



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

MODELÝ TRANSFORMÁTORŮ PRO VÝUKOVÉ ÚČELY

TRANSFORMER MODELS FOR EDUCATIONAL PURPOSES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Beran

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ivo Pazdera, Ph.D.

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**
Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Vojtěch Beran

ID: 174267

Ročník: 3

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Modely transformátorů pro výukové účely

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Realizujte vybrané typy lineárních modelů transformátoru v programu Simulink
2. Modely upravte s ohledem na nelinearitu magnetického obvodu
3. Ověřte funkčnost modelů a zpracujte stručný návod pro jejich obsluhu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PATOČKA, M. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. odborné knihy. odborné knihy. Brno: VUTIUM, 2011. 564 s. ISBN: 978-80-214-4003- 6.
- [2] Veltman A., Pulle D., Doncker R.W, Fundamentals of Electrical Drives, 2007

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 31.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Ivo Pazdera, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je návrh a realizace modelů transformátoru v programu Matlab a Simulink. Navržené modely objasňují teoretické předpoklady modelů. Cílem je zároveň vytvořit návody k použití těchto modelů.

Teoretická část bakalářské práce je zaměřena na teorii transformátoru, která definuje vlastnosti, fyzikální veličiny, parametry a vztahy mezi nimi. V této části je definován přechod ze základního modelu k modelům napětového a proudového transformátoru, které tvoří základ k realizaci modelů v programu Simulink. Další část popisuje vektorovou transformaci potřebnou k modelování třífázové soustavy, určení výkonu, napětí a proudu na transformátoru a změně zapojení jeho vinutí a zátěže. Poslední část popisuje nelinearitu magnetického obvodu.

Praktická část bakalářské práce se věnuje praktické realizaci modelů transformátoru v programu Simulink. Mezi realizované modely patří model transformátoru napětí a proudu. Každý model má svou lineární a nelineární podobu a může pracovat v jednofázové nebo třífázové soustavě. Výstupem simulace jsou hodnoty a průběhy napětí, proudu a výkonů transformátoru při zadané zátěži. Pro každý model je uveden stručný návod k obsluze.

Abstract

The aim of the bachelor's thesis is to project and realize models of transformers in Matlab and Simulink program. Projected models explain the theoretical precondition of the models. The aim is also to create manuals for models usage.

The theoretical part bachelor's thesis is focused on transformer theory, which defines the properties, physical quantities, parameters and relations between them. In this part is defined transition from the basic model to models of current and voltage transformer, which forms the basis for the realization of simulations in Simulink. The next part describes vector transformation needed for modeling three phase system, defining the power, voltage and current of the transformer and for change of winding connection. Last part describes non-linear magnetic field.

The practical part of the bachelor's thesis is the practical implementation of transformer models in Simulink. Realized models are models of current and voltage transformers. Each model has a form of linear and non-linear model and can work in single-phase or three-phase system. The output of simulation are values and voltage, current and power waveforms for a given load. There is a brief manual for usage for each model.

Klíčová slova

Transformátor, MATLAB, Simulink, transformátor napětí, transformátor proudu, vektorový prostor, vektor, třífázová soustava, lineární model transformátoru, nelineární model transformátor, vektorová transformace

Keywords

Transformer, MATLAB, Simulink, voltage transformer, current transformer, vector space, vector, three-phase system, linear transformer model, non-linear transformer model, vector transformation

Bibliografická citace:

BERAN, V. *Modely transformátorů pro výukové účely*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 70 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ivo Pazdera, Ph.D..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Modely transformátoru pro výukové účely jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 31.května 2017

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Ivovi Pazderovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 31.května 2017

.....
podpis autora

Obsah

Úvod	1
1 Teorie transformátorů.....	3
1.1 Základní vlastnosti	3
1.2 Základní obvodový model	4
1.3 Model transformátoru napětí	5
1.4 Model transformátoru proudu	6
2 Magnetické obvody	7
2.1 Popis magnetického obvodu	7
2.2 Lineární magnetický obvod	7
2.3 Nelineární magnetický obvod.....	8
3 Třífázová transformace vektorů	9
3.1 Třífázová soustava v elektrických strojích	9
3.2 Aplikace vektorového prostoru v třífázové soustavě.....	10
3.3 Vektorová transformace v zapojení do hvězdy a do trojúhelníku.....	11
3.3.1 Použití vektorového prostoru v zapojení hvězda.....	11
3.3.2 Použití vektorového prostoru v zapojení trojúhelník	12
3.3.3 Vektorová transformace trojúhelník/hvězda	13
3.4 Výpočet výkonu a napětí pomocí vektorové transformace.....	14
4 Lineární model transformátoru	15
4.1 Parametry lineárního modelu.....	15
4.2 Model transformátoru napětí	16
4.2.1 Volba zapojení vinutí transformátoru a zátěže	16
4.2.2 Zvolení zdroje modelu	18
4.2.3 Vlastní schéma modelu	21
4.2.4 Analýza výstupních signálů při jednofázovém zdroji	25
4.2.5 Analýza výstupních signálů při třífázovém zdroji.....	27
4.3 Model transformátoru proudu	32
4.3.1 Primární a sekundární strana	32
4.3.2 Analýza výstupních signálů při jednofázovém zdroji	34
4.3.3 Analýza výstupních signálů při třífázovém zdroji.....	36
5 Nelineární model transformátoru.....	39
5.1 Parametry nelineárního modelu transformátoru.....	39
5.2 Model transformátoru napětí	41
5.2.1 Princip a funkčnost modelu	41
5.2.2 Primární a sekundární strana	42
5.2.3 Analýza výstupních signálů při jednofázovém zdroji	44
5.2.4 Analýza výstupních signálů při třífázovém zdroji.....	45

5.3	Model transformátoru proudu	47
6	Návody k použití modelů	48
7	Příklad aplikace modelu.....	49
8	Závěr	51
	Literatura	53
	Seznam symbolů, veličin a zkratek.....	54
	Seznam příloh.....	55

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schematická značka transformátoru. [2]	3
Obrázek 2: Obvodový model transformátoru se vzájemnou indukčností. [2]	5
Obrázek 3: Lineární magnetizační charakteristiky	7
Obrázek 4: Nelineární magnetizační charakteristika.....	8
Obrázek 5: Přípojnice třífázového stroje	9
Obrázek 6: Bloky umožňující změnu zapojení transformátoru	17
Obrázek 7: Uspořádání subsystému Třífázová napájecí soustava.....	19
Obrázek 8: Uspořádání Transformace třífázové soustavy na alfa beta.....	20
Obrázek 9: Vnitřní uspořádání Převod zapojení zdroje	20
Obrázek 10: Vnitřní uspořádání Přepočet primárního proudu	21
Obrázek 11: Vnitřní uspořádání Převod proudu sekundáru na výstup.....	23
Obrázek 12: Vnitřní uspořádání Převod výstupního proudu na zátěž.....	23
Obrázek 13: Vnitřní uspořádání Převod napětí zátěže na sekundár	24
Obrázek 14: Subsystém analýzy výkonu třífázově napájeného transformátoru	28
Obrázek 15: Detail průběhu činného výkonu transformátoru napětí.....	29
Obrázek 16: Uspořádání subsystémů pro amplitudu a ef. hodnotu signálu	30
Obrázek 17: Detail průběhu činného výkonu transformátoru proudu	37
Obrázek 18: Hodnoty spřaženého toku v závislosti na proudu	40
Obrázek 19: Nelinearita magnetizační reaktance	43
Obrázek 20: Náznak proložení hodnot blokem Lookup Table	44

Seznam tabulek

Tabulka 1: Parametry transformátoru	15
Tabulka 2: Hodnoty simulace třífázového transformátoru napětí pro Y zátěž.....	31
Tabulka 3: Hodnoty simulace třífázového transformátoru napětí pro D zátěž	31
Tabulka 4: Hodnoty simulace třífázového transformátoru proudu pro Y zátěž	38
Tabulka 5: Hodnoty simulace třífázového transformátoru proudu pro D zátěž	38

ÚVOD

Transformátory jsou jedním z nejzákladnějších a z nejrozšířenějších zástupců elektrických strojů. Jde o netočivý elektrický stroj pracující se střídavým proudem na principu elektromagnetické indukce. V primárním vinutí se mění elektrická energie na magnetickou, která za vzniku magnetického toku vytváří na sekundární straně transformátoru opět energii elektrickou. Mezi typické transformátory patří například v elektrických rozvodných sítích výkonové transformátory, v laboratořích regulační transformátory (autotransformátory), pro měření velkých proudů, napětí a výkonu měřicí transformátory a v slaboproudých zařízeních speciální transformátory (např. oddělovací, impulsní apod.).

Téma bakalářské práce Modely transformátorů pro výukové účely jsem si vybral z důvodu zajímavosti tématu a zaměření na program Matlab a jeho modelové prostředí Simulink. Jedním z hlavních důvodů byl zároveň fakt, že modely vytvořené realizací této bakalářské práce budou moci dále sloužit pro výukové účely a mohou studentům ujasnit funkčnost a zjednodušit jejich pohled na problematiku magnetických obvodů a zejména transformátorů.

Bakalářská práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části se zaměřuji na definování teoretických základů pro následnou tvorbu matematických modelů transformátorů. Jedná se hlavně o základní teorii transformátorů, kde dochází k postupnému rozšíření základního obvodového modelu do konkrétních podob využitých při realizaci transformátoru napětí a proudu. Další teoretická část pojednává o základech teorie potřebné pro tvorbu modelů využívajících nelinearity magnetické obvodu aplikované v lineárních obvodech. Dále je v teoretické části kapitola věnována transformaci vektorů a použití vektorového prostoru. Tato kapitola je základem potřebným zejména pro modely třífázově napájených modelů transformátorů, jejich analýzu a pro možnosti měnit konfiguraci zapojení vinutí.

V praktické části bakalářské práce jsem na základech teoretických předpokladů pro jednotlivá náhradní zapojení realizoval dva lineární modely transformátorů. Pro tyto modely je detailně popsán princip funkčnosti a provedení, možnosti simulace a následná analýza. Nelinearity magnetického obvodu definované v teoretické části bylo použito v části věnované nelineárním modelům transformátoru. Na vybraném nelineárním modelu transformátoru napětí je zde opět vysvětlen detailně princip funkčnosti, provedení a možnosti simulace. Pro druhý lineární model přepracovaný do jeho nelineární podoby je zde pouze nastíněna analogie mezi jednotlivými modely.

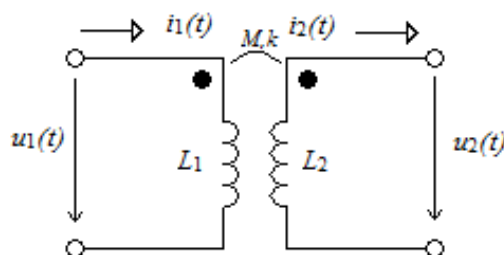
Cílem pro bakalářskou práci bylo navrhnout modely vybrané lineární modely transformátoru a pomocí simulací demonstrovat potvrzení teoretické předpoklady. Teoretické předpoklady jsou porovnávány s výsledky získanými analýzou simulací konkrétních modelů. Dalším cílem bylo zahrnout do vytvořených lineárních modelů nelinearitu magnetického obvodu. Aby mohly modely sloužit pro výukové účely dalším studentům bylo dalším cílem vytvořit ke každému realizovanému modelů stručný návod pro použití, provedení konkrétních simulací a pro usnadnění orientace v jednotlivých modelech.

1 TEORIE TRANSFORMÁTORŮ

Cílem této kapitoly je seznámení se s teorií transformátorů, která je základem pro tvorbu simulací jednotlivých modelů transformátorů. Popisuje matematické modely jednotlivých typů transformátorů a shrnuje základní předpoklady matematické analýzy nezbytné k tvorbě těchto modelů.

1.1 Základní vlastnosti

Modelem, na kterém vysvětlíme princip funkčnosti transformátoru je jednofázový model ideálního transformátoru. Takový transformátor je tvořen z jádra, které je tvořeno z feromagnetického materiálu a ze dvou vinutí, mezi kterými je vzduchová mezera. Typické schematické zobrazení je znázorněno na Obrázek 1 na kterém jsou znázorněny orientace okamžitých hodnot vstupních a výstupných napětí a proudů. Začátky jednotlivých vinutí jsou označeny tečkami. Toto zobrazení je v literatuře často označované jako lineární pasivní přenosový dvojbran. Pro zjednodušenou analýzu takového transformátoru je nutno zavést několik základních zjednodušujících předpokladů. [2], [3]



Obrázek 1: Schematická značka transformátoru. [2]

Jedním z předpokladů je to, že magnetizační charakteristika feromagnetického obvodu je lineární. Proud sekundárního vinutí má opačný směr oproti běžnému značení z důvodu uvažování odporové zátěže. Tento zjednodušený transformátor tedy pracuje ve spotřebičovém režimu. Dalšími předpoklady je zanedbání vířivých ztrát ve feromagnetiku a Joulových ztrát v mědi. Tyto ztráty je ale snadno možné implementovat do výsledného řešení. Zároveň neuvažujeme hysterezní ztráty feromagnetika, které se nezahrnují do teorie lineárních obvodů. [1], [2] Podle principu reciprocity, který je základní vlastností všech pasivních přenosových soustav, je možné dokázat, že vzájemná indukčnost M a činitel vazby k transformátoru zobrazených na Obrázek 1 jsou pro oba směry přenosu transformátoru stejné. Modely transformátoru znázorněné s vlastní a vzájemnou indukčností jsou definovány právě parametry L_1 a L_2 . Vzájemnou indukčnost je tedy možné definovat buď na primární a nebo na sekundární straně.

Jsou charakterizovány pomocí následujících rovnic, které jsou jasné dané a platné pro dva jakékoliv vodiče a to i bez přítomnosti feromagnetika [2]:

$$M = M_{12} = M_{21}, \quad (1)$$

$$k = k_{12} = k_{21}. \quad (2)$$

Je také dáno, že každý přenosový dvojbran má tři stupně volnosti. To zaručuje možnost popsat dvojbran pomocí tří nezávislých přenosových nebo obvodových parametrů. U transformátoru se využívá trojice parametrů L_1, L_2, M nebo L_1, L_2, k . Vzhledem k tomu, že vztah mezi těmito parametry dvojbranu lze vyjádřit pomocí rovnice (3), je jeden z těchto čtyř parametrů nadbytečný a nepotřebný pro analýzu.

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (3)$$

Pro transformátor tak plyne několik základních lineárních závislostí ze kterých jsou nejdůležitější dvě následující známé jako napěťový převod a proudový převod: [1], [2]

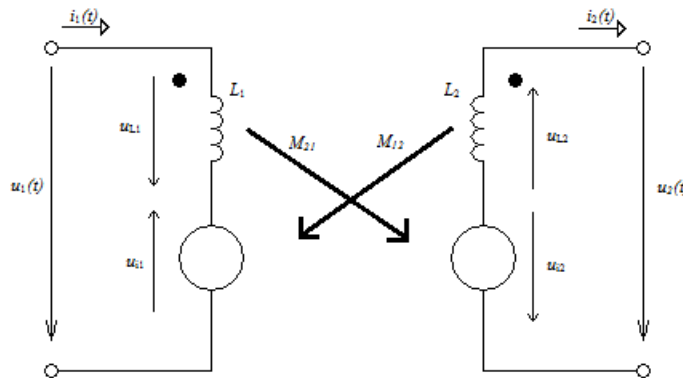
$$K_{U,21,0} = K_{I,12,K}, \quad (4)$$

$$K_{I,21,K} = K_{U,12,0}. \quad (5)$$

1.2 Základní obvodový model

Definováním základního matematického modelu transformátoru dostaneme přímou sadu rovnic popisující fyzikální zákonitosti uvnitř toho obvodu. Nevypovídá sice tolik o konkrétních užitečných vlastnostech transformátorů, ale poslouží nám jako základ pro tvorbu dalších modelů, které již budeme simulovat prostřednictvím programu Matlab a Simulink.

Základem je přímá fyzikální interpretace vzájemné indukčnosti a vlastní indukčnosti primárního, respektive sekundárního vinutí. Základní obvodový model znázorněný na Obrázek 2, obsahující zdroje indukovaného napětí vznikajícího průchodem proudu, tvoří výchozí stav pro matematickou definici lineárního transformátoru. [1], [2]



Obrázek 2: Obvodový model transformátoru se vzájemnou indukčností. [2]

Definováním okamžitých hodnot parametrů modelu transformátoru získáme takzvanou impedanční Z-matici, která vyjadřuje okamžitou hodnotu napětí na primární a sekundární straně transformátoru a je charakterizována sadou rovnic:

$$u_1(t) = L_1 \frac{di_1(t)}{dt} - M \frac{di_2(t)}{dt}, \quad (6)$$

$$u_2(t) = M \frac{di_1(t)}{dt} - L_2 \frac{di_2(t)}{dt}. \quad (7)$$

Záporná znaménka v rovnici (6) a (7) jsou zvolena záměrně kvůli respektování směru proudu sekundárního vinutí zobrazeném v základním obvodovém modelu na Obr. 2. [2], [4]

V praxi se dá obvodový model dle Obr.2 realizovat pomocí dvou operačních zesilovačů a dvou cívek bez magnetické vazby. Oba operační zesilovače zastávají funkci derivačních zesilovačů a pracují jako tzv. zdroje napětí řízené derivací protilehlého proudu. [2]

1.3 Model transformátoru napětí

Model označovaný jako transformátor napětí je napájený ze zdroje napětí a poslouží nám jako jeden ze základních modelů pro další matematickou analýzu. Vztahy definující proud primárního vinutí a napětí sekundárního vinutí jsou shrnuty v následujících dvou rovnicích tvořících tzv. H_U matici:

$$i_1(t) = I_{\mu 0} + \frac{1}{L_1} \int u_1(t) dt + k \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} i_2(t), \quad (8)$$

$$u_2(t) = k \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} u_1(t) - L_2(1 - k^2) \frac{di_2(t)}{dt}. \quad (9)$$

Okamžitá hodnota celkového primárního proudu je pak tedy dle vztahu (8) rovná součtu magnetizačního primárního proudu (první dva členy rovnice)

a proudu sekundárního vinutí přepočteného na primární stranu. Napětí sekundárního vinutí je pak rovno výstupnímu napětí naprázdno ochuzeného o úbytek napětí na výstupní indukčnosti transformátoru. [1], [2]

1.4 Model transformátoru proudu

Spolu s modelem transformátoru napětí je transformátor proudu dalším ze základních modelů potřebných pro matematickou analýzu transformátorů. Základní soustava dvou rovnic popisujících matematický model transformátoru proudu tvoří tzv. H₁ matici. Ta je popsána následujícími rovnicemi pro napětí primárního vinutí a proudu sekundárního vinutí:

$$u_1(t) = L_1(1 - k^2) \frac{di_1(t)}{dt} + k \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} u_2(t), \quad (10)$$

$$i_2(t) = k \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} i_1(t) - \left(I_{\mu 0} + \frac{1}{L_2} \int u_2(t) dt \right). \quad (11)$$

Z rovnice (10) je možné říct, že napětí primárního vinutí je rovno součtu úbytku na vstupní indukčnosti a primárního napětí přepočítaného ze sekundární strany na primární stranu. Proud sekundárního vinutí definovaný rovnicí (11) je pak roven rozdílu sekundárního proudu nakrátko přepočítaného z primární strany a magnetizačního sekundárního proudu. [1], [2]

2 MAGNETICKÉ OBVODY

Obsah této kapitoly tvoří základní teoretické poznatky potřebné k vytvoření matematických modelů transformátorů týkající se magnetickým obvodům a magnetismu jako takového. Základními částmi je definice magnetismu a rozdělení magnetických obvodů. Cílem pro matematickou analýzu bude vyjádření indukovaného napětí v lineární a nelineární cívce.

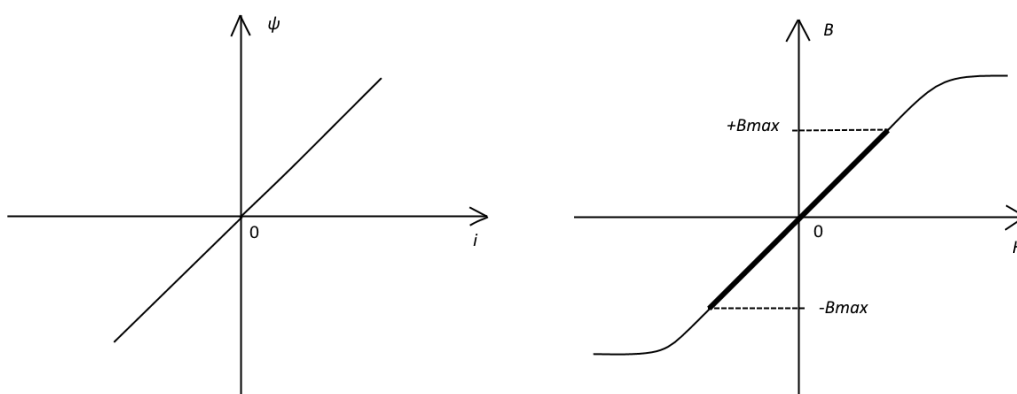
2.1 Popis magnetického obvodu

Magnetismus lze sledovat u feromagnetických materiálů. Je způsobený pohybem elektrických nábojů látky. Tento pohyb je vzbuzený průchodem elektrického proudu nebo pohybem elektronů v atomech feromagnetického materiálu.

Diskrétní magnetický obvod, který nás u transformátoru zajímá, obsahuje feromagnetické jádro s velkou permeabilitou čím že zajištěno, že téměř všechen magnetický tok prochází prostorově ohraničenou cestou. Tato cesta je vymezena geometrií jádra, u kterého sledujeme několik magnetických veličin. Magnetický obvod lze popsat pomocí tzv. magnetizační charakteristiky $\psi = \psi(i)$, ze které lze odečíst tvar funkční závislosti spřaženého magnetického toku magnetického obvodu na proud, který tímto obvodem prochází. Podle této závislosti lze potom magnetické obvody rozdělit na lineární a nelineární. [2]

2.2 Lineární magnetický obvod

Tvar magnetizační charakteristiky popisující lineární magnetický obvod je možné vidět na Obrázek 3.



Obrázek 3: Lineární magnetizační charakteristiky

Pro spřažený tok a proud magnetického obvodu s touto magnetizační charakteristikou musí platit přímá úměra a platí tedy následující vztah:

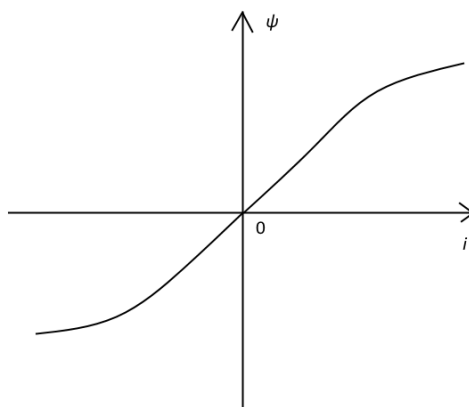
$$\psi(t) = L \cdot i(t). \quad (12)$$

Konstantou úměrnosti tohoto vztahu je indukčnost L . Ze vztahu je zároveň možné si povšimnout faktu, že přímá úměra platí pro okamžité hodnoty veličin v libovolném čase.

Pokud se pracovní bod pohybuje v lineární oblasti magnetizační charakteristiky, lze v technické praxi považovat feromagnetický obvod za téměř lineární. Místo magnetizační charakteristiky $\psi = \psi(i)$ je vhodnější použít v literatuře nazývanou relativní normovanou charakteristiku $B = B(H)$ (možno vidět na Obrázek 3 vpravo). Hlavní výhodou této normované charakteristiky je to, že průběh není závislý na geometrických rozměrech magnetického obvodu a proto je možné porovnávat vlastnosti jednotlivých feromagnetických materiálů. [2], [1]

2.3 Nelineární magnetický obvod

Magnetizační charakteristika nelineárního magnetického obvodu je zobrazena na Obrázek 4. Z této charakteristiky je zřejmé, že mezi spřaženým tokem a proudem magnetického obvodu nelze vyčíst žádnou lineární závislost. Matematický model transformátoru s použitím předpokladů nelineárního magnetického obvodu lze provést pomocí definované převodní tabulky zadané buď hysterezní křivkou, tj. závislostí $B = B(H)$, nebo pomocí převodní tabulky vycházející z magnetizační charakteristiky $\psi = \psi(i)$ konkrétního materiálu. Pro obě závislosti je nutné do modelového prostředí Matlabu zadat dostatečné množství hodnot těchto charakteristik a za pomoci vhodné matematické metody vytvořit plynulou funkci. Další možností by bylo použití analytické funkce vycházející z přímých vnitřních fyzikálních jevů. Pro potřeby našich simulací ale bude dostačující vhodně hustá síť hodnot. [1],[2]



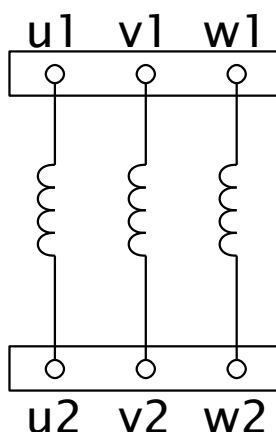
Obrázek 4: Nelineární magnetizační charakteristika

3 TŘÍFÁZOVÁ TRANSFORMACE VEKTORŮ

Cílem této kapitoly je položit teoretický základ pro převod jednofázové soustavy na třífázovou a následný přesun do vektorového prostoru. Zároveň jsou zde definované přechody mezi zapojením do trojúhelníku a do hvězdy. Většina elektrických pohonů je napájena právě z třífázové soustavy z důvodu účinnějšího přenosu elektrické energie od zdroje k zátěži, než tomu bývá u jednofázové soustavy. Pro zjednodušení modelace a ujasnění funkčnosti jednofázových a třífázových transformátorů je nezbytné definovat vztah mezi jednofázovou a třífázovou soustavou a jednotlivými zapojeními.

3.1 Třífázová soustava v elektrických strojích

Na přípojnicích elektrických strojů můžeme najít 2 vstupy pro každé vinutí/fázi podobně tak, jak je zobrazeno na Obrázek 5. Mezi svorkami jednotlivých vinutí je zde zobrazena vlastní impedance vinutí pro kterou se předpokládá, že má stejnou velikost na každé fázi.



Obrázek 5: Přípojnice třífázového stroje

Jednotlivé vinutí jsou označeny písmeny u , v a w . Začátky vinutí jsou označeny jedničkou a konce dvojkou. Svorkovnice je záměrně zvolena tak, aby uživatel byl schopen zapojit stroj do dvou odlišných konfigurací. Jednou je hvězda a druhou je trojúhelník. [3]

Zapojení do hvězdy se vyznačuje spojením konců vinutí k sobě a jednotlivé fáze napájecího zdroje jsou připojeny na začátky těchto vinutí. Pokud si každou fázi zdroje představíme jako obyčejný zdroj jednofázového vinutí, můžeme na základě Kirchhoffových zákonů definovat vztah mezi zdrojem a fázovými veličinami. Platí tedy, že součet proudů i součet napětí v jednotlivých fázích se musí rovnat nule. [3]

3.2 Aplikace vektorového prostoru v třífázové soustavě

Pro zahrnutí předešlých skutečností do matematické analýzy transformátorů je nutné v první řadě definovat tzv. vektorový prostor. Oproti použití komplexního třífázového systému je výhodnější použití vektorového prostoru vedoucího ke značnému zjednodušení. Typický vektorový prostor je dán vztahem (13), kde konstanta K je skalární veličinou reprezentující velikost vektoru, fázový posun φ je roven $2\pi/3$ a proměnné x_R , x_S a x_T jsou tři časově závislé proměnné, které nemusí mít nutně sinusový průběh. [1]

$$\vec{x} = K \cdot \{x_R + x_S e^{j\varphi} + x_T e^{j2\varphi}\}. \quad (13)$$

Pro další analýzu je třeba zakomponovat jednotlivé složky x_a , x_b , x_c do vektorového prostoru ve tvaru $\vec{x}_{abc} = x_\alpha + jx_\beta$, přičemž součet jednotlivých složek dává dohromady trojnásobek nulové složky, která může nabývat nenulové hodnoty. Pokud provedeme porovnání vektorových a skalárních veličin dostáváme převodovou matici ve tvaru:

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C & -\frac{C}{2} & -\frac{C}{2} \\ 0 & \frac{C \cdot \sqrt{3}}{2} & -\frac{C \cdot \sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}, \quad (14)$$

jakožto základ pro vyjádření jednotlivých skalárních složek a celkové transformaci vektorů.

Pro inverzní převod vektorového prostoru na skalární veličiny začneme vyjádřením reálné části komplexního tvaru vektorového prostoru x_α a dostaneme se k rovnici:

$$x_\alpha = C \cdot x_a - \frac{C}{2}(x_b + x_c). \quad (15)$$

Jak už bylo výše zmíněno, součet jednotlivých fázových proměnných je rovný trojnásobku nulové složky. Dosazením do rovnice (10) si tedy můžeme vyjádřit složku x_a jako:

$$x_a = \frac{2}{3C} \cdot x_\alpha + x_0. \quad (16)$$

Pokud obdobným způsobem vyjádříme zbývající 2 složky a použijeme stejnou substituci, dostaneme se k inverznímu maticovému zápisu odpovídajícímu rovnici (14).

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3 \cdot C} & 0 \\ -\frac{1}{3 \cdot C} & \frac{1}{C \cdot \sqrt{3}} \\ -\frac{1}{3 \cdot C} & -\frac{1}{C \cdot \sqrt{3}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot x_0 \quad (17)$$

Konstanta C používaná ve výpočtech je hodnota udávající invariantnost soustavy. V podstatě existují dvě hodnoty, kterých může nabývat. První z možností je hodnota $C = 2/3$. Vektorový prostor řízený touto hodnotou C je nazýván jako amplitudově invariantní forma. V této podobě dosahuje amplituda vektorového prostoru špičky fázové hodnoty proměnné. Druhou možností je hodnota pro $C = \sqrt{\frac{2}{3}}$. Takový vektorový prostor je nazýván výkonově invariantní a jeho amplituda dosahuje C -násobnou hodnotu amplitudy fázové hodnoty proměnné.[1]

3.3 Vektorová transformace v zapojení do hvězdy a do trojúhelníku

Jak už bylo výše zmíněno, podle potřeby uživatele lze elektrický stroj (stejně tak jako jeho zátěž) připojit buď do trojúhelníku nebo do hvězdy. Každé toto zapojení nám dodává do stroje různé hodnoty napětí a proudu, a tudíž i různý výkon. Rozdíl těchto hodnot je patrný právě i při použití vektorové transformace a je nutné ho zahrnout do tvořených třífázových modelů.

Proces převodu fázových proudů i napětí do formy vektorového prostoru je definován tím, že jednotlivé složky musí být převedeny do vektoru ve tvaru komplexního čísla. [1]

3.3.1 Použití vektorového prostoru v zapojení hvězda

Zapojením do hvězdy připojeného obvodu se rozumí uspořádání kdy jsou všechny konce vinutí jednotlivých fází stroje mezi sebou spojeny v tzv. neutrálním bodě. Tento bod většinou nebývá připojen k neutrálnímu bodu nebo nulové hladině zdroje. Je důležité si uvědomit, že fázová napětí jsou proměnnou časovou funkcí a nemusí být nutně sinusového průběhu. Kromě toho, součet tří fázových napětí nemusí být a ve skutečnosti není obvykle nulový. Na základě Kirchhoffových zákonů napětí a proudů budeme uvažovat součet fázových napětí i proudů nulový.

Pokud uvažujeme součet fázových napětí nulový, lze předpokládat i to, že impedance jednotlivých se považuje za stejné. Jednotlivé fázové proudy se pak tedy rovnají proudům tekoucím ze zdroje. Převod mezi proudy zdroje $i_{a,b,c}$ a proudy jednotlivých fázích zapojených do hvězdy $i_{Y1,2,3}$ lze definovat následujícím vztahem:

$$\begin{bmatrix} i_{Y1} \\ i_{Y2} \\ i_{Y3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Pokud zanedbáme nulovou složku napětí, platí pro napětí stejný vztah. Při transformaci do vektorového prostoru lze tedy postupovat dle rovnic definovaných v předešlé podkapitole vzhledem k tomu, že proudy i napětí třífázové soustavy se rovnají napětí třífázového zdroje.[1]

3.3.2 Použití vektorového prostoru v zapojení trojúhelník

Stejně tak při analýze transformace fázových napětí a proudů zapojených do trojúhelníka potřebujeme jednotlivé proměnné převést do vektorového prostoru. Zapojením do trojúhelníku se rozumí zapojení svorkovnice, kde konce a začátky vinutí různých fází jsou mezi sebou spojeny v párech $(u1,v2)$, $(v1,w2)$ a $(w1,u2)$ (viz Obr. 3). Toto zapojení se používá v aplikacích s převážně nízkou hladinou napětí zdroje. [1],[3]

Při analýze tohoto zapojení opět uvažujeme platnost druhého Kirchhoffův zákon jak tomu bylo v předešlé podkapitole při zapojení do hvězdy. Součet napětí jednotlivých fází je opět roven nule. Dle prvního Kirchhoffova zákona odpovídá součet proudů jednotlivými uzly fázových vinutí $i_{D1,2,3}$ rovnici (18).

$$i_{D1} + i_{D2} + i_{D3} = 3 \cdot i_{D0} \quad (19)$$

Výraz i_{D0} zde odpovídá tak zvané nulové složce proudu. Při simulaci obvodu ale žádný takový proud nebude existovat. Pokud ale použijeme první Kirchhoffův zákon na jeden z uzlů, do kterých teče proud zdroje, je proud v tomto uzlu roven rozdílu proudů tekoucích v jednotlivých vinutích. Pokud tento fakt zahrneme do analýza třífázové soustavy, dostáváme se ke vztahu (19).

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{D1} \\ i_{D2} \\ i_{D3} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Pro převod mezi napětím zdroje a napětím jednotlivých fází lze použít rovnici:

$$\begin{bmatrix} u_{D1} \\ u_{D2} \\ u_{D3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}. [1] \quad (21)$$

3.3.3 Vektorová transformace trojúhelník/hvězda

Pro převod napětí a proudu ve vektorovém prostoru lze definovat několik základních vztahů, pomocí kterých lze přepočítat napětí nebo proud ze strany zapojené do trojúhelníku na stranu zapojenou do hvězdy a naopak.

K definování napěťového převodu ze zapojení hvězda na trojúhelník je nutné přepočítat hodnoty napětí modelu zapojeného do hvězdy na ekvivalentní hodnoty v zapojení trojúhelníku. Model lze po takovém přepočtu považovat za model zapojený v trojúhelníku a lze ho tak i analyzovat. Zmíněný napěťový převod lze přepočítat pomocí následujícího vztahu:

$$\begin{bmatrix} u_{D\alpha} \\ u_{D\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos \frac{\pi}{6} & \sin \frac{\pi}{6} \\ -\sin \frac{\pi}{6} & \cos \frac{\pi}{6} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{Y\alpha} \\ u_{Y\beta} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Z rovnice lze usoudit, že transformací dojde ke zvýšení hodnoty napětí o $\sqrt{3}$ krát a k natočení fázorů o -30° .

V případě, že chceme převádět napětí v zapojení trojúhelník do zapojení hvězda, lze definovat napěťový převod obdobný tomu opačnému. V tomto ale dojde ke snížení hodnoty o $\sqrt{3}$ krát a natočení fázorů dojde k hodnotě $+30^\circ$. Vztah je následující:

$$\begin{bmatrix} u_{Y\alpha} \\ u_{Y\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \frac{\pi}{6} & -\sin \frac{\pi}{6} \\ \sin \frac{\pi}{6} & \cos \frac{\pi}{6} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{D\alpha} \\ u_{D\beta} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Pro převod proudu lze použít obdobných matic, jako tomu bylo pro napěťové převody. V případě proudového převodu ze zapojení do trojúhelníku na obvod zapojený do hvězdy lze použít následujícího vztahu, kdy je výsledný proud o $\sqrt{3}$ krát větší s otočeným fázorem $+30^\circ$:

$$\begin{bmatrix} i_{Y\alpha} \\ i_{Y\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos \frac{\pi}{6} & -\sin \frac{\pi}{6} \\ \sin \frac{\pi}{6} & \cos \frac{\pi}{6} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{D\alpha} \\ i_{D\beta} \end{bmatrix}. \quad (24)$$

Proud při přechodu z obvodu zapojeného do hvězdy přepočítávaného na trojúhelník dosahuje hodnoty $\sqrt{3}$ krát nižší a jeho fázor je otočen o -30° . Maticový zápis pro tento převod ve vektorovém prostoru lze zapsat jako:

$$\begin{bmatrix} i_{D\alpha} \\ i_{D\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \frac{\pi}{6} & \sin \frac{\pi}{6} \\ -\sin \frac{\pi}{6} & \cos \frac{\pi}{6} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{Y\alpha} \\ i_{Y\beta} \end{bmatrix} \cdot [1] \quad (25)$$

3.4 Výpočet výkonu a napětí pomocí vektorové transformace

Vektorovou transformaci lze vhodně využít například pro výpočet výkonu transformátoru. Výkon není nutné počítat ze tří složek (fází) obvodových veličin ale pouze ze dvou, což je jednou z výhod využití vektorové transformace.

Všechny definované vztahy použité při analýze průběhů signálů ve vektorové transformaci využívají veličin převedených z třífázové soustavy do vektorového prostoru. Při těchto rovnicích je zároveň důležité dbát na zapojení obvodu, aby výsledná analyzovaná hodnota byla odpovídající.

Pro naše modely potřebujeme definovat výpočet činné výkonu P , jalového výkonu Q , efektivní hodnoty napětí U_{RMS} a amplitudy napětí U_{AMP} . Rovnice pro výpočet jsou definovány následujícími rovnicemi:

$$P = u_{\alpha} \cdot i_{\alpha} + u_{\beta} \cdot i_{\beta}, \quad (26)$$

$$Q = u_{\beta} \cdot i_{\alpha} - u_{\alpha} \cdot i_{\beta}, \quad (27)$$

$$U_{RMS} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{(u_{\alpha})^2 + (u_{\beta})^2}, \quad (28)$$

$$U_{AMP} = \sqrt{(u_{\alpha})^2 + (u_{\beta})^2} \cdot [1] \quad (29)$$

4 LINEÁRNÍ MODEL TRANSFORMÁTORU

Tato kapitola bakalářské práce je věnovaná modelům lineárních modelů transformátorů, které jsou realizovány pomocí programu Matlab a blokového prostředí tohoto programu Simulink. Konkrétní modely využívají teoretických předpokladů a vtažů platících pro transformátor definovaných v teoretické části bakalářské práce. Základním prvkem, na kterém jsou jednotlivé modely staveny, je použití hybridní H_U matice pro model transformátoru napětí a H_I matice pro model transformátoru proudu.

Každá kapitola věnovaná konkrétnímu modelu je rozdělena do několika podkapitol, ve kterých je popsána funkčnost a princip použití modelů. Najdeme zde jak parametry jednotlivých modelů, tak popis jejich provedení, realizace a funkčnosti. Zároveň jsou zde uvedeny výsledky analýzy při simulacích realizovaných modelů a popis jejich dosažení.

4.1 Parametry lineárního modelu

Pro potřeby simulace modelů transformátoru byly zadány hodnoty transformátoru, které jsou zobrazené v Tabulka 1. Tyto hodnoty jsou výchozími pro všechny později dopočítávané a definované parametry matematických modelů transformátorů realizovaných v této bakalářské práci. Jak je z tabulky zřejmé, transformátor má definované napěťové hladiny a tedy napěťový převod mezi primárním a sekundárním vinutí. Z této hodnoty lze konstatovat, že se jedná o snižující transformátor. Dalšími definovanými parametry je rozptylová indukčnost primárního vinutí, magnetizační reaktance primárního vinutí, odpor primárního vinutí a odpor reprezentující ztráty v železe.

Parametr - značka	Hodnota (jednotka)
Napětí transformátoru - U_1/U_2	400/48 (V)
Rozptylová indukčnost primárního vinutí - $L_{\sigma 1}$	5 (mH)
Magnetizační reaktance - L_1	0,1 (H)
Odpor primárního vinutí - R_1	2 (Ω)
Odpor reprezentující ztráty v železe - R_{Fe}	15 000 (Ω)
Frekvence napájecího napětí - f	1 000 Hz

Tabulka 1: Parametry transformátoru

V obvodových modelech jednotlivých transformátorů je zároveň použita zátěž. Tato zátěž je označována jako R_Z . V lineárních i nelineárních modelech transformátoru definovaných v dalších kapitolách je uvažována čistě odporová zátěž a její hodnota je nastavována na 10 Ω .

4.2 Model transformátoru napětí

Realizace matematického modelu transformátoru napětí je provedena podle teoretických předpokladů popsanych v teoretické části bakalářské práce. S využitím informací z literatury [2] je model realizován dle náhradního zapojení v podobě Γ -článku a jeho základem je H_U matice. Inspirací pro koncepci schematických obvodů realizovaných v prostředí Simulink byla literatura[1] a znalosti získané ze cvičení z průběhu studia.

Model samotný se skládá ze dvou částí (respektive souborů), které jsou zobrazeny v přílohách a jsou připojeny k bakalářské práci. Jednou z částí je zadání parametrů do paměti proměnných zvané *Workspace* v programu Matlab. Tato část je realizována pomocí m-file souboru, jehož kód je zobrazený v Příloha 1. Na počátku m-file kódu se nachází příkazy k vymazání paměti prostředí *Workspace*. Další částí kódu je přiřazení konkrétních hodnot pro proměnné. Tyto proměnné jsou po spuštění kódu uchovány v prostředí *Workspace*, díky kterému jsou při simulacích načítány proměnné do části programu Simulink.

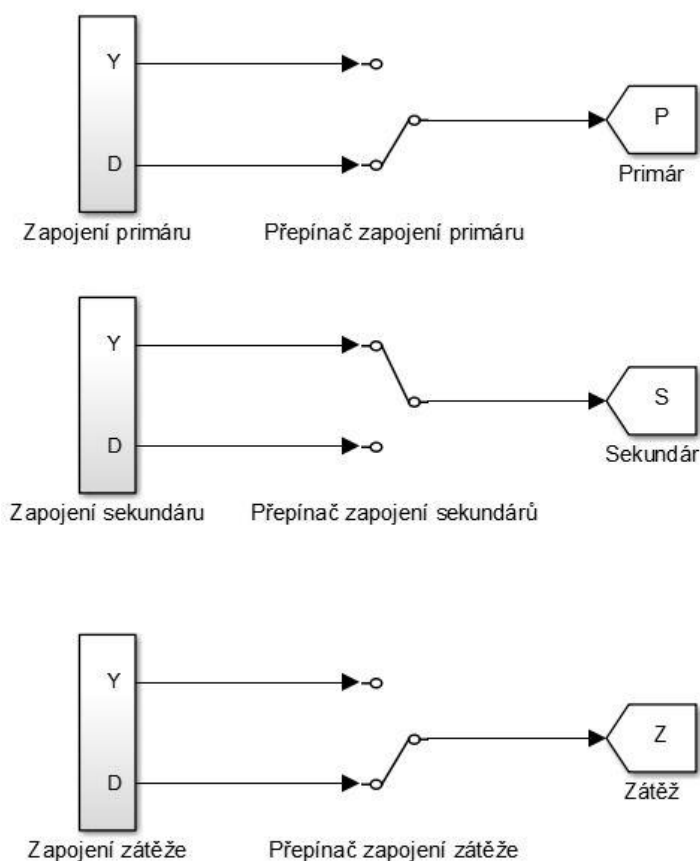
Proměnné vychází ze zadaných hodnot transformátoru definovaných pro všechny modely bakalářské práce. Veškeré parametry vstupující do obvodového modelu tímto kódem jsou zároveň pomocí poznámek popsány. Hodnoty transformátoru pro simulaci je tedy možné uživatelsky měnit právě změnou v tomto kódu. Před samotnými simulacemi je tedy nutné spustit mfile soubor a načíst proměnné.

Samotný schematický obvod matematického modelu lineárního transformátoru napětí je zobrazen v Příloha 4 Tento obvod lze rozdělit dle funkčnosti a vlivu na simulaci do několika částí. Tyto části jsou popsány v následujících kapitolkách.

4.2.1 Volba zapojení vinutí transformátoru a zátěže

Před vlastním spuštěním a následnou analýzou simulovaného modelu lineárního transformátoru napětí je nutné definovat model konfiguraci, v níž je zapojeno primární a sekundární vinutí transformátoru a také konfiguraci, ve kterém je na sekundární straně připojena zátěž. Výchozím stavem pro realizaci simulací v tomto modelu by měla být konfigurace hvězda jak pro primární tak i pro sekundární vinutí a i pro zátěž.

Volba konfigurace zapojení vinutí transformátoru a zátěže probíhá pomocí bloků typu *Manual Switch*, konkrétně pomocí bloků *Přepínač zapojení primáru*, *Přepínač zapojení sekundáru* a *Přepínač zapojení zátěže*. Všechny tyto bloky jsou zobrazeny na Obrázek 6 a při pohledu na celé schematické uspořádání tohoto modelu je lze nalézt v levé dolní části.



Obrázek 6: Bloky umožňující změnu zapojení transformátoru

Princip funkčnosti je takový, že výstupem jsou tři bloky typu Goto (pro primární a sekundární vinutí a pro připojení zátěže), které podle volby polohy přiřazeného přepínače přivádí do dalšího blokového uspořádání informaci zapojení jednotlivých vinutí. Tato informace v obvodu vystupuje jako signál s konstantní hodnotou označovaný jako P v případě primárního vinutí, S v případě sekundárního vinutí a Z v případě zapojení zátěže. Pro přehlednost a jednoduchost bylo řešení zapojení takové, že v případě volby konfigurace hvězda (v modelu značeno jako Y) je signálu odpovídajícího vinutí přiřazena konstantní hodnota 0 . V případě volby konfigurace zapojení vinutí do trojúhelníku (označováno jako D) je tomuto signálu přiřazena hodnota 1 .

Pomocí porovnávání výstupních konstantních signálů s předem nastavenou hodnotou nebo porovnáváním signálů mezi sebou je následně rozhodováno, jak má simulace proběhnout. Zejména jde o respektování toho, aby procházející signál byl v souladu se zvolenou konfigurací zapojení. Postup a provedení těchto porovnávání a přepočtů je vysvětlen v dalších kapitolách při přechodu modelu mezi jednotlivými vinutími a zátěží. Je zároveň důležité si ještě před samotnou analýzou uvědomit, že za použití různých konfigurací zapojení budou dosažené výsledky nabývat různých hodnot.

4.2.2 Zvolení zdroje modelu

Dalším krokem před samotnou simulací a analýzou modelu transformátoru napětí je definování zdroje signálu. Zdrojem signálu se rozumí uskupení bloků, které generuje do blokového modelu signál, který bude transformován a nakonec ho bude možné analyzovat. Za zdroj signálu v modelech bakalářské práce lze obecně pokládat soustavu generující napájecí napětí.

Bloky definující zdroj matematického modelu lineárního transformátoru napětí je možné vidět na levé straně celkového blokového schématu zobrazeného v Příloha 4. Tato strana zároveň představuje primární stranu transformátoru, což odpovídá reálnému napájení primární strany transformátoru. Možnost volby typu zdroje umožňuje blok *Manual Switch* určený k manuálnímu přepínání konkrétních soustav definujících zdroj.

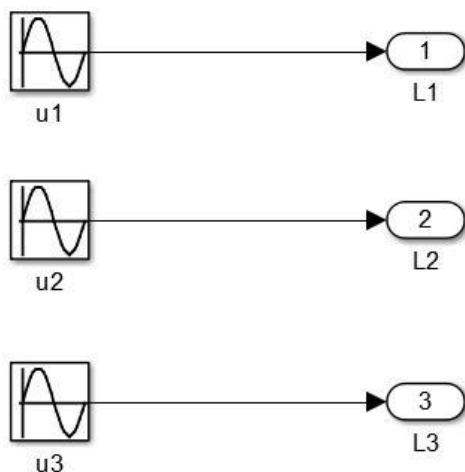
Jednou z možností použitého napájení je jednofázová napájecí soustava. V této soustavě vystupuje jako zdroj signálu pro simulaci blok typu *Sine Wave* pojmenovaný u_1 , který tvoří zdroj sinusového signálu napětí primárního vinutí. Amplituda napětí je rovna amplitudě fázové hodnoty zadaného napětí primární strany transformátoru (tedy 230 V krát odmocnina ze dvou). Frekvence signálu je zadána pomocí kmitočtu napájecí sítě ω definovaného v prostředí Matlab (z důvodu přizpůsobení se prostředí programu Matlab, zejména jeho textové sady, je použit jako název proměnné w).

Jelikož se jedná o univerzální model, který zahrnuje několik možností simulace, je nutné mít při volbě jednofázového napájecí soustavy mít bloky umožňující přepínání zapojení vinutí transformátoru a zátěže popsané v předchozí podkapitole nastavené do konfigurace hvězda ve všech parametrech. V takovém případě dojde k průchodu zdrojového signálu bez přepočtu a úpravě na konkrétní zapojení a tudíž ke správné analýze všech signálů jednofázové napájecí soustavy. V opačném případě by mohlo dojít k tomu, že by simulace vykazovala nesmyslné hodnoty výstupních signálů a nebo by celá simulace sehnala a výsledkem by bylo chybové hlášení.

Druhou možností volby napájení simulovaného transformátoru je použití třífázové napájecí soustavy. Tuto soustavu představují 3 subsystémy, které dohromady tvoří třífázový napájecí zdroj signálu pro další simulaci. Prvním z těchto subsystémů je subsystém *Třífázová napájecí soustava*, druhým je subsystém *Transformace třífázové soustavy na alfa a beta* a posledním je subsystém *Převod zapojení zdroje*.

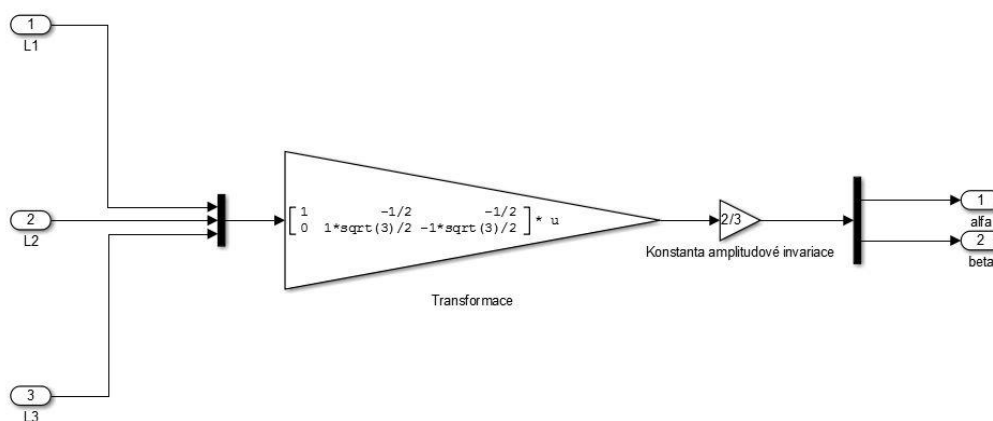
Zdroj signálu napětí pro tento model je možné nalézt uvnitř zmíněného subsystému *Třífázová napájecí soustava*. Vnitřní uspořádání tohoto subsystému je znázorněno na Obrázek 7. Jedná se o uskupení tří zdrojů sinusového signálu podobných tomu popsanému v případě volby jednofázové napájecí soustavy.

Amplituda těchto napětí je rovna opět fázové hodnotě zadaného napětí primární strany transformátoru. Pro tento sinusový signál je opět nastavena frekvence ω , která je zadána do proměnné m-file souborem jako proměnná w . Rozdílem oproti jednofázové napájecí soustavě je ten, že jednotlivé sinusové signály jsou navzájem posunuty o úhel $+120^\circ$ a -120° .



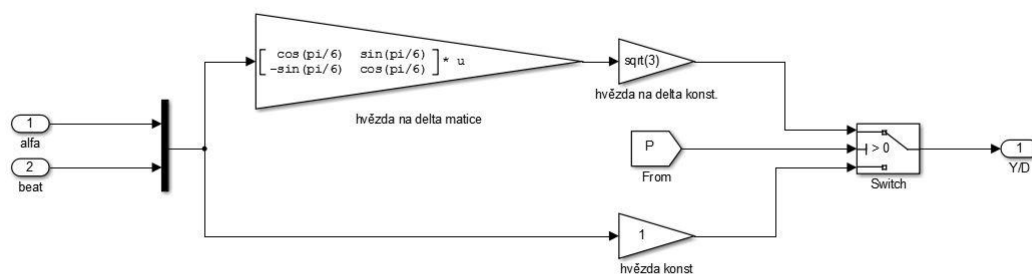
Obrázek 7: Uspořádání subsystému Třífázová napájecí soustava

Další částí tvořící třífázovou napájecí soustavu je subsystém *Transformace třífázové soustavy na alfa beta*, uvnitř kterého dochází k transformaci tří časově závislých proměnných signálů dodaných sinusovými zdroji napětí do vektorového prostoru. Vnitřní uspořádání toho subsystému je zobrazeno na Obrázek 8. Tato transformace je založena na vynásobení třísloužkového signálu maticí podle rovnice (14) definované v teoretické části bakalářské práce, která se věnuje vektorové transformaci. Výsledný signál je pak vynásoben konstantou o velikosti $2/3$, čímž dostáváme transformátor do režimu amplitudové invariance. Tento fakt je poté nutno zohlednit v dalších částech modelu, zejména při analýze. Signál je takto připraven pro další zpracování simulací a výstupem tohoto subsystému se tak stávají dva signály a to složky vektorového prostoru α a β .



Obrázek 8: Uspořádání Transformace třífázové soustavy na alfa beta

Posledním subsystémem upravujícím zdrojový signál napětí transformátoru je subsystém *Převod zapojení zdroje*. Uvnitř toho subsystému dochází k prvnímu využití konstantních signálů definujících typ zapojení vinutí transformátorů v celém modelu transformátoru. Do subsystému je pomocí bloku typu *From* přiváděn konstantní signál definující zapojení primárního vinutí P , který je dále přiváděn na blok typu *Switch*. Proměnná P získává hodnotu při nastavení zapojení vinutí popsaném v předchozí kapitole. Tento blok na základě vyřešení logické podmínky kdy dojde k zjištění konfigurace zapojení primárního vinutí provede přepočtení signálu na odpovídající zapojení primární strany transformátoru. Pokud je primární vinutí transformátoru nastaveno do konfigurace hvězda, je výsledkem transformace vstupní signál, jelikož už ten je definován jako v zapojení do hvězdy. V případě zapojení do trojúhelníku dojde k vynásobení signálu pomocí transformační matice a konstanty pro převod napětí z konfigurace hvězda na trojúhelník. Vnitřní uspořádání subsystému je možné vidět na Obrázek 9. Výstupem tohoto subsystému je jeden signál obsahující α a β část signálu transformovaného do vektorového prostoru.



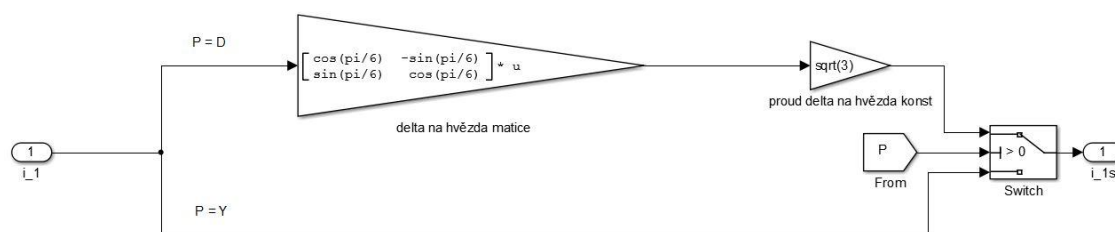
Obrázek 9: Vnitřní uspořádání Převod zapojení zdroje

4.2.3 Vlastní schéma modelu

Před samotnou simulací je tedy dobré zjistit jak konkrétní model vlastně funguje. K tomu účelu slouží tato kapitola. V této kapitole dochází k rozdělení schematického modelu na několik blokových částí představující konkrétní část transformátoru. Pro každou takovou část jsou zde popsány jednotlivé funkční bloky a jejich použití a vliv na průběh simulace.

V předchozích kapitolách byla popsána bloková část představující napájecí zdroj simulovaného modelu a pomyslný "ovládací" pult, kterým je možné řídit zapojení jednotlivých částí transformátoru. Při pohledu na obvodový model zobrazený v Příloha 4 lze model napěťového transformátoru pomocí subsystému *Blok ideálního transformátoru* rozdělit na primární a sekundární stranu.. Na primární straně modelu, do které vstupuje signál napájecího napětí se nachází bloky *Odpor reprezentující ztráty v železe*, *Odpor primárního vinutí* a *Magnetizační reaktance*, které násobí resp. dělí probíhající signál obvodovými parametry definovanými ve *Workspace* prostředí programu Matlab.

Hned na vstupu zdrojového signálu do simulovaného obvodu je možné vidět blok pojmenovaný *Goto u_1*, který odesílá signál napětí primárního vinutí na svorkách pro další matematickou analýzu. Za součtovým blokem *Add1* se nachází soustava bloků, která primárnímu vinutí definuje odpovídající hodnotu proudu. Prvotní signál této soustavy je odváděn blokem *Goto i_1*, který představuje proudu primárního vinutí potřebný k určení vstupního výkonu. V případě že je primární vinutí transformátoru zapojené do trojúhelníku je nutné tento signál přepočítat pomocí proudové matice a konstanty. Tento přepočet je realizován pomocí subsystému *Přepočet primárního proudu*, jehož vnitřní uspořádání je vidět na Obrázek 10. Systém funguje porovnáním hodnoty konstantního signálu P určujícího zapojení primárního vinutí a v případě vyhodnocení zapojení jako trojúhelník dojde k přepočtu proudu dle vztahů definovaných v teoretické části bakalářské práce. V případě že se je primární vinutí zapojeno do hvězdy prochází signál beze změny na výstup.



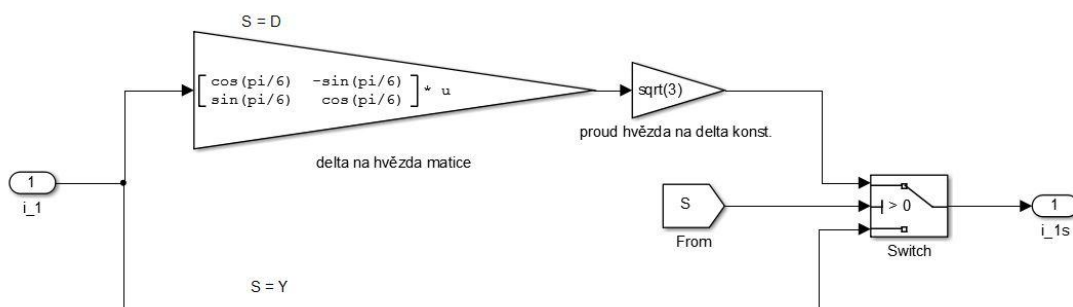
Obrázek 10: Vnitřní uspořádání Přepočet primárního proudu

Za blokem, který odesílá signál napětí primárního vinutí dochází pomocí bloku *Add2* k odečtení větve obsahující odpor primárního vinutí. Za tímto blokem vzniká napěťový signál, který lze integrací pomocí bloku *Integrator* převést na spřažený magnetický tok. Tento magnetický tok putuje na dělicí subsystém *Blok ideálního transformátoru*. Tento subsystém v sobě obsahuje násobící členy, které vynásobí vstupní signály převodovou konstantou transformátoru *Ku210* vypočítanou v programu Matlab. Vynásobením touto konstantou dostaneme vstupní signál přepočítaný na opačnou stranu transformátoru.

Do dělicího subsystému *Blok ideálního transformátoru* vstupují dva signály. Jedním je právě již zmíněný spřažený magnetický tok primárního vinutí ψ_1 a druhým signálem, který ale vstupuje do bloku ze sekundární strany, je proud sekundárního vinutí i_2 . Výstupem tohoto převodového subsystému je spřažený magnetický tok primárního vinutí přepočítaný na sekundární stranu ψ_1' a sekundární proud přepočítaný na primární stranu i_2' . Tento proud se vrací na primární stranu transformátoru a pomocí bloku *Add3* je tento signál připočítán k magnetizačnímu proudu transformátoru.

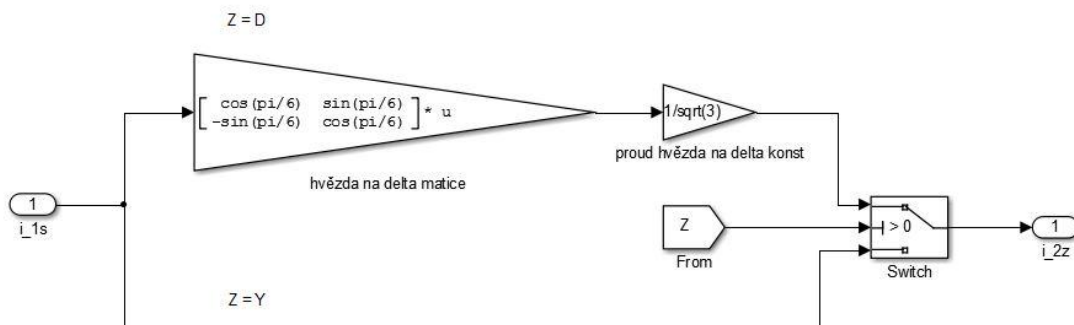
Za blokem subsystému *Blok ideálního transformátoru* (vpravo od bloku) se nachází pomyslná sekundární strana transformátoru napětí. Na této sekundární straně najdeme bloky *Rozptylová indukčnost vinutí* a *Odpor sekundárního vinutí*. Za blokem obsahující rozptylovou indukčnost vinutí vzniká z výsledného signálu proud primárního vinutí transformátoru. Tento signál je pomocí bloku *Goto i_2* odeslán k další analýze. Tato analýza je popsána v dalších kapitolách.

Jednou z cest signálu proudu sekundárního vinutí je blok *Odpor sekundárního vinutí*, který je pomocí bloku *Add4*, připočítáván k napětí sekundárního vinutí. Další cestou je pomyslný směr ven z transformátoru a dále na zátěž připojenou k sekundární straně transformátoru. Prvním blokem, který stojí na cestě tohoto signálu, je přepočtový subsystém *Převod proudu sekundáru na výstup*. Vnitřní uspořádání tohoto subsystému je zobrazeno na Obrázek 11. Uspořádání tohoto bloku prakticky shodné s přepočtovým subsystémem *Přepočet primárního proudu* s tím rozdílem, že v tomto subsystému je porovnáváním signálem konstantní signál S nesoucí informaci o zapojení sekundárního vinutí transformátoru. Za tímto subsystémem se nachází blok *Goto i_2s*, který odvádí výstupní signál z transformátoru pro další analýzu.



Obrázek 11: Vnitřní uspořádání Převod proudu sekundáru na výstup

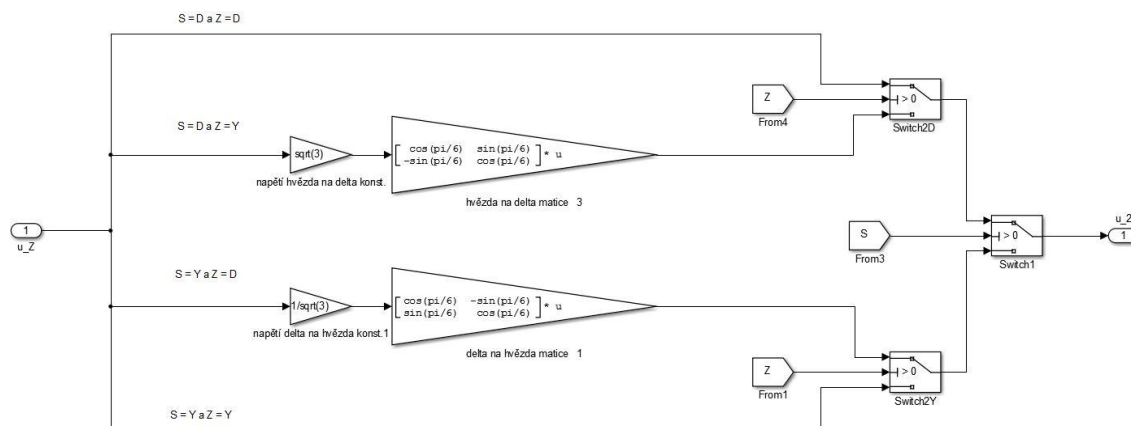
Poslední blokovou část tvoří uskupení bloků reprezentující zátěž připojenou k sekundárnímu vinutí transformátoru. Výstupní signál proudu transformátoru ze sekundárního vinutí putuje na subsystém *Převod výstupního proudu na zátěž*, který (jak už lze usoudit z jeho názvu) převádí výstupní proud transformátoru na odpovídající zapojení zátěže. Vnitřní uspořádání tohoto subsystému je zobrazeno na Obrázek 12. Na základě porovnání signálu Z nesoucího konstantní signál s informací o zapojení zátěže je proud vedoucí do zátěže shodný s výstupním proudem transformátoru v případě zapojení do hvězdy a v opačném případě dochází k vynásobení transformační maticí a konstantou pro převod proudu ze zapojení hvězda na zapojení trojúhelník.



Obrázek 12: Vnitřní uspořádání Převod výstupního proudu na zátěž

Za převodovým blok je výstupní blok *Goto i_2z* odvádějící signál proudu zátěže k analýze. Zátěže transformátoru je čistě odporová a je reprezentovaná *Gain* blokem *Odpor zátěže*. Hodnota zátěže je nastavena na 10Ω . Vynásobením signálu tímto blokem vzniká signál reprezentující napětí zátěže transformátoru. Tento signál je k analýze odeslán pomocí bloku *Goto u_2z* a putuje zpět do transformátoru.

Napětí zátěže je při návratu zpět na sekundární vinutí transformátoru nutné přepočítat na odpovídající zapojení sekundáru. Tento přepočet je realizován pomocí subsystému *Převod napětí zátěže na sekundár*. Uvnitř tohoto subsystému dochází k vynásobení signálu napětíovými transformačními maticemi a konstantami. Celý subsystém je prakticky postaven na logice obsažené již v předešlých transformačních subsystémech. V tomto případě je ale použito zdvojené logiky. Vnitřní uspořádání tohoto subsystému je zobrazeno na Obrázek 13.



Obrázek 13: Vnitřní uspořádání Převod napětí zátěže na sekundár

V prvním stupně použité logiky je určení, zda je sekundární vinutí transformátoru zapojeno do hvězdy nebo do trojúhelníku. Pomocí signálu uloženého v proměnné S dochází k určení konfigurace zapojení a následné cestě na druhý stupeň použité logiky. Na tomto stupni je porovnáván konstantní signál proměnné Z definující zapojení zátěže. Na základě vzájemného vztahu mezi zapojením sekundárního vinutí a zátěže transformátoru dojde buď k průchodu čistého nezměněného signálu v případě shodného zapojení nebo k vynásobení signálu odpovídající napětíovou maticí a konstantou.

Výstupem z tohoto subsystému je napětí sekundárního vinutí transformátoru v odpovídající konfiguraci zapojení. Z hlediska rozdělení modelu transformátoru na jednotlivé funkční bloky se tak dostáváme zpátky do části reprezentující sekundární vinutí transformátoru. V této části můžeme nalézt blok *Goto u_2*, který odvádí signál sekundárního napětí k dalším analyzujícím blokům.

4.2.4 Analýza výstupních signálů při jednofázovém zdroji

Následující kapitola popisuje analýzu signálů získaných simulací modelu lineárního transformátoru napětí při použití jednofázové napájecí soustavy. Pro úspěšnou analýzu modelu při tomto nastavení je nutné dodržet několik kroků popsaných v předešlých kapitolách. Zejména se jedná o nastavení zdroje signálu pomocí přepínače *Manual Switch* do polohy definující simulaci jednofázovou napájecí soustavy. Současně je nutné mít všechny manuální přepínače definující zapojení primárního a sekundárního vinutí transformátoru a zapojení zátěže do polohy Y (tedy zapojení hvězda).

Po spuštění mfile kódu a prvotním nastavením obvodových parametrů je možné spustit tuto simulaci. Doba simulace je zvolena na 0,5 sekundy. Tato hodnota je zvolena po sérii pokusných simulací, při kterých se tato hodnota ukázala jako dostatečná, aby při simulaci došlo k odeznění přechodových jevů a k ustálení harmonických signálů obvodových signálů. S přihlédnutím k nastavené frekvenci napájecího napětí 1 kHz je maximální velikost kroku prováděné simulace nastavena na hodnotu 0,1 milisekundy.

Vlastní analýza lineárního modelu transformátoru napětí s jednofázovou napájecí soustavou je realizovatelná bloky, které jsou shrnuty a uloženy v subsystému *Subsystém jednofázové analýzy*. Vnitřní uspořádání tohoto subsystému je zobrazené v Příloha 7. Tento subsystém je součástí modelu lineárního transformátoru napětí a je možné ho nalézt v horní části schematického uspořádání, tj. nad samotným obvodovým modelem transformátoru. Zobrazení vnitřního uspořádání tohoto subsystému obsahuje na Display blocích konkrétní hodnoty dosažené simulací jednofázově napájeného lineárního transformátoru napětí.

Jedním z výsledků analýzy jednofázově napájeného lineárního transformátoru napětí je soustava bloků zobrazená v levé horní části subsystému, kde můžeme vidět několik bloků typu *From*, které přivádějí obvodové signály přiváděných k analýze pomocí bloků typu *Goto* zmíněných v předchozí podkapitole. Každý z těchto bloků je pojmenován podle signálu, který přivádí k analýze. Samotná analýza signálů je realizována pomocí bloku *Scope*, na který jsou ve čtyřech vstupech přiváděny jednotlivé signály. Tento blok nám umožňuje zobrazit průběhy analyzovaných vstupních signálů v simulovaném čase a tím pádem zobrazit průběhy napětí a proudů primárního a sekundárního vinutí transformátoru.

Průběhy jednotlivých signálů dosažené simulací dle popsaného postupu jsou zobrazeny v Příloha 10. Zobrazené průběhy jsou s přihlédnutím k vysoké frekvenci obvodových signálů pro přehlednost zobrazeny v časovém rozmezí

simulace 0 až 10 milisekund. Za tento čas je v zobrazeném průběhu obsaženo přibližně 10 period jednotlivých signálů. Z celkového průběhu simulace je možné odečíst, že k odeznění přechodného jevu dochází přibližně v čase 0,15 s od začátku simulace.

Druhým výstupem jsou bloky *Ef. hodnota prim vinutí* a *Ef. hodnota sek vinutí*, které je možno vidět na pravé straně subsystému *Subsystém jednofázové analýzy*. Tyto bloky využívají bloků *Goto* přivádějící jednotlivé signály napětí primárního a sekundárního vinutí a pomocí bloků typu *RMS* nám zobrazují efektivní hodnotu jednotlivých vinutí. Stejně bloky jsou použity zároveň pro analýzu proudu primárního a sekundárního vinutí transformátoru. Pomocí bloků typu *Display* jsou odečteny efektivní hodnoty napětí 230,00 V na primární straně a 27,59 V na sekundární straně. U proudu bylo simulací dosaženo efektivní hodnoty 0,5152 A na primární straně a 2,759 A na sekundární straně transformátoru. Při použití fázové hodnoty napájecího napětí 230 V zadaného do simulace odpovídá výsledek předpokládaným hodnotám s mírnou odchylkou, která je dána metodou výpočtu simulace a zaokrouhlováním výsledné hodnoty na bloků *Display*.

Posledním výstupem analýzy je určení výkonu primárního a sekundárního vinutí. Tato analýza probíhá pomocí bloků ve spodní části subsystému obstarávajícího analýzu jednofázově napájeného transformátoru. Výpočet výkonu primárního a sekundárního vinutí jednofázově napájeného transformátoru je realizován pomocí bloků, které přivádí jednotlivé napětí a proudy na bloky typu *Product*, kde dojde k vynásobení obou signálů. Výsledný signál putuje na blok *Mean Value (Phasor Type)*, který ze signálu určí jeho střední hodnotu. Tomuto bloku je přiřazena hodnota periody analyzovaného signálu shodná s periodou definovanou vstupnímu signálu jednofázového zdroje napětí použitého v simulaci. Tuto hodnotu si blok vypočítá pomocí zadaného kmitočtu v proměnné w . Výsledná střední hodnota činného výkonu je pro primární vinutí 81,3 W a pro sekundární vinutí je to 76,12 W.

4.2.5 Analýza výstupních signálů při třífázovém zdroji

Tato kapitola popisuje analýzu signálů získaných simulacemi modelů lineárního transformátoru napětí s použitou třífázovou napájecí soustavou. Oproti analýze jednofázového transformátoru napětí přibývá pro takto simulovaný model možnosti volit různá zapojení pro primární a sekundární vinutí a také pro zapojení zátěže transformátoru. Všechny výsledky popsané v textu této kapitoly jsou dosažené simulací modelu transformátoru napětí při nastavení všech možností zapojení do polohy hvězda. Toto nastavení bylo zvoleno jako základní z tohoto důvodu, že při takto provedené simulaci nedochází ke změně obvodových signálů pomocí převodových subsystémů. Zároveň jde o jedno ze základních používaných zapojení transformátorů.

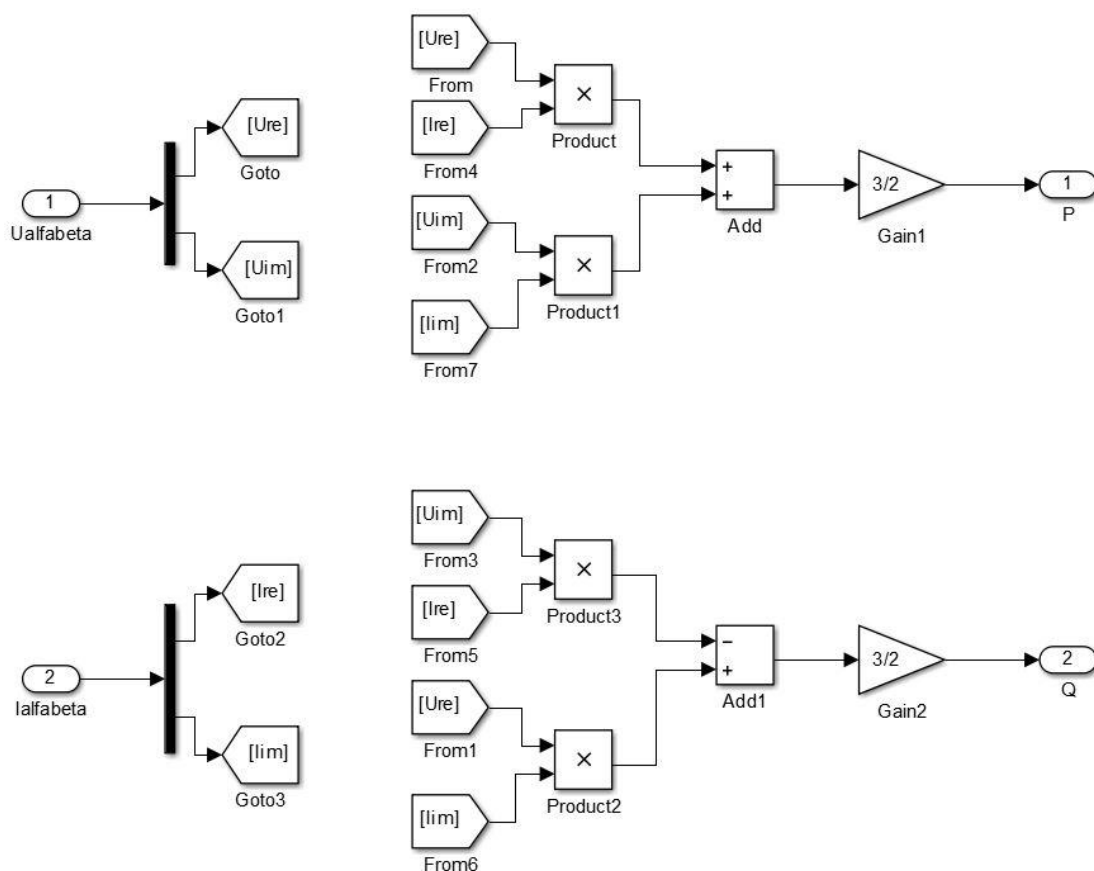
Při simulaci modelu transformátoru napětí napájeného třífázovou napětíovou soustavou lze analyzovat vstupní a výstupní výkon transformátoru, výkon transformátoru na zátěži, efektivní hodnoty a amplitudy signálů primárního a sekundárního vinutí transformátoru a také efektivní hodnoty a amplitudy signálů působících na zátěž. Všechny bloky realizující analýzu třífázově napájeného modelu transformátoru, které jsou dále blíže popisovány jsou součástí subsystému *Subsystém třífázové analýzy*. Vnitřní uspořádání tohoto subsystému je zobrazeno v Příloha 6.

V levé horní části subsystému analyzujícím třífázově napájený model transformátoru napětí lze opět nalézt uskupení bloků, pomocí kterého lze zobrazit jednotlivé průběhy signálů napětí a proudů na jednotlivých částí schematického obvodu. Pomocí bloku *Scope* lze zobrazit průběh napětí a proudů primárního a sekundárního vinutí.

Další možností analýzy třífázově napájeného transformátoru napětí je analýza výkonu primárního a sekundárního vinutí a výkonu na zátěži připojené k transformátoru. Tato analýza je realizována pomocí subsystému *Třífázový výkon* v levé dolní části subsystému *Subsystém jednofázové analýzy*. Vstupními signály do subsystému analyzujícího výkon příslušné části transformátoru jsou dva bloky typu *Goto*, které přivádějí k analýze napětí a proud. Vnitřní schematické uspořádání tohoto subsystému je pro všechny analyzované výkony shodné a je zobrazeno na Obrázek 14. Uspořádáním bloků tohoto subsystému je možné určit výslednou hodnotu činného a jalového výkonu. Princip výpočtu je takový, že uvnitř subsystému dochází k výpočtu hodnot činného a jalového výkonu pomocí vztahů (26) a (27) definovaných v teoretické části věnující se výpočtu výkonu za použití vektorové transformace.

Vstupní signály napětí a proudu jsou na začátku pomocí bloků typu *Demux* rozloženy na *alfa* a *beta* (resp. reálnou a imaginární) složku. Tyto složky jsou dále pro zachování přehlednosti řešení rozděleny na bloky *Goto* a *From*, pomocí kterých

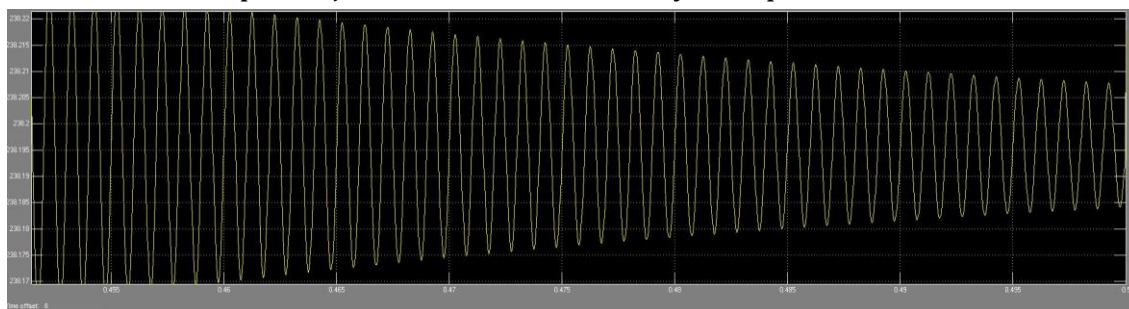
jsou dále přiváděny k potřebným matematickým operacím a tím dochází k sestavování rovnic dle teoretických vztahů. Okamžitá hodnota činného výkonu je vypočítána součtem součinu reálných a imaginárních hodnot vstupních signálů napětí, kdežto jalový výkon je určen rozdílem součinu imaginární složky napětí a reálné složky proudu oproti součinu imaginární složky proudu a reálné složce napětí. Před výstupem je signál vynásoben konstantou, která zohledňuje to, že veškeré signály jsou do simulace generovány s amplitudově invariantní konstantou. Výstupem tohoto subsystému je tak signál okamžité hodnoty činného a jalového výkonu.



Obrázek 14: Subsystem analýzy výkonu třífázově napájeného transformátoru

Výstupní signály subsystému *Třífázový výkon* jsou po výstupu ze subsystému přivedeny na bloky zobrazující výsledky analýzy. Oba signály putují na blok *Scope*, kde je možné zobrazit časový průběh výsledných veličin. Pro činný výkon je tu navíc blok *Display*, který ukazuje hodnotu okamžitou hodnotu činného výkonu. Po ukončení simulace v nastaveném čase je na něm tedy uchována poslední hodnota, které činný výkon dosáhl. Vzhledem k tomu, že po odeznění přechodových jevů se předpokládá ustálení výstupních signálů a že doba simulace je dostatečná aby tyto jevy odezněly, lze hodnotu zobrazenou na bloku *Display* brát jako výslednou.

Pro přesnější určení hodnoty činného výkonu je možné zobrazit průběh signálu simulovaného modelu třífázového transformátoru napětí na bloku *Scope*. Pomocí tohoto bloku a za použití dostatečného nastavení souřadnicového systému lze určit přesněji dosaženou nasimulovanou hodnotu činného výkonu. Na Obrázek 15 je možné vidět detail průběhu činného výkonu zobrazeného v bloku *Scope*. Z obrázku lze odpozorovat, že při dostatečném zoomu je z průběhu patrné, že po ustálení přechodného děje se hodnota pohybuje okolo 238,195 W, čímž se dostáváme na přesnější hodnotu třífázového výkonu primárního vinutí.



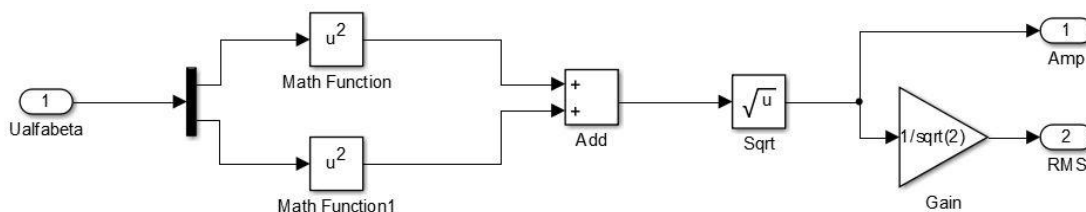
Obrázek 15: Detail průběhu činného výkonu transformátoru napětí

Ve vnitřním uspořádání subsystému zobrazeném v Příloha 6 je možné vidět pod výše zmíněnými bloky pro vstupní výkon stejnou sadu bloků, která slouží pro analýzu výstupního výkonu na sekundární straně transformátoru. Zároveň je možné vidět stejnou sadu bloků pro výkon zátěže připojené k sekundárnímu vinutí. Tato sada bloků slouží pouze pro kontrolu správného přepočtu proudu mezi sekundárním vinutím a připojenou odporovou zátěží. Při čistě odporové zátěži se předpokládá stejná hodnota pro oba výkony. Pomocí bloku typu *Display* byly určeny oba výkony shodně na 225,5 W. Obdobným způsobem, jako tomu bylo pro vstupní výkon, lze i u těchto výkonů na sekundární straně transformátoru přiblížit průběh signálu činného výkonu v příslušném bloku *Scope* a odečíst tak přesnější ustálenou hodnotu.

Dalším analyzovaným parametrem při simulaci třífázového transformátoru napětí je analýza amplitudy a efektivní hodnoty napětí a proudu primárního a sekundárního vinutí. Tato analýza je realizována pomocí bloků *Amplituda a efektivní hodnota napětí* a *Amplituda a efektivní hodnota proudu*. Tyto bloky je možné vidět na pravé straně subsystému *Subsystém třífázové analýzy*.

Každý subsystém určující amplitudu a efektivní hodnotu sledovaného signálu má jeden vstup, na který je přiváděno napětí nebo proud analyzované části transformátoru. Zdrojové bloky typu *Goto* vždy nesou jméno signálu, který k analýze přivádějí. Uvnitř subsystému *Amplituda a efektivní hodnota napětí* (resp. *proudu*) probíhá výpočet efektivní hodnoty a amplitudy napětí pomocí rovnic (28) a (29) definovaných v teoretické části v kapitole věnované určení efektivní hodnoty a amplitudy signálů ve vektorovém prostoru. V subsystému jsou

pomocí dostupných funkčních bloků modelového prostředí Simulink realizovány zmíněné rovnice. Vnitřní uspořádání tohoto subsystému je zobrazené na Obrázek 16.



Obrázek 16: Uspořádání subsystémů pro amplitudu a ef. hodnotu signálu

Vstupní signál napětí (resp. proudu) přiváděný pomocí bloků typu *From* je rozložen na *alfa* a *beta* (resp. reálnou a imaginární) složku. Na každou z těchto složek jsou aplikovány příslušné matematické funkce. Výstupem ze subsystému je potom amplituda vstupního signálu a jeho efektivní hodnota.

Z bloků typu *Display* připojených na jednotlivé bloky počítající efektivní hodnotu a amplitudu signálů je možné odečíst výsledné hodnoty. Pro zapojení vinutí i zátěže transformátoru do konfigurace hvězda byly simulací dosaženy efektivní hodnoty napětí pro primární vinutí 230 V a pro efektivní hodnotu proudu 0,5118 A. Efektivní hodnoty napětí a proudů pro sekundární vinutí jsou shodné s hodnotami, které lze naměřit na zátěži transformátoru. Pro efektivní hodnotu napětí bylo simulací dosaženo hodnoty 27,41 V a efektivní hodnotě proudu 2,741 A. Všechny tyto hodnoty odpovídají předpokladu vycházejícího ze vstupního napětí, z převodové konstanty transformátoru a dalších parametrů definovaných pro simulaci. Případná odchylka je dána metodou výpočtu a zaokrouhlováním bloků.

Výsledné efektivní hodnoty napětí a proudů primárního a sekundárního vinutí a zátěže transformátoru spolu se vstupními a výstupními výkony a výkony zátěže pro různé kombinace zapojení jednotlivých vinutí a k nim připojené zátěže jsou shrnuty a zobrazeny ve dvou tabulkách. Pro zapojení zátěže do hvězdy je možno vidět dosažené výsledky na Tabulka 2. Pro zátěž v konfiguraci trojúhelník je možné vidět výsledky na Tabulka 3.

Zapojení primár/sekundár	Y/Y	Y/D	D/Y	D/D
Napětí primárního vinutí U_1 [V]	230,00	230,00	398,40	398,40
Proud primárního vinutí I_1 [A]	0,51	0,39	0,89	0,67
Napětí sekundárního vinutí U_2 [V]	27,41	27,54	47,48	47,71
Proud sekundárního vinutí I_2 [A]	2,74	0,92	4,75	1,59
Napětí na zátěži U_z [V]	27,41	15,90	47,48	27,54
Proud na zátěži I_z [A]	2,74	1,59	4,75	2,75
Vstupní výkon P_1 [W]	238,20	87,28	714,70	262,40
Výstupní výkon P_2 [W]	225,50	75,87	676,40	227,60
Výkon na zátěži P_z [W]	225,50	75,87	676,40	227,60

Tabulka 2: Hodnoty simulace třífázového transformátoru napětí pro Y zátěž

Zapojení primár/sekundár	Y/Y	Y/D	D/Y	D/D
Napětí primárního vinutí U_1 [V]	230,00	230,00	398,40	398,00
Proud primárního vinutí I_1 [A]	1,09	0,51	1,89	0,89
Napětí sekundárního vinutí U_2 [V]	26,89	27,41	46,58	47,48
Proud sekundárního vinutí I_2 [A]	8,07	2,74	13,97	4,75
Napětí na zátěži U_z [V]	46,58	27,41	80,67	47,48
Proud na zátěži I_z [A]	4,66	2,74	8,07	4,75
Vstupní výkon P_1 [W]	674,10	238,20	2022,00	714,70
Výstupní výkon P_2 [W]	650,80	225,50	1952,00	676,40
Výkon na zátěži P_z [W]	650,80	225,50	1952,00	676,40

Tabulka 3: Hodnoty simulace třífázového transformátoru napětí pro D zátěž

Pro popis jednotlivých kombinací zapojení příslušného vinutí transformátoru je v obou tabulkách použit symbol Y pro zapojení do hvězdy a D odpovídá zapojení do trojúhelníku. Všechny hodnoty jsou odečteny z *Display* bloků u odpovídajících bloků subsystému *Subsystém třífázové analýzy* pro jednotlivé kombinace zapojení.

4.3 Model transformátoru proudu

Dalším realizovaným modelem transformátoru je model transformátoru proudu. Jeho obvodový model realizovaný v programu Simulink je možné vidět v Příloha 5. Schematické řešení modelu transformátoru proudu je obdobné, jako tomu bylo u transformátoru napětí. Celý model je opět tvořen dle literatury [2] v podobě náhradního zapojení realizovaného jako T-článek. Pro simulaci tohoto modelu bylo nutné přepočítat obvodové parametry T-článku dle teoretických vztahů.

Přepočet parametrů potřebných pro simulaci tohoto modelu a jejich zadání do *Workspace* prostředí programu Matlab je zobrazené v Příloha 2. Po spuštění tohoto kódu a naplnění paměti proměnných je nutno model připravit a vhodně nastavit ke konkrétní simulaci. Zdrojem pro simulaci lineárního modelu transformátoru proudu může být opět buď třífázová nebo jednofázová napájecí soustava. Volbu konkrétního zdroje opět zprostředkovává manuální přepínač, tj. blok *Manual Switch* v levé části obvodového modelu. Pro třífázovou napájecí soustavu je opět možné definovat konfiguraci zapojení primárního nebo sekundárního vinutí a zapojení zátěže k sekundární straně transformátoru. Všechny tyto části lze zapojit do simulovaného modelu jako konfiguraci zapojení do hvězdy nebo do trojúhelníku. Tyto změny je možné realizovat pomocí bloků typu *Manual Switch* obdobným způsobem, jako tomu bylo i u modelu transformátoru napětí. Je nutné zmínit, že při použití jednofázového napájecího zdroje je nutné mít manuální přepínače u primárního i sekundárního vinutí i u připojené zátěže nastaveny v poloze konfigurace hvězda (tj. Y).

4.3.1 Primární a sekundární strana

Při pohledu na lineární model transformátoru proudu je opět možné si celý schematický obvod rozdělit do několika funkčních bloků. Stejně jako tomu bylo u transformátoru napětí lze i transformátor proudu rozdělit pomocí subsystému *Blok ideálního transformátoru* na primární a sekundární stranu transformátoru. Rozdílem oproti modelu transformátoru napětí je ten, že na primární straně najdeme v tomto modelu navíc blok *Rozptylová indukčnost vinutí*, jejíž hodnota je přepočtena z T-článku. Najdeme tu opět bloky *Odpor reprezentující ztráty v železe* a *Odpor primárního vinutí* a bloky typu *Goto*, které odesílají signály napětí a proudu primárního vinutí pro další matematickou analýzu. Pro proud primárního vinutí transformátoru jsou použity stejné bloky jako tomu bylo u transformátoru napětí. V případě zapojení primárního vinutí v konfiguraci trojúhelník dochází k zapůsobení bloku *Přepočet primárního proudu*, který vynásobí proud příslušnou proudovou transformační maticí a konstantou. Vnitřní uspořádání tohoto subsystému je již zobrazeno na Obrázek 10.

Pomyslný přechod na sekundární stranu transformátoru je realizován subsystémem *Blok ideálního transformátoru*. Vnitřní uspořádání tohoto subsystému opět obsahuje převodovou konstantou transformátoru Ku_{210} , která je však v tomto modelu přepočítaná pro 1-článek. Další změna ve funkčnosti tohoto subsystému je ta, že v modelu transformátoru proudu do něj vstupují signály reprezentující sekundární magnetický tok ψ_2 a primární proud i_1 . Podělením těchto signálů uvnitř subsystému dostáváme výsledný signál přepočítaný na primární respektive sekundární stranu. Výstupem ze subsystému tedy je signál sekundárního magnetického toku přepočítaný na primární vinutí ψ_2' a primární proud přepočítaný na sekundární vinutí i_1' .

Sekundární strana transformátoru má oproti modelu transformátoru napětí také několik drobných změn. Například zde můžeme vidět blok *Magnetizační reaktance*, jehož hodnota je opět přepočtena z Γ -článku a který byl u předešlého modelu umístěn na primární straně. Zároveň byl odsud odebrán blok reprezentující rozptylovou indukčnost vinutí, který byl přepočítán na primární stranu transformátoru. Za blokem *Add4*, na kterém dochází odečtení magnetizačního proudu od proudu primárního vinutí přepočítaného na sekundár, se nachází blok *Goto i_2*, který odvádí signál sekundárního proudu k další analýze.

Signál proudu sekundárního vinutí dále putuje pomyslně směrem ven z transformátoru. Na této cestě je opět použit převodový subsystém *Převod proudu sekundáru na výstup*. Vnitřní uspořádání subsystému je shodné se subsystémem použitým při modelu transformátoru napětí. Jeho vnitřní uspořádání je možné vidět na Obrázek 11. Za tímto blokem je blok pojmenovaný *Goto i_2s*, který představuje signál proudu, který vystupuje z transformátoru. Tento proud dále putuje na subsystém *Převod výstupního proudu na zátěž*. Vnitřní uspořádání subsystému bylo opět zobrazeno na Obrázek 12 při popisu modelu transformátoru napětí. Na základě porovnání zapojení zátěže zde dochází k odpovídající proudové transformaci vstupního signálu. Výstupem ze subsystému je proud zátěže.

Proud zátěže je jednak odváděn pomocí bloku *Goto i_2z* k další analýze a zároveň dochází k jeho vynásobení blokem *Odpor zátěže*. I v tomto případě je v modelu použita čistě odporová zátěž o velikosti $10\ \Omega$. Za tímto blokem vzniká napětí zátěže, které je pomocí bloku *Goto u_2z* opět odváděno k další analýze. Signál dál putuje zpět do modelu. Vzhledem k tomu, že další část modelu reprezentuje opět sekundární vinutí transformátoru, je nutné aby signál nejprve prošel transformačním subsystémem *Převod napětí zátěže na sekundár*. Vnitřní uspořádání je opět stejně jako pro transformátor napětí a je zobrazeno na Obrázek 13. Dle kombinace zapojení zátěže a sekundárního vinutí dochází k vynásobení signálu příslušnou napěťovou transformační maticí a konstantou. Za tímto blokem vzniká napětí sekundární vinutí, které je blokem *Goto u_2* odváděno k další

analýze. Za blokem *Add5* dochází k integraci blokem *integrator2*, čímž dostáváme signál reprezentující magnetický spřažený tok sekundárního vinutí. Tento blok putuje zpět na subsystém *Blok ideálního transformátoru*, čímž dochází k uzavření smyčky schematického obvodu lineárního modelu transformátoru proudu.

4.3.2 Analýza výstupních signálů při jednofázovém zdroji

Tato kapitola popisuje analýzu signálů dosažených simulací modelu lineárního transformátoru proudu při použití jednofázové napájecí soustavy. Pro úspěšný chod simulace je důležité dodržet několik kroků popsanych již v kapitole věnované modelu transformátoru napětí. Pro tento model je nutné mít naplněné prostředí *Workspace* parametry, které přísluší tomuto modelu. Nastavení bloku *Manual Switch* do polohy jednofázové napájecí soustavy zajistí simulaci se sinusovým napětiovým zdrojem o amplitudě definované v mfile souboru. Zároveň je nutné mít všechny přepínače zapojení vinutí a zátěže nastavené do polohy Y, tedy zapojení reprezentujícího zapojení do hvězdy.

Doba analýzy je s přihlédnutím k frekvenci napájecího napětí a době potřebné k odeznění přechodných jevů opět zvolena na 0,5 sekundy. Maximální krok simulace je roven opět hodnotě 0, 1 milisekundy. Po doběhnutí simulace spuštěné tímto způsobem je možné přikročit k vlastní analýze jednofázově napájeného modelu.

Bloky umožňující analýzu lineárního modelu transformátoru proudu jsou shodné s bloky použitými při analýze jednofázově napájeného lineárního transformátoru napětí. Všechny tyto bloky jsou obsažené opět v subsystému *Subsystém jednofázové analýzy*, jehož vnitřní uspořádání je zobrazené v Příloha 7. Subsystém je možné nalézt v horní části celkového schematického modelu transformátoru proudu.

Jeden z výsledků simulace je zobrazení průběhu napětí a proudů primárního a sekundárního vinutí z bloku *Scope*. Soustava bloků umožňující tuto analýzu je v levé horní části subsystému jednofázové analýzy. Na blok *Scope* jsou pomocí bloků typu *Goto* přiváděny jednotlivé signály ze simulace. Význam těchto signálů je obsažen v pojmenování těchto bloků. Výsledné průběhy pro čas simulace 0 až 10 milisekund jsou zaznamenány v Příloha 11. Porovnáním výsledných průběhů modelu transformátoru napětí zobrazených v Příloha 10 je možné říct, že mezi výslednými průběhy obou simulací není prakticky žádný rozdíl, což bylo i cílem simulace. K odeznění přechodových jevů dochází asi 0,15 sekund po začátku simulace.

Dalším výstupem simulace je analýza proudů a napětí primárního a sekundárního vinutí. U lineárního transformátoru proudu byly opět použity

bloky typu *RMS*, konkrétně blok *Ef hodnota prim vinutí* a blok *Ef. hodnota sek vinutí*. Tyto bloky *RMS* posílají na výstup efektivní hodnotu vstupního signálu, kterou určují na základě nastavené frekvence. Tato frekvence je určena z kmitočtu ω napájecího napětí zadaného do *Workspace* prostředí programu Matlab. Z bloků typu *Display*, které na tyto bloky navazují, lze odečíst jednotlivé efektivní hodnoty proudů a napětí. Efektivní hodnota napětí primárního vinutí byla určena jako 230,10 V a hodnota napětí sekundárního vinutí byla 27,56 V. Tyto hodnoty odpovídají vstupní fázové hodnotě napájecího napětí 230 V zadané do simulace s mírnou odchylkou, která je dána metodou výpočtu simulace a zaokrouhlováním. Efektivní hodnota proudu primárního vinutí odečtená ze simulace byla 0,5156 A a pro sekundární vinutí byla tato hodnota 2,756 A.

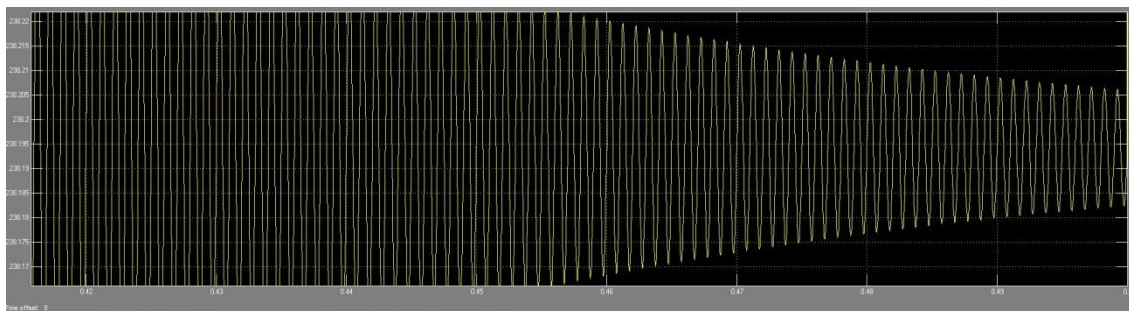
Posledním sledovaným parametrem při simulaci jednofázově napájeného transformátoru proudu je výkon na vstupní (primární) a výstupní (sekundární) straně transformátoru. Metoda určení těchto hodnot je opět totožná jako u transformátoru napětí a je realizovaná pomocí roznásobení signálů napětí a proudu pomocí bloku *Product* a následným použitím bloku *Mean Value (Phasor Type)*. Tento blok má nastavenou periodu na které zjišťuje střední hodnotu. Tato hodnota periody opět vychází ze zadaného kmitočtu vstupního napětí. Výslednou střední hodnotou činného výkonu primárního vinutí je 81,22 W a pro sekundárního vinutí střední hodnota činného výkonu nabyla hodnoty 75,93 W.

4.3.3 Analýza výstupních signálů při třífázovém zdroji

Při použití třífázové napájecí soustavy pro simulaci lineárního modelu transformátoru proudu je analýza obdobná jako při analýze transformátoru napětí. V třífázové napájecí soustavě analyzujeme opět třífázový výkon primární a sekundárního vinutí a připojené zátěže a efektivní hodnoty proudu a napětí primárního a sekundárního vinutí a zátěže pro různé konfigurace zapojení. Všechny bloky pro analýzu třífázového transformátoru proudu je možné opět najít v subsystému *Subsystém třífázové analýzy* ve schematickém obvodu lineárního modelu transformátoru proudu. Vnitřní uspořádání tohoto subsystému je možné vidět na Příloha 6.

Po nastavení bloku *Manual Switch* do polohy generující do modelu třífázovou napájecí soustavu je možné spustit simulaci modelu. Doba analýzy i maximální krok se kterým analýza probíhá je shodný se simulací při jednofázovém napájecím zdroji a zároveň je shodný se simulací transformátoru napětí popsaného v předchozí kapitole. Výchozím stavem analýzy popsaným v této kapitole je zvolené zapojení primárního vinutí, sekundárního vinutí i zátěže do transfigurace hvězda. V levé horní části subsystému analýzy třífázového výkonu je možné pomocí bloků typu *Goto* přivádějících signály na blok *Scope* zobrazit průběhy jednotlivých napětí a proudů dosažených při simulaci.

Dalšími sledovanými parametry lineárního transformátoru proudu je třífázový výkon. Pro výpočet třífázového výkonu je opět použit subsystém *Třífázový výkon*, jehož vnitřní blokové uspořádání je totožné s uspořádáním použitým při simulaci třífázového transformátoru napětí zobrazeným na Obrázek 14. Postup určení hodnoty činného výkonu je také totožný jako pro transformátor napětí. Pomocí bloku *Display* byla pro činný výkon primárního vinutí odečtena hodnota 238,2 W. Tento blok ale ukazuje poslední hodnotu dosaženou simulací. Vzhledem k tomu, že subsystém *Třífázový výkon* posílá na výstup signál reprezentující okamžitou hodnotu činného výkonu, je nutné tuto hodnotu blíže analyzovat. Tato analýza je shodná jako u modelu transformátoru napětí. Z průběhu činné složky výkonu primárního vinutí byla z bloku *Scope* odečtena hodnota po odeznění přechodného děje okolo 238,195 W. Tímto se dostáváme na přesnější výsledek výkonu primárního vinutí. Výsledný průběh činné složky je zobrazený na Obrázek 17.



Obrázek 17: Detail průběhu činného výkonu transformátoru proudu

Pod bloky určujícími výkon primárního vinutí transformátoru proudu zobrazených v Příloha 7 je možné najít shodnou skupinu bloků, která slouží pro analýzu výkon na výstupní, tj. sekundární straně transformátoru a také na zátěži připojené k této části transformátoru. Sada bloků určující výsledný výkon ze signálů změřených na zátěži je zde opět pouze pro kontrolu, případně pro aplikaci kdy by byla k modelu přidána další zátěž, neboť při čistě odporové zátěži se předpokládá stejná hodnota výkonu jako na straně sekundárního vinutí transformátoru. Pomocí bloku typu *Display* byla odečtena pro obě části hodnota činného výkonu 225,5 W. Pomocí stejného postupu jako u určení přesnější hodnoty činného výkonu primárního vinutí transformátoru lze určit přesnější hodnotu i pro průběh výkonu sekundárního vinutí, resp. výkonu na zátěži.

Dalšími analyzovanými parametry byla amplituda a efektivní hodnota napětí primárního a sekundárního vinutí a zátěže transformátoru proudu. Tyto hodnoty byly analyzovány pomocí stejných bloků, jako tomu bylo u modelu transformátoru napětí. Tyto bloky je možné vidět na pravé části subsystému třífázové analýzy. Funkčnost bloků definujících amplitudu a efektivní hodnotu napětí resp. proudu je totožná s použitím při simulaci modelu transformátoru napětí. Z příslušných bloků typu *Display* byla stanovena efektivní hodnota napětí primárního vinutí jako 230,0 V. Efektivní hodnota napětí odečteného na sekundárním vinutí je 27,41 V. Efektivní hodnota proudu primárního vinutí transformátoru byla simulací určena jako 0,5116 A a pro sekundární vinutí je tato hodnota 2,741 A. Vzhledem k tomu, že zapojení sekundárního vinutí bylo shodné se zapojením zátěže, jsou hodnoty napětí a proud naměřené simulací pro zátěž totožné s hodnotami získanými pro sekundární vinutí.

Všechny tyto hodnoty byly zaznamenány pro konfiguraci primárního i sekundárního vinutí, stejně tak jako zátěže na sekundární straně transformátoru, v zapojení do hvězdy. Výsledné hodnoty odpovídají teoretickým předpokladům a téměř se shodují i s hodnotami odečtenými při analýze transformátoru napětí. Odchyłky mezi těmito výsledky jsou zanedbatelné.

Výsledné efektivní hodnoty napětí a proudů primárního a sekundárního vinutí a zátěže spolu s hodnotami činného výkonu primárního a sekundárního vinutí a zátěže modelu transformátoru proudu pro jednotlivé kombinace zapojení jsou souhrnně zobrazeny v Tabulka 4 pro zátěž připojenou v konfiguraci hvězda. Pro zátěž zapojenou do trojúhelníku jsou dosažené výsledky zobrazeny v Tabulka 5. Stejně tak jako při analýze transformátoru napětí, i při transformátoru proudu reprezentuje symbol Y zapojení do hvězdy a D odpovídá zapojení do trojúhelníku. Všechny hodnoty jsou odečteny z *Display* bloků zobrazujících efektivní hodnotu (RMS výstup) vstupního signálu pro jednotlivé kombinace zapojení.

Zapojení primár/sekundár	Y/Y	Y/D	D/Y	D/D
Napětí primárního vinutí U_1 [V]	230,00	230,00	398,40	398,40
Proud primárního vinutí I_1 [A]	0,51	0,39	0,89	0,67
Napětí sekundárního vinutí U_2 [V]	27,41	27,54	47,48	47,71
Proud sekundárního vinutí I_2 [A]	2,74	0,92	4,75	1,59
Napětí na zátěži U_z [V]	27,41	15,90	47,48	27,54
Proud na zátěži I_z [A]	2,74	1,59	4,75	2,75
Vstupní výkon P_1 [W]	238,20	87,41	714,70	262,30
Výstupní výkon P_2 [W]	225,50	75,87	676,40	227,60
Výkon na zátěži P_z [W]	225,50	75,87	676,40	227,60

Tabulka 4: Hodnoty simulace třífázového transformátoru proudu pro Y zátěž

Zapojení primár/sekundár	Y/Y	Y/D	D/Y	D/D
Napětí primárního vinutí U_1 [V]	230,00	230,00	398,40	398,40
Proud primárního vinutí I_1 [A]	1,09	0,51	1,89	0,89
Napětí sekundárního vinutí U_2 [V]	26,89	27,41	46,58	47,48
Proud sekundárního vinutí I_2 [A]	8,07	2,74	13,97	4,75
Napětí na zátěži U_z [V]	46,58	27,41	80,67	47,48
Proud na zátěži I_z [A]	4,66	2,74	8,07	4,75
Vstupní výkon P_1 [W]	674,10	238,20	2022,00	714,70
Výstupní výkon P_2 [W]	650,80	225,50	1952,00	676,40
Výkon na zátěži P_z [W]	650,80	225,50	1952,00	676,40

Tabulka 5: Hodnoty simulace třífázového transformátoru proudu pro D zátěž

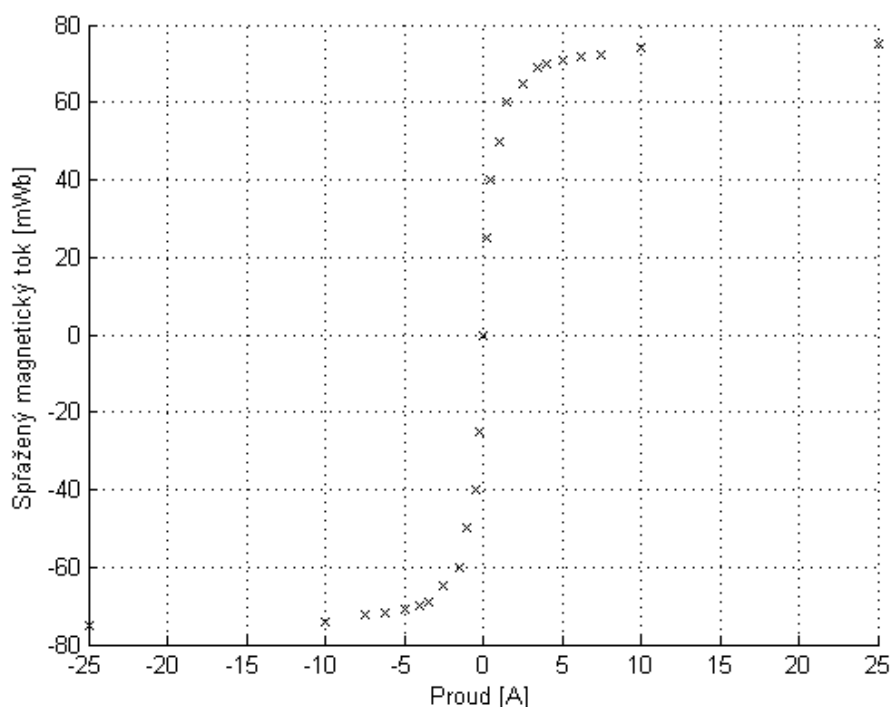
5 NELINEÁRNÍ MODEL TRANSFORMÁTORU

V této kapitole bakalářské práce je popsán další matematický model, který navazuje na modely vytvořené a popsané v předchozí kapitole. Jedná se o model nelineárního transformátoru napětí, které jsou stejně jako tomu bylo i u lineárních modelů, realizovány v blokovém prostředí Matlabu - Simulink. Do schematického obvodu vstupují zadané parametry pomocí kódu programu Matlab. Modely opět využívají teoretických základů pro modely transformátoru ve tvaru hybridní H_U matice pro model transformátoru napětí a H_I matice pro model transformátoru proudu. Co z modelu dělá model nelineární je přihlídnutí na nelinearitu magnetického obvodu, které je do simulace vneseno.

Model detailně popsáný v této kapitole je nelineární model transformátoru napětí. Lineární model transformátoru proudu popsáný v předchozí kapitole lze změnit na nelineární model transformátoru proudu stejným způsobem, jak je tomu naznačeno v následující kapitole. Proto v bakalářské práci tento model není popsán tak detailně jako tomu pro transformátor napětí.

5.1 Parametry nelineárního modelu transformátoru

Oproti lineárnímu modelu transformátoru je v tomto simulovaném modelu nutno přihlídnout k nelinearitě magnetického obvodu. Jak bylo řečeno v teoretické části, kvůli této skutečnosti je nutné vytvořit pomocí sady hodnot převodní tabulku mezi spřaženým magnetickým tokem ψ a k němu přiřadit odpovídající hodnoty indukovaného proudu. Graf hodnot zadaných pro blíže analyzované modely je možné vidět na Obrázek 18.



Obrázek 18: Hodnoty spřaženého toku v závislosti na proudu

Tyto hodnoty byly vytvořeny na základě simulace lineárního modelu transformátoru napětí při jednofázovém napájecím zdroji a ve snaze přiblížit se průběhu magnetizační charakteristiky materiálu dle literatury. Při frekvenci napájecího napětí 1 kHz a efektivní hodnotě 230 V byla odečtena hodnota amplitudy spřaženého magnetického toku indukovaného při simulaci na primárním vinutí jako hodnota 0,05 Wb. Pro tuto hodnotu odpovídal následně indukovaný proud o hodnotě 0,5 A v amplitudě. Tyto body byly určeny jako krajní body linearizované části průběhu magnetizační charakteristiky. Ostatní body byly určeny na základě odhadu ve snaze přiblížit se tvaru magnetizační charakteristiky materiálu dle literatury. Body této charakteristiky jsou symetricky rozloženy kolem os souřadného systému.

Samotný kód, pomocí kterého vstupují hodnoty do prostředí Matlabu, je pak zobrazený v Příloha 3. Při prvotní tvorbě těchto hodnot byla vytvářena závislost spřaženého toku na proudu odečtená ze simulace provedené s napájecím napětím o frekvenci 50 Hz. Při simulaci se zvoleným zdrojem 1 kHz byla hodnota indukovaného spřaženého magnetického toku 20-ti násobně menší. Pro zachování již určeného tvaru magnetizační charakteristiky byly pro tuto frekvenci hodnoty zadané pro 50 Hz vyděleny hodnotou 20. Jak je z tohoto kódu zřetelné, pomocí proměnné *S_psi* se ukládá do *Workspace* soubor hodnot odpovídající spřaženému magnetickému toku vzniklého simulací při frekvenci 50 Hz. Hodnoty proudu odpovídající tomuto magnetickému toku a této frekvenci jsou pak ukládány

do proměnné S_i . Tyto proměnné jsou následně přepočítány pro použití při frekvenci 1 kHz v prostředí Simulink, kde z těchto hodnot probíhá aplikace nelinearity magnetického pole.

Ostatní vstupní parametry simulace nelineárních transformátorů jsou stejné, jako tomu bylo pro lineární modely. Parametry transformátoru zadané do Matlabu jsou již zmíněné v předchozí kapitole popisující parametry lineárních modelů transformátoru. Samotný m-file kód, který je dostává do *Workspace* prostředí programu Matlab je již zobrazen v Příloha 1 při použití modelu transformátoru napětí (Γ -článku) a v Příloha 2 je zobrazen kód pro model transformátoru proudu (I -článek).

5.2 Model transformátoru napětí

Nelineární model transformátoru napětí je realizován (stejně tak, jak tomu bylo pro lineární transformátor napětí) za použití teoretických znalostí popsaných v teoretické části bakalářské práce. Model transformátoru napětí je opět realizován náhradním zapojením v podobě Γ -článku. Celý obvodový model nelineárního modelu transformátoru napětí realizovaný v programu Simulink je zobrazen v Příloha 8. Celý schematický model si lze opět pomyslně rozdělit na primární a sekundární stranu transformátoru.

Vstupními parametry pro nelineární model transformátoru jsou jak již bylo zmíněno v předchozí podkapitole stejné parametry jako pro lineární model. Navíc je ale nutné zahrnout hodnoty definující závislost spřaženého magnetického toku na proudu, čímž se snažíme v modelu simulovat nelinearitu magnetického obvodu, která se ve skutečnosti v praxi vyskytuje.

5.2.1 Princip a funkčnost modelu

Postup a princip funkčnosti nelineárního modelu transformátoru je prakticky totožný s postupem a fungováním lineárních modelů transformátorů, které byly detailně popsány v předcházející kapitole. Po naplnění proměnných ve *Workspace* prostředí programu Matlab, lze přejít k samotné analýze v obvodovém modelu realizovaném v prostředí Simulink. Postup naplnění proměnných je stejný jako při lineárním modelu transformátoru napětí, tedy je nutné spustit mfile kód zobrazený v Příloha 1. Pro přidání proměnných vnášejících do modelu nelinearitu magnetického obvodu je nutné spustit další mfile kód, který je zobrazený v Příloha 3. Po takto naplněném prostředí *Workspace* je před samotnou simulací ještě projít několik kroků nastavení modelu.

Před spuštěním simulace a následnou analýzou nelineárního modelu transformátoru napětí je opět nutné zvolit požadovanou konfiguraci zapojení primárního a sekundárního vinutí a připojené zátěže k transformátoru.

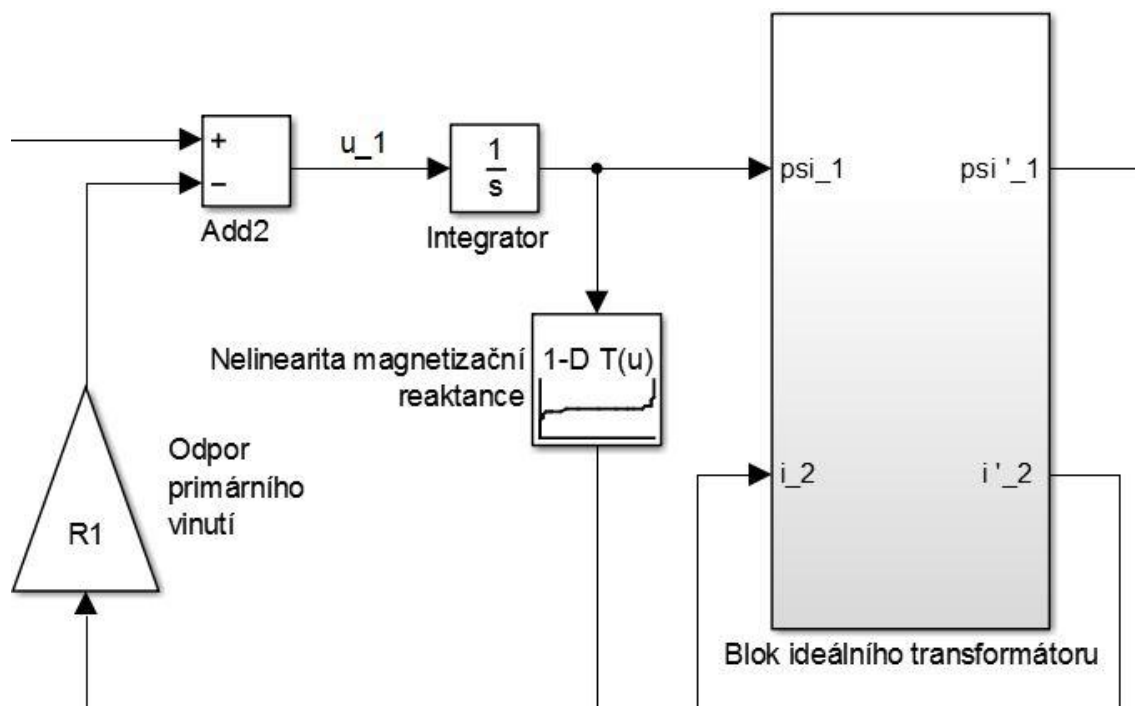
Schematické bloky umožňující toto realizovat jsou již zobrazeny na Obrázek 6. Volba konfigurace probíhá pomocí bloků typu *Manual Switch*, kterými zvolíme požadovanou konfiguraci zapojení jednotlivého vinutí nebo zátěže nelineárního transformátoru. Touto volbou dojde k přiřazení hodnoty do proměnných, na základě kterých bude později při simulaci rozhodnuto, zda se signál bude nebo nebude přepočítávat na konkrétní zapojení části transformátoru do které vstupuje.

Dalším úkonem před samotnou simulací je volba napájecího zdroje pro nelineární model. Na výběr je zde jednofázová napájecí soustava, která přivádí do obvodu sinusové napětí o amplitudě definované pomocí m-file. Další možností je třífázová napájecí soustava, která do simulace přivádí trojici sinusových napětí vzájemně posunutých o 120° . Simulace je spouštěna se stejnou dobou simulace a to tedy 0,5 sekundy. Maximální krok ve výpočtu simulace je nastaven na 0,1 milisekundy.

V případě volby jednofázové napájecí soustavy je opět důležité zvolit na přepínačích zapojení jednotlivých vinutí a zátěže transformátoru možnost pro zapojení do hvězdy (hodnota Y). Pokud by byl přepínač nastaven do jiné polohy, výsledkem simulace bude chybové hlášení a nebo budou analyzující bloky vracet nezvyklé hodnoty napětí a proudů.

5.2.2 Primární a sekundární strana

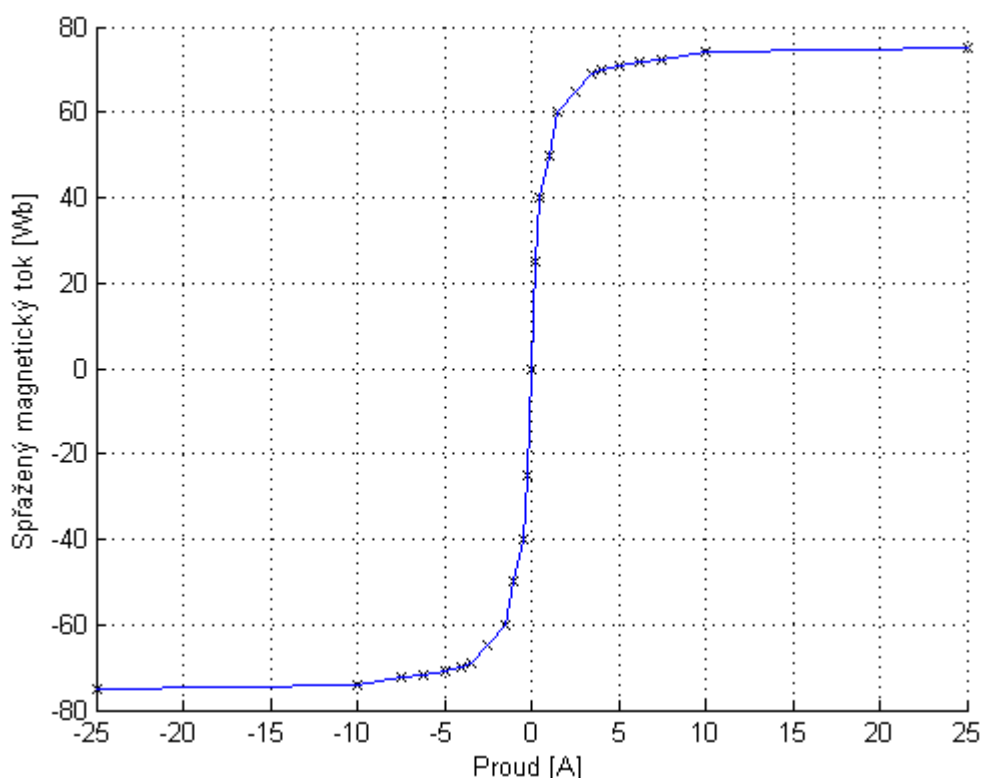
Nelineární model transformátoru napětí zobrazeného v Příloha 8 lze opět rozdělit na několik pomyslných funkčních bloků představujících konkrétní část transformátoru. Pomocí subsystému *Blok ideálního transformátoru* opět rozdělit na primární a sekundární stranu. Při porovnání se schematickým uspořádáním modelu transformátoru napětí v jeho lineární podobě zobrazené v Příloha 4 by se dalo na první pohled usoudit, že oba modely na vypadají totožně. Rozdílem, který do modelu zahrnuje nelinearitu magnetického obvodu, je to, že blok lineárního modelu transformátoru napětí *Magnetizační reaktance* je pro nelineární model transformátoru nahrazen blokem *Nelinearita magnetizační reaktance*.



Obrázek 19: Nelinearita magnetizační reaktance

Blok *Nelinearita magnetizační reaktance* typu *Lookup Table (1-D)* je zobrazen na Obrázek 19. Tento blok provádí v nelineárním modelu transformátoru napětí změnu oproti lineárnímu modelu tím, že magnetizační reaktance transformátoru už není konstantní, ale je přímo úměrná změně spřaženého magnetizačního toku, který při simulaci nelineárního transformátoru vzniká. Z Obrázek 19 je patrné, že za součtovým členem *Add2* vzniká signál napětí primárního vinutí jehož integrací dostáváme spřažení magnetický tok primárního vinutí. Blok prostředí Simulink typu *Lookup Table* přiřazuje vstupnímu signálu předem definovanou hodnotu signálu na základě porovnání hodnot z externího zdroje. V této konkrétní aplikaci je spřaženému magnetizačnímu toku přiřazena odpovídající hodnota proudu. Tyto hodnoty vstupují z prostředí *Workspace* programu Matlab do modelového prostředí Simulink v podobě dvou sad hodnot, přičemž jedna definuje spřažený magnetický tok, který je pomocí bloku proložen lineárním algoritmem, a druhá definuje tomuto toku odpovídající hodnotu proudu.

Blok *Lookup Table (1-D)* umožňuje řadu nastavitelných možností. Možností potřebnou nastavit v zájmu dosažení co nejhladšího proložení závislosti spřaženého toku na proudu primárního vinutí byl způsob matematické interpolace a extrapolace vstupních hodnot bloku. Z dostupných možností se jako nejlepší řešení ukázalo použití lineární interpolace i extrapolace zadané magnetizační charakteristiky. Způsob, jakým program Matlab tento lineární typ proložení realizuje a který byl nakonec použitý v bloku *Nelinearita magnetizační reaktance* při provedených simulacích, je zobrazen na Obrázek 20.



Obrázek 20: Náznak proložení hodnot blokem Lookup Table

5.2.3 Analýza výstupních signálů při jednofázovém zdroji

Po naplnění správném spuštění mfile kódu definujícím parametry modelu transformátoru napětí a po spuštění mfile kódu pro přidání nelinearity magnetického obvodu je možné provést simulaci a následnou vlastní analýzu. Pro analýzu výstupních signálů nelineárního transformátoru napětí při použití jednofázové napájecí soustavy je nutné zvolit tuto soustavu pomocí bloku *Manual Switch*. Přepínače nastavující zapojení primárního a sekundárního vinutí a zapojení zátěže je opět nutné mít nastavené do polohy definující zapojení do hvězdy.

Pro samotnou analýzu výstupních signálů jednofázově napájeného modelu nelineárního transformátoru napětí jsou použity stejné bloky jako pro lineární modely popsané v předchozích kapitole. Všechny analyzující bloky jsou obsaženy v subsystému *Subsystém jednofázové analýzy*, jehož vnitřní uspořádání je zobrazené v Příloha 7.

Při analýze jednofázově napájeného nelineárního transformátoru napětí lze určit efektivní hodnoty a amplitudy procházejících signálů. Efektivní hodnoty napětí byly ze simulace odečteny pro primární vinutí na 230,10 V a pro sekundární

vinutí 27,56 A. Pro efektivní hodnoty proudů bylo odečteno 0,7319 A pro primární vinutí a 2,756 A pro sekundární vinutí transformátoru, respektive zátěž připojenou na sekundární straně transformátoru. Výsledky odpovídají předpokládaným hodnotám s přihlédnutím k hodnotám nastavovaným do této simulace. Tyto hodnoty jsou opět odečteny pomocí bloků typu *Goto*, které přivádějí jednotlivé signály na bloky typu *RMS* počítajících efektivní hodnotu vstupního signálu. Tato hodnota je počítána s přihlédnutím k frekvenci vstupního signálu, který je přepočítáván z kmitočtu ω definovaného ve *Workspace* prostředí.

Dalším výstupním parametrem analýzy jednofázového transformátoru s nelinearitou magnetického obvodu je výkon primárního a sekundárního vinutí. Tyto hodnoty jsou odečteny pomocí přívodu signálů napětí a proudů jednotlivých vinutí na blok typu *Product*, který tyto signál mezi sebou vynásobí. Poté putuje signál na *Mean Value (Phasor Type)*, který určí střední hodnotu vstupního signálu s nastavenou periodou shodnou s periodou vstupního jednofázového zdroje napětí opět určenou pomocí kmitočtu ω . Výsledná hodnota činného výkonu dosažená simulací byla pro primární vinutí 82,07 W a pro sekundární vinutí 75,94 W.

Dalším možným výstupem této analýzy je zobrazení průběhů napětí a proudů primárního a sekundárního vinutí pomocí bloku typu *Display*. Tyto průběhy je možné vidět v Příloha 12. Při simulaci nelineárního transformátoru napětí je možné ze zobrazených průběhů vyzorovat, že vlivem nelinearity magnetizační reaktance dochází ke zkreslení analyzovaných signálů. V okamžiku, kdy hodnota spřaženého magnetického toku dosahuje na magnetizační charakteristice oblasti přesycení (tj. oblastí kdy se charakteristika přestane chovat lineárně), dochází k přesycení magnetického obvodu a tedy k deformaci průběhu původně sinusových signálů. Tato situace je nejzřetelnější při průběhu proudu primárního vinutí. Z průběhu primárního proudu je zároveň vidět proudová špička u začátku simulace. Pro detailnější zobrazení zkreslení signálu není tato špička v průběhu zřetelná, ale při jiném přiblížení je možné odečíst maximální proud 105 A.

5.2.4 Analýza výstupních signálů při třífázovém zdroji

Při analýze nelineárního transformátoru napětí napájeného pomocí třífázové napájecí soustavy lze analyzovat stejné parametry jako pro lineární modely zmíněné v předchozích kapitolách. Sledovanými parametry je vstupní a výstupní výkon modelu transformátoru, efektivní hodnoty napětí a proudu primárního a sekundárního vinutí a zároveň je možné zobrazit pro tyto signály časový průběh pomocí bloků typu *Scope*. Všechny bloky analyzující nelineární model transformátoru jsou shrnuty v subsystému *Subsystém třífázové analýzy*, jehož vnitřní uspořádání je zobrazeno v Příloha 6Příloha 7.

Pro analýzu simulace modelu transformátoru napětí v jeho nelineární podobě je ale v první řadě definovat potřebné omezení. Vzhledem k tomu, že magnetizační charakteristika, která do obvodu vnáší nelinearitu magnetického pole, je stavěná podle jmenovitých hodnot spřaženého magnetického toku vzniklého při simulaci lineárního modelu transformátoru při zapojení všech částí v konfiguraci hvězda, jsou veškeré analýzy třífázově napájeného transformátoru napětí popsány v této kapitole realizované při konfiguraci zapojení vinutí do hvězdy na primární i sekundární straně transformátoru. Pro použití jiné konfigurace zapojení by bylo nutné vnést do simulace odpovídající magnetizační charakteristiku. Tato změna by byla nutná především v případě, kdy by bylo změněno zapojení primárního vinutí na transfiguraci trojúhelník.

Analýza výkonu primárního a sekundárního vinutí probíhá pomocí subsystému *Třífázový výkon* definovaném v předchozích kapitolách. Při simulaci nelineárního třífázového transformátoru napětí byla pomocí bloků typu *Display* odečtena hodnota činného výkonu primárního vinutí jako 238,7 W a pro sekundární vinutí bylo odečteno 225,4 W. Výkonu na zátěži připojené k transformátoru odpovídá stejná hodnota jako pro výkon sekundárního vinutí. Metoda výpočtu činného a jalového výkonu odpovídá rovnicím popsaných v teoretické části bakalářské práce. Pro všechny hodnoty jde opět o poslední hodnotu dosaženou simulací. Vzhledem k nastavení dostatečné doby simulace potřebné k odeznění přechodných jevů lze tyto výsledné hodnoty pokládat za ustálené. Z detailního průběhu na bloku *Scope* by se dala blíže určit střední hodnota výsledného průběhu výkonu stejnou metodou, jako tomu bylo při analýze třífázového výkonu lineárních modelů transformátorů.

Dalšími sledovanými parametry nelineárního modelu transformátoru napětí je efektivní hodnota napětí a proudu primárního a sekundárního vinutí a zátěže připojené k sekundární straně transformátoru. Tato hodnota je odečtena pomocí bloku *Display*, na který je přiváděn výstup subsystému *Amplituda a efektivní hodnota napětí* respektive *Amplituda a efektivní hodnota proudu* zobrazených v Příloha 6. Funkčnost těchto subsystémů byla popsána při lineárních modelech transformátoru a jejich vnitřní blokové uspořádání je možné vidět na Obrázek 16. Z bloků typu *Display* byla pro efektivní hodnotu napětí primárního vinutí stanoveno 230 V a pro sekundární vinutí 27,41 V. Stejným postupem byla určena efektivní hodnota proudu primárního vinutí jako 0,8461 A. Pro sekundární vinutí byla odečtena hodnota 2,741 A. Naměřené efektivní hodnoty sekundárního vinutí jsou shodné s hodnotami naměřenými na odporové zátěži připojené k nelineárnímu transformátoru napětí.

5.3 Model transformátoru proudu

Nelineární model transformátoru proudu je zobrazen v Příloha 9. Stejně tak jako nelineární model transformátoru napětí popsáný v předchozí podkapitole navazuje na lineární model popsáný v předchozí kapitole. Rozdíl mezi modely je v tom, že blok *Magnetizační reaktance* nacházející se v lineárním modelu je nahrazen blokem *Nelinearita magnetizační reaktance* stejně jako pro nelineární model transformátoru napětí popsaného v předchozí kapitole.

Pro postup simulace i princip její funkčnosti platí to stejné jako pro předešle popsané modely. Po naplnění parametrů pro model v programu Matlab je model možné opět analyzovat buď pro jednofázovou nebo třífázovou napájecí soustavu, tak pro různé kombinace zapojení. Při použití třífázové napájecí soustavy ale opět platí podmínka, že soubory hodnot vstupující do bloku *Nelinearita magnetizační reaktance* (tedy spřažený magnetický tok a proud) musí odpovídat konkrétní aplikaci použití.

Výsledky simulací jsou závislé na konkrétním použití sad hodnot pro aplikaci nelinearity magnetického obvodu. Dosažené výsledky jsou opět podobné jako pro model transformátoru napětí a potvrzují fakt, že model transformátoru lze realizovat v několika provedení náhradního schémat za dosažení stejných výsledků. Pro nelineární model toto platí také z drobnou odchylkou danou zasahující magnetizační charakteristikou.

6 NÁVODY K POUŽITÍ MODELŮ

V přílohách jsou uvedeny návody, které je možné využít pro simulaci modelů lineárních a nelineárních transformátorů. V Příloha 13 je zobrazen návod sloužící k obsluze lineárních modelů transformátorů. Lineární model transformátoru napětí a lineární model transformátoru proudu jsou každý uložen v samostatném .slx souboru obsahujícím obvodová schémata modelu a pro každý model slouží samostatný mfile kód, ve kterém jsou definované konkrétní parametry použité u popsaných modelů. Tyto parametry mohou být uživatelem dle libosti změněny.

V Příloha 14 je zobrazen návod pro obsluhu nelineárního modelu transformátoru napětí a proudu. Tyto modely (stejně jako tomu bylo u lineárních modelů) v sobě obsahují možnosti přepínání konfigurace vinutí. Tato funkce ale není při simulaci s hodnotami přidávanými k schematickému obvodu funkční jako tomu bylo pro lineární modely. Pro konkrétní simulaci je třeba použít odpovídající hodnoty magnetizační charakteristiky, které vnášení do simulací vliv nelinearity magnetického obvodu. Přiložená charakteristika odpovídá při použití třífázové napájecí soustavy zapojení primárního i sekundárního vinutí a zapojení zátěže transformátoru do zapojení hvězda.

Návody obsahují v bodech několik základních pokynů pro obsluhu modelů a úspěšné spuštění simulací. Předpokládají základní znalost problematiky a prostředí programu Matlab a Simulink. V případě potřeby je možné aby si uživatel v bakalářské práci našel konkrétní část v popisu modelu a našel zde k ní více informací.

7 PŘÍKLAD APLIKACE MODELU

Vytvořením modelů transformátoru dostáváme funkční celek, který je možné použít při dalších simulacích elektrických strojů a přístrojů. V této kapitole je ukázán praktický příklad použití modelu transformátoru v dalších modelech.

Jako praktický příklad je zde popsán a zobrazen model jednočinného můstkového propustného měniče. Jeho schematické uspořádání je možné vidět na Příloha 15. Model je opět realizován v programu Matlab a v jeho modelovém prostředí Simulink. Parametry potřebné pro provedení simulace tohoto modelu jsou zobrazeny v Příloha 16. Tento mfile kód je tvořen obdobným způsobem jako tomu bylo pro modely transformátorů. Pro význam jednotlivých vstupních parametrů je zde opět možné vidět krátkou poznámku. Zároveň je možné si povšimnout, že parametry pro model jednočinného měniče jsou stavené na parametrech modelu transformátoru napětí realizovaného v podobě Γ -článku, jehož parametry jsou zobrazeny v Příloha 1.

Jednočinný propustný můstkový měnič tvoří základ celého blokového schématu. Obecně po připojení napájecího napětí realizovaného blokem *DC Voltage Source* dochází k připojení napětí na primární vinutí transformátoru. Tímto dochází k magnetizaci jádra transformátoru, na kterém vzniká energie, kterou je nutné po vypnutí tranzistorů odvést. Pokud by tak nenastalo, docházelo by k přesycení jádra transformátoru. Demagnetizace jádra transformátoru je zajištěna pomocí diod D1 a D2. U tranzistorů T1 a T2 si lze povšimnout, že každý má stejnojmenný vlastní zdroj buzení. Zdrojem buzení těchto tranzistorů je blok *Pulse Generator*, který je možné vidět v levé horní části blokového schématu. Pulz tímto blokem generovaný má amplitudu rovnou 1, periodu vypočtenou dle napájecí frekvence a šířku pulzu nastavenou na 40% z doby periody. Tato doba je volena z důvodu sycení transformátoru. V případě že by tato doba byla větší než polovina periody, dochází k lavinovitému přesycení transformátoru. Na pravé straně za diodou D3 a D0 je možné vidět filtrovací tlumivku a kondenzátor za kterým je možné vidět zátěž. Velikost této odporové zátěže je shodná s velikostí zátěže použité při modelech transformátorů a to 10 Ω .

Samotný model transformátoru aplikovaný do modelu jednočinného můstkového měniče se nachází uvnitř subsystému *trafoSimPowhybrid*. Tento subsystém je hybridním spojením bloků použitých z knihovny Simulinku SimPowerSystems a bloků, pomocí kterých byl realizován modely transformátorů popsané v předchozích kapitolách, které se nacházejí v jiné knihovně programu Simulink. Model je takto realizován z důvodu propojení těchto dvou knihoven, neboť SimPowerSystem bloky neumí pracovat se signály generovanými modely realizovanými v této bakalářské práci. Pomocí bloků symbolizujících voltmetr

je uvnitř subsystému odváděn signál napětí primárního a sekundárního vinutí k další analýze. Proud primárního a sekundárního vinutí je zde odečítán pomocí bloku řízeného proudového zdroje.

V pravém horním rohu blokového schématu je vidět několik bloků typu *From*, které přivádějí obvodové signály k analýze na bloky typu *Scope*. Popis signálu je možné vidět v bloku přivádějícím signál. Pro zobrazení funkčnosti tohoto modelu jsou v přílohách zobrazeny vybrané průběhy získané simulací. Pro názornost a spojení jednotlivých průběhů jsou všechny průběhy zobrazeny ve stejném čase simulace. Tento čas byl zvolen po odeznění přechodných dějů v obvodu a to od 500 do 505 milisekund od začátku simulace.

V Příloha 18 jsou zobrazeny průběhy proudů získané simulací a to průběh primárního proudu, sekundárního proudu a magnetizačního proudu transformátoru. Při přechodném ději dosahuje primární proud hodnoty 6,385 A. Pro sekundární vinutí tento proud dosahuje hodnoty 40,225 A. Primární proud transformátoru je součtem magnetizačního proudu a transformovaného sekundárního proudu na primární stranu. Vyobrazené průběhy jsou typické pro jednočinný můstkový propustný měnič. Na průběhu magnetizačního proudu je vidět, že díky nastavené střídě 0,4 dochází k celkové demagnetizaci. Doby magnetizace je stejná jako doba magnetizace a z průběhu je patrné že nedochází k přesycování transformátoru.

Průběhy napětí primárního a sekundárního vinutí transformátoru v modelu jednočinného můstkového měniče jsou zobrazeny v Příloha 17. Na primární straně dochází ke generování obdélníkových pulsů o velikosti definované z prostředí programu Matlab. Na sekundární straně vzniká napětí dané převodovou konstantou transformátoru. Z průběhu je patrný přechodný děj v podobě napětíového překmitu nad očekávanou hodnotu, který může být způsobený výpočtovou chybou. Po vypnutí tranzistorů dochází k uzavření obvodu přes demagnetizační diody a na primární straně skokově vznikne záporné napětí stejné velikosti jako při sepnutém tranzistoru.

V Příloha 19 je možné vidět detailní průběh napětí na měniči po dobu jedné periody. Porovnáním šířky pulzů napětí primárního a sekundárního vinutí je zřetelné, že šířka pulzu sekundárního vinutí je užší než primárního. Tento rozdíl (resp. zpoždění) je dáno rozptylovou indukčností sekundárního vinutí.

8 ZÁVĚR

V bakalářské práci byly definovány základní fyzikální vztahy a teoretické předpoklady potřebné k tvorbě matematických rovnic. Tyto rovnice se staly základem k vytvoření blokových modelů transformátorů v prostředí Matlab a Simulink. Všechny tyto fyzikální a teoretické vztahy byly tvorbou simulací v programu Simulink postupně testovány a samotné modely byly tak zlepšovány dokud nebylo dosaženo požadovaných výsledků.

V teoretické části bakalářské práce byly definovány základní parametry a veličiny pro model transformátoru. Tím byl definován základní model transformátoru, který byl následně převeden do ekvivalentních náhradních zapojení. Pomocí toho vznikl model transformátoru napětí a model transformátoru proudu. Pro oba modely byly definované základní matematické vztahy. Důležitým základem pro tvorbu simulací těchto modelů bylo definování vektorového prostoru, které umožnilo realizovat a analyzovat tyto modely v třífázové napájecí soustavě. Dalším důležitým bodem bylo definování základních znalostí k nelinearitě magnetického obvodu, která kombinací s prvotně vzniklými modely umožnila vznik nelineárních modelů transformátoru.

Tvorba praktické části bakalářské práce byla prvně směřována na jednofázové lineární modely transformátorů. Po vzniku a ověření funkčnosti těchto modelů byly modely dále rozšiřovány. Pro každý model přibyla na základě vektorové transformace možnost volby třífázové napájecí soustavy. Zde bylo důležité vytvořit bloky generující tři zdrojové signály a následně je dle teorie převést na signál dvousložkového tvaru, který se dostává dál do simulace. Zároveň bylo důležité vytvořit bloky umožňující analýzu výkonu, efektivní hodnoty a amplitudy těchto dvousložkových signálů. Při porovnání výsledků simulací lineárních modelů bylo dosaženo stejných výsledků čímž se potvrdil teoretický předpoklad, že jeden model lze realizovat několika způsoby náhradních zapojení. Tento fakt lze nejvíc vidět při porovnání výsledků třífázové analýzy modelu transformátoru napětí a proudu.

Další částí bylo do vzniklých lineárních modelů transformátorů aplikovat nelinearitu magnetického obvodu. Po vytvoření vhodné sady hodnot určující magnetizační charakteristiku (závislost spřaženého magnetického toku na indukovaném proudu) došlo k sérii simulací a následného vytvoření nelineárních modelů.

Pro všechny vytvořené modely transformátorů na závěr vznikly stručné návody. Každý návod obsahuje v několika krocích popis a postup provedení simulace s konkrétním nastavením a lze ho tedy využít pro výukové účely předmětů zaměřujících se na problematiku transformátorů.

Veškeré bloky i parametry vstupující do modelů jsou pro přehlednost popsány. Uživateli se základní znalostí programu Matlab a Simulink by nemělo dělat problém zorientovat se v modelech a pomocí návodů a popisu jednotlivých modelů v bakalářské práci realizovat libovolné možné simulace.

Realizací lineárních modelů transformátorů, jejich převod do nelineárních podoby a vytvořením návodů bylo dosaženo všech cílů zadaných pro tvorbu bakalářské práce. Zpracování bakalářské práce pro mě bylo zajímavé především díky prohloubení znalostí v oblasti elektrických strojů a v tvorbě simulací a práce s programy Matlab a Simulink. Zejména v programovém prostředí Simulink jsem zaznamenal velký pokrok, protože pro tvorbu modelů bylo třeba využít bloky z dostupných knihoven, se kterými jsem se doposud nesetkal.

Do bakalářské práce byl navíc jako praktický příklad použití modelu transformátoru přidán ještě jeden model. Jedná se o model jednočinného můstkového měniče realizovaného pomocí programu Simulink. Bloky použité v modelu se nachází v knihovně SimPowerSystems. Vzhledem k odlišnosti funkčnosti bloků této knihovny je část tvořící model transformátoru použita v tomto modelu upravená pro toto použití.

Literatura

- [1] VELTMAN, André a DUCO W.J. PULLE AND RIK W. DE DONCKER. *Fundamentals of electrical drives*. 3. Ed. S.l.: Springer, 2007. ISBN 14-020-5503-X.
- [2] PATOČKA, Miroslav a DUCO W.J. PULLE AND RIK W. DE DONCKER. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoprůdné elektrotechnice*. V Brně: VUTIU, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [3] *Elektrické stroje* [Elektronická skripta]. FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ [cit. 2017-01-01]. Po přihlášení do informačního systému pomocí vutloginu dostupné z:
https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/208815/mod_resource/content/2/c_elek_skripta_2016.pdf
- [4] FITZGERALD, A. E., Charles KINGSLEY a Stephen D. UMANS. *Electric machinery*. 6th ed. Boston, Mass.: McGraw-Hill, c2003. ISBN 00-711-2193-5.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

M	-	vzájemná indukčnost	[H]
k	-	činitel vazby	[-]
L	-	vlastní indukčnost	[H]
K	-	převodová konstanta	[-]
u	-	napětí	[V]
i	-	proud	[A]
I_μ	-	magnetizační proud	[A]
ψ	-	spřažený magnetický tok	[Wb]
B	-	magnetická indukce	[T]
H	-	intenzita magnetického pole	[A/m]
φ	-	fázový posun	[rad]
C	-	konstanta invariantnosti	[-]
i_Y	-	proud v konfiguraci hvězda	[A]
i_D	-	proud v konfiguraci trojúhelník	[A]
P	-	činný výkon	[W]
Q	-	jalový výkon	[VA]
U_{RMS}	-	efektivní hodnota napětí	[V]
U_{AMP}	-	amplituda napětí	[V]
R_{Fe}	-	odpor reprezentující ztráty v železe	[Ω]
R_Z	-	odpor zátěže	[Ω]
f	-	frekvence	[Hz]
L_σ	-	rozptylová indukčnost	[H]
P	-	konstanta zapojení primárního vinutí	[-]
S	-	konstanta zapojení sekundárního vinutí	[-]
Z	-	konstanta zapojení zátěže transformátoru	[-]

Seznam příloh

Příloha 1	Parametry transformátoru napětí - mfile kód
Příloha 2	Parametry transformátoru proudu - mfile kód
Příloha 3	Sada hodnot pro přidání nelinearity mag. obvodu - mfile kód
Příloha 4	Lineární model transformátoru napětí - blokové schéma
Příloha 5	Lineární model transformátoru proudu - blokové schéma
Příloha 6	Uspořádání subsystému Subsystém třífázové analýzy
Příloha 7	Uspořádání subsystému Subsystém jednofázové analýzy
Příloha 8	Nelineární model transformátoru napětí - blokové schéma
Příloha 9	Nelineární model transformátoru proudu - blokové schéma
Příloha 10	Průběhy lineárního jednofázového transformátoru napětí
Příloha 11	Průběhy lineárního jednofázového transformátoru proudu
Příloha 12	Průběhy nelineárního jednofázového transformátoru napětí
Příloha 13	Návod pro obsluhu lineárních modelů transformátoru
Příloha 14	Návod pro obsluhu nelineárních modelů transformátoru
Příloha 15	Jednočinný můstkový měnič - blokové schéma
Příloha 16	Parametry modelu jednočinného měniče - mfile
Příloha 17	Průběhy napětí jednočinného měniče
Příloha 18	Průběhy proudu jednočinného měniče
Příloha 19	Detail průběhu napětí jednočinného měniče
Příloha 20	CD s vytvořenými modely a mfile soubory

Příloha 1 Parametry transformátoru napětí - mfile kód

```
clc
clear all
%% Určené parametry náhradních zapojení
%% Napětový transformátor
% Gamma článek
L1 = 0.1; % Magnetizační reaktance na straně primárního vinutí
R1 = 2; % Odpor primárního vinutí
Lsigp = 0.005; % Rozptylová indukčnost primárního vinutí
Rz = 10; % Zátěž
Rfe = 15000; % Odpor reprezentující ztráty v železe
Ku210 = 48/400; % Převod transformátoru napětí
u1 = 230*sqrt(2); % Napájecí napětí
w = 2*pi*1000; % Napájecí frekvence
R2 = R1*(Ku210*Ku210); % Odpor sekundárního vinutí
Lsig = Lsigp*(Ku210*Ku210); % Rozptylová indukčnost sekundárního vinutí
```

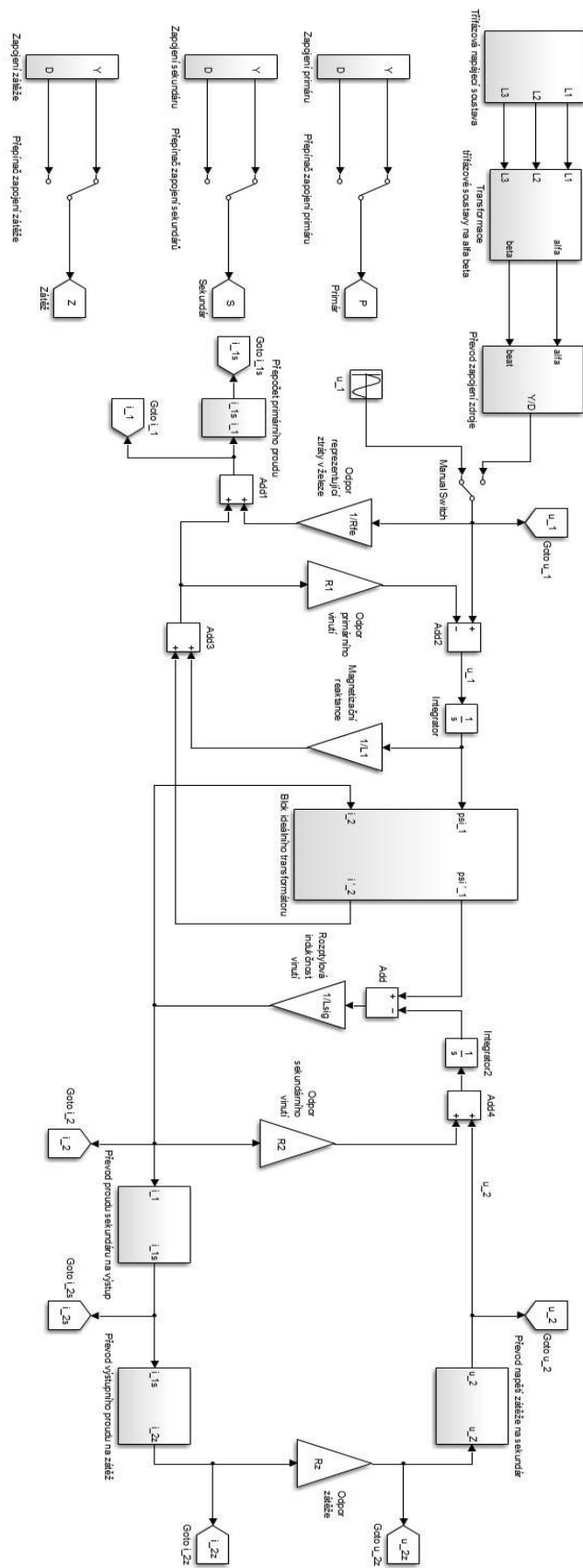
Příloha 2 Parametry transformátoru proudu - mfile kód

```
%% Definování hodnot pro nelinearitu magnetického obvodu
%% Hodnoty pro závislost spřaženého magnetického toku na proudu
% Hodnoty pro spřažený tok při 50 Hz
S_psi = [-1.5, -1.48, -1.45, -1.435, -1.42, -1.4, ...
-1.38, -1.3, -1.2, -1, -0.8, -0.5, ...
0, 0.5, 0.8, 1, 1.2, 1.3, ...
1.38, 1.4, 1.42, 1.435, 1.45, 1.48, 1.5];
% Hodnoty proudu při 50 Hz
S_i = [-500, -200, -150, -125, -100, -80, ...
-70, -50, -30, -20, -10, -5, ...
0, 5, 10, 20, 30, 50, ...
70, 80, 100, 125, 150, 200, 500];
% Převod charakteristiky na frekvenci napájecího napětí 1 kHz
S_psikHz = S_psi/20;
S_ikHz = S_i/20;
```

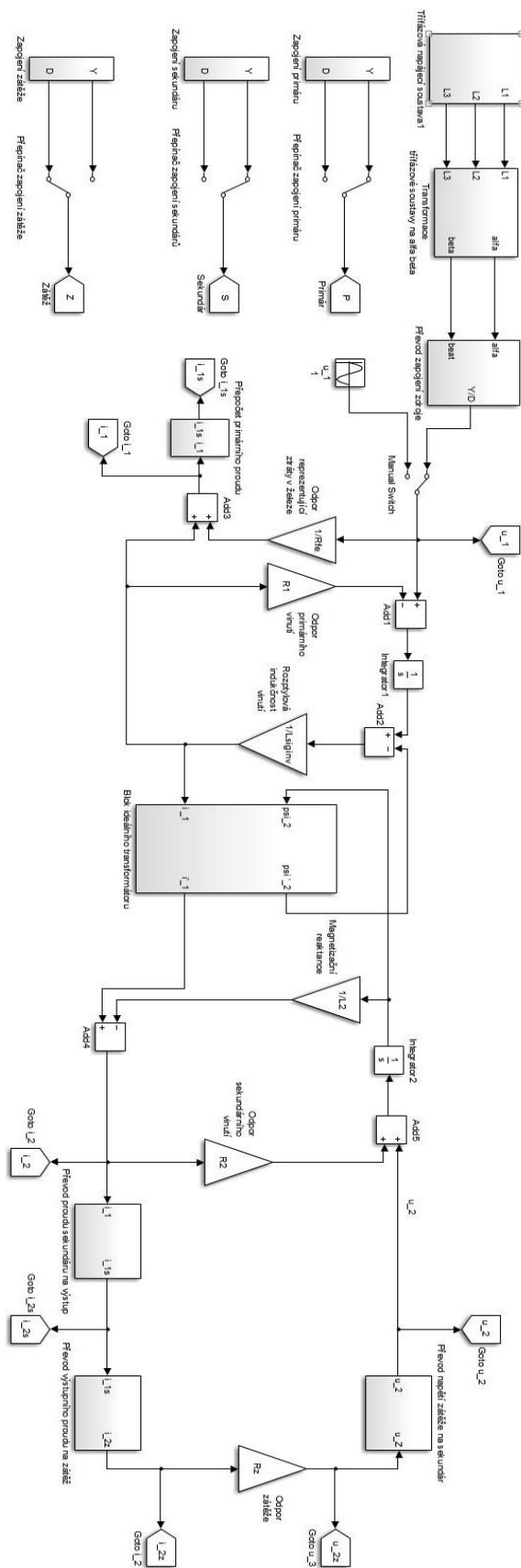
Příloha 3 Sada hodnot pro přidání nelinearity mag. obvodu - mfile kód

```
clc
clear all
%% Určené parametry náhradních zapojení
%% Proudový transformátor
% Inverzní gamma článek
L1 = 0.1; % Magnetizační reaktance na straně primárního vinutí
R1 = 2; % Odpor primárního vinutí
Lsigp = 0.005; % Rozptylová indukčnost primárního vinutí
Rz = 10; % Zátěž
Rfe = 15000; % Odpor reprezentující ztráty v železe
Ku210 = 48/400; % Převod transformátoru napětí
u1 = 230*sqrt(2); % Napájecí napětí
w = 2*pi*1000; % Napájecí frekvence
R2 = R1*(Ku210*Ku210); % Odpor sekundárního vinutí
k = sqrt(L1/(L1 + Lsigp)); % Určení koeficientu pro přepočítání z gamma parametrů
L2 = (Ku210/k)^2*L1; % Magnetizační reaktance na straně sekundárního vinutí
Lsig = Lsigp*(Ku210*Ku210); % Rozptylová indukčnost sekundárního vinutí
Lsiginv = L1*(1-k*k); % Rozptylová indukčnost vinutí
Ku210 = sqrt(L2/L1)/k; % Převod transformátoru inv gamma
```

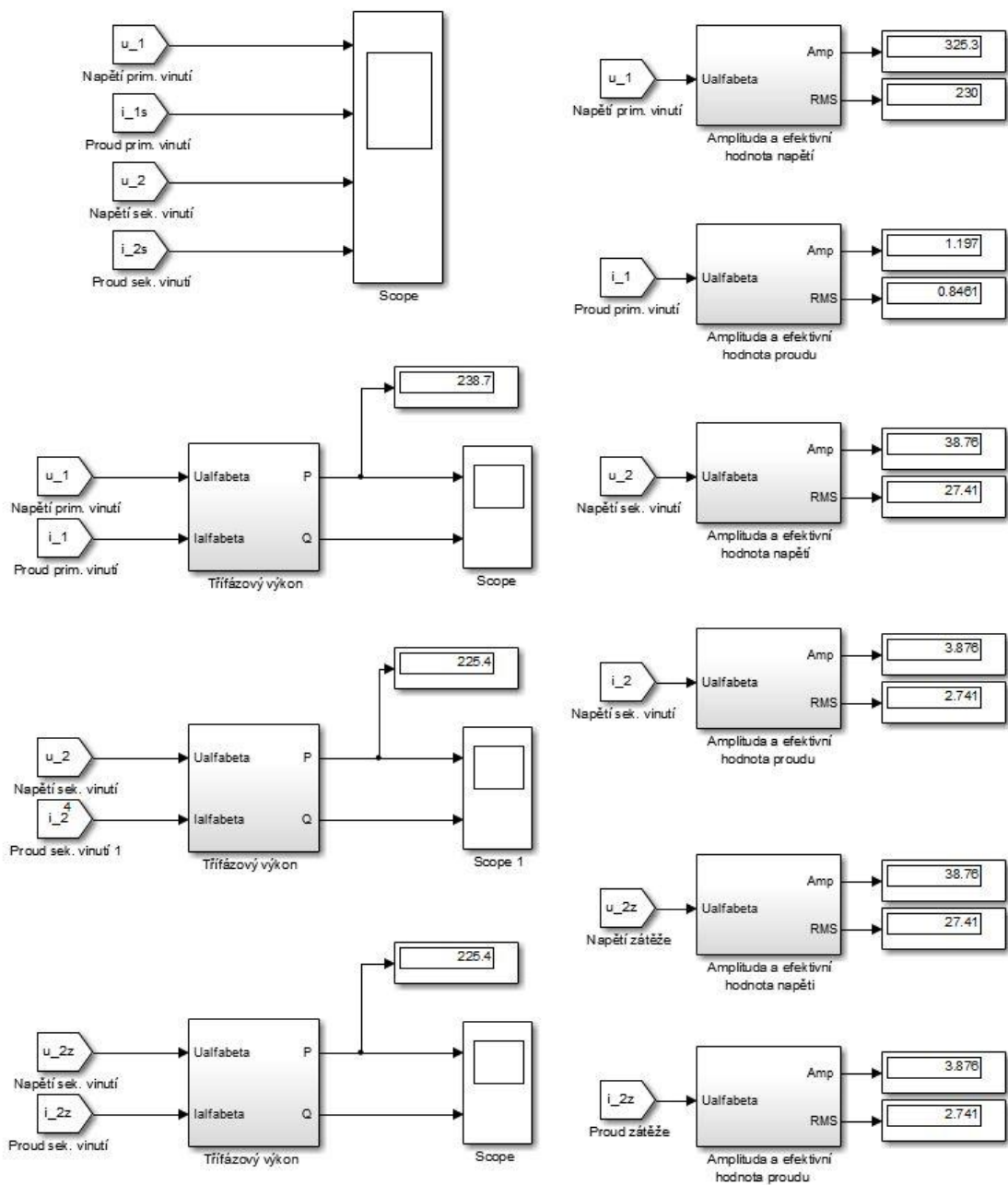
Příloha 4 Lineární model transformátoru napětí - blokové schéma



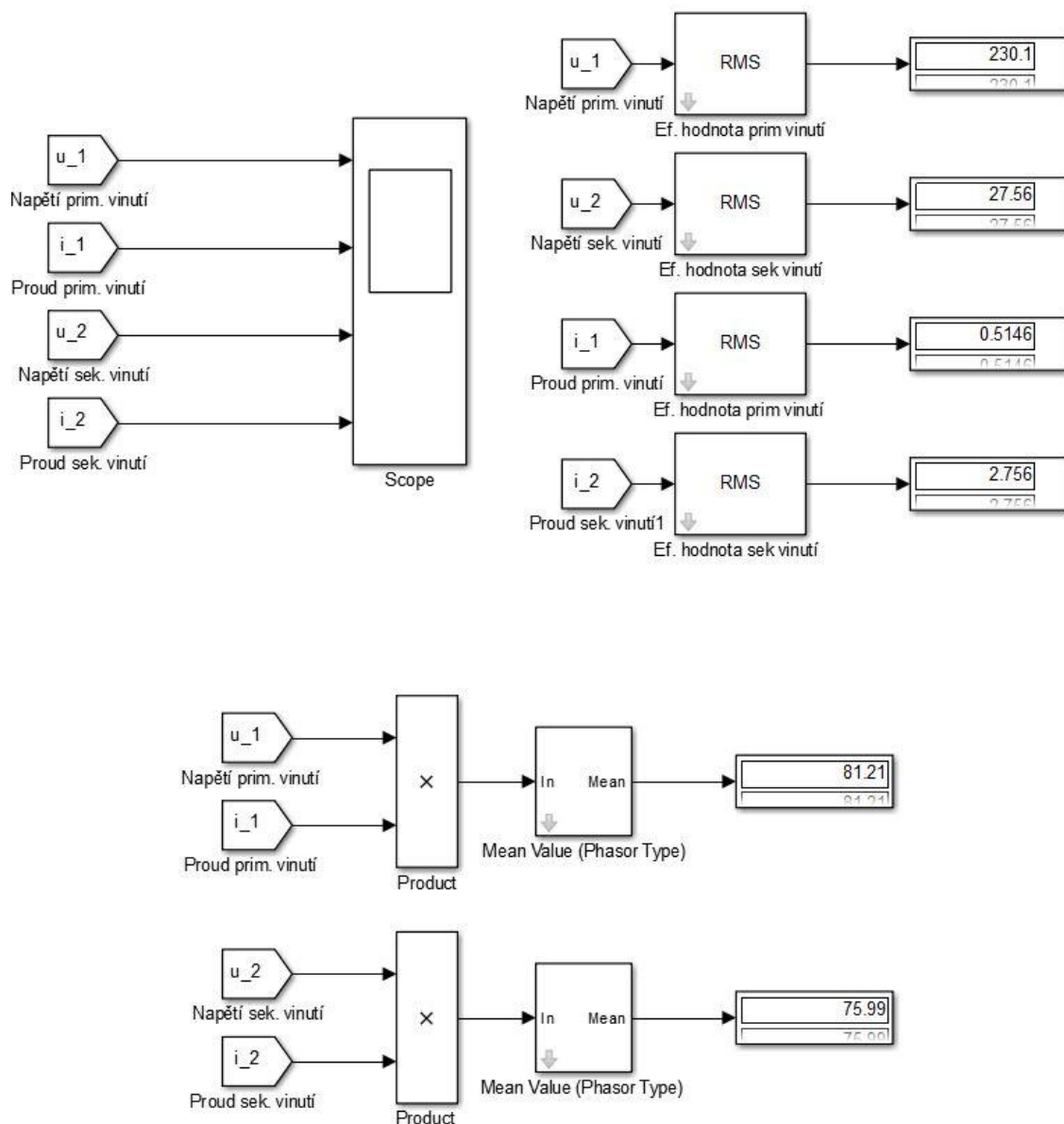
Příloha 5 Lineární model transformátoru proudu - blokové schéma



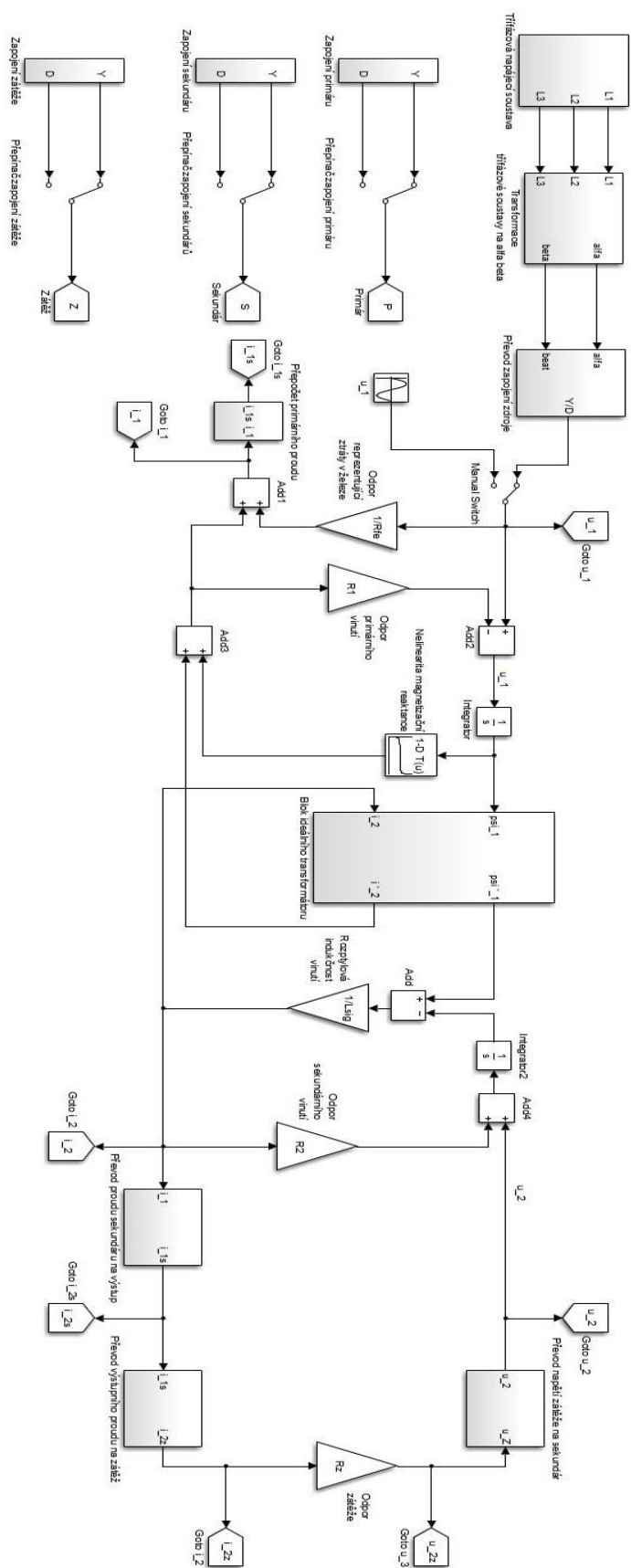
Příloha 6 Uspořádání subsystému Subsystém třífázové analýzy



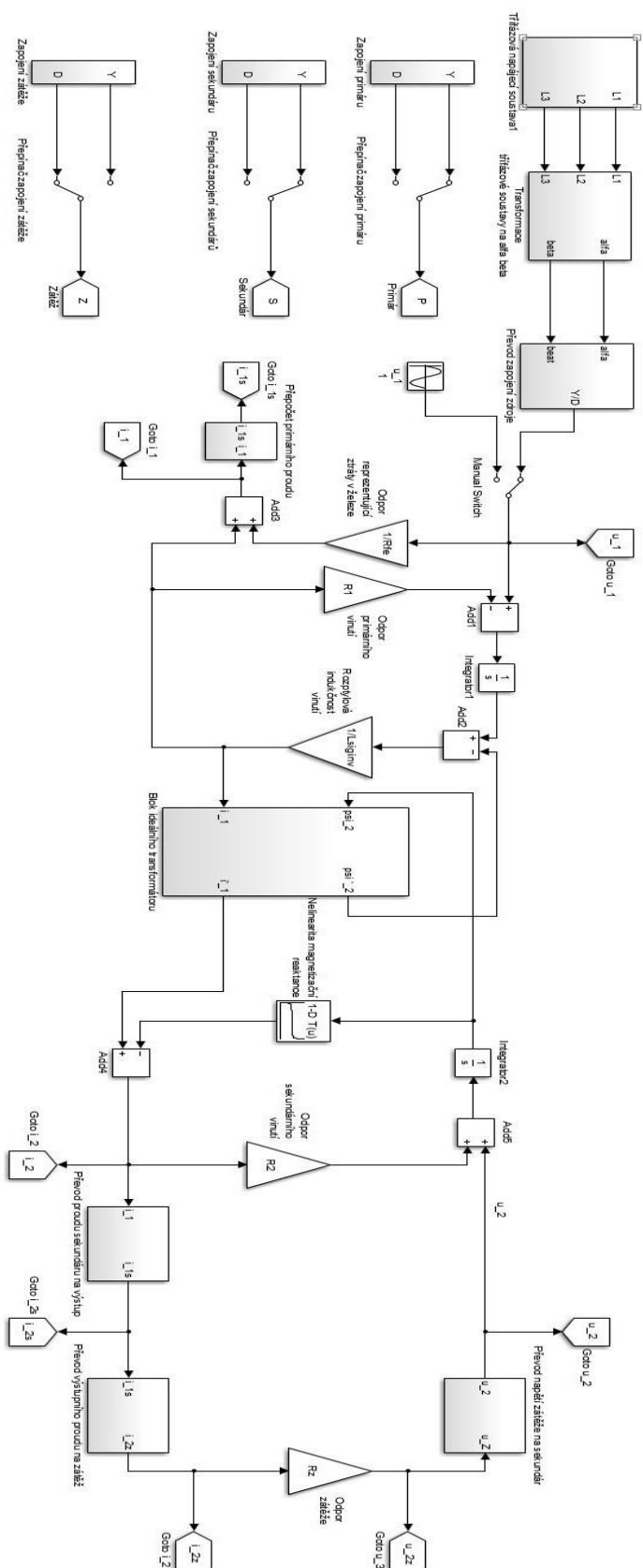
Příloha 7 Uspořádání subsystému Subsystém jednofázové analýzy



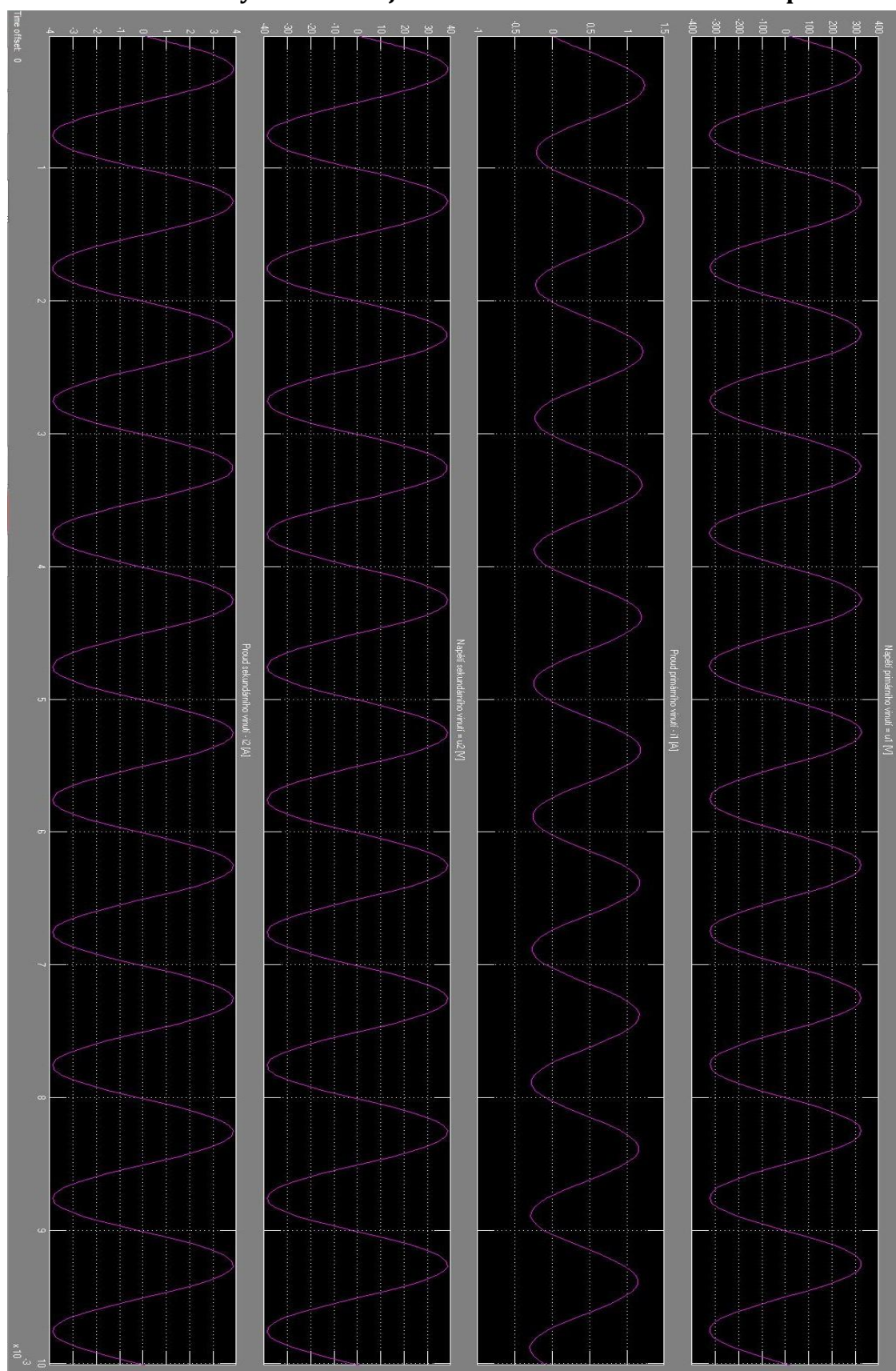
Příloha 8 Nelineární model transformátoru napětí - blokové schéma



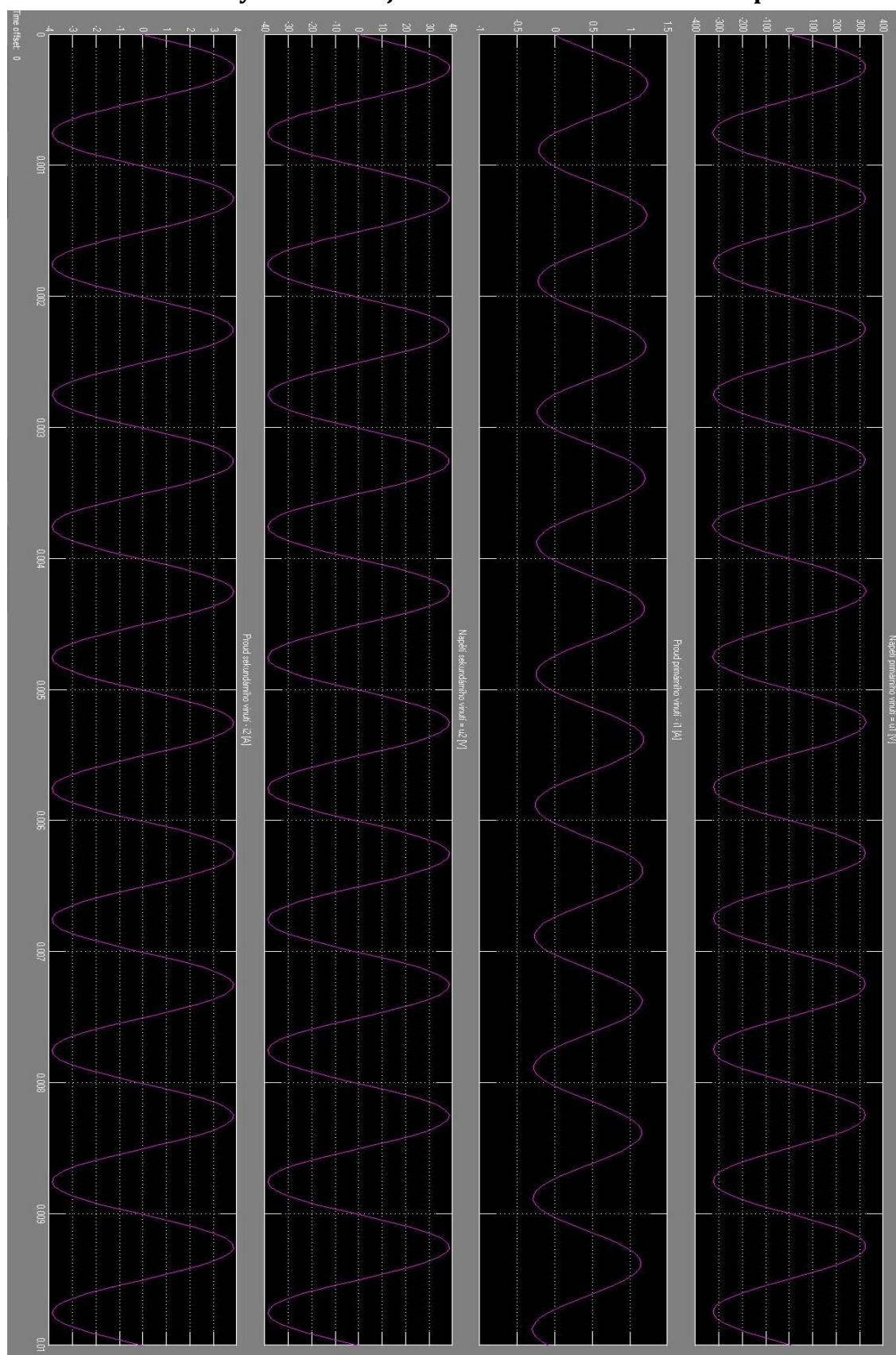
Příloha 9 Nelineární model transformátoru proudu - blokové schéma



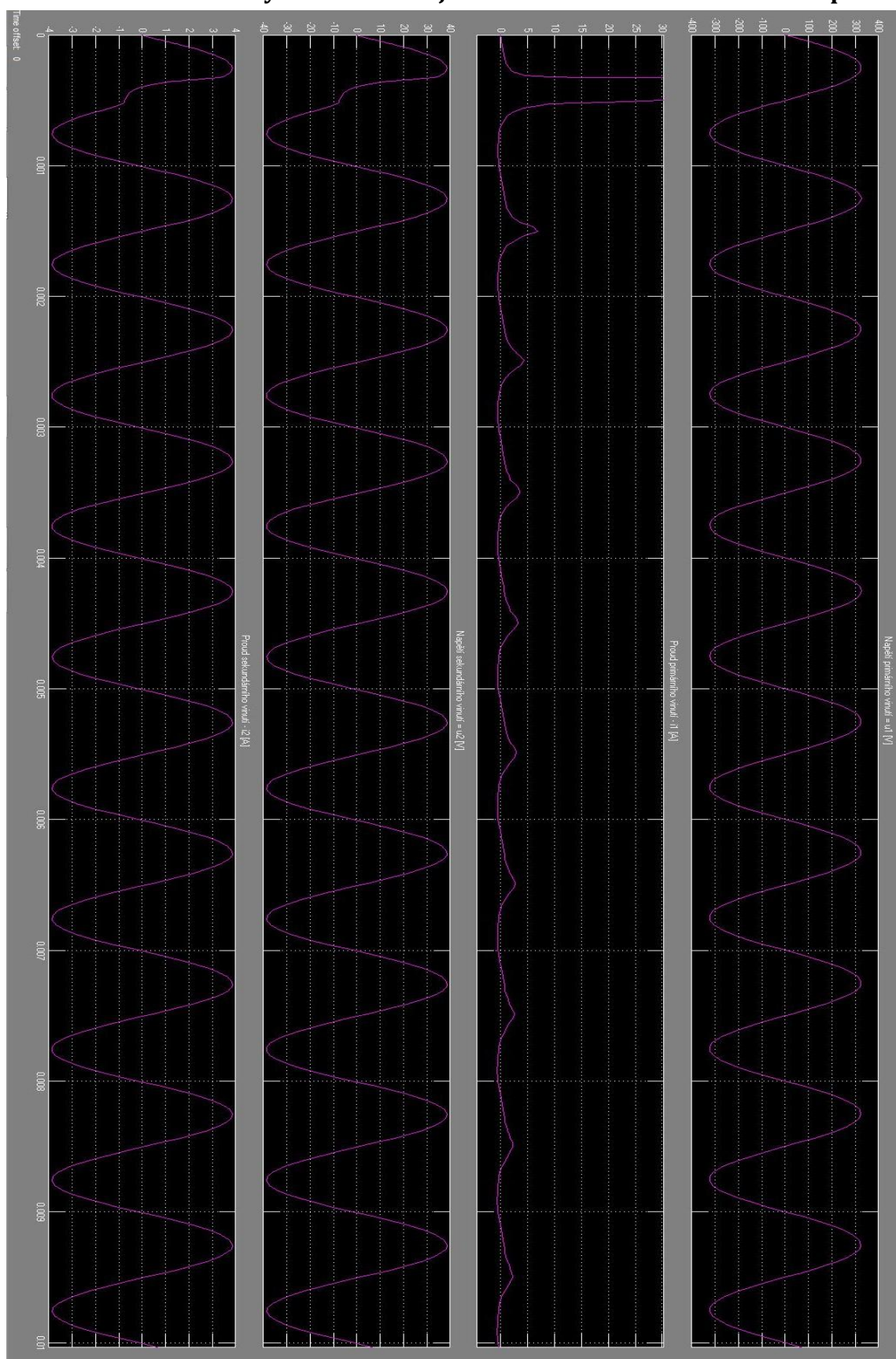
Příloha 10 Průběhy lineárního jednofázového transformátoru napětí



Příloha 11 Průběhy lineárního jednofázového transformátoru proudu



Příloha 12 Průběhy nelineárního jednofázového transformátoru napětí



Příloha 13 Návod pro obsluhu lineárních modelů transformátoru

Návod k obsluze lineárních modelů transformátoru

Pro úspěšné provedení simulace lineárního modelů transformátorů je zapotřebí dodržet několik následujících kroků. Každý krok je v případě potřeby rozdělen na 2 části pro model transformátoru napětí a pro model transformátoru proudu.

1) Definice parametrů pro simulaci

- načíst parametry transformátoru do *Workspace* prostředí programu Matlab spuštěním konkrétního mfile souboru
- všechny parametry v kódu mají poznámku a defaultní hodnotu, kterou je možno v případě potřeby předefinovat dle požadavků uživatele
- a) **Model transformátoru napětí** - parametry jsou v souboru *MfileGammaClanek.m*
- b) **Model transformátoru proudu** - parametry jsou v souboru *MfileInvGammaClanke.m*

2) Otevřít simulovaný model

- pro zvolený lineární model transformátoru otevřít schematický model Simulinku
- a) **Model transformátoru napětí** - obvod ze souboru *LinModGamma.slx*
- b) **Model transformátoru proudu** - obvod ze souboru *LinModInvGamma.slx*

3) Orientace ve schematickém obvodu

- ve středu schematického obvodu v souboru Simulinku lze vidět vlastní model transformátoru, kde každý blok nese popis s jeho významem/typem bloku
- v horní části je možno vidět subsystém umožňující třífázovou analýzu signálů a jednofázovou analýzu signálů

4) Volba typu napájecího zdroje

- pro každý z modelů jsou zde 2 možnosti volby napájecí soustavy
- a) **Jednofázová napájecí soustava** - Manual Switch do dolní polohy (blok *u_1*)
 - při volbě této soustavy proběhne simulace se sinusovým napájecím napětím o amplitudě definované do proměnné *u1ve Workspace* prostředí programu Matlab
 - !! při této volbě je nutné mít bloky *Přepínač zapojení primáru*, *Přepínač zapojení sekundáru* a *Přepínač zapojení zátěže* nastavené do polohy *Y*
- b) **Třífázová napájecí soustava** - Manual Switch do horní polohy (bloky 3f soustavy)
 - při volbě této soustavy proběhne simulace s třífázovým sinusovým napájecím napětím o amplitudě definované proměnnou *u_1* se vzájemným v fázovém posunem $+30^\circ$ a -30°
 - pro konkrétní simulaci nastavit požadovanou konfiguraci zapojení primárního a sekundárního zapojení vinutí transformátoru
 - volbu primárního vinutí nastavit pomocí bloku *Přepínač zapojení primáru*
 - volbu sekundárního vinutí nastavit pomocí bloku *Přepínač zapojení sekundáru*
 - pro oba bloky platí že parametr *Y* značí zapojení do hvězdy a *D* zapojení do trojúhelníku

5) Spuštění simulace s vhodnou dobou simulace

- pro parametry obsažené v mfile souborech je tato doba zvolena jako 0.5 s

6) Provést analýzu výstupních signálů

- dle zvoleného typu napájecí soustavy zvolit buď *Subsystém třífázové analýzy* nebo pokračovat do *Subsystém jednofázové analýzy*
- konkrétní analyzující bloky nesou název/popis parametru nebo veličiny kterou sledují

Příloha 14 Návod pro obsluhu nelineárních modelů transformátoru

Návod k obsluze nelineárních modelů transformátoru

Pro úspěšné provedení simulace nelineárního modelů transformátorů je zapotřebí dodržet několik následujících kroků. Každý krok je v případě potřeby rozdělen na 2 části pro model transformátoru napětí a pro model transformátoru proudu.

1) Definice parametrů pro simulaci

- načíst parametry transformátoru a magnetizační charakteristiky do *Workspace* prostředí programu Matlab spuštěním konkrétního mfile souboru
- všechny parametry v kódu mají poznámku a defaultní hodnotu, kterou je možno v případě potřeby předefinovat dle požadavků uživatele
- po naplnění hodnot transformátoru je potřeba spustit mfile ze souboru *MfilePridaniNelinearity.m* pro přidání hodnot nelinearity magnetizační reaktance
- tuto sadu hodnot je nutné přidávat pro konkrétní zapojení simulovaného modelu
- a) **Model transformátoru napětí** - parametry jsou v souboru *MfileGammaClanek.m*
- b) **Model transformátoru proudu** - parametry jsou v souboru *MfileInvGammaClanke.m*

2) Otevřít simulovaný model

- pro zvolený nelineární model transformátoru otevřít schematický model Simulinku
- a) **Model transformátoru napětí** - obvod ze souboru *NelinModGamma.slx*
- b) **Model transformátoru proudu** - obvod ze souboru *NelinModInvGamma.slx*

3) Orientace ve schematickém obvodu

- ve středu schematického obvodu v souboru Simulinku lze vidět vlastní model transformátoru, kde každý blok nese popisek s jeho významem/typem bloku
- v horní části je možno vidět subsystém umožňující třífázovou analýzu signálů a jednofázovou analýzu signálů

4) Volba typu napájecího zdroje

- pro každý z modelů jsou zde 2 možnosti volby napájecí soustavy
- a) **Jednofázová napájecí soustava** - Manual Switch do dolní polohy (blok *u_1*)
 - při volbě této soustavy proběhne simulace se sinusovým napájecím napětím o amplitudě definované do proměnné *u1* ve *Workspace* prostředí programu Matlab
 - !! při této volbě je nutné mít bloky *Přepínač zapojení primáru*, *Přepínač zapojení sekundáru* a *Přepínač zapojení zátěže* nastavené do polohy *Y*
- b) **Třífázová napájecí soustava** - Manual Switch do horní polohy (bloky 3f soustavy)
 - při volbě této soustavy proběhne simulace s třífázovým sinusovým napájecím napětím o amplitudě definované proměnnou *u_1* se vzájemným v fázovém posunem $+30^\circ$ a -30°
 - pro konkrétní simulaci nastavit požadovanou konfiguraci zapojení primárního a sekundárního zapojení vinutí transformátoru a zapojení zátěže
 - volbu primárního vinutí nastavit pomocí bloku *Přepínač zapojení primáru*
 - volbu sekundárního vinutí nastavit pomocí bloku *Přepínač zapojení sekundáru*
 - pro všechny bloky platí že parametr *Y* značí zapojení do hvězdy a *D* do trojúhelníku

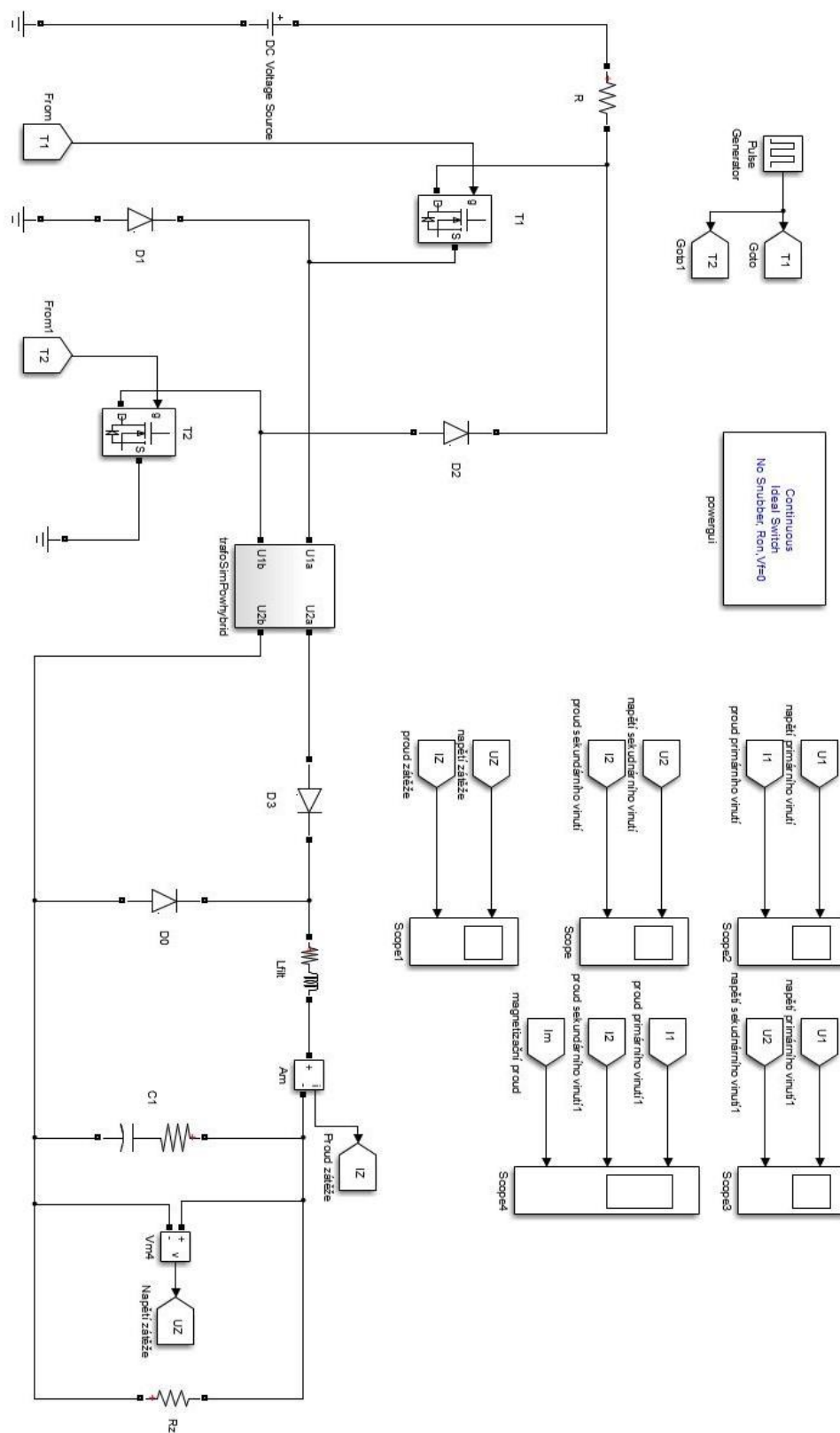
5) Spuštění simulace s vhodnou dobou simulace

- pro parametry obsažené v mfile souborech je tato doba zvolena jako 0.5 s

6) Provést analýzu výstupních signálů

- dle zvoleného typu napájecí soustavy zvolit buď *Subsystém třífázové analýzy* nebo pokračovat do *Subsystém jednofázové analýzy*
- konkrétní analyzující bloky nesou název/popis parametru nebo veličiny kterou sledují

Příloha 15 Jednočinný můstkový měnič - blokové schéma



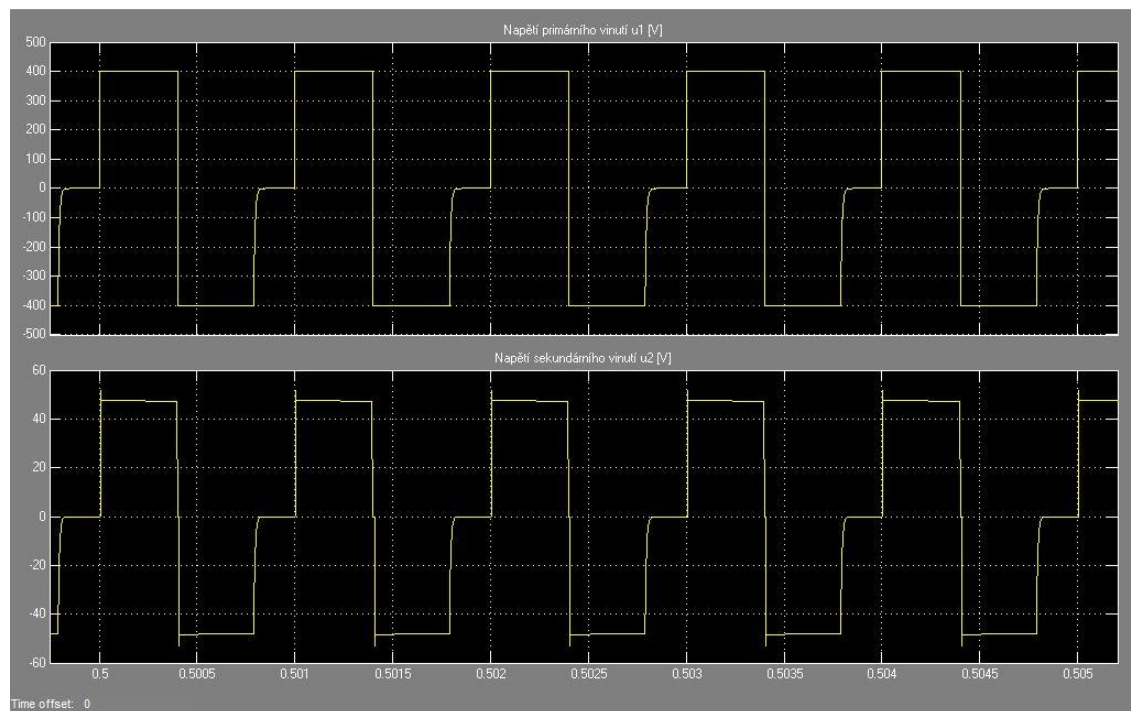
Příloha 16 Parametry modelu jednočinného měniče - mfile

```

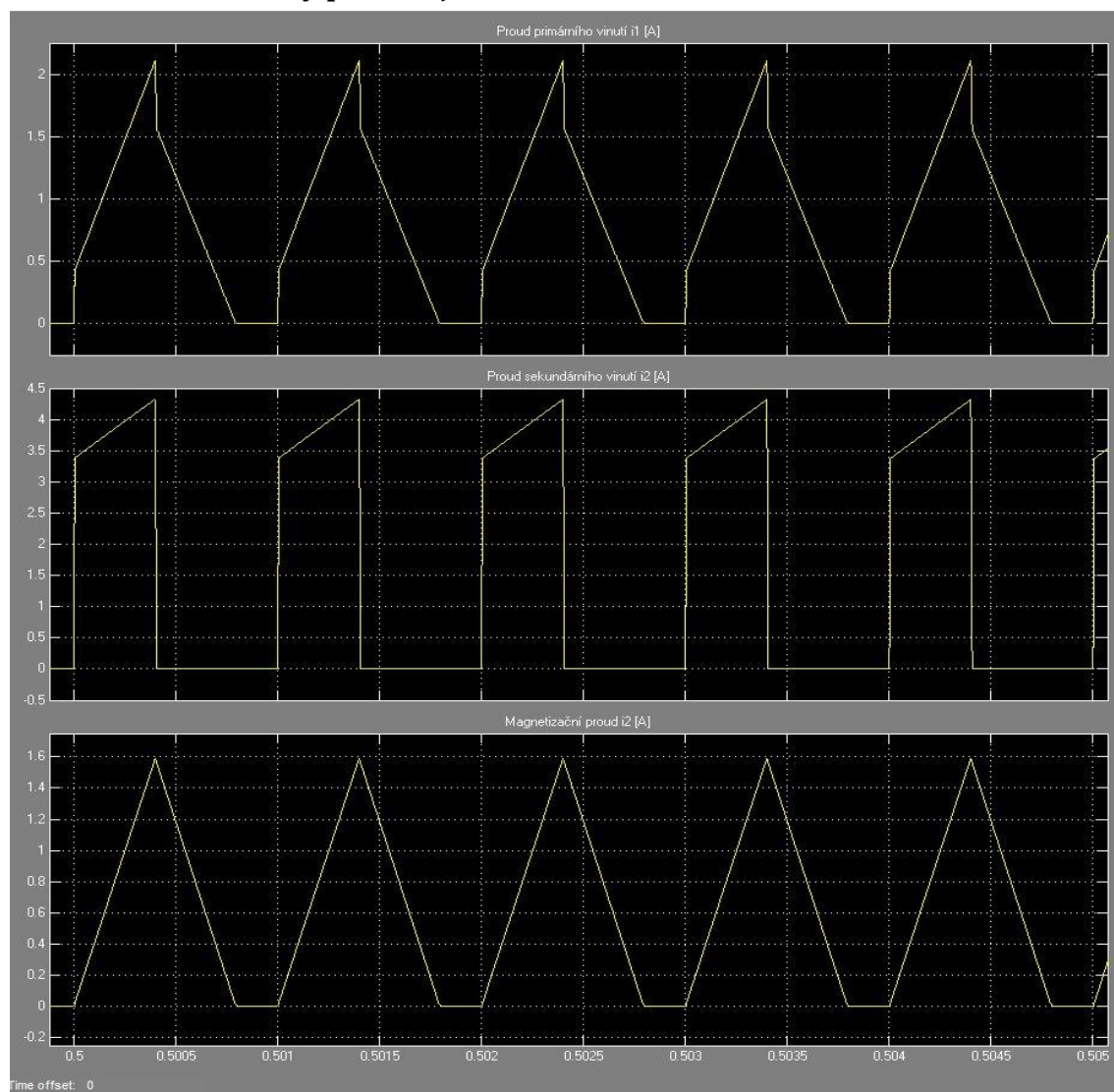
clc
clear all
%% Určené parametry náhradních zapojení
%% Napěťový transformátor
% Gamma článek
L1 = 0.1; % Magnetizační reaktance na straně primárního vinutí
R1 = 2; % Odpor primárního vinutí
Lsigp = 0.005; % Rozptylová indukčnost primárního vinutí
Rz = 5; % Zátěž
Rfe = 15000; % Odpor reprezentující ztráty v železe
Ku210 = 48/400; % Převod transformátoru napětí
U1 = 400; % Napájecí napětí
R2 = R1*(Ku210*Ku210); % Odpor sekundárního vinutí
Lsig = Lsigp*(Ku210*Ku210); % Rozptylová indukčnost sekundárního vinutí
f = 1000; % Frekvence
Lfilt = 48/1/f/4; % Velikost filtrační indukce
Rfilt = 0.1; % Velikost filtračního odporu
ffilt = 50; % Filtrovací frekvence
Cfilt = 1/2/pi/sqrt(ffilt*Lfilt); % Velikost filtrační kapacity

```

Příloha 17 Průběhy napětí jednočinného měniče



Příloha 18 Průběhy proudu jednočinného měniče



Příloha 19 Detail průběhu napětí jednočinného měniče

