinutí v magnetickém obvodu. Pro pravotočivou cívku se směr svorkového napětí shoduje se směrem magnetického toku. Při kreslení schémat zapojení předpokládáme vždy pravotočivé

cívky z toho nám vyplívá, že kladný směr magnetického toku nakreslený po straně vinutí, souhlasí s kladným směrem indukovaného napětí. Základní způsoby zapojení jsou uvedeny v tab. 1.3.[1]

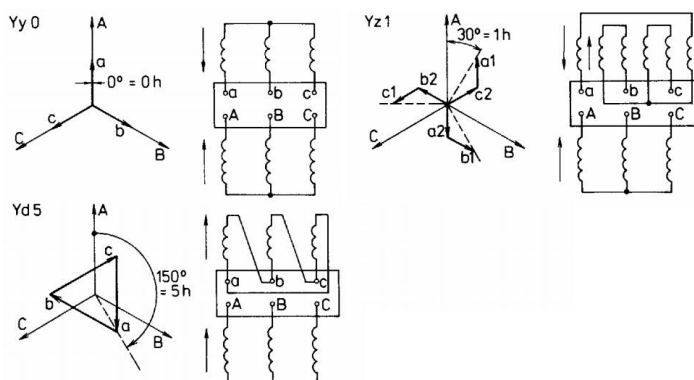
Tab. 1.3 základní zapojení vinutí trojfázových spojení

Název a znak	Schéma spojení	Diference	Fázorový diagram
Hvězda: strana vyššího napětí má značku <b>Y</b> , strana nižšího napětí <b>y</b>		Začátky vinutí jednotlivých fází jsou spojeny do uzlu	
Trojúhelník: strana vyššího napětí má značku <b>D</b> , strana nižšího napětí <b>d</b>		Začátek vinutí jedné fáze je spojen s koncem následující fáze	
Lomená hvězda: jen na straně nižšího napětí má značku <b>z</b>		Polovina závitů vinutí jedné fáze je spojena s polovinou následující fáze a začátky jsou spojeny do uzlu	

### 1.6.1 Hodinové číslo

Jedno z důležitých kritérií které zejména rozhoduje při paralelním chodu transformátorů je fázové natočení vektorů napětí strany výstupní vzhledem ke straně vstupní, vyjadřuje se takzvaným hodinovým číslem (nebo též úhlem). Každé kombinaci zapojení vinutí náleží aspoň tři hodinová čísla, některým až šest hodinových čísel. Dle normy se zapojení transformátorů značí dvěma písmeny a číslicí. První velké písmeno označuje zapojení strany vyššího napětí, druhé malé písmeno značí zapojení strany nižšího napětí (značení zapojení viz. Tab. 1.3). Číslice nám označuje zpoždění fáze menšího napětí za fází většího napětí

v hodinách 0-11 hodin, kde jedné hodině odpovídá úhel  $30^\circ$ . Toto vyjádření v hodinách je umožněno tím, že jde u trojfázových transformátorů vždy o úhlové zpoždění, jež je celistvým násobkem  $30^\circ$  (tzn. jedné hodiny) [1].



Obr.1.8 Základní zapojení transformátorů s vyznačeným hodinovým číslem [1]

V energetických zařízeních se používá zapojení Yy 0, Yd 1, Dy 1, Yz 1 (viz. Obr.1.8). Z obr.1.8 je patrné základní zapojení transformátorů fázorově znázorněná hodinová čísla u nás nejčastěji používaných zapojení [1].

## 1.7 Základní údaje transformátoru

Základní údaje nám odpovídají podmínkám na které byl stroj navržen, jsou to jmenovité hodnoty, z nichž jsou mnohé uvedeny na štítku stroje.

Většinou se uvádí tyto štítkové hodnoty [4]:

- Druh transformátoru, např. blokový, distribuční, důlní apod.
- Jmenovitý zdánlivý výkon v kVA
- Jmenovité napětí ve V (u vícefázových transformátorů se uvádí síťové napětí)
- Jmenovitý proud v A (u vícefázových transformátorů se uvádí síťový proud)
- Jmenovitý kmitočet v Hz
- Počet fází
- Spojení fází
- Napětí na krátko v procentech
- Druh zatížení – je-li transformátor určen pro trvalé zatížení, či pro krátkodobý nebo přerušovaný chod anebo přerušované zatížení
- Druh chlazení
- Druh prostředí, ve kterém může transformátor pracovat
- Krytí transformátoru
- Třída izolace vinutí

Dále se na štítku uvádí název a sídlo výrobce, rok výroby, typ a výrobní číslo transformátoru a údaje nutné pro montáž a provoz, zejména celková hmotnost transformátoru v kg a hmotnost oleje v kg (u olejových transformátorů).

## 2 Nelinearita magnetického obvodu

### 2.1 Magnetické jádro

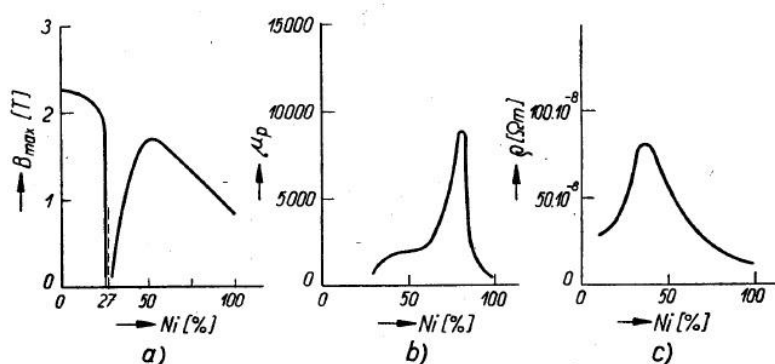
Následující kapitola je vypracována dle publikace [8]:

Magnetické jádro je konstruováno z feromagnetického materiálu (magneticky měkkého), jehož hlavním prvek je železo. Čisté železo, i když má dobré magnetické vlastnosti tak se pro magnetické obvody nehodí, jelikož jeho výroba je velmi obtížná. Materiály užívané pro magnetický obvod lze rozdělit na:

- *Slitiny železa*
- *Elektrotechnické oceli*
- *Amorfní kovové sloučeniny*
- *Ferity*

#### 2.1.1 Slitiny železa

Používají se hlavně u transformátorů proudu kvůli dosažení určitých funkčních vlastností – malých chyb, malého nadproudového čísla, atd.. Slitiny železa a niklu jsou též známé jako permalloye. Dané vlastnosti slitiny nám velmi ovlivňuje obsah Ni popřípadě dalších přísad (Cu, Mo, Cr,...). Slitina s obsahem 27% niklu je nemagnetická viz. Obr. 2.1 a)



Obr. 2.1 Vlastnosti feromagnetických slitin při různém složení [8]  
a) Maximální sycení b) počáteční permeabilita c) měrný odpor

Samozřejmě i počáteční permeabilita závisí na poměru obou složek viz. Obr 2.1 b). Měrný odpor nám udává velikost ztrát vířivými proudy, který je největší při obsahu 30 – 40% niklu, s větším obsahem niklu nám měrný odpor klesá viz. Obr. 2.1 c).



**Dále lze rozdělit slitiny železa dle obsahu niklu do tří skupin:****I. S obsahem niklu větším než 76 %**

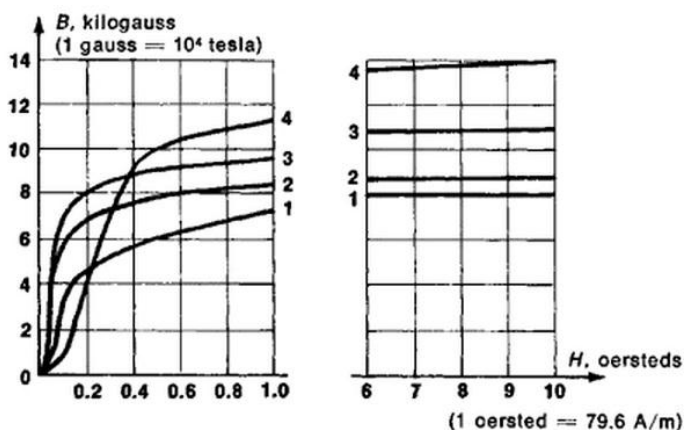
Užívají se pro transformátory proudu. Tyto slitiny jak je zřejmé z obr. 2.1b mají velkou počáteční permeabilitu z toho důvodu nastává nasycení kolem 0,6 – 1,1 T. Pro zmenšování ztrát vířivými proudy se přidává pár procent chromu a molybdenu (zlepšují magnetické vlastnosti). Měď, která se zde může použít slouží ke korekci permeability.

**II. S obsahem niklu 50%**

Menší počáteční i maximální permeabilita. Magnetická indukce při nasycení je oproti I. skupině vyšší zhruba kolem 1,6 T

**III. S obsahem niklu 36%**

Uplatňují se zejména pro magnetické obvody přístrojů na vyšší kmitočet. Zde je patrný velký měrný odpor (obr.2.1 c)), z toho nám plyne, že zde máme nejmenší ztráty vířivými proudy.



Obr. 2.2 Magnetizační křivky vybraných materiálů [9]  
 Cr permalloy (2) Mo permalloy (3) permalloy s 76% Ni (4) permalloy s 50% Ni

**2.1.2 Elektrotechnické oceli**

Elektrotechnické oceli se používají především pro síťové transformátory. Elektrotechnické oceli se dají dále rozdělit na:

- **Elektrotechnické izotropní (Ei)**
- **Elektrotechnické orientované (Eo)**
- **Elektrotechnické tabulové (Et)**

Tyto skupiny se liší především v technologii výroby, a to elektrotechnické tabulové, které jsou válcované za tepla a elektrotechnické orientované a izotropní za studena. Dále se tyto plechy liší v obsahu křemíku, kterým je ocel legována.

### 2.1.3 Amorfni kovové sloučeniny

Jsou vyráběny za pomoci rychlého zchlazení taveniny např. litím taveniny na rychle rotující kotouč, tím se vytvoří sklovitá nekystalická struktura. Velmi výhodná věc při této metodě je že nám již vzniká tenký pásek, tudíž není nutné takto vzniklý plech již dále výrobně upravovat jako u jiných plechů. Výroba se soustřeďuje na tři základní druhy amorfni kovových slitin:

- *Na bázi Co (obsahuje 70% Co)*
- *Na bázi Fe (obsahuje 80% Fe)*
- *Na bázi FeNi (obsahuje 40% Fe a 40% Ni)*

Zbývající část slitin tvoří příměsi, jako jsou B, Cr, Fe, Mo, Ni, Si. Amorfni kovové kyseliny se zatím moc nevyužívají z důvodu vysokých pořizovacích nákladů navíc jsou výsledné slitiny velmi křehké. Z toho důvodu se musí navíc umísťovat do plastových obalů.

### 2.1.4 Ferity

Ferity nacházejí uplatnění hlavně pro transformátory pracující na vysokém kmitočtu. Pro svoji nízkou hodnotu nasycení cca 0,5 T při 50 Hz se nehodí pro napájecí transformátory. Jsou tvořeny izolovanými částicemi a z tohoto důvodu mají velký elektrický odpor na druhou stranu mají dobrou magnetickou vodivost a minimální ztráty vířivými proudy.

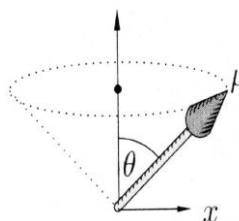
## 2.2 Magnetismus

Následující kapitola je zpracovaná dle publikace [11]:

Magnetické vlastnosti materiálu se odvíjí od jeho magnetického stavu. Magnetický stav materiálu má atomový původ a je především určen elektrony atomů. Z magnetického hlediska je každý atom charakterizován magnetickým momentem  $\mu$ , který se skládá z:

- *Orbitálního pohybu elektronů po dráze kolem jádra atomu*
- *Spin elektronů (takzvaný vnitřní magnetický moment)*
- *Vnější magnetické pole ovlivňující pohyb elektronů kolem jádra*

Magnetický moment  $\mu$  je vektorová veličina, tj. má svoji velikost a svůj směr (B,z).



Obr. 2.3 Magnetický moment [10]

Vystavíme-li atom vnějšímu magnetickému poli o magnetické indukci B, jeho směr není totožný se směrem magnetického momentu, magnetický moment se přikloní ke směru vnějšího pole, s nímž bude svírat úhel  $\theta$ . Jelikož je magnetický moment určen i orbitálním momentem, přítomnost magnetického pole způsobí, že směr magnetického momentu začne rotovat kolem směru magnetického pole.

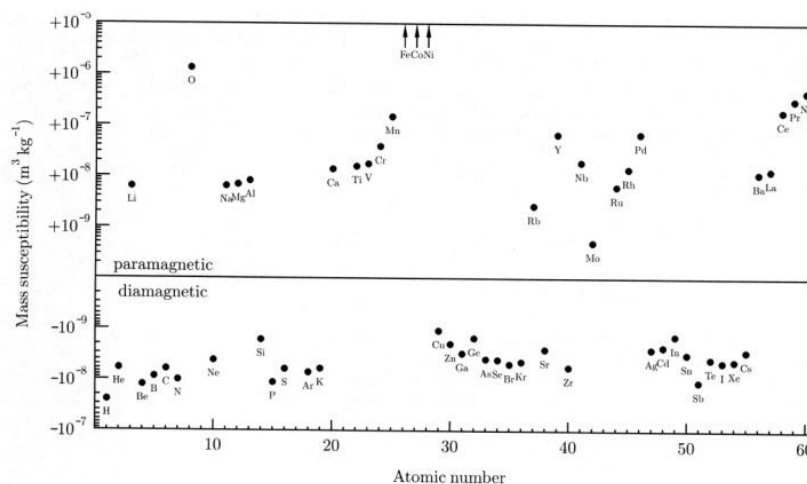
Magnetický materiál se skládá z velkého počtu atomů, jeho magnetický projev popisujeme magnetizací M, která je definována jako vektorový součet magnetických momentů všech přítomných atomů dělený objemem materiálu.

$$\vec{M} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{\mu}_i}{V} \quad (201)$$

### 2.2.1 Dělení magnetických materiálů

Základními veličinami, které zde pozorujeme, jsou magnetizace M a magnetická susceptibilita  $\chi$ . Magnetická susceptibilita je definována poměrem M/H, kde H je intenzita vnějšího magnetického pole, která indukuje magnetizaci M v materiálu. Na základě tohoto dělíme magnetické materiály do tří hlavních skupin:

- **Diamagnetické látky** kde  $\chi < 0$
- **Paramagnetické látky** kde  $\chi > 0$
- **Uspořádané magnetické materiály** – feromagnetické, antiferomagnetické, feromagnetické látky kde  $\chi \gg 0$



Obř. 2.4 Závíslost susceptibilitý na magnetických vlastnostech prvků [10]

Jádro atomu též nese malý magnetický moment, ale jeho velikost je tak malá že nám neovlivní celkové magnetické chování atomu.

## 2.2.2 Diamagnetismus

Diamagnetismus je forma magnetismu, která se objevuje pouze za přítomnosti vnějšího magnetického pole. Jestliže tedy vložíme diamagnetickou látku do magnetického pole, v materiálu se začne indukovat magnetický moment, který je orientován proti směru vnějšího magnetického pole. Z důvodu, že je odpuzována je magnetická permeabilita menší než jedna. Diamagnetická látka je tudíž z magnetického pole vypuzována.

Diamagnetické látky se skládají z diamagnetických atomů, to v praxi znamená, že tyto látky mírně zesilují magnetické pole. Mezi diamagnetické látky patří všechny vzácné plyny, polyatomické plyny jako  $H_2$ ,  $N_2$  a většina organických sloučenin, uhlík, měď, síra, zlato, apod.. Diamagnetické látky nacházejí využití v tekutých krystalech a supravodičích [11].

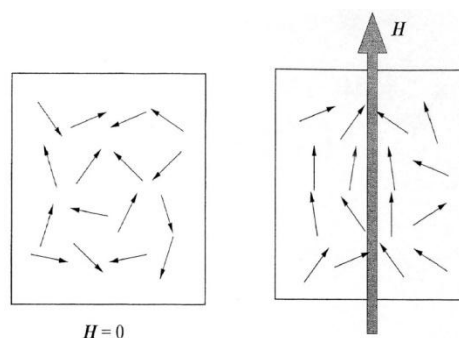
## 2.2.3 Paramagnetismus

Paramagnetismus též potřebuje vnější magnetické pole, aby se zde objevili magnetické vlastnosti. Jelikož jsou paramagnetické materiály přitahovány magnetickým polem mají magnetickou permeabilitu větší než jedna (z tohoto důvodu látky mírně zesilují magnetické pole).

Atomy těchto látek mají vlastní magnetické pole. Vnějším magnetickým polem by tedy bylo možné je uspořádat tak, aby došlo k souhlasné orientaci magnetických polí jednotlivých atomů, a tím i ke značnému zesílení magnetického pole v látce. Ve skutečnosti tento stav nenastává, jelikož mu brání tepelný pohyb. Magnetické pole v paramagnetické látce není možné zesílit ani vnějším polem o velké magnetické indukci. Paramagnetická látka se

tedy bude k magnetu přitahovat a sama bude přitahovat drobné kovové předměty (např. kancelářská svorka) pouze v případě, že bude v blízkosti magnetu [11].

Na rozdíl od feromagnetických látek, které po vložení do magnetického pole zůstávají zmagnetované, paramagnetické látky se nedokáží udržet zmagnetování. Mezi paramagnetické prvky patří například hliník, baryum, vápník, platina atd..

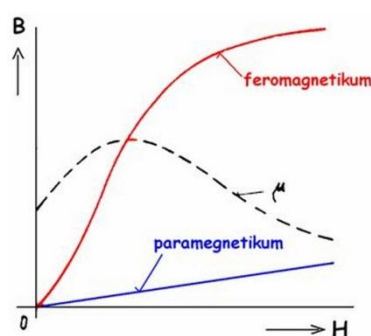


Obr. 2.5 Vliv vnějšího magnetického pole na paramagnetickou látku [10]

## 2.2.4 Feromagnetismus

Feromagnetické látky jsou složeny také z paramagnetických atomů, ale v takovém uspořádání, že výrazně zesilují magnetické pole. Již slabým magnetickým polem lze u nich vyvolat takové uspořádání atomů, že se magnetické pole zesílí a dojde k magnetování látky. Magnetické pole ve feromagnetické látce zůstává, i když vnější pole zanikne.

Na obr. 2.6 je znázorněna křivka prvotní magnetizace paramagnetika a feromagnetika z níž je patrné proč se pro magnetický obvod transformátoru volí feromagnetikum jenž má pro tento účel dobré magnetické sycení pro správný chod transformátoru.

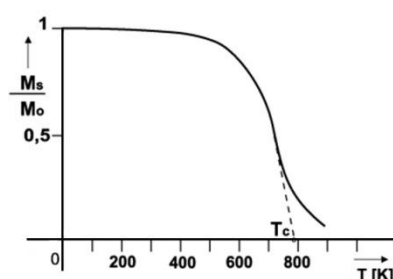


Obr. 2.6 Křivky prvotní magnetizace [12]

Příčinou magnetizace látky je působení tzv. výměnných sil mezi sousedními atomy. Jejich vlivem nastává i bez vnějšího magnetického pole souhlasné uspořádání magnetických

polí v malé oblasti látky. Při této spontánní (samovolné) magnetizaci vznikají v látce zmagnetované mikroskopické oblasti zvané magnetické domény, které jsou orientovány nahodile. Při tomto ději se objem domén postupně zvětšuje, až při jejich souhlasném uspořádání doménová struktura mizí – látka je magneticky nasycena [13].

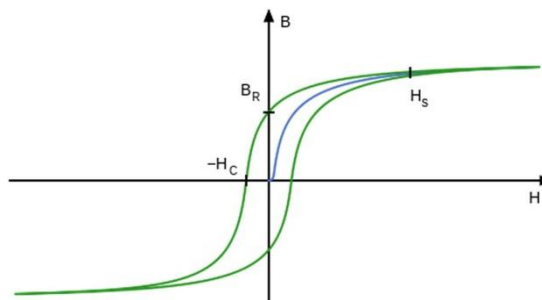
Feromagnetismus se objevuje u látek, kde výměnné interakce podporují paralelní uspořádání magnetických momentů. Díky přítomnosti molekulárního pole mají spontánní magnetizaci i bez přítomnosti vnějšího magnetického pole. Při 0 K je uspořádání kompletní, což vede k maximální hodnotě spontánní magnetizace. Jak roste teplota, hodnota spontánní magnetizace klesá a spontánní magnetizace feromagnetického materiálu vymizí, jak dosáhne Courieovy teploty při níž se z ní stává materiál paramagnetický, viz. Obr. 2.7.



Obr. 2.7 Teplotní závislost magnetizace na teplotě [13]

$T_C$  – Courieova teplota, která je v tomto případě  $768^\circ\text{C}$ , je charakteristická pro železo Na obrázku 2.7 je od 0 do  $T_C$  látka feromagnetická dále od  $T_C$  je látka paramagnetická. Pro každý materiál je Courieova teplota jiná, např. Kobalt-  $1130^\circ\text{C}$ , Nikl -  $358^\circ\text{C}$ , Oxid železitý -  $622^\circ\text{C}$ .

## 2.3 Hysterezní křivka



Obr. 2.8 Statická hysterezní křivka [14]

B – magnetické indukce

H – intenzita magnetického pole

$H_s$  – intenzita nasycení (v tomto bodě se nám při zvětšení intenzity již indukce nebude zvětšovat graf bude pokračovat jako křivka)

$H_c$  – koercitivní síla (síla potřebná k odmagnetování materiálu)

$B_r$  – remanentní indukce (též zbytková indukce, která v materiálu zůstává i po snížení intenzity magnetického pole na nulu)

Hysterezní křivka nám zobrazuje uzavřenou křivku magnetování respektive magnetizační proud, který je potřebný k vytvoření a udržení magnetického pole. Velikost magnetizačního proudu je u transformátoru velikost jalové složky celkového proudu a je tedy zpožděna za napětím o  $90^\circ$ .

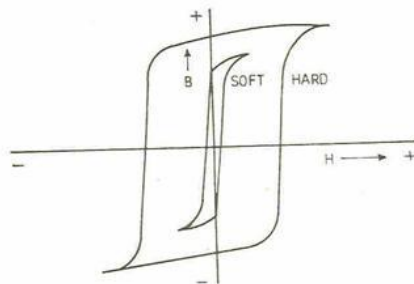
Křivka nám zobrazuje závislost  $B=f(H)$ . Mnohem častěji se udávají maximální hodnoty  $B_m=f(H_m)$  což se označuje jako magnetizační křivka, která je na obr. 2.8 označena modrou barvou. Tato křivka prochází vrcholy hysterezních křivek pro různé intenzity magnetického pole H. Lze z ní navíc přímo odečíst magnetickou indukci B při zvolené intenzitě H.

Můžeme zde vyčíst informaci o tom jaký vliv má působení vnějšího magnetického pole na magnetické schopnosti materiálu, který se v tomto poli nachází. Křivku získáme provedením jednoho cyklu takzvaného magnetování (vlození nezmagnetované látky do magnetického pole a postupné zvětšování intenzity magnetického pole).

Křivka nám slouží k určení vlastností daného materiálu, který se rozhodneme použít viz. kapitola 2.1. Každý materiál je charakterizován jinou křivkou. Dle hysterezní křivky jde magnetické materiály rozdělit na dvě podskupiny:

- *Magneticky měkké materiály*
- *Magneticky tvrdé materiály*

Materiály s širokou hysterezní křivkou nazýváme materiály magneticky tvrdé naopak materiály s úzkou hysterezní křivkou jsou materiály magneticky měkké.



Obr. 2.9 Hysterezní křivky: Soft-magneticky měkký materiál, Hard-magnetický tvrdý materiál [15]

### 2.3.1 Magneticky měkké materiály

Charakteristické vlastnosti magneticky měkkých materiálů:

- *Malá koercitivní síla ( $<10^3 \text{ Am}^{-1}$ )*
- *Velká počáteční permeabilita*
- *Velká maximální permeabilita*
- *Velká remanentní indukce*
- *Nízké hysterezní ztráty*
- *Snadné nasycení v poměrně malých magnetických polích*

Největší užití nacházejí v elektrických točivých strojích, transformátorech, relé, jádra cívek, paměťové a spínací prvky. Mezi magneticky měkké materiály se řadí například: železo, oceli, různé slitiny železa (Fe-Ni, Fe-Al). V ideálním případě magneticky měkký materiál po vyndání z magnetického pole ztrácí své magnetické vlastnosti [17].

### 2.3.2 Magneticky tvrdé materiály

Charakteristické vlastnosti magneticky tvrdých materiálů:

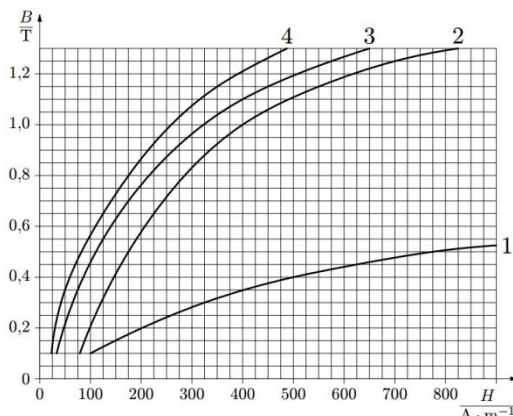
- *Velká koercitivní síla ( $>10^3 \text{ Am}^{-1}$ )*
- *Malá počáteční permeabilita*
- *Malá maximální permeabilita*
- *Velká remanentní indukce*
- *Velký energetický součin  $(BH)_{max}$*

Magneticky tvrdý materiál je takový, který v ideálním případě po vložení do magnetického prostředí zůstane trvale zmagnetovaný, proto se používají tyto látky především pro permanentní magnety. Patří sem zejména zakalené oceli s vyšším obsahem uhlíku (martenzitické), legované obvykle až 6% wolframu [17].



### 3 Výpočet pasivních parametrů transformátorů

#### 3.1 Základní údaje vybraných transformátorů



Obr. 3.1 Magnetizační charakteristiky vybraných materiálů [18]  
 Litina (2) ocelolitina (3) transformátorový plech (4% Si) (4) železný plech

Pro znázornění nelinearity magnetického obvodu transformátoru jsem si vybral jeden jednofázový transformátor 220/40. Další transformátor jsem volil třífázový 35/0,42 kV. Na těchto transformátorech budeme znázorňovat nelinearitu magnetického obvodu se zavedenou magnetizační křivkou do simulace. Pomocí následujících výpočtů zjistíme všechny potřebné hodnoty náhradního schématu transformátoru s respektováním sycení daným grafem na obr.3.1

#### Jednofázový transformátor 220/40 V

Jmenovitý výkon:	$S = 1980 \text{ VA}$
Napětí na krátko:	$u_k = 5 \%$
Proud naprázdno:	$i_0 = 9\%$
Ztráty v železe:	$P_0 = 10 \text{ W}$
Ztráty ve vinutí:	$P_K = 37 \text{ W}$
Počet závitů primárního vedení:	$N_1 = 1100 \text{ z}$
Počet závitů sekundárního vedení:	$N_2 = 200 \text{ z}$
Magnetizační charakteristika magnetického obvodu viz. Obr. 3.1 (3)	

#### Třífázový transformátor 35/0,42 kV

Jmenovitý výkon:	$S = 160 \text{ kVA}$
Napětí na krátko:	$u_k = 6 \%$
Proud naprázdno:	$i_0 = 0,5\%$
Ztráty v železe:	$P_0 = 300 \text{ W}$
Ztráty ve vinutí:	$P_K = 2700 \text{ W}$
Počet závitů primárního vedení:	$N_1 = 15000 \text{ z}$
Počet závitů sekundárního vedení:	$N_2 = 180 \text{ z}$
Magnetizační charakteristika magnetického obvodu viz. Obr. 3.1 (4)	

Zapojení vinutí u tohoto transformátoru je Dyn1. To znamená, že primární vedení je spojeno do trojúhelníka a sekundární je do hvězdy, číslice jedna nám označuje posun o 1 hodinu respektive 30°.

### 3.2 Výpočet pasivních parametrů jednofázového transformátoru 220/40 V

#### 3.2.1 Výpočet příčných parametrů náhradního schématu

Jelikož víme, že zdánlivý jmenovitý výkon se netransformuje je tudíž na primární i sekundární straně stejný, můžeme si za pomoci nám známých napětí spočítat proudy na primární a sekundární straně. Vycházíme ze vzorečku pro zdánlivý výkon:

$$S = U_1 I_1 \Rightarrow I_1 = \frac{S}{U_1} = \frac{1980}{220} = 9A \quad (301)$$

$$S = U_2 I_2 \Rightarrow I_2 = \frac{S}{U_2} = \frac{1980}{40} = 49,5A \quad (302)$$

Dále si spočteme proud na prázdno:

$$i_0 = \frac{I_0}{I_1} 100 \Rightarrow I_0 = \frac{i_0}{100} I_1 = \frac{9}{100} 9 = 0,81 A \quad (303)$$

Potřebujeme zjistit účinník na prázdno pro výpočet prvků příčné větve. Jelikož známe ztráty v železe a proud na prázdno jsme si spočetli, dosazujeme tedy do následujícího vzorce nám již známé hodnoty:

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{U_1 I_0} = \frac{10}{220 \cdot 0,81} = 0,056 \quad (304)$$

Pomocí vypočteného účinníku na prázdno snadno dopočteme proud v železe  $I_{FE}$ . Opět zde vycházíme z toho, že pro výpočet použijeme proud na prázdno s účinníkem na prázdno, jelikož víme že  $I_1 = I_0$ . Dosazujeme proto následovně:

$$I_{FE} = I_0 \cos\varphi_0 = 0,81 \cdot 0,056 = 45,3 mA \quad (305)$$

Z proudu v železe a proudu na prázdko dopočteme magnetizační proud:

$$I_{\mu} = \sqrt{I_0^2 - I_{FE}^2} = \sqrt{0,81^2 - 0,0453^2} = 0,81 \text{ A} \quad (306)$$

Jelikož víme, že na příčné větvi je napětí  $U_1$  můžeme pomocí nám již známých proudů vypočítat magnetizační reaktanci  $X_{\mu}$ , která nám respektuje konečnou vodivost magnetického obvodu. Dále dopočteme odpor, který nám respektuje ztráty v železe (zahrnuje ztráty hysterezní a v železe):

$$R_{Fe} = \frac{U_1}{I_{FE}} = \frac{220}{0,0453} = 4856,5 \Omega \quad (307)$$

$$X_{\mu} = \frac{U_1}{I_{\mu}} = \frac{220}{0,81} = 271,6 \Omega \quad (308)$$

### 3.2.2 Výpočet podélných parametrů primární strany

Výpočet podélných parametrů transformátoru vychází ze spojení transformátoru na krátko. Proto si nejdřív musíme spočítat napětí na krátko  $U_K$ :

$$U_{K1} = \frac{u_{k\%} U_1}{100} = \frac{5,220}{100} = 11 \text{ V} \quad (309)$$

Dále si zjistíme účinník transformátoru na krátko za pomoci ztrát ve vedení a napětí na krátko. Víme, že proud na krátko se rovná proudu na primární straně dosazujeme tedy do vzorce:

$$\cos\varphi_K = \frac{P_K}{U_{K1} I_1} = \frac{37}{11,9} = 0,37 \quad (310)$$

Jelikož známe napětí na krátko a proud na krátko zjistíme si celkovou impedanci primárního vedení:

$$Z_{K1} = \frac{U_{K1}}{I_1} = \frac{11}{9} = 1,22 \Omega \quad (311)$$

Za pomoci celkové impedance a účinníku určíme podélné parametry primární strany transformátoru:

$$R_1 = Z_{K1} \cos \varphi_K = 1,22 \cdot 0,37 = 0,45 \Omega \quad (312)$$

$$X_{\sigma 1} = Z_{K1} \sin \varphi_K = 1,22 \cdot 0,93 = 1,13 \Omega \quad (313)$$

Z rozptylové reaktance si dopočteme rozptylovou indukčnost:

$$X_{\sigma 1} = \omega L_{\sigma 1} \Rightarrow L_{\sigma 1} = \frac{X_{\sigma 1}}{2\pi f} = \frac{1,13}{2\pi \cdot 50} = 3,597 \text{ mH} \quad (314)$$

### 3.2.3 Výpočet podélných parametrů sekundární strany

Pro výpočet prvků sekundární strany využijeme postup stejný jako u výpočtu primární strany, jen si musíme dát pozor abychom počítali s parametry sekundární strany transformátoru :

$$U_{K2} = \frac{u_{k\%} U_2}{100} = \frac{5,40}{100} = 2 \text{ V} \quad (315)$$

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{U_{K2} I_2} = \frac{37}{2,49,5} = 0,37 \quad (316)$$

$$Z_{K2} = \frac{U_{K2}}{I_2} = \frac{2}{49,5} = 0,04 \Omega \quad (317)$$

$$R_2 = Z_{K2} \cos \varphi_K = 0,04 \cdot 0,37 = 0,015 \Omega \quad (318)$$

$$X_{\sigma 2} = Z_{K2} \sin \varphi_K = 0,04 \cdot 0,93 = 0,037 \Omega \quad (319)$$

$$X_{\sigma 2} = \omega L_{\sigma 2} \Rightarrow L_{\sigma 2} = \frac{X_{\sigma 2}}{2\pi f} = \frac{0,037}{2\pi \cdot 50} = 117,775 \mu H \quad (320)$$

### 3.3 Výpočet pasivních parametrů třífázového transformátoru 35/0,42 kV

#### 3.3.1 Výpočet příčných parametrů náhradního schématu

Třífázový transformátor je spojení tří jednofázových transformátorů, proto se výpočet skoro neliší. Pozor si musíme dávat pouze na sdružená napětí. Zdánlivý výkon je zde součtem výkonů v každé fázi.

Vypočítáme si proudy jednou fází transformátoru pomocí vzorce (301) upraveného na třífázové spojení:

$$S = \sqrt{3} U_{S1} I_1 \Rightarrow I_1 = \frac{S}{\sqrt{3} U_{S1}} = \frac{160000}{\sqrt{3} \cdot 35000} = 2,64 A \quad (321)$$

$$S = \sqrt{3} U_{S2} I_2 \Rightarrow I_2 = \frac{S}{\sqrt{3} U_{S2}} = \frac{160000}{\sqrt{3} \cdot 420} = 219,94 A \quad (322)$$

Spočteme proud na prázdno:

$$i_0 = \frac{I_0}{I_1} 100 \Rightarrow I_0 = \frac{i_0}{100} I_1 = \frac{0,5}{100} 2,64 = 13,2 mA \quad (323)$$

Dále si zjistíme účinník nakrátko:

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_1I_0} = \frac{300}{\sqrt{3} \cdot 35000 \cdot 0,0132} = 0,375 \quad (324)$$

Pomocí vypočteného účinníku na prázdko snadno dopočteme proud v železe  $I_{FE}$ . Opět zde vycházíme z toho, že pro výpočet použijeme proud na prázdko s účinníkem na prázdko:

$$I_{FE} = I_0 \cos\varphi_0 = 0,0132 \cdot 0,375 = 4,95 \text{ mA} \quad (325)$$

Z proudu v železe a proudu na prázdko dopočteme magnetizační proud:

$$I_\mu = \sqrt{I_0^2 - I_{FE}^2} = \sqrt{0,0132^2 - 0,00495^2} = 12,24 \text{ mA} \quad (326)$$

Za pomoci nám již známých vzorců z předchozí kapitoly 3.2 spočteme podélné parametry:

$$R_{FE} = \frac{U_{1f}}{I_{FR}} = \frac{\frac{35000}{\sqrt{3}}}{0,00495} = 4,08 \text{ M}\Omega \quad (327)$$

$$X_\mu = \frac{U_{1f}}{I_\mu} = \frac{\frac{35000}{\sqrt{3}}}{0,01224} = 1,65 \text{ M}\Omega \quad (328)$$

### 3.3.2 Výpočet podélných parametrů primární strany

Výpočet podélných parametrů transformátoru se vypočte stejně jako u jednofázového transformátoru. Opět dáváme pozor na to, abychom zde dosazovali fázové napětí:

$$U_{K1} = \frac{u_{k\%} U_{1f}}{100} = \frac{6 \cdot \frac{35000}{\sqrt{3}}}{100} = 1212,4 \text{ V} \quad (329)$$

Dále si zjistíme účinník transformátoru na krátko za pomoci ztrát ve vedení a napětí na krátko. Víme, že proud na krátko se rovná proudu na primární straně dosazujeme tedy do vzorce:

$$\cos\varphi_K = \frac{P_K}{3U_{K1}I_1} = \frac{2700}{3 \cdot 1212,4 \cdot 2,64} = 0,281 \quad (330)$$

Jelikož známe napětí na krátko a proud na krátko zjistíme si celkovou impedanci primárního vedení:

$$Z_{K1} = \frac{U_{K1}}{I_1} = \frac{1212,4}{2,64} = 459,24 \Omega \quad (331)$$

Za pomoci celkové impedance a účinníku určíme podélné parametry primární strany transformátoru:

$$R_1 = Z_{K1} \cos\varphi_K = 459,24 \cdot 0,281 = 129,13 \Omega \quad (332)$$

$$X_{\sigma 1} = Z_{K1} \sin\varphi_K = 459,24 \cdot 0,959 = 440,74 \Omega \quad (333)$$

Z rozptylové reaktance si dopočteme rozptylovou indukčnost:

$$X_{\sigma 1} = \omega L_{\sigma 1} \Rightarrow L_{\sigma 1} = \frac{X_{\sigma 1}}{2\pi f} = \frac{400,9}{2\pi \cdot 50} = 1,4 \text{ H}$$

(334)

### 3.3.3 Výpočet podélných parametrů sekundární strany

Pro výpočet prvků sekundární strany využijeme postup stejný jako u výpočtu primární strany, jen si musíme dát pozor, abychom počítali s parametry sekundární strany transformátoru:

$$U_{K2} = \frac{u_{k\%} U_{2f}}{100} = \frac{6 \cdot \frac{420}{\sqrt{3}}}{100} = 14,55 \text{ V}$$

(335)

$$\cos\varphi_K = \frac{P_K}{3U_{K2}I_2} = \frac{2700}{3 \cdot 14,55 \cdot 219,4} = 0,282$$

(336)

$$Z_{K2} = \frac{U_{K2}}{I_2} = \frac{14,55}{219,4} = 0,066 \Omega$$

(337)

$$R_2 = Z_{K2} \cos\varphi_K = 0,066 \cdot 0,282 = 0,0186 \Omega$$

(338)

$$X_{\sigma 2} = Z_{K2} \sin\varphi_K = 0,066 \cdot 0,536 = 0,0354 \Omega$$

(339)

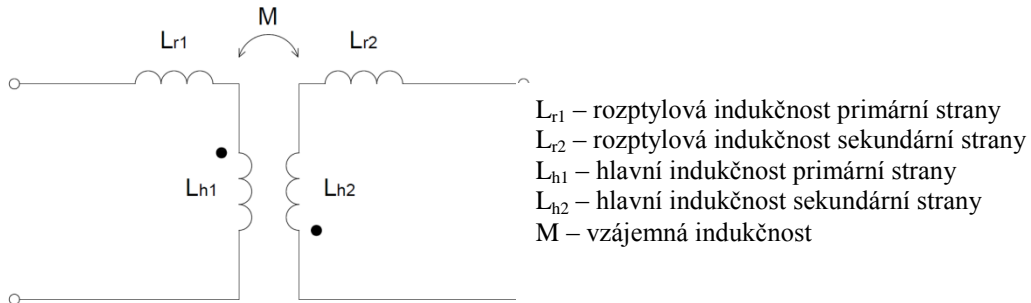
$$X_{\sigma 2} = \omega L_{\sigma 2} \Rightarrow L_{\sigma 2} = \frac{X_{\sigma 2}}{2\pi f} = \frac{0,0354}{2\pi \cdot 50} = 201,5 \mu\text{H}$$

(340)



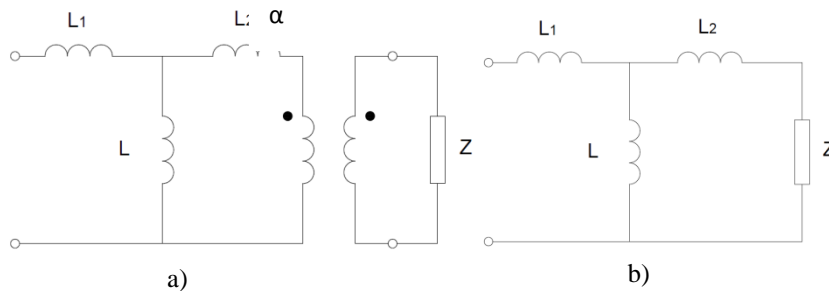
## 4 Modely transformátorů v systému DYNAST

### 4.1 Způsoby modelování transformátorů



Obr. 4.1 Induktivní model transformátoru [19]

Pro modelování transformátorů musíme uvažovat činitel vazby  $K=1$ . Činitel vazby je roven jedné jen v ideálním případě a to, že se obě rozptylové indukčnosti rovnají nule, tj.  $L_{r1} = L_{r2} = 0$ . Transformátor s  $K=1$ , jehož hlavní indukčnosti jsou nekonečné, je charakterizován jediným parametrem a to převodem. Je to takzvaný ideální transformátor, který se již nechová jako dynamický, nýbrž jako statický model skutečného transformátoru. Ideální transformátor lze potom tedy nahradit kombinacemi řízených zdrojů [19].



Obr. 4.2 a) linearizovaný model reálného transformátoru s ideálním transformátorem  
 b) linearizovaný transformátor se zátěží modelovaný jako dvojpól [19]

Na obr. 4.2 a je v praxi často používaný náhradní obvod reálného transformátoru s ideálním transformátorem, o převodu  $\alpha$ , který je ekvivalentní dosud uvažovanému transformátoru, pokud jeho parametry volíme tak aby platilo:

$$L_2 = \frac{L_2 + L}{\alpha^2} \quad \text{a} \quad M = \frac{L}{\alpha}$$

(401)

Fiktivní převod  $\alpha$  lze v obou případech volit libovolně. Často výhodné je transformátor modelovat společně s jeho zátěží jako dvojpól. Náhradní obvod, který je ekvivalentní obvodu na obr. 4.2a z hlediska primárních pólů, je na obr. 4.2b. Impedance zátěže sekundárního vinutí se zde násobí činitelem  $\alpha^2$  [19].

Naznačený způsob modelování lze uplatnit i u vícefázových transformátorů. Pro modelování vinutí jednotlivých fází se používají tytéž náhradní obvody jako pro vinutí transformátorů jednofázových [19].

## 4.2 Model jednofázového transformátoru 220/40 V

Zvolený transformátor jsem modeloval pomocí dvou ekvivalentních zdrojů, jimž jsem přiřadil hodnotu indukovaného napětí pomocí zadaných rovnic a vypočtených hodnot do programu DYNAST. V náhradním schématu jsem též uvažoval rozptylové reaktance a odpory cívek. Dále jsem respektoval nelinearitu magnetického obvodu pomocí funkce zadané do programu. V programu to fungovalo tak, že dle nám známých vzorců jsme spočítali magnetickou indukci, k níž se ke každé proměnné hodnotě přiřazovala magnetická intenzita.

Dále jsem simuloval transformátor při stavu na krátko, na prázdno a při zatížení. Z každého zapojení sem vkládám grafy napětí a proudů primárních a sekundárních stran. Označení os v grafech je následující:

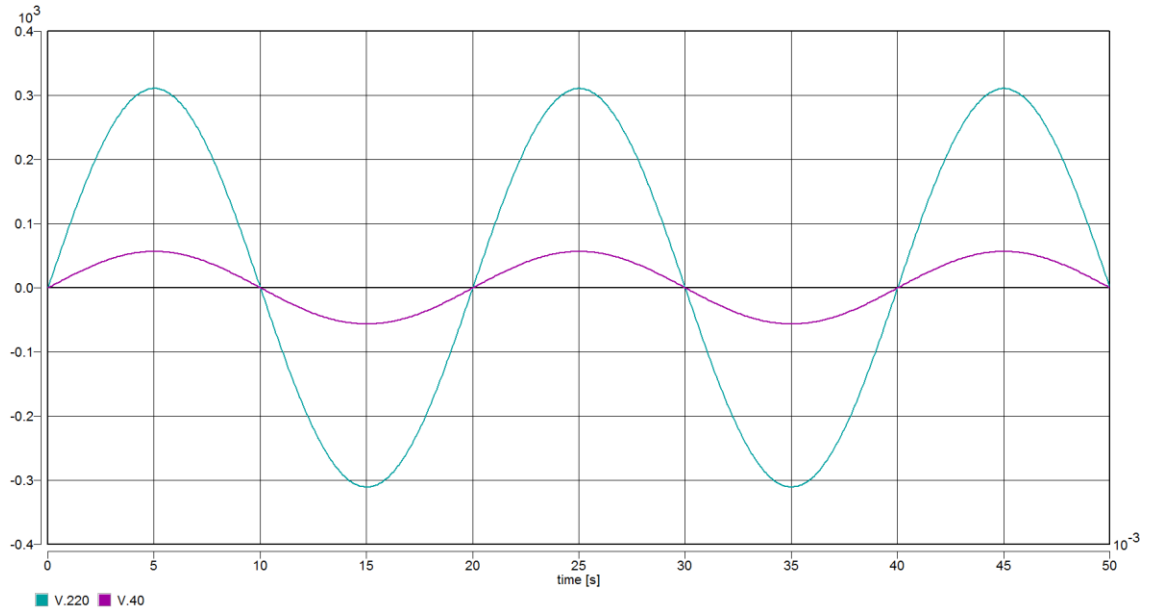
V.220 – napětí na primární straně

V.40 – napětí na sekundární straně

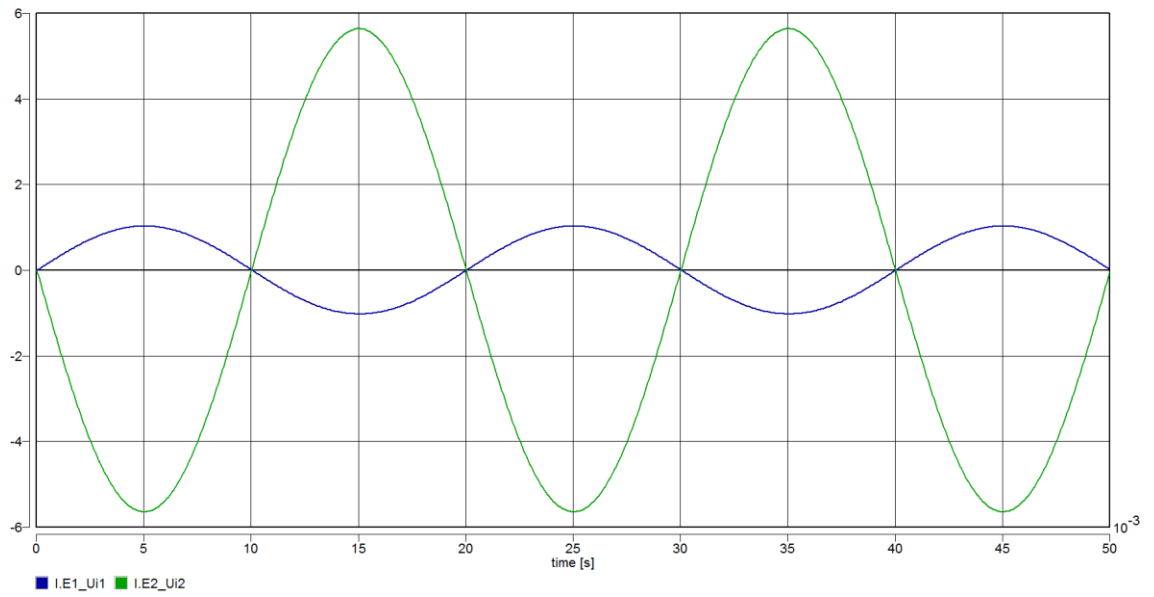
I.E1\_Ui1 – proud na primární straně

I.E\_Ui2 – proud na sekundární straně

### 4.2.1 Transformátor při zatížení

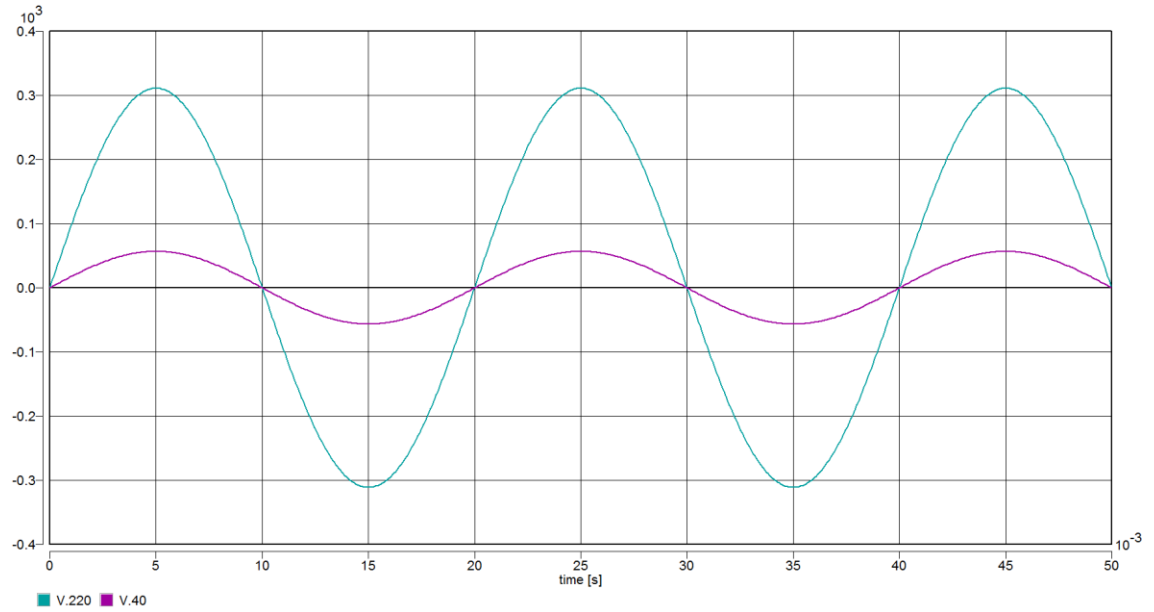


Obr. 4.3 Napětí na primární a sekundární straně při zatížení

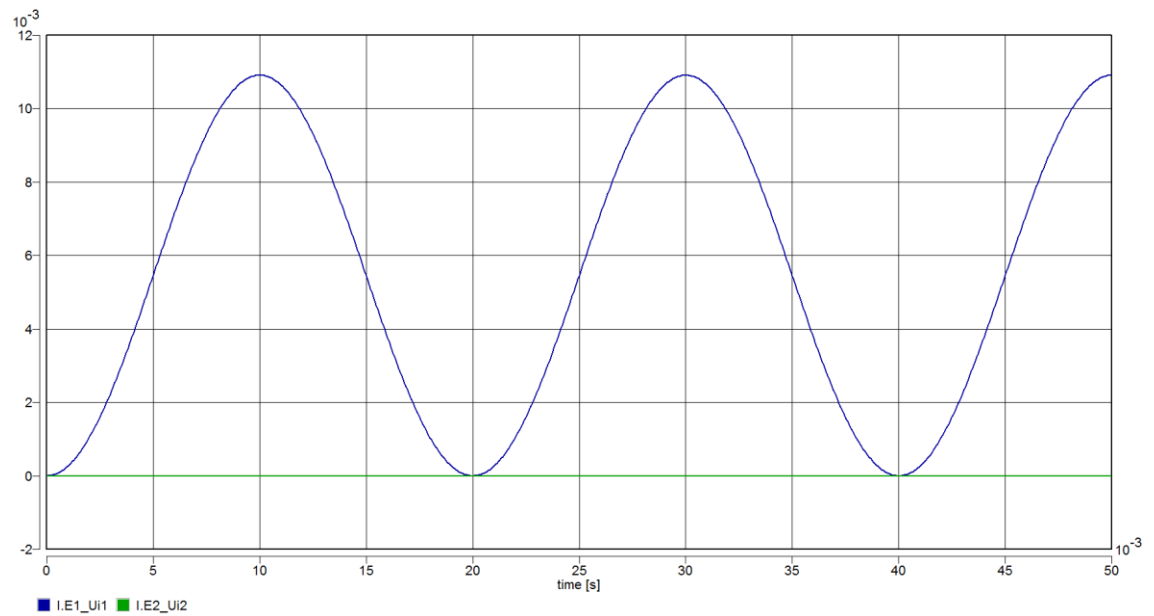


Obr. 4.4 Proudů na primární a sekundární straně při zatížení

## 4.2.2 Transformátor ve stavu na prázdkno

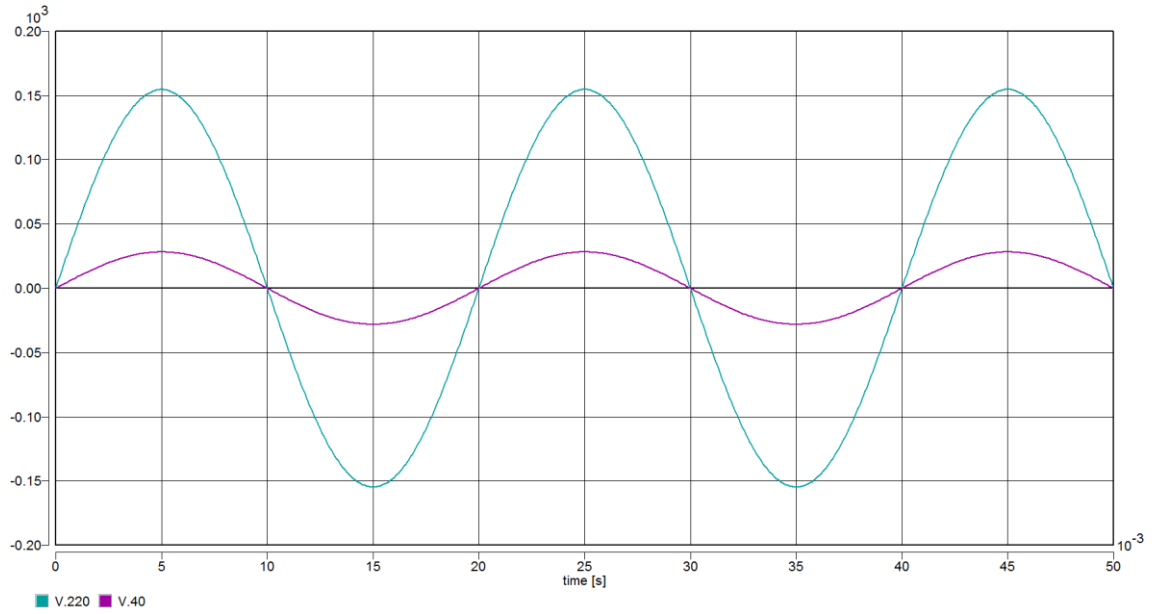


Obr. 4.5 Napětí na primární a sekundární straně na prázdkno

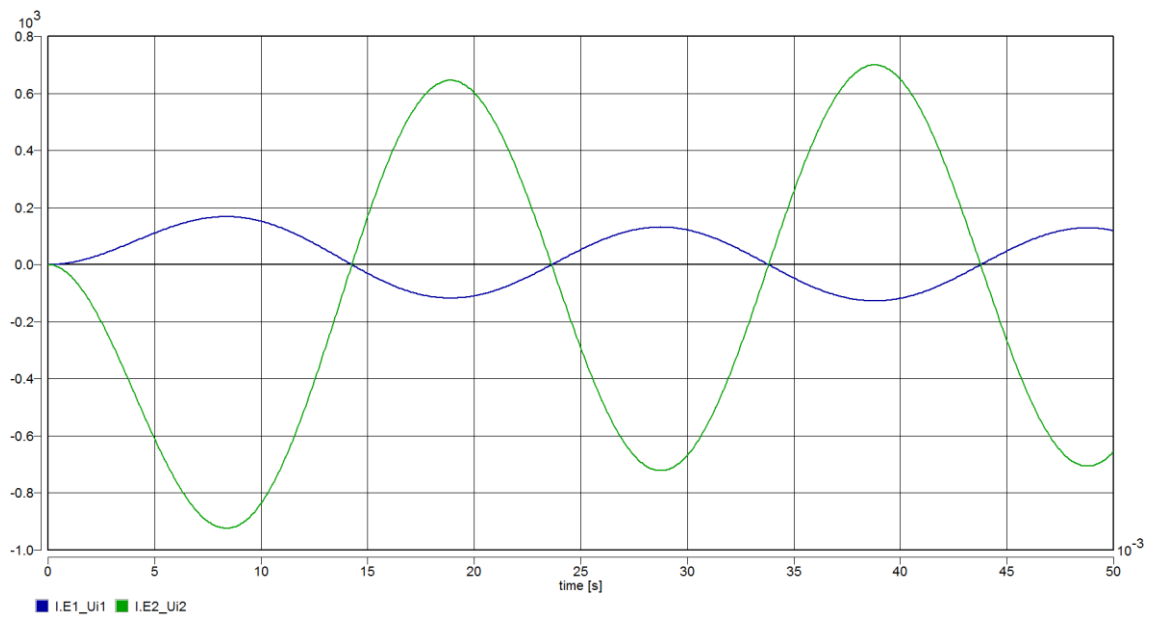


Obr. 4.6 Proudý primární a sekundární strany na prázdkno

### 4.2.3 Transformátor ve stavu na krátko



Obr. 4.7 Napětí primární a sekundární strany na krátko



Obr. 4.8 Proudů primární a sekundární strany na krátko

### 4.3 Model trojfázového transformátoru 35/0,42 kV

Trojfázový transformátor a jeho model vychází z jednofázového, kdy jsem spojil tři jednofázové. Jelikož se jejich vinutí zapojují dle typového označení Dyn1, znamenalo to zapojit primární stranu do trojúhelníka a sekundární do hvězdy. Též jsem musel respektovat fázový posuv vinutí, jež byl 1hod, tedy  $30^\circ$ . Magnetický tok, z něhož se následovně počítala magnetická indukce, se musel počítat 3x, protože se musela respektovat délka magnetických čar.

Transformátor jsem opět nasimuloval na krátko, na prázdno, při zatížení. Příkládám průběhy napětí a proudů.

Označení os v grafech je následující:

L1 – napětí primárního vedení fáze 1

L2 – napětí primárního vedení fáze 2

L3 – napětí primárního vedení fáze 3

L21 – napětí sekundárního vedení fáze 1

L22 – napětí sekundárního vedení fáze 2

L23 – napětí sekundárního vedení fáze 3

I.E1\_Ui1 – Proud fáze  $L_1$  primární strany

I.E2\_Ui1 – Proud fáze  $L_2$  primární strany

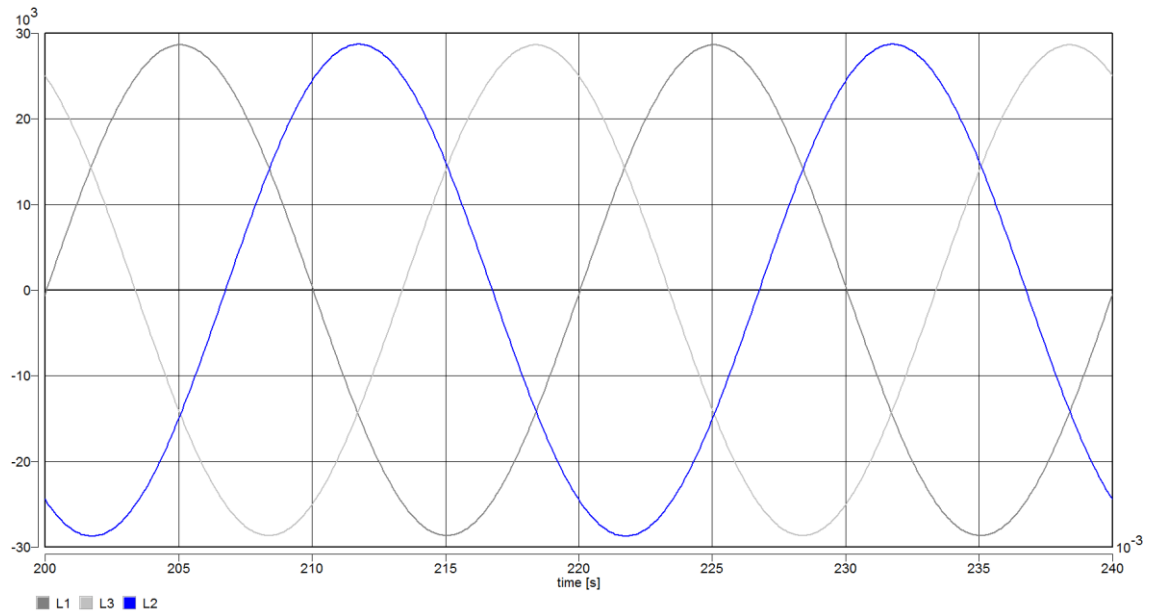
I.E3\_Ui1 – Proud fáze  $L_3$  primární strany

I.E1\_Ui2 – Proud fáze  $L_1$  sekundární strany

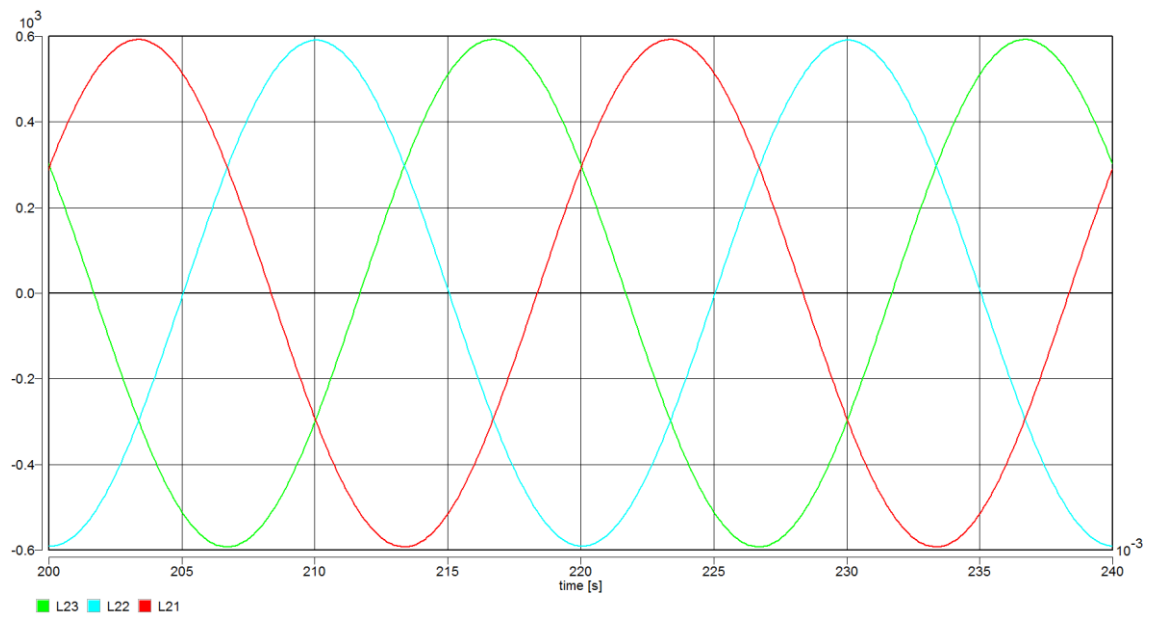
I.E2\_Ui2 – Proud fáze  $L_2$  sekundární stranou

I.E3\_Ui2 – Proud fáze  $L_3$  sekundární stranou

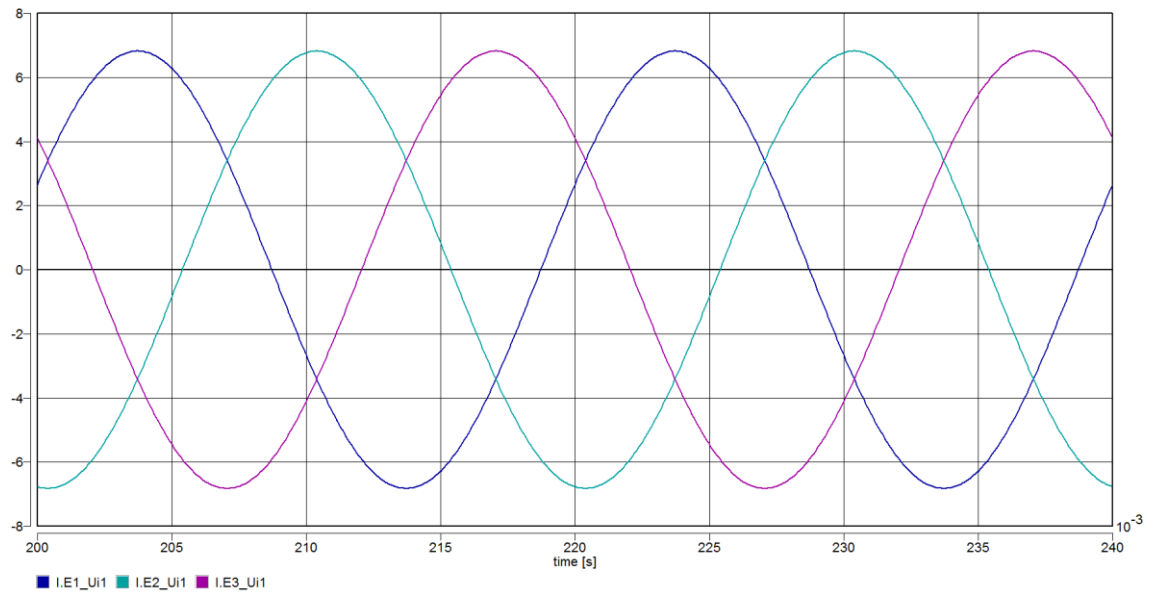
### 4.3.1 Transformátor při zatížení



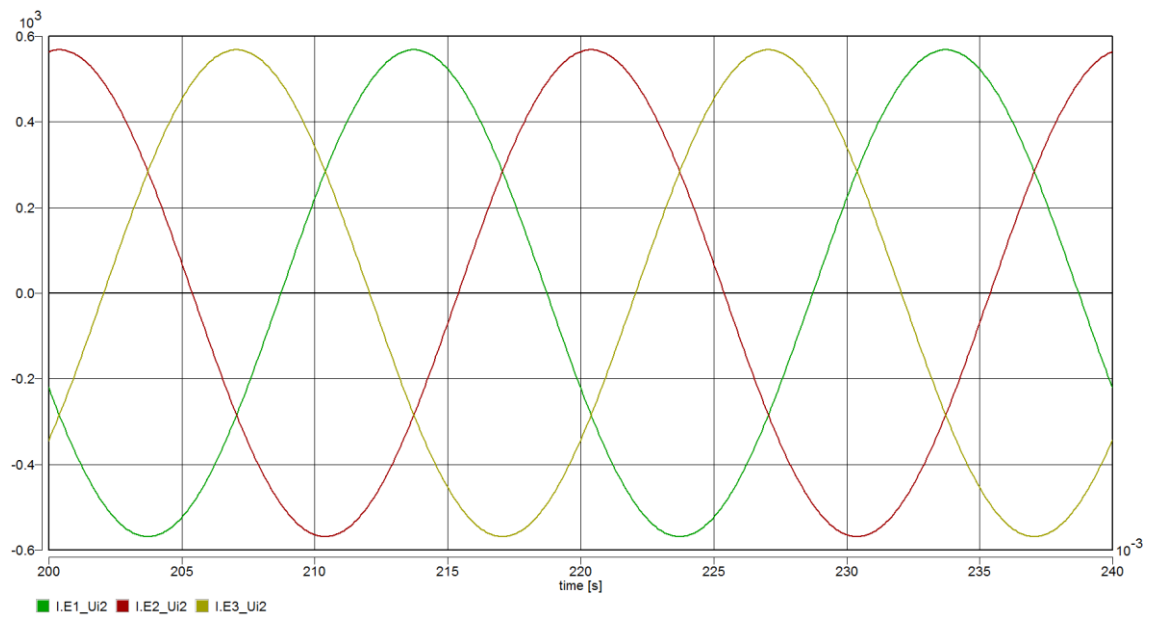
Obr. 4.9 Napětí primární strany při zatížení



Obr. 4.10 Napětí sekundární strany při zatížení



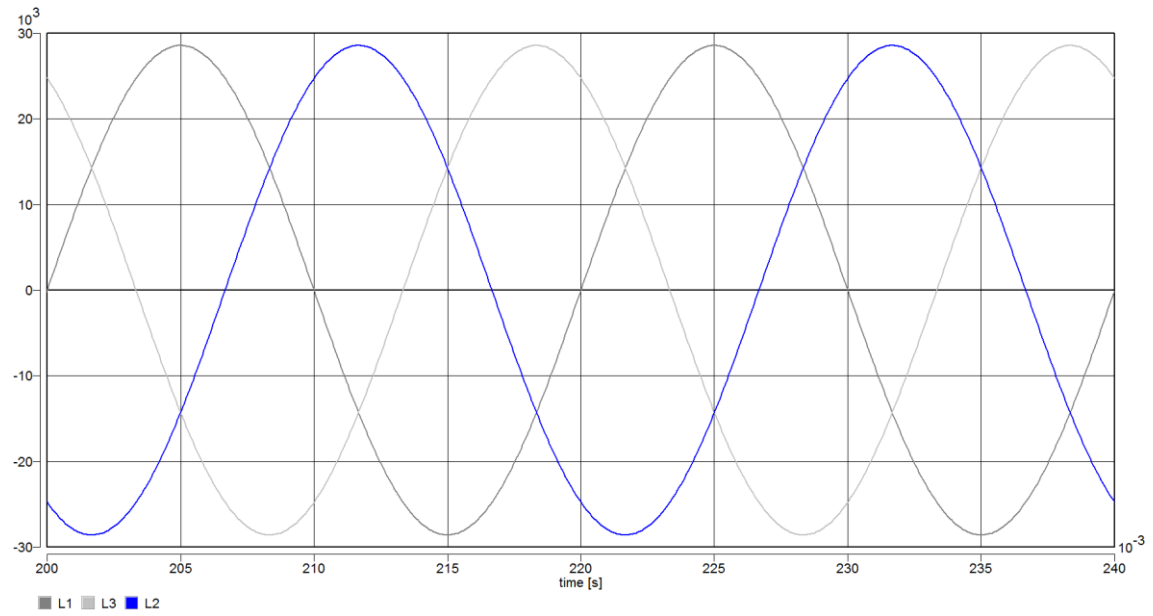
Obr. 4.11 Proudý ve všech třech fázích primární strany při zatížení



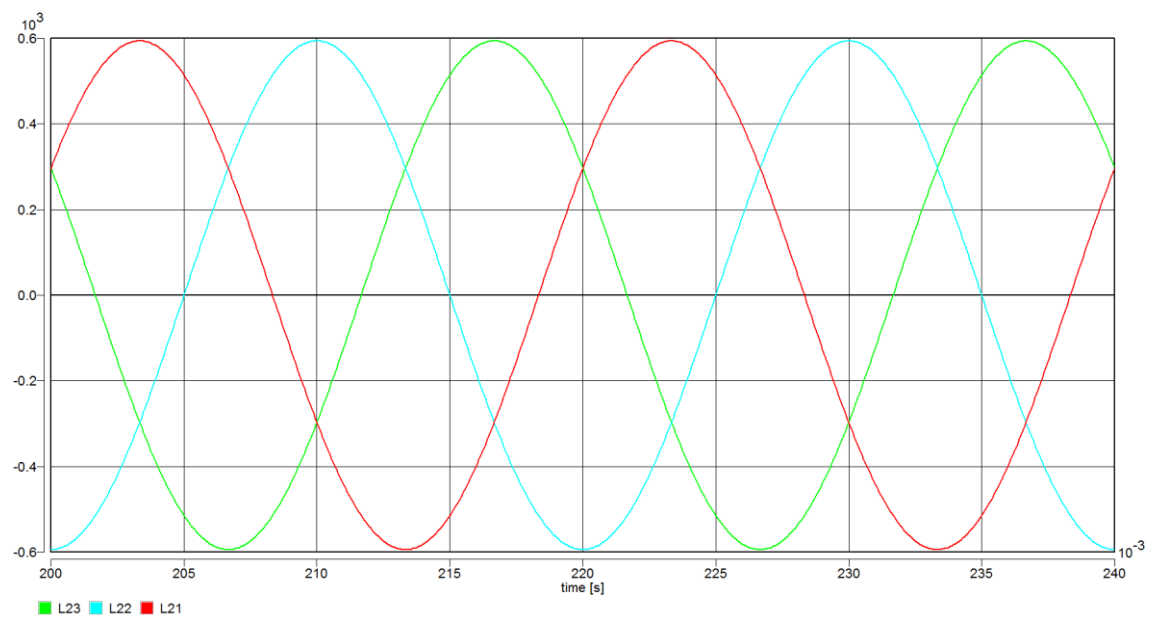
Obr. 4.12 Proudý ve všech třech fázích sekundární strany při zatížení



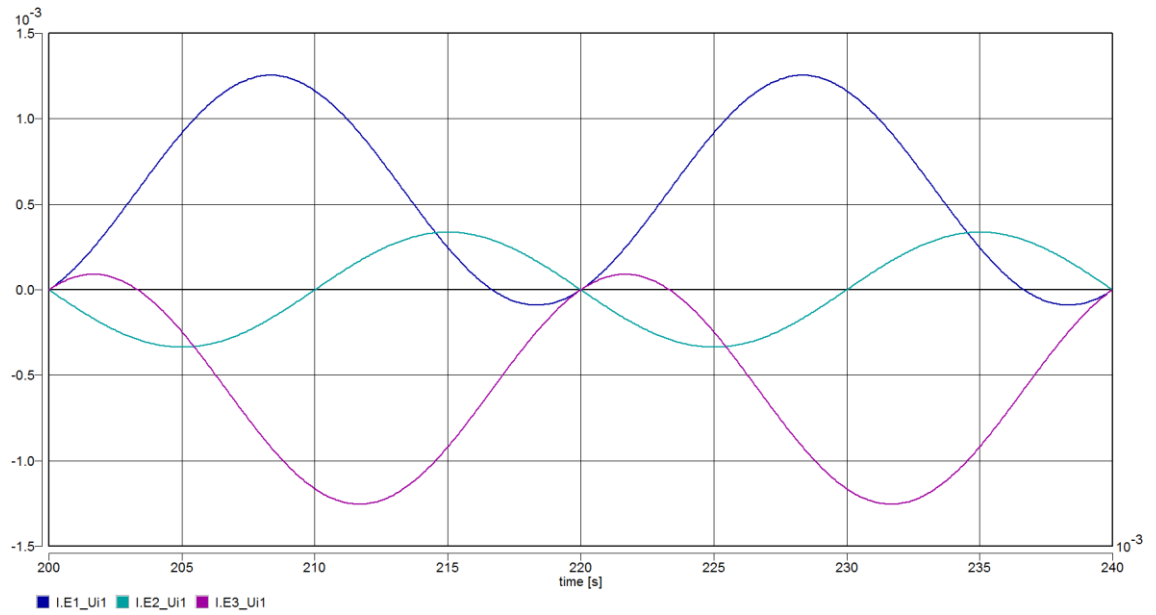
### 4.3.2 Transformátor ve stavu na prázdkno



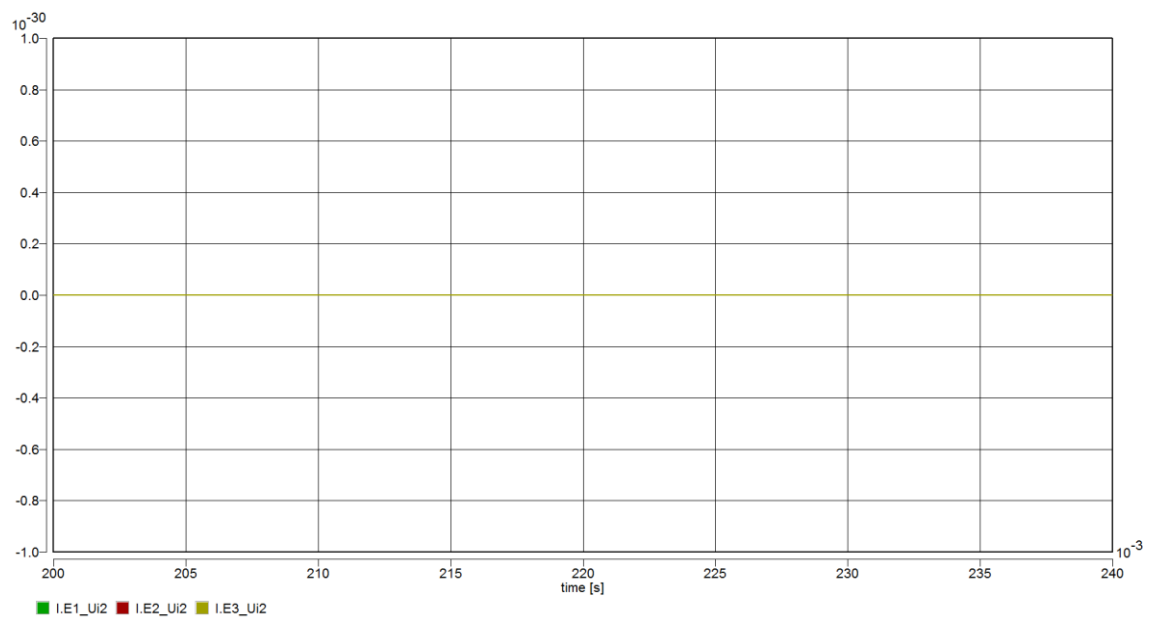
Obr. 4.13 Napětí ve všech třech fázích primární strany ve stavu na prázdkno



Obr. 4.14 Napětí ve všech třech fázích sekundární strany ve stavu na prázdkno

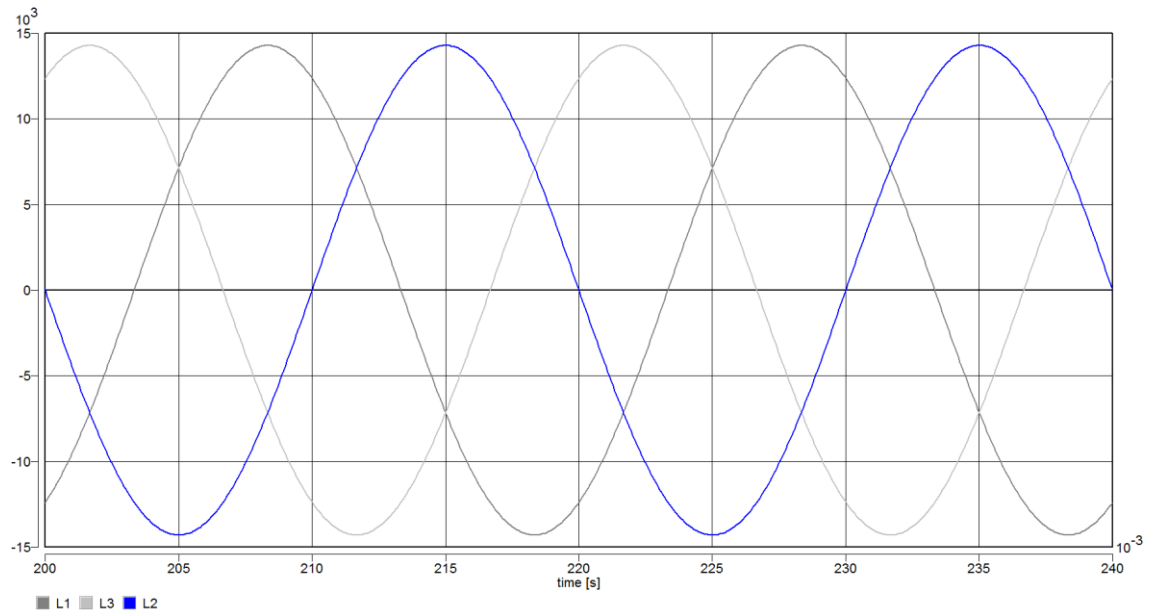


Obr. 4.15 Proudý ve všech třech fázích primární strany ve stavu na prázdkno

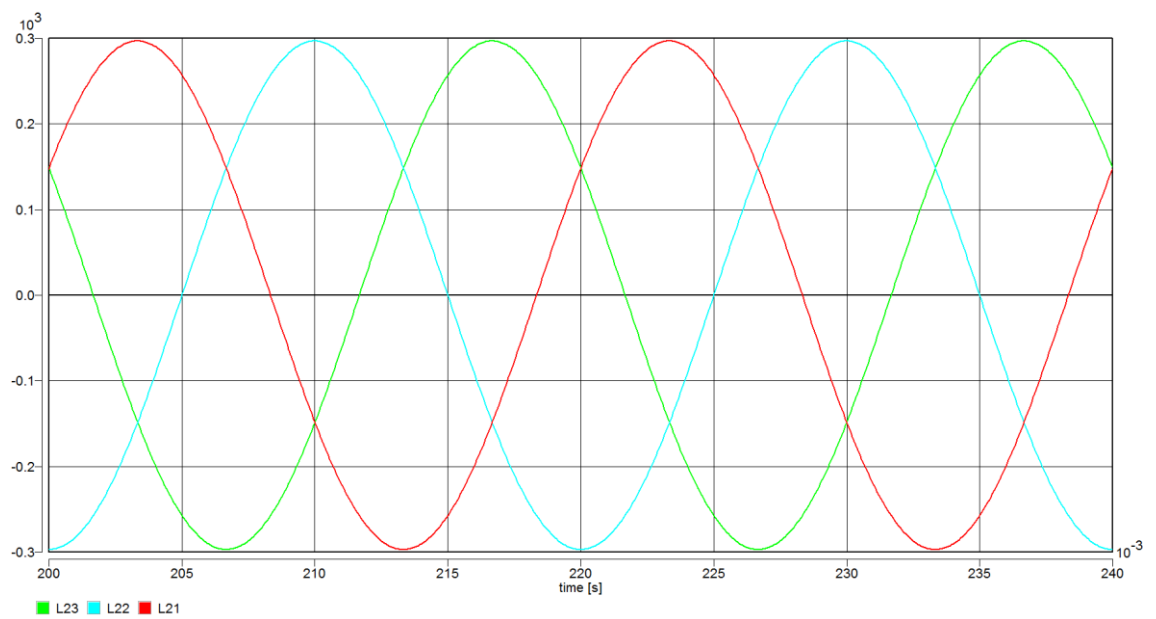


Obr. 4.16 Proudý ve všech třech fázích sekundární strany ve stavu na prázdkno

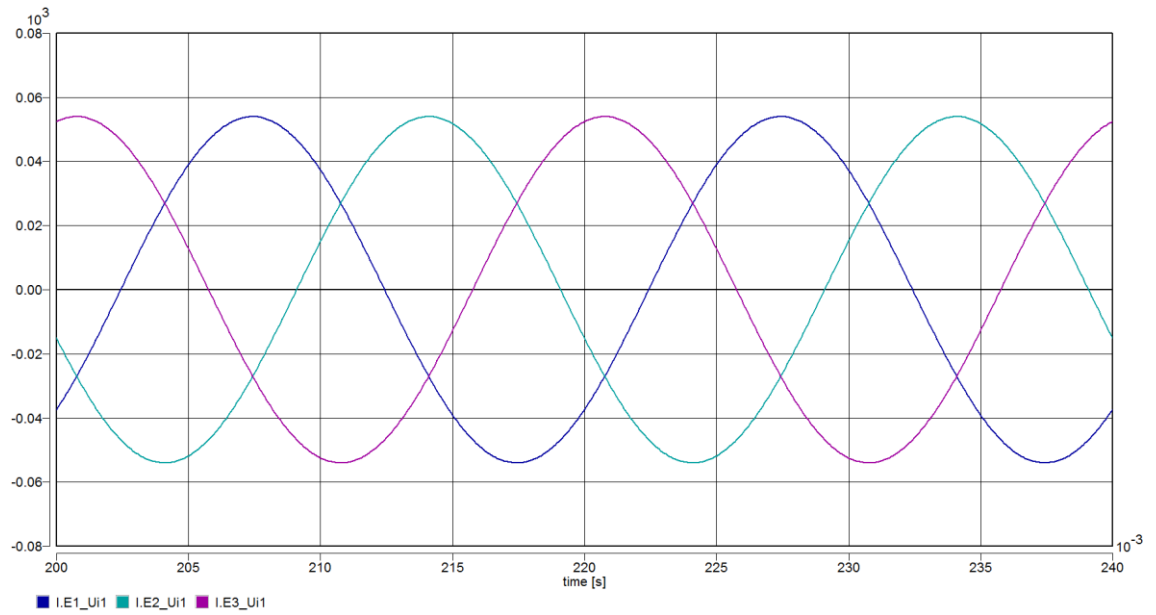
### 4.3.3 Transformátor ve stavu na krátko



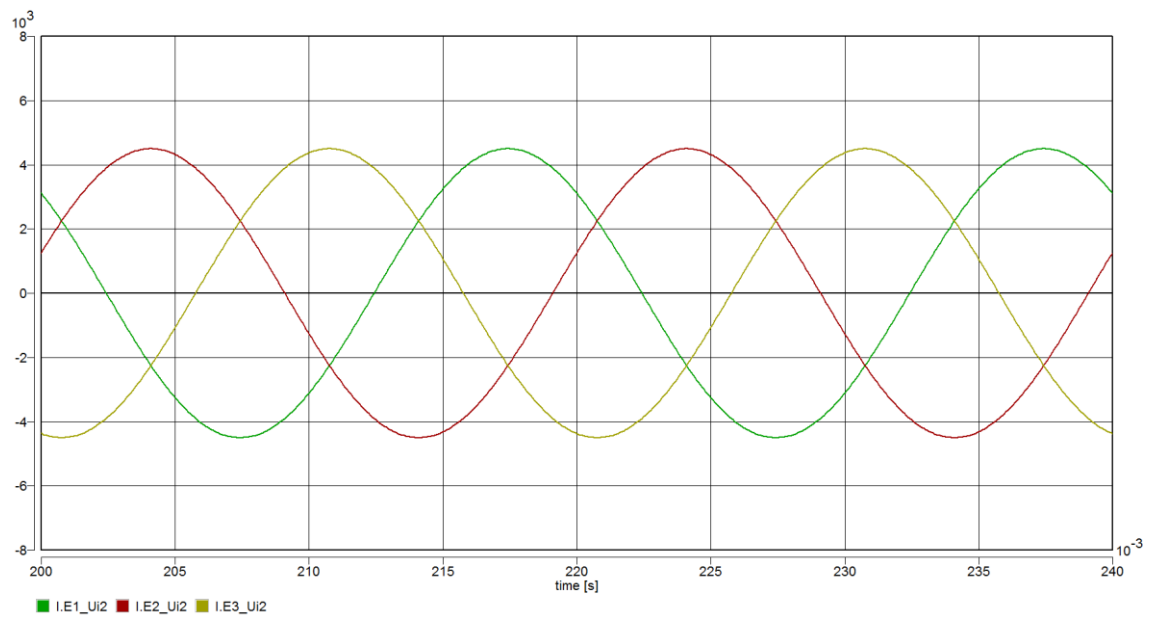
Obr. 4.17 Napětí ve všech třech fázích primární strany ve stavu na krátko



Obr. 4.18 Napětí ve všech třech fázích sekundární strany ve stavu na krátko



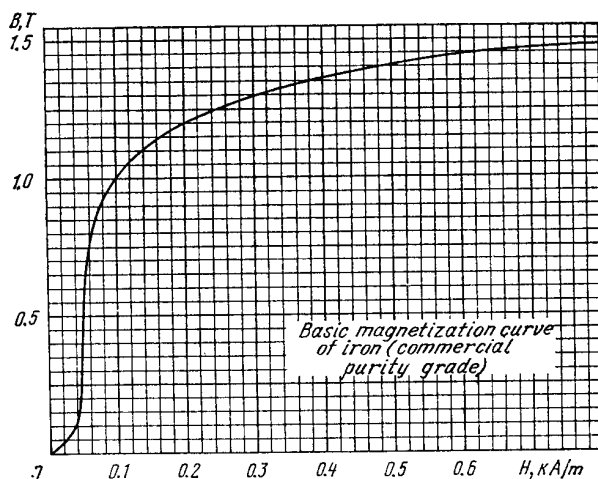
Obr. 4.19 Proudý ve všech třech fázích primární strany ve stavu na krátko



Obr. 4.20 Proudý ve všech třech fázích sekundární strany ve stavu na krátko

## 5 Přehled magnetizačních charakteristik

Pro úplnost zde uvádím několik magnetizačních charakteristik, jež se následně dají využít pro rozšíření knihovny. Následující charakteristiky jsem zpracoval pomocí tabulky, které se zadávají do programu DYNAST. Rozšíření o více magnetizačních charakteristik, než jaké jsem použil pro moji simulaci je způsob jak co nejvíce zhodnotit výslednou práci a její použitelnost v praxi.



Obr. 5.1 Magnetizační charakteristika železa (komerční stupeň čistoty) [20]

Tab. 5.1 Magnetizační charakteristiky železa (komerční stupeň čistoty)

B [T]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
H [A/m]	0	40	42	45	48	50	52	59
B [T]	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,45
H [A/m]	62	78	100	140	180	300	480	600

Tab. 5.2 Transformátorový plech 4% Si

B [T]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
H [A/m]	0	20	50	65	82	110	140	175
B [T]	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,35	1,4
H [A/m]	210	262	337	410	519	660	800	1000

Daná charakteristika je přiložena v přílohách viz. Příloha A.

Tab. 5.3 ocel E11

B [T]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
H [A/m]	0	40	60	70	80	98	117	140
B [T]	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,35	1,4
H [A/m]	167	200	240	300	400	550	700	900

Daná charakteristika je přiložena v přílohách, viz. příloha A.

Tab. 5.4 Transformátorový plech Tloušťky 0,35 E13

B [T]	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1
H [A/m]	12	15,5	18,5	20,1	22,2	24,1	26	31
B [T]	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2
H [A/m]	34	40	50	64	90	180	1100	10000

Daná charakteristika je přiložena v přílohách, viz. příloha B.

## Závěr

V první kapitole jsem se zaměřil na obecný popis transformátoru, jaký je účel a užití transformátoru, odvození základní rovnice, zapojení vinutí trojfázových transformátorů a s tím související kapitolu hodinové číslo.

V kapitole druhé je popsán magnetický obvod transformátoru a problém nelinearity v podobě hystereze.

Třetí kapitola je věnována výpočtu dvou konkrétních transformátorů, které jsem si zvolil pro simulaci v programu DYNAST, jeden jednofázový a druhý trojfázový.

V předposlední kapitole jsem se věnoval prezentaci výsledků nasimulovaných v programu DYNAST. Součástí této kapitoly byla v neposlední řadě i práce s programem, jež zabrala spoustu času se spuštěním simulace. Simulace transformátorů se skládala z náhradního schématu, kde jsem místo příčných prvků volil dva náhradní zdroje, jež měli představovat magnetický obvod transformátoru. Jednotlivé zdroje jsem popsal rovnicí  $N \cdot \dot{\Phi}$ , která mi reprezentuje indukované napětí ( $N$  - počet závitů,  $\Phi$  - označení magnetického toku v programu,  $\dot{\Phi}$  - derivace dle času). Podélné prvky jsem již měl vypočítané z kapitoly číslo 3. Pro výpočet magnetického toku jsem si v programu nadefinoval 3 rovnice. Nejdříve jsem vypočetl intenzitu magnetického pole, kde jsem pomocí vložené tabulky hysterezní křivky přiřadil hodnotu magnetické indukci. Výsledný magnetický tok jsem spočetl dle vzorečku  $\Phi = B \cdot S$ , kde  $S$  je průřez jádra, který jsem volil dle napětí transformátorů. Další kontrola simulace u trojfázového transformátoru spočívala i ve správném spojení vinutí, jelikož transformátory ve jmenovité řadě, kterou jsem si zvolil, se ve většině případů zapojují spojením, které se označuje Dyn1 (trojúhelník-hvězda, posun navzájem od sebe o  $30^\circ$ , tedy jednu hodinu), také muselo v simulaci sedět i hodinové číslo, tedy jinými slovy fázový posuv vinutí primární a sekundární strany. Dále se simulace použijí a udělají se z nich knihovny transformátorů s respektováním nelinearity magnetického obvodu, kde si budou moct uživatelé volit mezi jednofázovým a trojfázovým transformátorem a na výběr budou mít i možnost výběru transformátorových plechů, které se do knihovny přidají pomocí tabulky a daných hodnot závislosti  $B=f(H)$ , příklady magnetizačních charakteristik jsou v kapitole číslo 5.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

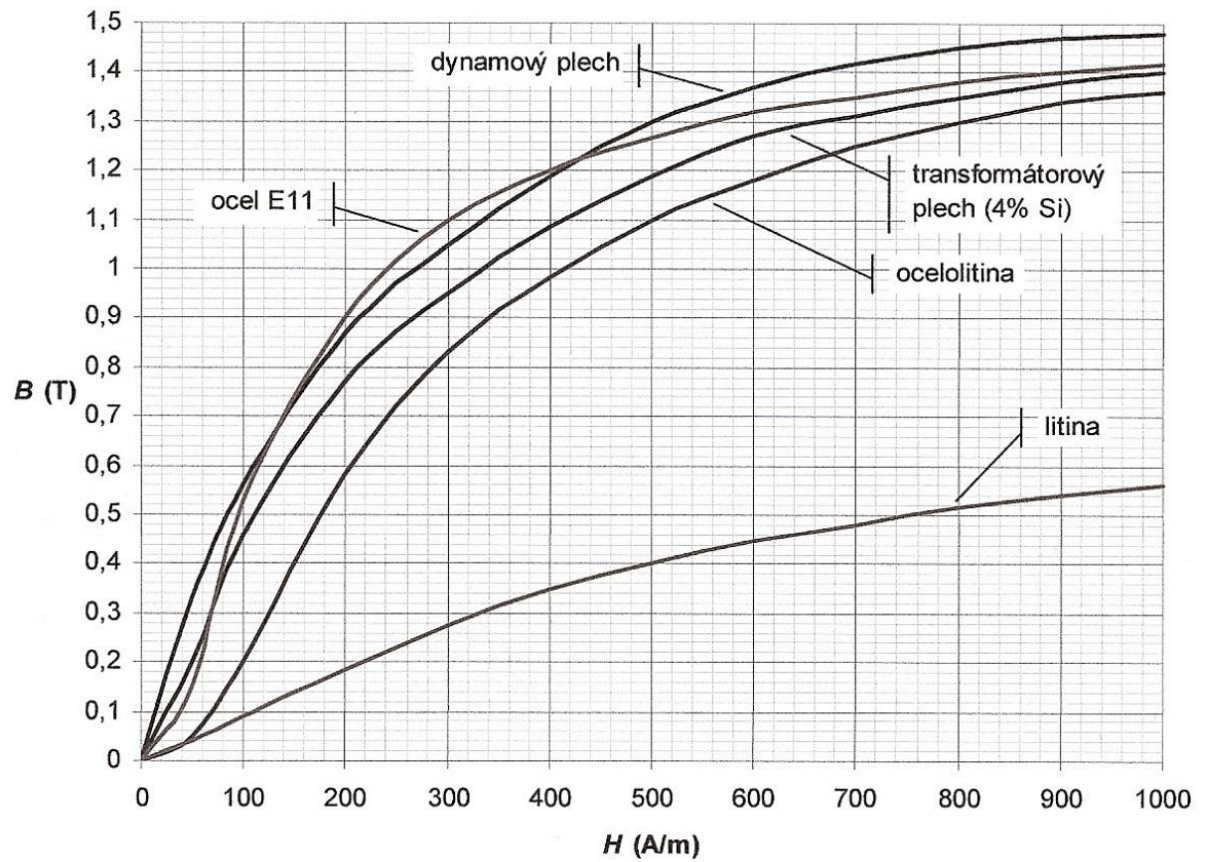
- [1] BAŠTA, Jan, Jaroslav CHLÁDEK a Imrich MAYER. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1968.
- [2] BARTOŠ. *Elektrické stroje*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2001.
- [3] KONÍČEK, Václav. *Elektrické stroje* [online]. 2008 [cit. 2013-06-01]. Dostupné z: <http://www.vosaspsekrizik.cz/cs/download/studium/sps/el-stroje-a-pristroje/transformatory.pdf>
- [4] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 1*. Praha: Academia, 1980.
- [5] Elektronická učebnice. In: *Středná priemyselná škola Levice* [online]. 2007 [cit. 2013-06-01]. Dostupné z: <http://www.spslevice.sk/soc-uceb-siz2007/Elektronicka%20ucebnica%20SIZ/HTML/Jednofazove%20transformatory/1f.%20trafo.htm>
- [6] Fyzika. In: *Fyzika na GBN* [online]. 2005 [cit. 2013-06-01]. Dostupné z: [http://fyzika.gbn.cz/phprs/image/fyzika/elmag/strid\\_p\\_e/transformator\\_3.jpg](http://fyzika.gbn.cz/phprs/image/fyzika/elmag/strid_p_e/transformator_3.jpg)
- [7] Autotransformator. In: *Wikipedia* [online]. 2004 [cit. 2013-06-01]. Dostupné z: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/98/Autotransformator.png/400px-Autotransformator.png>
- [8] KOPEČEK, Jan a Miloš DVOŘÁK. *PŘÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY měřicí a jisticí*. Praha: Academia, 1966.
- [9] Magnetization curve. In: *The Free Dictionary* [online]. 2009 [cit. 2013-06-01]. Dostupné z: <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Magnetization+Curve>
- [10] TUČEK, Jiří. Úvod do magnetismu, magnetické vlastnosti materiálů a magnetické jevy v nanosvětě. 2010. Dostupné z: <http://nanosystemy.upol.cz/upload/10/tucek-uvod.pdf>
- [11] Magnetické vlastnosti látek. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. 2007 [cit. 2013-06-01]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/295-magneticke-vlastnosti-latek>
- [12] Křivky prvotní magnetizace. In: *Univerzita obrany* [online]. 2002 [cit. 2013-06-01]. Dostupné z: [http://user.unob.cz/zaplatilek/ZEL/Tema07\\_Obr/Obr17.jpg](http://user.unob.cz/zaplatilek/ZEL/Tema07_Obr/Obr17.jpg)
- [13] Přednáška 6. In: *Portál zčú* [online]. 2011 [cit. 2013-06-01]. Dostupné z: [https://portal.zcu.cz/wps/myportal!/ut/p/c5/hY5bDoIwEEXXwgJMhyLgb22xoFApAiI\\_BKNRiA8SDQZXLz6iifFx5\\_PkzL0oRe3t8rpY5cdiv8s3KEGpkQEHlyAajRkY6pCy\\_2KEq3NLYmZFRTuyu6QJwE-uAhT7BHokBHO2PPUUIJdLNJ2au85pi4Z1qH5Vvk2opRYzC3w2FT1ROgv4iDqEzJMI1odO66TXr786b61fQuDOzbHkms8wcAebgHUcCjli12EP\\_2119Fr9kQ\\_kkwt7v12iahvVIRXYJ6loF694ZRU!/dl3/d3/L2dJQSEvUUt3QS9ZQnZ3LzZfMEcwNIJBM0NW\\_RDA2MUpDRDFKQzEwMDAwMDA!/">https://portal.zcu.cz/wps/myportal!/ut/p/c5/hY5bDoIwEEXXwgJMhyLgb22xoFApAiI\\_BKNRiA8SDQZXLz6iifFx5\\_PkzL0oRe3t8rpY5cdiv8s3KEGpkQEHlyAajRkY6pCy\\_2KEq3NLYmZFRTuyu6QJwE-uAhT7BHokBHO2PPUUIJdLNJ2au85pi4Z1qH5Vvk2opRYzC3w2FT1ROgv4iDqEzJMI1odO66TXr786b61fQuDOzbHkms8wcAebgHUcCjli12EP\\_2119Fr9kQ\\_kkwt7v12iahvVIRXYJ6loF694ZRU!/dl3/d3/L2dJQSEvUUt3QS9ZQnZ3LzZfMEcwNIJBM0NW\\_RDA2MUpDRDFKQzEwMDAwMDA!/](https://portal.zcu.cz/wps/myportal!/ut/p/c5/hY5bDoIwEEXXwgJMhyLgb22xoFApAiI_BKNRiA8SDQZXLz6iifFx5_PkzL0oRe3t8rpY5cdiv8s3KEGpkQEHlyAajRkY6pCy_2KEq3NLYmZFRTuyu6QJwE-uAhT7BHokBHO2PPUUIJdLNJ2au85pi4Z1qH5Vvk2opRYzC3w2FT1ROgv4iDqEzJMI1odO66TXr786b61fQuDOzbHkms8wcAebgHUcCjli12EP_2119Fr9kQ_kkwt7v12iahvVIRXYJ6loF694ZRU!/dl3/d3/L2dJQSEvUUt3QS9ZQnZ3LzZfMEcwNIJBM0NW_RDA2MUpDRDFKQzEwMDAwMDA!/)



- 
- [14] Hysteresis curve. In: *Wikipedia* [online]. 2010 [cit. 2013-06-01]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Hysteresiskurve.svg>
- [15] Magnetic properties. In: *IETE-elan* [online]. 2004 [cit. 2013-06-01]. Dostupné z: [http://iete-elan.ac.in/solution/jun2004/Sol-D04-J04\\_files/image004.jpg](http://iete-elan.ac.in/solution/jun2004/Sol-D04-J04_files/image004.jpg)
- [16] KOČMAN, Karel, Josef HOLBA, Alexander IHLÁR a Rudolf MRAVEC. *Elektrické stroje a přístroje 1*. Praha: SNTL, 1990.
- [17] JIRÁK, Josef, Rudolf AUTRATA, Karel LIEDERMANN, Zdenka ROZSÍVALOVÁ a Marie SEDLAŘÍKOVÁ. *Matreriály a technická dokumentace* [online]. 2002 [cit. 2013-06-01]. Dostupné z: <http://uloz.to/xtupe1u/materialy-v-elektrotechnice-pdf>
- [18] VYBÍRAL, Bohumil. *Magnetické pole v látce* [online]. 2010 [cit. 2013-06-01]. Dostupné z: [http://www.jaroska.cz/fo/\\_media/archiv/knihovna/magvll.pdf](http://www.jaroska.cz/fo/_media/archiv/knihovna/magvll.pdf)
- [19] MANN, Heřman. *Využití počítače při elektrotechnických návrzích*. Praha: SNTL, 1984.
- [20] Basic magnetization curve of iron. In: *Solutioninn* [online]. 2006 [cit. 2013-06-06]. Dostupné z: <http://www.solutioninn.com/physics/electricity-and-magnetism/magnetic-fields/fig.-3.76-illustrates-basic-magnetization-curve-of-iron>

## Přílohy

### Příloha A – Magnetizační charakteristiky vybraných materiálů



**Příloha B – Magnetizační charakteristika transformátorového plechu E13 Tloušťky 0,35**