



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

MĚŘENÍ A MODELOVÁNÍ SLOŽKOVÝCH IMPEDANCÍ TRANSFORMÁTORŮ

MEASUREMENT AND MODELLING OF SYMMETRICAL IMPEDANCES OF TRANSFORMERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Dvořák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Václav Vyčítal, Ph.D.

BRNO 2025



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Petr Dvořák

ID: 247660

Ročník: 3

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

Měření a modelování složkových impedancí transformátorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznámení se s teorií souměrných složek a jejich měřením
2. Měření složkových impedancí transformátorů.
3. Stanovení složkových impedancí transformátorů pomocí výpočetních programů (např. Ansys Maxwell aj.)
4. Srovnání výsledků z měření a modelování, vyhodnocení

DOPORUČENÁ LITERATURA:

doporučená literatura podle pokynů vedoucího závěrečné práce

Termín zadání: 10.2.2025

Termín odevzdání: 28.5.2025

Vedoucí práce: Ing. Václav Vyčítal, Ph.D.

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

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

Tato práce se zabývá měřením a následnou dokumentací složkových impedancí transformátorů při různých typech zapojení vinutí. Součástí práce je také diskuze způsobů numerického modelování v programu Ansys electronic a jeho nástaveb. Výsledkem je porovnání změřených a numericky modelovaných výsledků, na jejichž základě je posouzeno, zda lze použité programy aplikovat při stanovení složkových impedancí, či nikoliv.

Klíčová slova

Metoda souměrných složek, sousledná složka, zpětná složka, netočivá složka, impedance, transformátor, model, Ansys.

Abstract

This thesis focuses on the measurement and subsequent documentation of the sequence impedances of transformers with various winding connection types. The work also includes an analysis of a suitable method for numerical modeling using Ansys Electronics and its add-on tools. The outcome is a comparison of the measured and numerically modeled results, based on which it is assessed whether these programs can be effectively applied for determining sequence impedances.

Keywords

Symmetrical components method, positive sequence, negative sequence, zero sequence impedance, transformer, model, Ansys.

Bibliografická citace

DVOŘÁK, Petr. *Měření a modelování složkových impedancí transformátorů*. Online, bakalářská práce. Václav VYČÍTAL (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2025. Dostupné z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/168118_ [cit. 2025-05-27].

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Petr Dvořák*

VUT ID studenta: *247660*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2024/25*

Téma závěrečné práce: *Měření a modelování složkových impedancí transformátorů*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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:

podpis autora

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Václavu Vyčítalovi, Ph.D. za odbornou pomoc, trpělivost a cenné rady, které mi byly poskytnuty při tvorbě této práce.

V Brně dne:

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	11
ÚVOD	14
1. TEORIE SOUMĚRNÝCH SLOŽEK.....	15
1.1 SOUMĚRNÉ SLOŽKY	15
1.2 PORUCHY A NESYMETRIE V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ	17
1.2.1 Dělení poruch.....	17
1.2.2 Nesymetrie v soustavách	18
1.3 SCHÉMATA A PRŮBĚHY PORUCH.....	19
1.3.1 Třífázová kovová porucha.....	19
1.3.2 Dvoufázová kovová porucha.....	21
1.3.3 Dvoufázová zemní kovová porucha.....	22
1.3.4 Jednofázová kovová porucha	24
1.4 TRANSFORMÁTORY	26
1.4.1 Konstrukce transformátoru	26
1.4.2 Rozdělení.....	26
1.4.3 Zapojení transformátorů.....	26
1.4.4 Měření na transformátorech	27
2. MĚŘENÍ SLOŽKOVÝCH IMPEDANCÍ TRANSFORMÁTORŮ.....	29
2.1 MĚŘENÍ NA DVOJVINUŤOVÝCH TRANSFORMÁTORECH.....	29
2.1.1 Měření sousledné složky transformátoru v zapojení Dyn1.....	29
2.1.2 Měření netočivé složky transformátoru v zapojení Dyn1	32
2.1.3 Měření sousledné složky transformátoru v zapojení Dy1	33
2.1.4 Měření sousledné složky transformátoru v zapojení YNd11	36
2.1.5 Měření netočivé složky transformátoru v zapojení YNd11.....	37
2.1.6 Měření sousledné složky transformátoru v zapojení YNyn0.....	38
2.1.7 Měření netočivé složky transformátoru v zapojení YNyn0.....	42
2.1.8 Porovnání jednotlivých složek transformátorů	46
2.2 MĚŘENÍ NA TROJVINUŤOVÉM TRANSFORMÁTORU	47
2.2.1 Měření sousledné složky transformátoru v zapojení YNynd.....	47
2.2.2 Měření netočivé složky transformátoru v zapojení YNynd.....	51
3. NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ TRANSFORMÁTORU	53
3.1 URČENÍ PARAMETRŮ TRANSFORMÁTORU	53
3.2 TVORBA MODELU V PROGRAMU PEMAG	53
3.3 TVORBA MODELU V PROGRAMU ANSYS ELECTRONICS 2024.....	57
3.3.1 Simulace zkoušky nakrátko	58
3.3.2 Simulace zkoušky naprázdno	60
3.3.3 Simulace měření netočivé složky.....	61
4. SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ Z MĚŘENÍ A MODELOVÁNÍ	63
4.1 SROVNÁNÍ VÝSLEDKU	63
4.1.1 Srovnání výsledků Dyn1.....	63

4.1.2	<i>Srovnání výsledků Y_{Nyn0}</i>	64
4.1.3	<i>Celkové zhodnocení</i>	65
5.	VALIDACE METODIKY NUMERICKÉHO MODELOVÁNÍ	67
5.1	SIMULACE VÁLCE	67
5.1.1	<i>Analytický výpočet</i>	67
5.1.2	<i>Simulace válce programem Ansys electronic</i>	70
5.1.3	<i>Srovnání výsledků</i>	73
5.2	SIMULACE SE SÉRIOVĚ ŘAZENÝM ODPorem K VINUTÍM	75
5.2.1	<i>Zkouška nakrátko</i>	75
5.2.2	<i>Zkouška naprázdno</i>	76
5.2.3	<i>Zkoušky pro netočivé složky</i>	77
5.2.4	<i>Srovnání výsledků</i>	79
5.3	SIMULACE SE SYMETRICKÝMI ZDROJI.....	81
5.3.1	<i>Zkouška nakrátko s použitím symetrických zdrojů</i>	81
5.3.2	<i>Zkouška naprázdno s použitím symetrických zdrojů</i>	82
5.3.3	<i>Vyhodnocení zkoušek s použitím symetrických zdrojů</i>	82
5.4	OVĚŘENÍ POSTUPU MODELOVÁNÍ	83
5.4.1	<i>Parametry modelu</i>	83
5.4.2	<i>Analytická metoda výpočtu magnetického obvodu</i>	83
5.4.3	<i>Model cívky v programu Femm</i>	85
5.4.4	<i>Model cívky v programu Ansys electronic</i>	86
5.4.5	<i>Model cívky v programu Ansys electronic v modulu External circuits</i>	87
5.4.6	<i>Zhodnocení</i>	90
6.	ZÁVĚR	92
	SEZNAM PŘÍLOH	100

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1 Rozklad na souměrné složky převzato z [1]	15
1.2 Druhy zkratů převzato z [4]	18
1.3 Třífázový kovová porucha převzato z [7]	20
1.4 Ekvivalentní schéma třífázové kovové poruchy převzato z [7]	20
1.5 Dvoufázová kovová porucha převzato z [7]	21
1.6 Ekvivalentní schéma dvoufázové kovové poruchy převzato z [7]	22
1.7 Dvoufázová zemní kovová porucha převzato z [7]	23
1.8 Ekvivalentní schéma dvoufázové zemní kovové poruchy převzato z [7]	23
1.9 Jednofázový kovová porucha převzato z [7]	24
1.10 Ekvivalentní schéma jednofázové kovové poruchy převzato z [7]	25
1.11 Parametry náhradního schématu zkoušky nakrátko převzato z [10]	27
1.12 Schéma zkoušky nakrátko převzato z [10]	27
1.13 Parametry náhradního schématu zkoušky naprázdno převzato z [10]	28
1.14 Schéma zkoušky naprázdno převzato z [10]	28
2.1 Schéma zapojení zkoušky nakrátko pro Dyn1	29
2.2 Schéma zapojení zkoušky naprázdno pro Dyn1	31
2.3 Schéma zkoušky naprázdno pro Dyn1 s rozpojením sekundární strany	32
2.4 Schéma zapojení pro měření netočivé složky pro Dyn1 [11]	33
2.5 Schéma zapojení zkoušky nakrátko pro Dy1	34
2.6 Schéma zapojení zkoušky naprázdno pro Dy1	35
2.7 Schéma zapojení zkoušky naprázdno pro Dy1 s rozpojením sekundární strany	35
2.8 Schéma zapojení zkoušky nakrátko pro YNd11	36
2.9 Schéma zapojení zkoušky naprázdno pro YNd11	37
2.10 Schéma zapojení pro měření netočivé složky pro YNd11	38
2.11 Schéma zapojení zkoušky nakrátko pro YNyn0	38
2.12 Schéma zapojení zkoušky naprázdno pro YNyn0	39
2.13 Schéma dílčích impedancí náhradního obvodu transformátoru primární, sekundární vinutí a magnetizační větev [11]	40
2.14 Impedance jednotlivých vinutí a magnetizační větev [11]	43
2.15 Schéma č.1 zapojení pro měření impedance Z_{013} [11]	43
2.16 Schéma č.2 zapojení pro měření impedance Z_{012} [11]	43
2.17 Schéma č.3 zapojení pro měření impedance Z_{023} [11]	44
2.18 Schéma č.4 zapojení pro měření impedance	44
2.19 Schéma zapojení měření nakrátko pro impedanci Z_{12}	48
2.20 Schéma zapojení měření nakrátko pro impedanci Z_{13}	48
2.21 Schéma zapojení měření nakrátko pro impedanci Z_{23}	49
2.22 Schéma zapojení měření naprázdno pro zapojení YNynd	50
2.23 Schéma zapojení měření impedance Z_{012}	51
2.24 Schéma zapojení měření impedance Z_{013}	51
2.25 Schéma zapojení měření impedance Z_{023}	52
3.1 Rozhraní programu PeMag	54
3.2 Železné jádro s kostrou vinutí v programu PeMag	54
3.3 Model v programu PeMag s vinutím transformátoru	55
3.4 Detail modelu transformátoru	56
3.5 Transformátor se sériovým číslem 55056	57
3.6 Zjednodušený model transformátoru	58

3.7	Schéma zapojení nakrátko v modulu External circuits.....	58
3.8	Výsledky simulace v zapojení Dyn1 nakrátko	59
3.9	Schéma zapojení naprázdno v modulu External circuits	61
3.10	Schéma zapojení pro měření netočivé složky v modulu External circuits	62
4.1	Graf průměrných relativních chyb jednotlivých veličin pro zapojení Dyn1	65
4.2	Graf průměrných relativních chyb jednotlivých veličin pro zapojení YNyn0	66
5.1	Rozměry vzduchové válcové tlumivky	67
5.2	Model válce představující vinutí	70
5.3	Schéma zapojené pro simulaci válce	71
5.4	Zkouška nakrátko s předřadným odporem	75
5.5	Zkouška naprázdno s předřadným odporem.....	76
5.6	Schéma zapojení pro netočivou složku Měření 1	78
5.7	Schéma zapojení pro netočivou složku Měření 2	78
5.8	Schéma zapojení pro netočivou složku Měření 3	78
5.9	Grafické porovnání výsledků jednotlivých metod.....	80
5.10	Rozměry železného jádra	83
5.11	Model cívky v programu Femm	86
5.12	Model cívky v programu Ansys electronic.....	87
5.13	Schéma zapojení s použitím proudového zdroje	88
5.14	Schéma zapojení s použitím proudového zdroje	89
5.15	Graf průměrných relativních chyb jednotlivých metod.....	90

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Výsledky zkoušky nakrátko pro zapojení Dyn1	30
Tabulka 2: Parametry převedené na stranu nižšího napětí pro Dyn1	30
Tabulka 3: Výsledky zkoušky naprázdno pro zapojení Dyn1	31
Tabulka 4: Výsledky zkoušky naprázdno pro Dyn1 s rozpojenou sekundární stranou.....	32
Tabulka 5: Výsledky měření netočivé složky v zapojení Dyn1	33
Tabulka 6: Výsledky zkoušky nakrátko pro zapojení Dy1	34
Tabulka 7: Parametry převedené na stranu nižšího napětí pro Dy1	34
Tabulka 8: Výsledky zkoušky naprázdno pro zapojení Dy1	35
Tabulka 9: Výsledky zkoušky naprázdno pro Dy1 s rozpojenou sekundární stranou.....	36
Tabulka 10: Výsledky zkoušky nakrátko pro zapojení YNd11	36
Tabulka 11: Parametry převedené na stranu nižšího napětí pro YNd11	37
Tabulka 12: Výsledky zkoušky naprázdno pro zapojení YNd11	37
Tabulka 13: Výsledky měření netočivé složky v zapojení YNd11	38
Tabulka 14: Výsledky zkoušky nakrátko pro zapojení YNyn0	39
Tabulka 15: Parametry převedené na stranu nižšího napětí pro YNyn0	39
Tabulka 16: Výsledky zkoušky naprázdno pro zapojení YNyn0.....	39
Tabulka 17: Výsledky měření nakrátko ze sekundárního vinutí.....	40
Tabulka 18: Výsledky měření naprázdno z primárního vinutí.....	40
Tabulka 19: Hodnoty impedancí transformátoru stanovené měřením	41
Tabulka 20: Hodnoty impedancí vypočtené odvozením pro kořen X_1	41
Tabulka 21: Hodnoty impedancí vypočtené odvozením pro kořen X_2	41
Tabulka 22: Porovnání výsledků zkoušky nakrátko	42
Tabulka 23: Porovnání výsledků zkoušky naprázdno.....	42
Tabulka 24: Měření netočivé složky pro zapojení YNyn0	44
Tabulka 25: Vypočtené veličiny převedené na stranu sekundárního napětí	45
Tabulka 26: Vypočtené hodnoty netočivých složek impedancí pro zapojení YNyn0	45
Tabulka 27: Hodnoty impedancí z měření	46
Tabulka 28: Hodnoty impedancí vypočtené odvozením pro kořen $X_{(0)1}$	46
Tabulka 29: Hodnoty impedancí vypočtené odvozením pro kořen $X_{(0)2}$	46
Tabulka 30: Porovnání výsledků netočivých složek ve vinutí.....	46
Tabulka 31: Srovnání sousledných složek různých zapojení.....	47
Tabulka 32: srovnání netočivých složek různých zapojení.....	47
Tabulka 33: Změřené a vypočtené veličiny pro měření Z_{12}	49
Tabulka 34: Změřené a vypočtené veličiny pro měření Z_{13}	49
Tabulka 35: Změřené a vypočtené veličiny pro měření Z_{23}	49
Tabulka 36: Vypočtené impedance jednotlivých vinutí.....	50
Tabulka 37: Změřené a vypočtené hodnoty pro zapojení YNynd.....	51
Tabulka 38: Měření netočivé složky trojvinutového transformátoru	52
Tabulka 39: Výsledné impedance netočivé složky	52
Tabulka 40: Simulované proudy nakrátko pro zapojení Dyn1	59
Tabulka 41: Simulované napětí nakrátko pro zapojení Dyn1	59
Tabulka 42: Simulace zkoušky nakrátko Dyn1	60
Tabulka 43: Simulované proudy naprázdno pro zapojení Dyn1	61
Tabulka 44: Simulované napětí naprázdno pro zapojení Dyn1	61
Tabulka 45: Simulace zkoušky naprázdno Dyn1	61
Tabulka 46: Simulované proudy nakrátko pro netočivou složku v zapojení Dyn1.....	62

Tabulka 47: Simulované napětí nakrátko pro netočivou složku v zapojení Dyn1	62
Tabulka 48: Simulace netočivé složky	62
Tabulka 49: Relativní chyba výsledků naprázdno pro Dyn1	63
Tabulka 50: Relativní chyba výsledků nakrátko pro Dyn1	63
Tabulka 51: Relativní chyba výsledků pro netočivou složku Dyn1	64
Tabulka 52: Průměrná relativní chyba veličin v zapojení Dyn1	64
Tabulka 53: Relativní chyba výsledků naprázdno pro YNyn0	64
Tabulka 54: Relativní chyba výsledků nakrátko pro YNyn0	64
Tabulka 55: Relativní chyba výsledků pro netočivou složku YNyn0	65
Tabulka 56: Průměrná relativní chyba veličin v zapojení YNyn0	65
Tabulka 57: Výsledky analytického výpočtu dle A – odpor s průřezem válce	68
Tabulka 58: Výsledky analytického výpočtu indukčnosti a reaktance	69
Tabulka 59: Výsledky analytického výpočtu dle B – odpor s průřezem vodiče	69
Tabulka 60: Výsledky analytického výpočtu dle C – odpor se součinitelem délky kroucení	70
Tabulka 61: Výsledky proudů s uvažovaným průřezem válce	71
Tabulka 62: Výsledky napětí s uvažovaným průřezem válce	71
Tabulka 63: Účinitky pro simulace s uvažovaným průřezem válce	71
Tabulka 64: Výsledky simulace s uvažovaným průřezem válce	72
Tabulka 65: Výsledky proudů s uvažováním průřezu vodiče	72
Tabulka 66: Výsledky napětí s uvažováním průřezu vodiče	72
Tabulka 67: Účinitky pro simulace s uvažováním průřezu vodiče	73
Tabulka 68: Výsledky simulace s uvažováním průřezu vodiče	73
Tabulka 69: Výsledky rozdílů jednotlivých metod pro 310 závitů	73
Tabulka 70: Srovnání rozdílů hodnot s průřezem válce	74
Tabulka 71: Srovnání rozdílů hodnot s průřezem vodiče	74
Tabulka 72: Srovnání rozdílů hodnot s průřezem vodiče s uvažováním prodloužení	74
Tabulka 73: Simulované proudy nakrátko s předřazeným odporem	75
Tabulka 74: Simulované napětí nakrátko s předřazeným odporem	76
Tabulka 75: Výsledky simulace zkoušky nakrátko s předřazeným odporem	76
Tabulka 76: Převedené veličiny zkoušky nakrátko s předřazeným odporem	76
Tabulka 77: Simulované proudy naprázdno s předřazeným odporem	77
Tabulka 78: Simulované napětí naprázdno s předřazeným odporem	77
Tabulka 79: Simulace zkoušky naprázdno s předřazeným odporem	77
Tabulka 80: Simulované proudy netočivých složek s předřazeným odporem	79
Tabulka 81: Simulované napětí netočivých složek s předřazeným odporem	79
Tabulka 82: Výsledky simulací netočivých složek s předřazeným odporem	79
Tabulka 83: Relativní chyba výsledků naprázdno s předřazeným odporem	79
Tabulka 84: Relativní chyba výsledků nakrátko s předřazeným odporem	80
Tabulka 85: Relativní chyba výsledků pro netočivou složku s předřazeným odporem	80
Tabulka 86: Průměrná relativní chyba veličin s předřazeným odporem	80
Tabulka 87: Simulované proudy nakrátko pro zapojení Dyn1 se symetrickými zdroji	81
Tabulka 88: Simulované napětí nakrátko pro zapojení Dyn1 se symetrickými zdroji	81
Tabulka 89: Simulace zkoušky nakrátko Dyn1 se symetrickými zdroji	81
Tabulka 90: Simulované proudy naprázdno pro zapojení Dyn1 se symetrickými zdroji	82
Tabulka 91: Simulované napětí naprázdno pro zapojení Dyn1 se symetrickými zdroji	82
Tabulka 92: Simulace zkoušky naprázdno Dyn1 se symetrickými zdroji	82
Tabulka 93: Výsledné hodnoty analytické metody	85
Tabulka 94: Výsledné hodnoty programu Femm	86

Tabulka 95: Výsledné hodnoty programu Ansys electronic	87
Tabulka 96: Výsledky analýzy s použitím proudového zdroje	88
Tabulka 97: Výsledné hodnoty analýzy s použitím proudového zdroje	88
Tabulka 98: Výsledky analýzy s použitím napěťového zdroje	89
Tabulka 99: Výsledné hodnoty analýzy s použitím napěťového zdroje	89
Tabulka 100: Výsledky jednotlivých analýz.....	90
Tabulka 101: Relativní chyby analýz.....	90

ÚVOD

Při řešení nesouměrných zkratů v třífázové soustavě lze užít různých metod řešení. K nejčastěji užívaným pak patří metoda souměrných složek. Autorem této metody byl C. L. Fortescue a publikoval ji v roce 1918. Tato metoda byla přelomová, protože měla širokou aplikovatelnost v praxi při řešení nesymetrických zkratů. Umožňuje rozložit nesymetrický děj na několik souměrných dějů, které lze poté opět složit díky zákonu superpozice na celkový děj nesouměrný [1]. Metoda souměrných složek nachází uplatnění například při výpočtu asymetrických poruch v elektrické soustavě.

Jedním z úskalí této metody je nezbytnost znát velikosti impedancí prvků v obvodu v různých složkových soustavách. Stanovení těchto impedancí je obvykle prováděno měřeními. Nicméně s rozvojem počítačové techniky a výpočtových nástrojů se nabízí použití způsobu stanovení těchto impedancí odlišným způsobem a to např. numericky. Jedním z nástrojů, založeným na numerických metodách řešení je například program Ansys, který umožňuje simulaci elektromagnetických jevů a elektrických obvodů pomocí metody konečných prvků. Díky tomu je možné numericky modelovat chování jednotlivých komponent při různých stavech a získat potřebné informace bez nutnosti fyzického modelování.

Cílem této práce je řádně zdokumentovat složkové impedance na různých způsobech zapojení transformátorů, a prověřit, zda lze díky nástroji Ansys Maxwell numericky stanovit výpočty složkových impedancí, nebo zda nelze dosáhnout výsledků numerickým modelováním.

1. TEORIE SOUMĚRNÝCH SLOŽEK

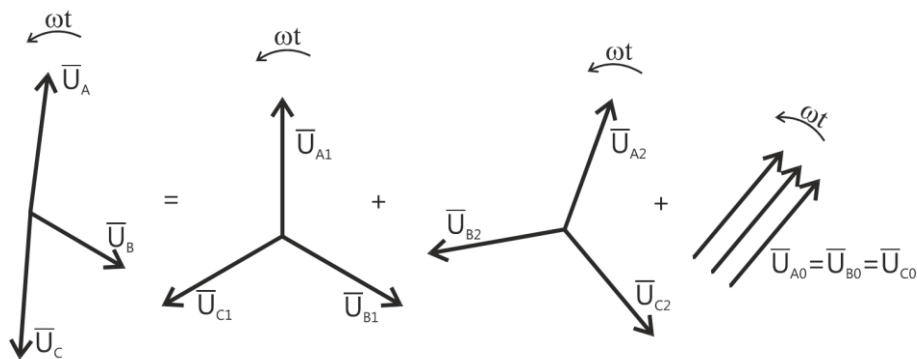
1.1 Souměrné složky

V elektrizační soustavě se vyskytují elektrické zdroje, spotřebiče, ale i samotné prvky sítě. Tyto prvky nejsou mnohdy ideální, a proto zde dochází k nesymetrickým dějům a nevyváženosti soustavy. Příčiny můžeme nalézt v nesymetrii napájecího napětí, nesymetrii zatížení (zapojení jednofázových spotřebičů v třífázové soustavě), nebo může být způsobená nesymetrií elektrických parametrů sítě. Metoda si zakládá na rozkladu nesouměrného děje, ten lze rozložit na více souměrných a díky tomu se tento výpočet zjednoduší. Je nutné podotknout, že tato zjednodušení, lze provést jen za předpokladu, kdy je uvažován pouze jeden zdroj nesymetrie.

Principem metody souměrných složek je, že jakýkoliv nesymetrický děj lze rozložit do tří souměrných složek [2]:

- Sousedná složka – tvořena třemi fázory o stejné velikosti, které jsou pootočený o 120° , má souhlasný sled fází jako nevyvážená soustava, je značena indexem 1,
- Zpětná složka – tvoří jí tři fázory o stejné velikosti a stejném úhlu natočení, který je 120° , má opačný sled fází a je značena indexem 2,
- Netočivá složka – tvořena třemi fázory o stejné velikosti, úhel natočení mezi jednotlivými fázory je 0° a značí se indexem 0.

Z Obr. 1.1 lze vidět, jak dochází k rozkladu nesymetrického děje na symetrické složky:



Obrázek 1.1 Rozklad na souměrné složky převzato z [1]

Součtem jednotlivých vektorů symetrických složek \bar{U}_{A1} , \bar{U}_{A2} a \bar{U}_{A0} , lze získat původní nesymetrický vektor \bar{U}_A . Následující rovnice obsažené v této kapitole pochází z literatury [1]:

$$\bar{U}_A = \bar{U}_{A1} + \bar{U}_{A2} + \bar{U}_{A0}, \quad (1.1)$$

$$\bar{U}_B = \bar{U}_{B1} + \bar{U}_{B2} + \bar{U}_{B0}, \quad (1.2)$$

$$\bar{U}_C = \bar{U}_{C1} + \bar{U}_{C2} + \bar{U}_{C0}. \quad (1.3)$$

Zvolením referenční fáze A se rovnice (1.1) -(1.3), přepíše na rovnice pro fázové napětí:

$$\bar{U}_A = \bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_0, \quad (1.4)$$

$$\bar{U}_B = \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_1 + \bar{a} \cdot \bar{U}_2 + \bar{U}_0, \quad (1.5)$$

$$\bar{U}_C = \bar{a} \cdot \bar{U}_1 + \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_2 + \bar{U}_0. \quad (1.6)$$

Operátor \bar{a} představuje úhel natočení daného vektoru:

$$\bar{a} = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (1.7)$$

Při vyjádření je také užita druhá mocnina operátoru \bar{a} :

$$\bar{a}^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (1.8)$$

Pomocí rovnic (1.4), (1.5) a (1.6), lze sestavit matici, která definuje fázové napětí sítě pomocí složkových napětí:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_0 \end{bmatrix}. \quad (1.9)$$

Z rovnice (1.9) lze odvodit matici z které lze určit jednotlivé souměrné složky

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{bmatrix}. \quad (1.10)$$

Souměrné složky lze také vyjádřit analogicky i pro fázové proudy:

$$\bar{I}_A = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_0, \quad (1.11)$$

$$\bar{I}_B = \bar{a}^2 \cdot \bar{I}_1 + \bar{a} \cdot \bar{I}_2 + \bar{I}_0, \quad (1.12)$$

$$\bar{I}_C = \bar{a} \cdot \bar{I}_1 + \bar{a}^2 \cdot \bar{I}_2 + \bar{I}_0. \quad (1.13)$$

Opět se sestaví matice pomocí rovnic (1.11)- (1.13):

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_A \\ \bar{I}_B \\ \bar{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_0 \end{bmatrix}. \quad (1.14)$$

Odvozením se opět získá tvar pro jednotlivé souměrné proudy:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_A \\ \bar{I}_B \\ \bar{I}_C \end{bmatrix}. \quad (1.15)$$

1.2 Poruchy a nesymetrie v elektrizační soustavě

Pro řešení nesymetrických stavů v síti je důležité tyto stavy správně identifikovat. Následující podkapitoly se zabývají jejich definováním a rozčleněním.

1.2.1 Dělení poruch

Poruchy lze rozdělit mnoha způsoby přičemž nejvýznamnějším typem poruchy v sítích je zkrat. Zkrat je přechodový děj, který nastává při náhodném nebo úmyslném spojení dvou či více bodů v obvodu [1]. Následující rozdělení zkratů je čerpáno ze zdroje [3], [4]:

Na základě přechodového odporu v oblasti poruchy:

- Kovové (dokonalé), je zde zanedbatelná přechodová impedance, vyskytují se zde největší tepelné a dynamické účinky,
- Nekovové (nedokonalé), poruchy jsou tvořeny přes impedanci, která není zanedbatelná, díky tomu je zde pravděpodobnost vzniku elektrického oblouku a následné nebezpečí vzniku požáru.

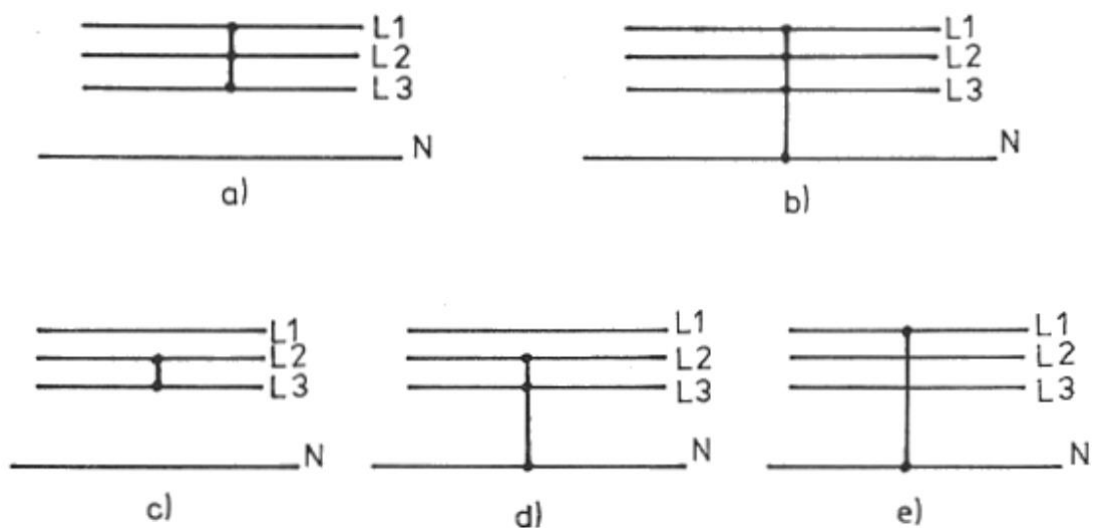
Dle charakteru zatížení třífázového zdroje:

- Souměrné – patří zde třífázový a třífázový zemní zkrat,
- Nesouměrné – patří zde dvoufázový, dvoufázový zemní a jednofázový zkrat.

Dle způsobu spojení jednotlivých poruch:

- Třífázové – spojení tří fází,
- Třífázové zemní – spojení tří fází se zemí,
- Dvoufázové – spojení dvou fází,
- Dvoufázové zemní – spojení dvou fází se zemí,
- Jednofázové – spojení jedné fáze se zemí.

Na následujícím obrázku 1.2 lze vidět jednotlivé schématické zobrazení poruch, které mohou nastat v elektrizační soustavě.



Obrázek 1.2 Druhy zkratů převzato z [4]

Obrázek 1.2 značí: a) třífázový zkrat, b) třífázový zemní zkrat, c) dvoufázový zkrat, d) dvoufázový zemní zkrat, e) jednofázový zkrat.

Poruchy lze také rozlišit dle způsobu, jakým je elektrizační soustava, ve které vznikla porucha provedena. Dle literatury [3] se dělí na:

1. Sítě s izolovaným uzlem transformátoru mají uzel izolovaný od země. Při bezporuchovém stavu mají vodiče sdružené napětí vůči sobě a fázové napětí vůči zemi. Na uzlu transformátoru je nulový potenciál. Tento druh sítě nazýváme nekompensovanou (izolovanou) sítí.
2. Sítě s neúčinně uzemněným uzlem transformátoru. Tyto sítě jsou provozovány pomocí Petersonovi tlumivky či uzemněny přes uzlový odporník. Tlumivka či uzlový odporník je zapojen mezi zem a uzel transformátoru. V případě zemní poruchy v odporově uzemněné síti tento odporník limituje velikost poruchového proudu. Při poruše se zemním spojením v síti s tlumivkou se vykompenzuje kapacitní proud pomocí indukčnosti Petersonovi tlumivky. Užití tlumivky umožňuje síť nadále provozovat i po vzniku poruchy, protože místem zemního spojení protéká jen zbytkový proud. Tento druh sítě nazýváme kompenzovanou sítí.
3. Sítě s přímo uzemněným uzlem transformátoru, kdy uzel transformátoru je zde přímo spojený se zemí. Pokud dojde k spojení fáze se zemí nastává jednofázový zkrat a síť musí být vypnuta.

1.2.2 Nesymetrie v soustavách

Nesymetrie napětí je jakýkoliv stav, ve kterém se třífázové napětí sítě liší v amplitudě nebo se odchyluje od svého normálního fázového posuvu, který je 120° . Tento jev je všeobecně způsoben nerovnoměrným zatížením fází a je přímo závislý na velikosti

impedance napájecí soustavy a velikosti jednofázové zátěže v procentech k jmenovitému výkonu.[6]

Dle výsledků součtu fázorů jednotlivých fází se nesymetrická soustava dělí na [5]:

- Vyváženou – součet fázorů je rovný nule

$$\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C = 0, \quad (1.16)$$

$$I_A + \bar{I}_B + I_C = 0. \quad (1.17)$$

- Nevyváženou – součet fázorů je různý od nuly

$$\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C \neq 0, \quad (1.18)$$

$$I_A + \bar{I}_B + I_C \neq 0. \quad (1.19)$$

V distribučních sítích nízkého napětí jsou hlavními zdroji nesymetrie jednofázové spotřebiče, které jsou připojeny mezi fází a střední vodič, avšak je zde snaha tyto spotřebiče rovnoměrně rozfázovat.

V distribučních sítích vysokého a velmi vysokého napětí jsou jednofázové spotřebiče napojeny mezi fázemi, nebo mezi fází a střední vodič. Takovéto odběry bývají především jednofázové pece a napájecí stanice střídavé trakce.

Zdrojem nesymetrie může být také zpětná složka napětí, která se šíří z nižších hladin napětí do sítě vyšších hladin napětí s velkým útlumem. Při opačném směru, tedy z vyšší úrovně do nižší, útlum závisí na vyrovnávacím účinku přítomných točivých strojů. [6]

Nesymetrie také způsobuje tok zpětné složky proudu trojfázovým indukčním motorem, a to vede k redukci výstupního točivého momentu. Dále však způsobuje nadměrný ohřev točivých strojů a transformátorů, což má za následek snížení jmenovitého výkonu až o 10 % [6].

Větší a nákladnější stroje jsou chráněny ochranami, které jsou v souladu s normou ČSN 333051 [8]. Pokud nesymetrie sítě je dostatečně velká zareaguje ochrana a vypne daný stroj. Stroje mohou krátkodobě pracovat s nesymetrií až 4 %, není to ale žádané, protože se tímto provozem snižuje životnost strojů.

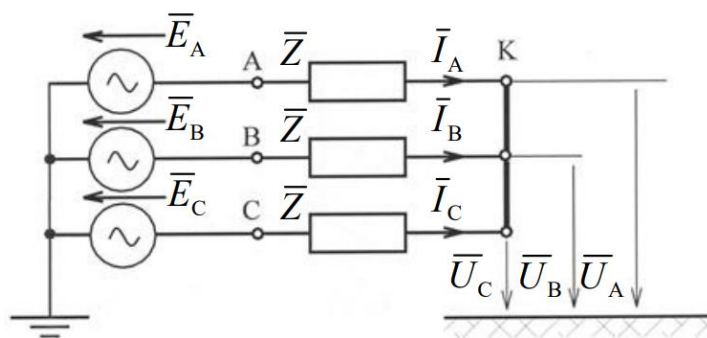
1.3 Schémata a průběhy poruch

K porozumění jednotlivých poruch je třeba znát schéma dané poruchy. Porucha se dá také popsat za pomoci matematických vztahů.

Následující podkapitola čerpá ze zdrojů [1], [7]:

1.3.1 Třífázová kovová porucha

Na obrázku 1.1, lze vidět třífázový zkrat, který má místo poruchy v bodě K.



Obrázek 1.3 Třífázový kovová porucha převzato z [7]

Napětí v bodě K jsou rovna nule a soustava před zkratem je v chodu naprázdno.

$$\bar{U}_A = \bar{U}_B = \bar{U}_C = 0, \quad (1.20)$$

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2 = \bar{U}_0 = 0. \quad (1.21)$$

Z rovnice (1.21) lze vyvodit, vztahy pro proudy nacházející se v poruchovém obvodu:

$$\bar{U}_1 = 0 = \bar{E}_1 - \bar{I}_1 \cdot \bar{Z}_1, \quad (1.22)$$

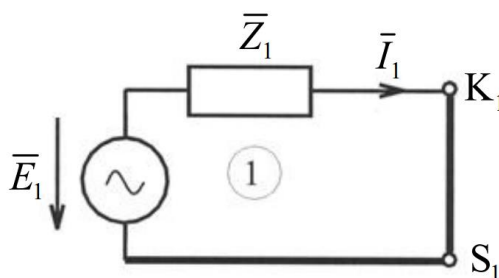
$$\bar{U}_2 = 0 = -\bar{I}_2 \cdot \bar{Z}_2, \quad (1.23)$$

$$\bar{U}_0 = 0 = -\bar{I}_0 \cdot \bar{Z}_0. \quad (1.24)$$

Z rovnic (1.23) a (1.24) plyne, že zpětný a netočivý proud bude nulový, takže platí:

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_0 = 0. \quad (1.25)$$

Obvod lze zjednodušit a překreslit na obrázek 1.4, který nám říká, že při této poruše se v obvodu se nachází pouze sousledná složka:



Obrázek 1.4 Ekvivalentní schéma třífázové kovové poruchy převzato z [7]

Z odvození rovnice (1.22) získáme sousledný proud, který protéká obvodem:

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{E}_1}{\bar{Z}_1}, \quad (1.26)$$

1.3.2 Dvoufázová kovová porucha

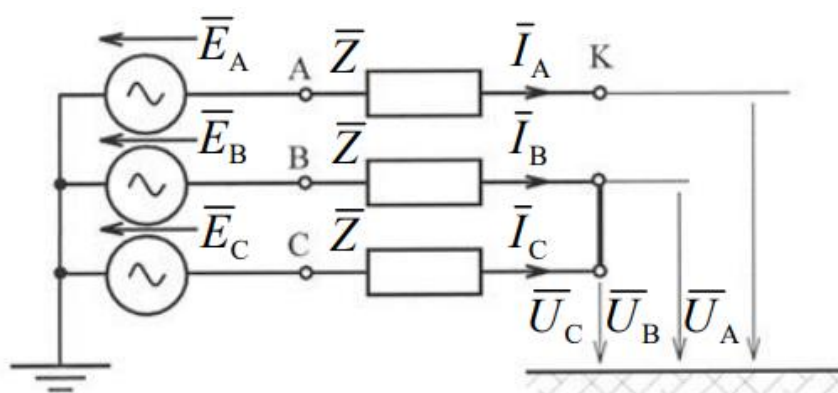
V místě K na obrázku 1.5 došlo ke vzniku dvoufázové poruchy. Soustava na tomto obrázku je napájena symetrickým napětím. Uvažujeme, že soustava před poruchou je v chodu naprázdno. Ze schématického znázornění poruchy nám vyplývají tyto vzorce:

$$\bar{I}_A = 0, \quad (1.27)$$

$$\bar{I}_B = -\bar{I}_C, \quad (1.28)$$

$$\bar{U}_A = \bar{E}_A, \quad (1.29)$$

$$\bar{U}_B = \bar{U}_C. \quad (1.30)$$



Obrázek 1.5 Dvoufázová kovová porucha převzato z [7]

Dosazením vztahů (1.27) a (1.28) do rovnice (1.15) získáme rovnici ze které lze odvodit proudy jednotlivých souměrných složek:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{I}_B \\ -\bar{I}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} j\sqrt{3} \cdot \bar{I}_B \\ -j\sqrt{3} \cdot \bar{I}_B \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (1.31)$$

Z matematického vyjádření tedy plyne že, sousledná složka je rovna záporné hodnotě zpětné složky a nulová složka zde není zastoupena:

$$\bar{I}_1 = -\bar{I}_2, \quad (1.32)$$

$$\bar{I}_0 = 0, \quad (1.33)$$

Při dosazení $\bar{U}_B = \bar{U}_C$ do rovnic (1.5), (1.6), získáme vztah, ze kterého dokážeme zjistit napětí souměrných složek:

$$\bar{a}^2 \cdot \bar{U}_1 + \bar{a} \cdot \bar{U}_2 + \bar{U}_0 = \bar{a} \cdot \bar{U}_1 + \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_2 + \bar{U}_0, \quad (1.34)$$

$$\bar{a}^2 \cdot \bar{U}_1 + \bar{a} \cdot \bar{U}_2 = \bar{a} \cdot \bar{U}_1 + \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_2, \quad (1.35)$$

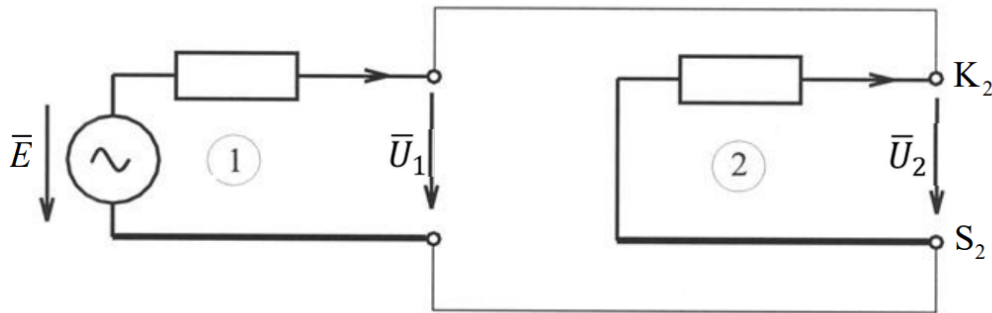
$$\bar{U}_1 \cdot (\bar{a}^2 - \bar{a}) = \bar{U}_2 \cdot (\bar{a}^2 - \bar{a}), \quad (1.36)$$

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2, \quad (1.37)$$

$$\bar{U}_0 = 0. \quad (1.38)$$

Na obrázku 1.6 lze vidět ekvivalentní schéma dvoufázové poruchy, ze kterého je možné zjistit proud \bar{I}_1 :

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2}. \quad (1.39)$$



Obrázek 1.6 Ekvivalentní schéma dvoufázové kovové poruchy převzato z [7]
Pomocí tohoto lze následně odvodit proud \bar{I}_B :

$$\bar{I}_B = \bar{a}^2 \cdot \bar{I}_1 + \bar{a} \cdot \bar{I}_2 + \bar{I}_0, \quad (1.40)$$

$$\bar{I}_B = \bar{I}_1 \cdot (\bar{a}^2 - \bar{a}) = -j\sqrt{3} \cdot \bar{I}_1. \quad (1.41)$$

1.3.3 Dvoufázová zemní kovová porucha

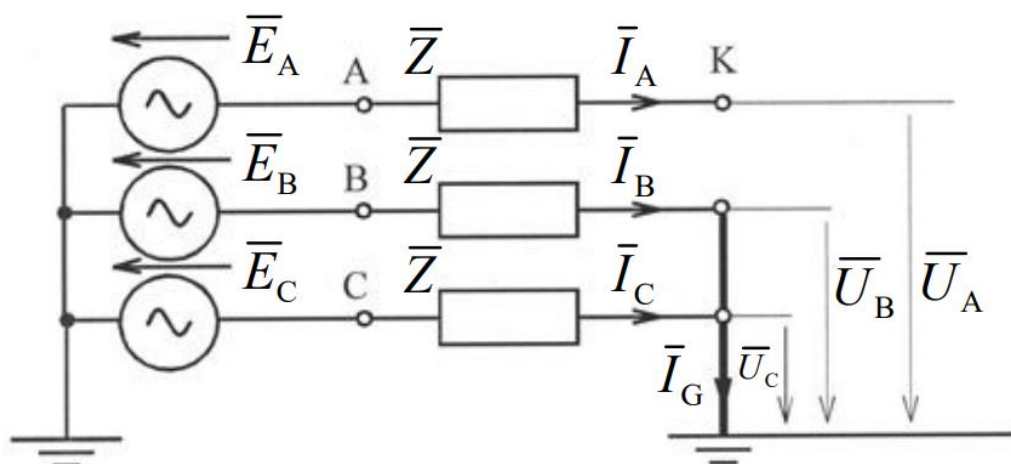
Při tomto schématickém zapojení, které je vyobrazeno na obrázku 1.7, se stanoví předpoklad, že soustava bude před zkratem v chodu naprázdno a bude také platit:

$$\bar{U}_B = \bar{U}_C = 0, \quad (1.42)$$

$$\bar{U}_A = \bar{E}_A, \quad (1.43)$$

$$\bar{I}_G = \bar{I}_B + \bar{I}_C, \quad (1.44)$$

$$\bar{I}_A = 0. \quad (1.45)$$



Obrázek 1.7 Dvoufázová zemní kovová porucha převzato z [7]

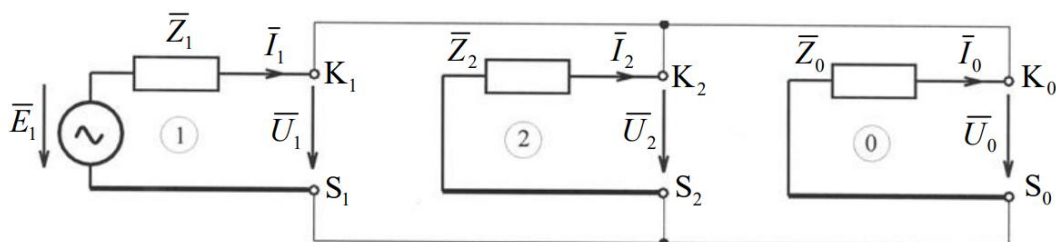
Po dosazení rovnice (1.43) do rovnice (1.10) vznikne vztah ze kterého se získají jednotlivé složky napětí:

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_A \\ \bar{U}_A \end{bmatrix}. \quad (1.46)$$

Z předchozího vzorce je patrné, že všechny složky mají stejnou velikost napětí tedy:

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2 = \bar{U}_0 = \frac{1}{3} \cdot \bar{U}_A. \quad (1.47)$$

Jednotlivé složkové proudy mohou být odvozeny pomocí metody postupného zjednodušování obvodu z obrázku 1.8.



Obrázek 1.8 Ekvivalentní schéma dvoufázové zemní kovové poruchy převzato z [7]
Výsledné proudy budou mít tuto podobu:

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{E}_1}{\bar{Z}_1 + \frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_0}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0}}, \quad (1.48)$$

$$\bar{I}_2 = -\frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} \cdot \bar{I}_1, \quad (1.49)$$

$$\bar{I}_0 = -\frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} \cdot \bar{I}_1, \quad (1.50)$$

Pomocí sousledného proudu \bar{I}_1 lze vyjádřit zbylé proudy v soustavě:

$$\bar{I}_B = \bar{I}_1 \cdot \left(\bar{a}^2 - \frac{\bar{a} \cdot \bar{Z}_0 + \bar{Z}_2}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} \right), \quad (1.51)$$

$$\bar{I}_C = \bar{I}_1 \cdot \left(\bar{a} - \frac{\bar{a} \cdot \bar{Z}_0 + \bar{Z}_2}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} \right), \quad (1.52)$$

$$\bar{I}_G = \bar{I}_B + \bar{I}_C = \bar{I}_1 \cdot \left(\frac{3 \cdot \bar{Z}_2}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} \right). \quad (1.53)$$

1.3.4 Jednofázová kovová porucha

Při zapojení dle obrázku 1.9, se stanoví předpoklad, že soustava bude před poruchou v chodu naprázdno a bude také plazit:

$$\bar{I}_B = \bar{I}_C = 0 \quad (1.54)$$

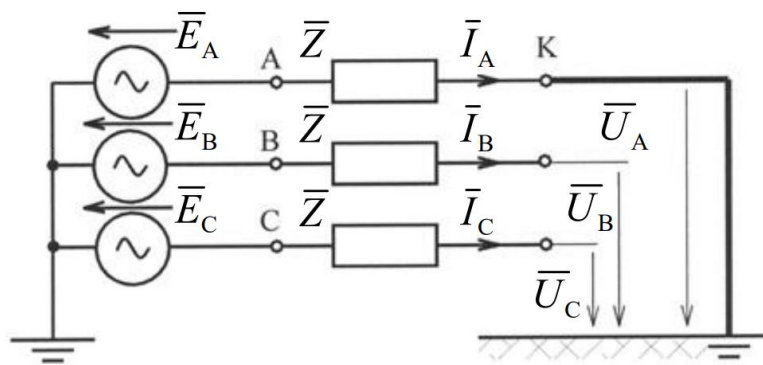
$$\bar{U}_A = 0 \quad (1.55)$$

Pokud dosadíme vzorec (1.54) do rovnice (1.15) vznikne rovnice, ze které lze vyjádřit jednotlivé složkové proudy:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_A \\ \bar{I}_A \\ \bar{I}_A \end{bmatrix}. \quad (1.56)$$

Z rovnice (1.56) plyne, že veškeré složkové proudy mají stejnou velikost:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \bar{I}_0 = \frac{1}{3} \cdot \bar{I}_1. \quad (1.57)$$



Obrázek 1.9 Jednofázový kovová porucha převzato z [7]

Z obrázku 1.9 je možné konstatovat, že:

$$\bar{U}_A = \bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_0 = 0 \quad (1.58)$$

$$\bar{U}_1 = -(\bar{U}_2 + \bar{U}_0) \quad (1.59)$$

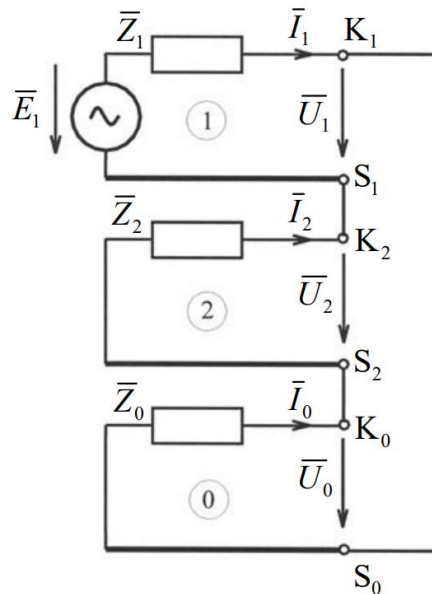
Pomocí následujících vztahů lze odvodit vzorec pro sousledné napětí:

$$\bar{U}_2 = -\bar{Z}_2 \cdot \bar{I}_2 = -\bar{Z}_2 \cdot \bar{I}_1 \quad (1.60)$$

$$\bar{U}_0 = -\bar{Z}_0 \cdot \bar{I}_0 = -\bar{Z}_0 \cdot \bar{I}_1 \quad (1.61)$$

Po dosazení vzniká vztah pro sousledné napětí:

$$\bar{U}_1 = (\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0) \cdot \bar{I}_1 \quad (1.62)$$



Obrázek 1.10 Ekvivalentní schéma jednofázové kovové poruchy převzato z [7]

Z obrázku 1.10 lze odvodit rovnici, pomocí které lze vypočítat složkový proud, protože celé schéma je v sérii a bude tedy platit, že všechny složkové proudy budou mít stejnou velikost:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \bar{I}_0 = \frac{\bar{E}_1}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} \quad (1.63)$$

Fázové proudy budou mít poté následující tvar:

$$\bar{I}_A = 3 \cdot \bar{I}_1 \quad (1.64)$$

$$\bar{I}_B = \bar{I}_C = 0 \quad (1.65)$$

1.4 Transformátory

Nesymetrické děje, které vznikají v elektrizační soustavě ovlivňují veškeré prvky v soustavě. Mezi tyto prvky jsou zahrnuty i transformátory, které zde mají vysoké uplatnění.

Transformátory jsou elektrické netočivé stroje sloužící k přenosu elektrické energie mezi střídavými obvody. Jeho princip spočívá ve využití elektromagnetické indukce. Tento jev nastává při průchodu proudem cívkou, ta vytváří magnetické pole, které svými účinky indukuje elektrické napětí na druhé cívice.

1.4.1 Konstrukce transformátoru

Mezi základní části transformátoru patří:

- Magnetický obvod – nazývaný také jako jádro, jedná se o feritové plechy, které jsou vzájemně od sebe izolovány, aby se snížily vířivé proudy.
- Vinutí – jako materiál se využívá lakovaná měď, z důvodu vzájemného odizolování.
- Chladicí systém – jako medium se u transformátorů s nižším výkonem využívá vzduch. U transformátorů s vyššími výkony se uplatňuje minerální olej.

1.4.2 Rozdělení

Transformátory lze dělit dle:

- Provedení – plášťové, jádrové,
- Převodu – zvyšovací, snižovací, oddělovací,
- Počtu fází – jednofázové, třífázové,
- Chladicího média – olejové, vzduchové,
- Účelu – blokové, vlastní spotřeby, měřicí, spojovací, distribuční, trakční, oddělovací,
- Zapojení – do hvězdy, trojúhelníka, lomené hvězdy.

1.4.3 Zapojení transformátorů

Vinutí transformátorů je připojeno na svorkovnici a jeho zapojení je vždy udáno na štítku transformátoru. Velké písmena značí spojení vinutí na straně vyššího napětí a malá písmena na nižší straně napětí. Na štítku se může také vyskytnout písmeno N, to značí vyvedení středního vodiče. Dále se zde vyskytují čísla, která značí, jaký je zde hodinový úhel. Hodinový úhel nám udává fázový posuv, mezi jednotlivými fázemi, kdy jedna hodina znamená fázový posuv o 30° . Tato podkapitola čerpá informace z literatury [9].

Na štítku transformátoru se zapojení vinutí značí:

- Zapojení do hvězdy Y, nebo y.
- Zapojení do trojúhelníka D, nebo d.
- Zapojení do lomené hvězdy Z, nebo z.

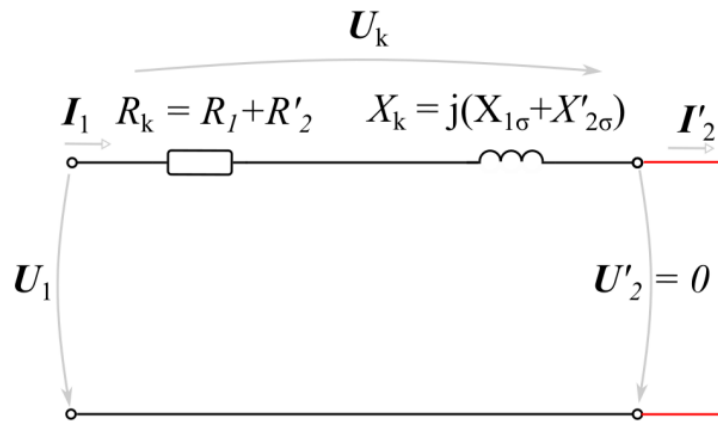
1.4.4 Měření na transformátorech

Abychom získali potřebné informace o transformátoru, které nejsou uvedeny na štítku je třeba jej změřit. Měření, která se na transformátorech provádí jsou měření naprázdno a nakrátko. Podkapitola vychází z informací literatury [10].

1) Nakrátko

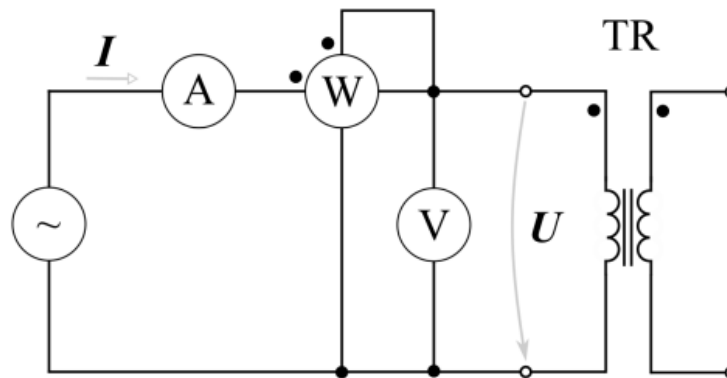
Z praktických důvodů se obvykle zkouška nakrátko provádí na straně vyššího napětí při sníženém napětí, tak aby nedošlo k poškození vinutí. Při této zkoušce je totiž nutné dbát, aby nebyl překročen jmenovitý proud na vinutí.

Pomocí této zkoušky lze zjistit parametry podélné větve viz. Obr. 1.11:



Obrázek 1.11 Parametry náhradního schématu zkoušky nakrátko převzato z [10]

Tyto parametry lze změřit dle schématu zapojení, kdy je jedna strana spojena viz. Obr. 1.12.



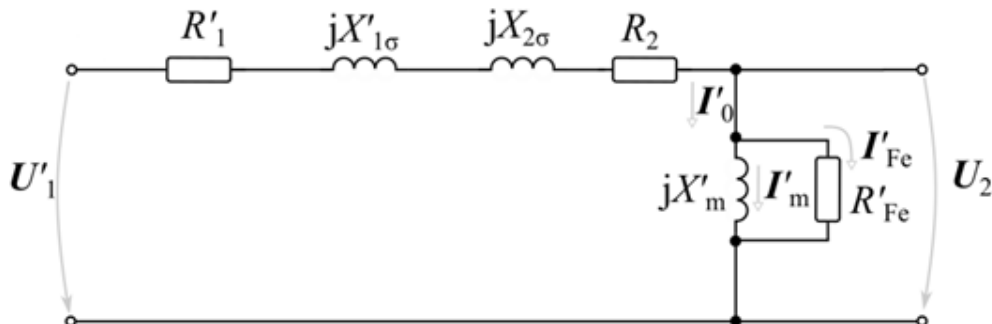
Obrázek 1.12 Schéma zkoušky nakrátko převzato z [10]

Výsledná impedance lze z naměřených hodnot spočítat pomocí rovnice (1.66).

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k}. \quad (1.66)$$

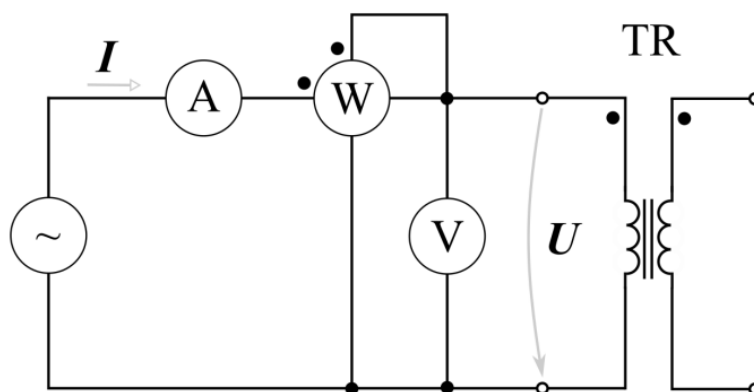
2) naprázdno

Z praktických důvodů se obvykle zkouška naprázdno provádí na straně nižšího napětí. Pomocí zkoušky naprázdno lze získat hodnoty parametrů příčné větve viz. Obr. 1.13:



Obrázek 1.13 Parametry náhradního schématu zkoušky naprázdno převzato z [10]

Tyto parametry se změří dle schématu zapojení, kdy je druhá strana rozpojena viz. Obr.1.14:



Obrázek 1.14 Schéma zkoušky naprázdno převzato z [10]

Z výsledků zkoušky naprázdno lze vypočítat impedance naprázdno pomocí rovnice(1.67).

$$Z_0 = \frac{U_0}{I_0}. \quad (1.67)$$

3) Převod mezi vinutími

Pro snadný přepočet mezi primární a sekundární stranou transformátoru se využívá transformační poměr dle rovnice (1.68).

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}. \quad (1.68)$$

2. MĚŘENÍ SLOŽKOVÝCH IMPEDANCÍ TRANSFORMÁTORŮ

Tato kapitola se věnuje měření a výpočtu složkových impedancí na dvojvinutových a trojvinutových transformátorech. Veličiny pro tyto výpočty byly stanoveny skrze testy naprázdno a nakrátko. Pro tyto testy bylo použito dostupné vybavení z Laboratoře elektrických sítí, ve které se vyučuje předmět Distribuce elektrické energie, viz. příloha A.

V kapitoly byly měřeny a počítány sousledné a netočivé složky. Zpětná složky nebyly měřeny, protože by v tomto případě měly být rovny sousledným.

2.1 Měření na dvojvinutových transformátorech

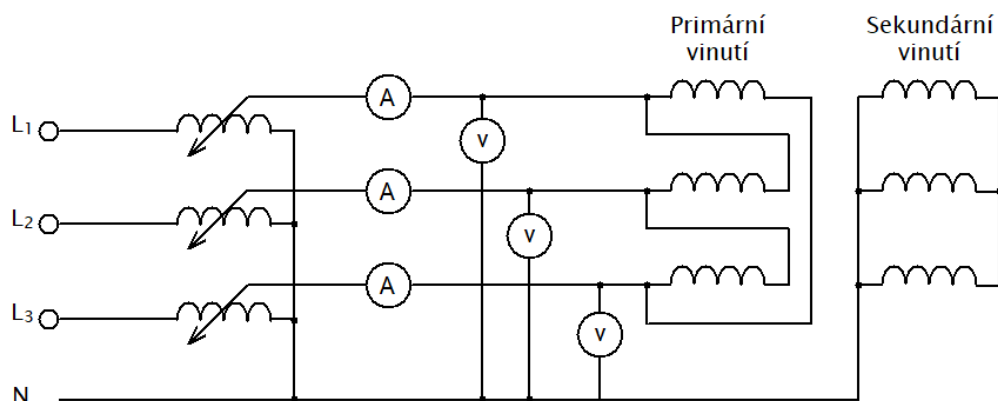
Tato podkapitola se zabývá měřením dvojvinutových transformátorů. Pro měření byly použity dva transformátory se stejným výkonem. Použité transformátory umožňovali různá zapojení. Tato zapojení jsou uvedena v následujících kapitolách, přičemž pro každé zapojení byl naměřen rozdílný převod, tento převod je zde vždy uveden.

Následující podkapitoly se věnují měření na transformátoru se sériovým číslem 55056, výsledky pro druhý transformátor jsou uvedeny v příloze B.

2.1.1 Měření sousledné složky transformátoru v zapojení Dyn1

Pro zjištění sousledné složky transformátoru je nutno provést zkoušku naprázdno a nakrátko. Při zkoušce naprázdno lze zanedbat podélnou větev transformátoru, díky tomuto zjednodušení lze jednoduše získat parametry příčné větve. Při zkoušce nakrátko lze zanedbat příčnou větev transformátoru a lze získat parametry podélné větve.

Na obrázku 2.1 lze vidět schéma zapojení zkoušky nakrátko se zapojením Dyn1.



Obrázek 2.1 Schéma zapojení zkoušky nakrátko pro Dyn1

Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v tabulce 1. Jak si lze povšimnout z naměřených hodnot, objevovala se zde nesymetrie napětí. Pro ověření zdroje

nesymetrie byla změřena kvalita napájecí sítě. Při testu bylo zjištěno, že napájecí síť měla minimální vliv na nesymetrii. Dospělo se k závěru, že nesymetrie napětí byla způsobena použitím autotransformátoru jako regulovatelného zdroje, ale i samotným měřeným transformátorem.

Tabulka 1: Výsledky zkoušky nakrátko pro zapojení Dyn1

	L1	L2	L3
U (V)	2,562	2,984	1,562
I (A)	1,442	1,492	1,152
$\cos\varphi$ (-)	0,999	0,942	0,946
Z_k (Ω)	1,777	2,000	1,356
R_k (Ω)	1,775	1,884	1,283
X_k (Ω)	0,079	0,671	0,440

Napětí, proud a účinník byly změřeny pro každou fázi. Z těchto výsledků se následně provedly výpočty, jejich příklady jsou uvedeny pro fázi (L1):

$$Z_k = \frac{U}{I} = \frac{2,562}{1,442} = 1,777 \Omega, \quad (2.1)$$

$$R_k = Z_k \cdot \cos\varphi = 1,777 \cdot 0,999 = 1,775 \Omega, \quad (2.2)$$

$$X_k = Z_k \cdot \sin(\arccos(\varphi)) = 1,777 \cdot \sin(\arccos(0,999)) = 0,079 \Omega. \quad (2.3)$$

Po získání výsledků je ještě nutno převést tyto parametry na sekundární stranu transformátoru. Pro tento účel byl změřen na začátku měření převod transformátoru, který je pro uvedené zapojení roven 1.

Tabulka 2: Parametry převedené na stranu nižšího napětí pro Dyn1

	L1	L2	L3
$Z_{(1)}$ (Ω)	1,777	2,000	1,356
$R_{(1)}$ (Ω)	1,775	1,884	1,283
$X_{(1)}$ (Ω)	0,079	0,671	0,440

Přepočtené parametry jsou výsledky sousledné složky, jak lze vidět v příkladech výpočtů, které jsou uvedeny pro fázi L1:

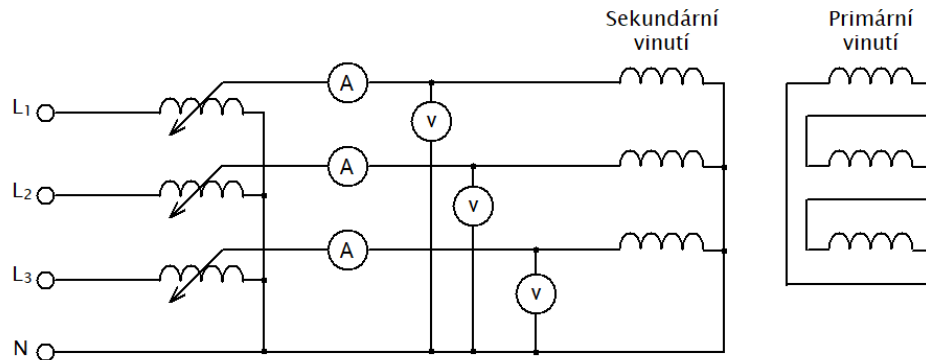
$$Z_{(1)} = \frac{Z_k}{k^2} = \frac{1,777}{1^2} = 1,777 \Omega, \quad (2.4)$$

$$R_{(1)} = \frac{R_k}{k^2} = \frac{1,775}{1^2} = 1,775 \Omega, \quad (2.5)$$

$$X_{(1)} = \frac{X_k}{k^2} = \frac{0,079}{1^2} = 0,079 \Omega. \quad (2.6)$$

Po zkoušce nakrátko následuje zkouška naprázdno. U této zkoušky si lze povšimnout vysoké nesymetrie, která nastala u účinníků jednotlivých fází. Tato nesymetrie napětí byla nejspíše způsobena nedokonalostí transformátoru. Tato teorie byla ověřena použitím

různých regulovatelných zdrojů a zkouškou měřících přístrojů použitím na více modelech.



Obrázek 2.2 Schéma zapojení zkoušky naprázdno pro Dyn1

Na obrázku 2.2 lze vidět schématické zobrazení zkoušky naprázdno.

Tabulka 3: Výsledky zkoušky naprázdno pro zapojení Dyn1

	L1	L2	L3
U (V)	134,2	129,0	129,0
I (A)	0,745	0,606	0,677
$\cos\varphi$ (-)	0,822	0,669	0,665
Z_m (Ω)	180,134	212,871	190,547
R_{Fe} (Ω)	219,141	318,193	286,536
X_m (Ω)	316,309	286,401	255,136

Napětí, proud a účinník byly změřeny pro každou fázi. Z těchto výsledků se následně provedly výpočty, jejich příklady jsou uvedeny pro fázi L1:

$$R_{Fe} = \frac{U}{I \cdot \cos\varphi} = \frac{134,2}{0,745 \cdot 0,822} = 219,141 \Omega, \quad (2.7)$$

$$X_m = \frac{U}{I \cdot \sin\varphi} = \frac{134,2}{0,745 \cdot \sin(\arccos(0,822))} = 316,309 \Omega, \quad (2.8)$$

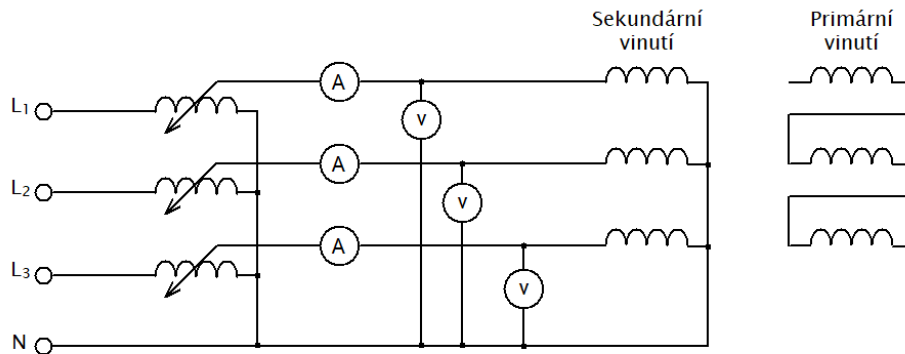
$$Z_m = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R_{Fe}^2} + \frac{1}{X_m^2}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(219,141)^2} + \frac{1}{(316,309)^2}}} = 180,134 \Omega. \quad (2.9)$$

Z měření naprázdno byly zjištěny hodnoty rezistence jádra R_{Fe} , magnetizační reaktance X_m a magnetizační impedance Z_0 .

Dále byla změřena zkouška naprázdno s rozpojenou sekundární stranou (tj. otevřeným trojúhelníkem). Tato konfigurace byla zvolena za účelem ověření, zda se zde bude stále vyskytovat nesymetrie napájecího napětí. Lze totiž očekávat, že pokud by

bylo napájecí napětí dokonale symetrické, tak by nemělo mít uzavření sekundárního vinutí do trojúhelníku vliv na průběh zkoušky naprázdno, protože vinutími by neměl procházet žádný proud. Pokud je však nesymetrické napájecí napětí, nebo pokud má transformátor vlastní nesymetrie, tak se může sekundární vinutí zapojené do trojúhelníku chovat jako určitá zátěž.

Rozpojení tedy slouží pro ověření, zda se zde bude nesymetrie napájecího napětí stále vyskytovat. Schéma této zkoušky je k vidění na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3 Schéma zkoušky naprázdno pro Dyn1 s rozpojením sekundární strany

Tabulka 4: Výsledky zkoušky naprázdno pro Dyn1 s rozpojenou sekundární stranou

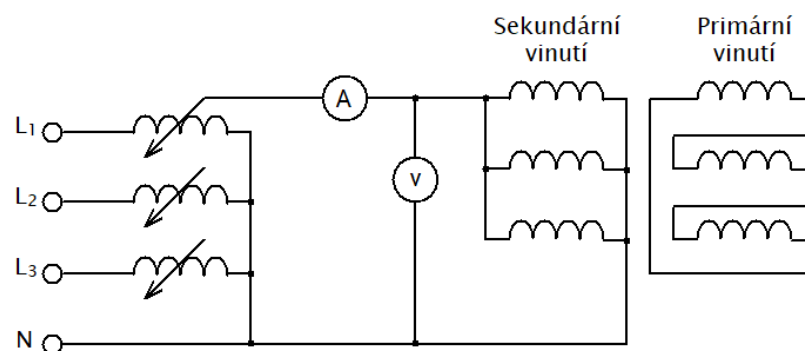
	L1	L2	L3
U (V)	239,800	235,300	241,900
I (A)	0,462	0,235	0,246
$\cos\varphi$ (-)	0,325	0,818	0,831
Z_m (Ω)	519,048	1001,277	983,333
R_{Fe} (Ω)	1597,070	1224,055	1183,313
X_m (Ω)	548,842	1740,690	1767,719

Dle naměřených hodnot si lze povšimnout, že napětí a proud je velmi nesymetrické. Tyto velikosti se dále projeví do impedance.

2.1.2 Měření netočivé složky transformátoru v zapojení Dyn1

Netočivou složku v zapojení Dyn1 je možné změřit dle schématu na obrázku 2.4. Jak je patrné ze schématu, měří se ze strany sekundárního vinutí, kde je tok netočivé složky z její definice možný.

Dále si lze povšimnout, že tato složka se měří pomocí jednofázového napájení, kdy jsou všechna sekundární vinutí spojena na koncích vinutí.



Obrázek 2.4 Schéma zapojení pro měření netočivé složky pro Dyn1 [11]

Tabulka 5: Výsledky měření netočivé složky v zapojení Dyn1

U (V)	1,580
I (A)	2,520
$\cos\varphi$ (-)	0,963
$Z_{(0)}$ (Ω)	1,881
$R_{(0)}$ (Ω)	1,811
$X_{(0)}$ (Ω)	0,507

Netočivá impedance lze určit pomocí vzorce převzatého z literatury [11] :

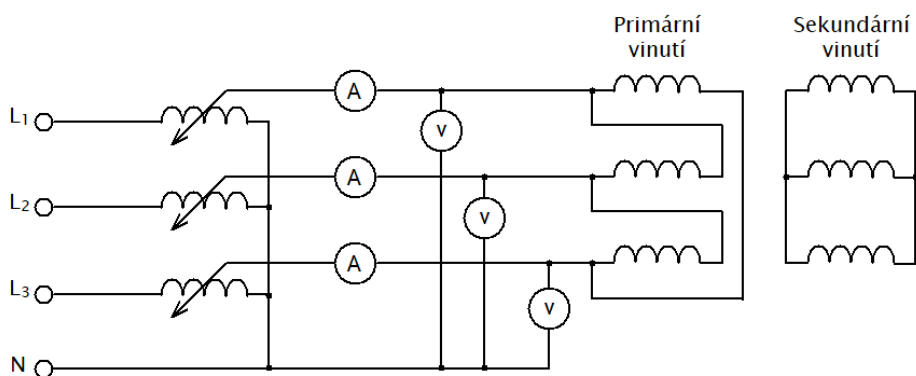
$$Z_{(0)} = 3 \cdot \frac{U}{I} = 3 \cdot \frac{1,580}{2,520} = 1,881 \Omega. \quad (2.10)$$

Reaktance a rezistence se určí opět stejným způsobem jako u zkoušky nakrátko a dané hodnoty jsou přímo rovny netočivým složkám.

Obrázek 2.4 je v souladu s literaturou [11], kde je uvedeno schéma pro zapojení YNd11.

2.1.3 Měření sousledné složky transformátoru v zapojení Dy1

U transformátoru, který byl zapojen v provedení Dy1 nelze změřit netočivou složku, tudíž se zde provádí jen měření naprázdno a nakrátko.



Obrázek 2.5 Schéma zapojení zkoušky nakrátko pro Dy1

Výsledné změřené a vypočtené hodnoty zkoušky nakrátko jsou zapsány v tabulce 6.

Tabulka 6: Výsledky zkoušky nakrátko pro zapojení Dy1

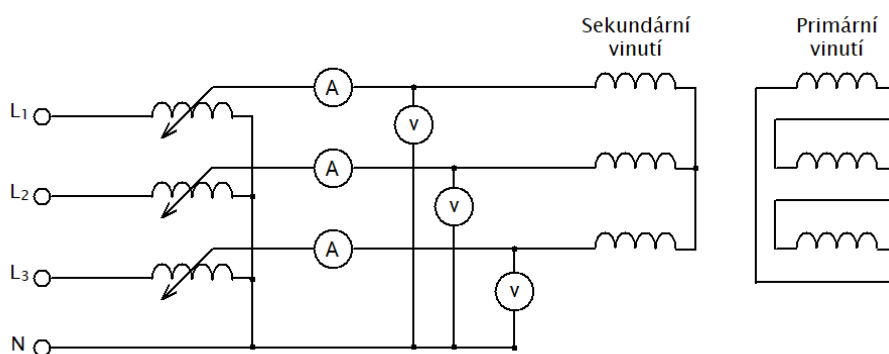
	L1	L2	L3
U (V)	3,922	2,219	1,562
I (A)	1,787	1,393	1,251
$\cos\varphi$ (-)	0,987	0,850	0,999
Z_k (Ω)	2,195	1,593	1,249
R_k (Ω)	2,166	1,354	1,247
X_k (Ω)	0,353	0,839	0,056

Tyto hodnoty byly vypočteny stejným způsobem a opět převedeny na sekundární stranu transformátoru pomocí konstanty $k = 1$.

Tabulka 7: Parametry převedené na stranu nižšího napětí pro Dy1

$Z_{(1)}$ (Ω)	2,195	1,593	1,249
$R_{(1)}$ (Ω)	2,166	1,354	1,247
$X_{(1)}$ (Ω)	0,353	0,839	0,056

Dále se opět provedla zkouška naprázdno dle zobrazeného schématu zapojení, tentokrát se však nepřipojil střední vodič ke středu transformátoru.



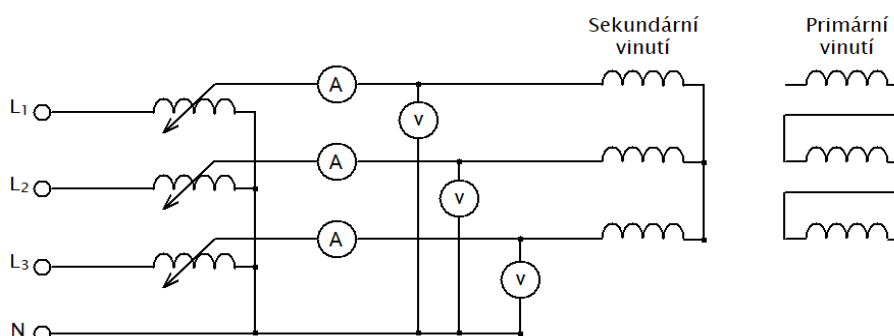
Obrázek 2.6 Schéma zapojení zkoušky naprázdno pro Dy1

Tabulka 8: Výsledky zkoušky naprázdno pro zapojení Dy1

	L1	L2	L3
U (V)	134,900	129,600	129,800
I (A)	0,149	0,096	0,142
$\cos\varphi$ (-)	0,169	0,297	0,534
Z_m (Ω)	905,369	1350,000	914,085
R_{Fe} (Ω)	5357,214	4545,455	1711,769
X_m (Ω)	918,582	1413,794	1081,137

V tabulce 8 je patrné, že při této zkoušce se zvýšila hodnota impedance, to mohlo být zapříčiněno odpojením vyvedeného středu. Pro výpočet impedancí se použily stejné rovnice jako při zapojení Dyn1.

Stejně jako v předchozím zapojení bylo změřeno i zapojení naprázdno s rozpojenou sekundární stranou transformátoru. Schéma tohoto zapojení lze vidět na následujícím obrázku.



Obrázek 2.7 Schéma zapojení zkoušky naprázdno pro Dy1 s rozpojením sekundární strany

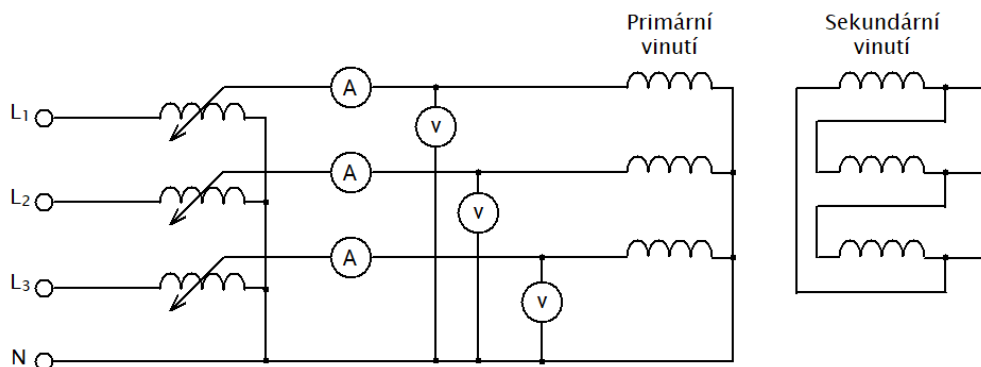
Tabulka 9: Výsledky zkoušky naprázdno pro Dy1 s rozpojenou sekundární stranou

	L1	L2	L3
U (V)	141,800	135,400	136,900
I (A)	0,462	0,235	0,246
$\cos\varphi$ (-)	0,325	0,818	0,831
Z_m (Ω)	306,926	576,170	556,504
R_{Fe} (Ω)	944,389	704,365	669,680
X_m (Ω)	324,545	1001,655	1000,416

Z výsledků je patrné, že zde bylo opět vysoká nesymetrie napájecího napětí. Výsledkem toho jsou rozdílné impedance na vinutích jednotlivých fází.

2.1.4 Měření sousledné složky transformátoru v zapojení YNd11

V následujícím měření se opět provedla jako první zkouška nakrátko, ze které byly získány hodnoty sousledných složek. Měření vycházelo ze schématu na obrázku 2.8.



Obrázek 2.8 Schéma zapojení zkoušky nakrátko pro YNd11

Měření opět provázela nesymetrie napájecího napětí, která se projevila na první fázi, jak lze vidět v tabulce 10.

Tabulka 10: Výsledky zkoušky nakrátko pro zapojení YNd11

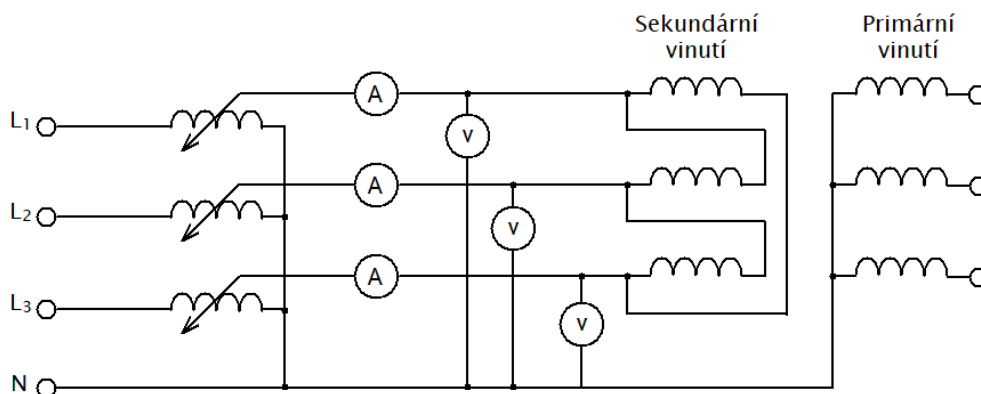
	L1	L2	L3
U (V)	4,906	4,047	3,984
I (A)	0,925	0,765	0,753
$\cos\varphi$ (-)	0,974	0,974	0,975
Z_k (Ω)	5,304	5,290	5,291
R_k (Ω)	5,166	5,153	5,159
X_k (Ω)	1,202	1,198	1,176

Tyto hodnoty byly následně převedeny pomocí převodu $k = 2,875$ a zapsány do tabulky 11.

Tabulka 11: Parametry převedené na stranu nižšího napětí pro YNd11

$Z_{(1)} (\Omega)$	0,642	0,640	0,640
$R_{(1)} (\Omega)$	0,625	0,623	0,624
$X_{(1)} (\Omega)$	0,145	0,145	0,142

Následovala zkouška naprázdno, která byla provedena dle schématu na obrázku 2.9. Měření bylo prováděno nesymetrií napájecího napětí, tudíž se hodnoty výsledných impedancí opět lišily.



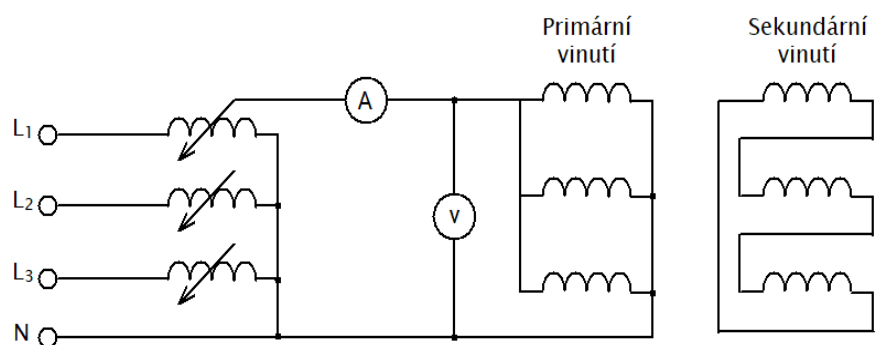
Obrázek 2.9 Schéma zapojení zkoušky naprázdno pro YNd11

Tabulka 12: Výsledky zkoušky naprázdno pro zapojení YNd11

	L1	L2	L3
U (V)	47,610	44,170	42,770
I (A)	0,065	0,062	0,086
$\cos\varphi$ (-)	0,506	0,855	0,717
Z_m (Ω)	732,462	712,419	497,326
R_{Fe} (Ω)	1447,552	833,239	693,620
X_m (Ω)	849,198	1373,662	713,448

2.1.5 Měření netočivé složky transformátoru v zapojení YNd11

V následujícím měření se opět změřily a vypočetly hodnoty pro netočivou složku.



Obrázek 2.10 Schéma zapojení pro měření netočivé složky pro YNd11

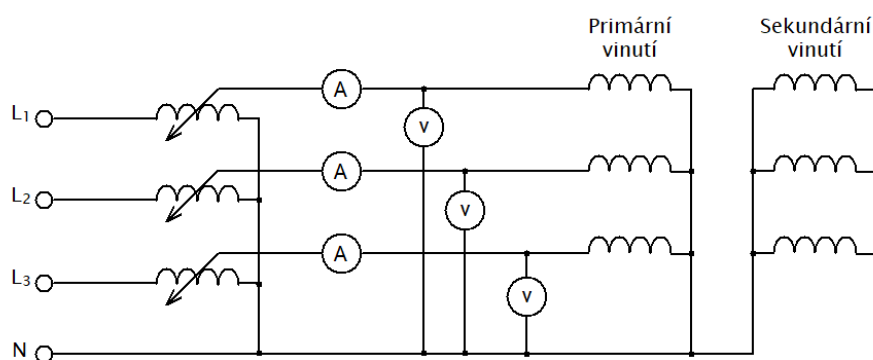
Tabulka 13: Výsledky měření netočivé složky v zapojení YNd11

U (V)	2,672
I (A)	1,566
$\cos\varphi$ (-)	0,951
$Z_{(0)}$ (Ω)	5,119
$R_{(0)}$ (Ω)	4,868
$X_{(0)}$ (Ω)	1,583

Hodnoty impedancí netočivé složky byly opět vypočteny stejným způsobem jako u zapojení Dyn1 v kapitole 2.1.2.

2.1.6 Měření sousledné složky transformátoru v zapojení YNyn0

Tento postup se opět shoduje s předchozími postupy, tzn. opět byly změřeny parametry transformátorů zkouškou nakrátko a naprázdno.



Obrázek 2.11 Schéma zapojení zkoušky nakrátko pro YNyn0

V tabulce 14 si lze opět povšimnout nesymetrie napětí, která se objevila ve třetí fázi.

Tabulka 14: Výsledky zkoušky nakrátko pro zapojení YNyn0

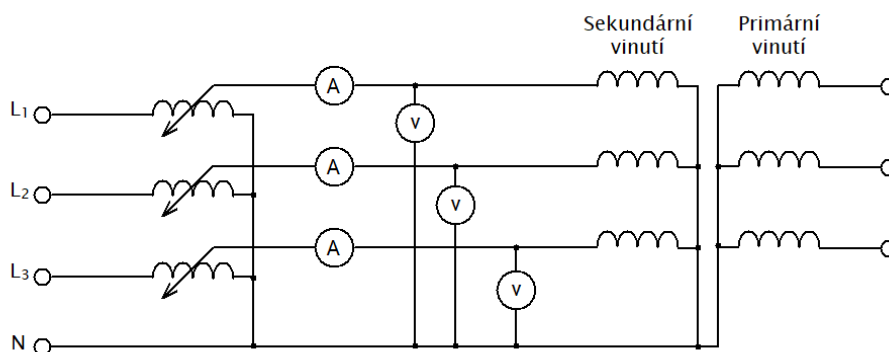
	L1	L2	L3
U (V)	8,375	7,281	5,906
I (A)	1,500	1,448	1,259
$\cos\varphi$ (-)	0,980	0,945	0,987
Z_k (Ω)	5,587	5,028	4,691
R_k (Ω)	5,475	4,752	4,630
X_k (Ω)	1,112	1,645	0,754

Dále se parametry opět převedly na stranu sekundárního vinutí pomocí převodu $k=1,66$.

Tabulka 15: Parametry převedené na stranu nižšího napětí pro YNyn0

$Z_{(1)}$ (Ω)	1,862	1,676	1,564
$R_{(1)}$ (Ω)	1,825	1,584	1,543
$X_{(1)}$ (Ω)	0,371	0,548	0,251

Dále se provedla zkouška naprázdno, která se změřila na sekundární straně vinutí transformátoru. Výsledky jsou zapsány v tabulce 16.



Obrázek 2.12 Schéma zapojení zkoušky naprázdno pro YNyn0

Tabulka 16: Výsledky zkoušky naprázdno pro zapojení YNyn0

	L1	L2	L3
U (V)	135,900	130,500	131,600
I (A)	0,362	0,177	0,186
$\cos\varphi$ (-)	0,333	0,864	0,744
Z_m (Ω)	375,414	737,288	707,527
R_{Fe} (Ω)	1127,370	853,343	950,977
X_m (Ω)	398,137	1464,350	1058,887

Pro tento transformátor bylo provedeno i měření nakrátko ze strany sekundárního vinutí transformátoru a naprázdno ze strany primárního vinutí transformátoru. Výsledky jsou uvedeny v tabulkách 17 a 18.

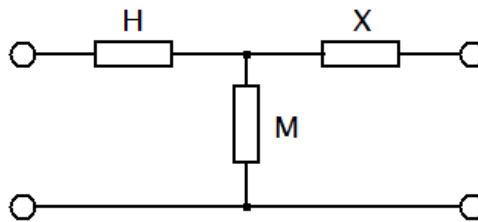
Tabulka 17: Výsledky měření nakrátko ze sekundárního vinutí

	L1	L2	L3
U (V)	5,672	3,891	2,844
I (A)	2,573	2,282	1,775
$\cos\varphi$ (-)	0,975	0,917	0,999
Z_k (Ω)	2,204	1,705	1,602
R_k (Ω)	2,149	1,564	1,601
X_k (Ω)	0,490	0,680	0,072

Tabulka 18: Výsledky měření naprázdno z primárního vinutí

	L1	L2	L3
U (V)	235,800	225,000	227,300
I (A)	0,298	0,162	0,149
$\cos\varphi$ (-)	0,258	0,862	0,911
Z_m (Ω)	791,275	1388,889	1525,503
R_{Fe} (Ω)	3066,958	1611,240	1674,537
X_m (Ω)	819,003	2739,922	3699,030

Tato měření byla uskutečněna, protože zde byla snaha zjistit, zda lze jednotlivé impedance větví stanovit samostatně. Pro získání těchto parametrů byly sestaveny rovnice dle obrázku 2.13. Odvození rovnic pro zjištění samostatných impedancí se nachází v příloze C.



Obrázek 2.13 Schéma dílčích impedancí náhradního obvodu transformátoru primární, sekundární vinutí a magnetizační větev [11]

Následující rovnice jsou odvozeny z obrázku 2.13, jak již bylo uvedeno výše. Každá z těchto rovnic představuje určitý způsob měření. Přičemž každá z těchto rovnic definuje jinou zkoušku, takže například impedance \bar{Z}_{0P} představuje zkoušku naprázdno měřenou z primárního vinutí. Dále impedance \bar{Z}_{kS} znamená zkoušku nakrátko měřenou ze sekundárního vinutí.

$$\bar{Z}_{0P} = \bar{Z}_H + \bar{Z}_M, \quad (2.11)$$

$$\bar{Z}_{0S} = \bar{Z}_X + \bar{Z}_M, \quad (2.12)$$

$$\bar{Z}_{kP} = \bar{Z}_H + \frac{\bar{Z}_X \cdot \bar{Z}_M}{\bar{Z}_X + \bar{Z}_M}, \quad (2.13)$$

$$\bar{Z}_{kS} = \bar{Z}_X + \frac{\bar{Z}_H \cdot \bar{Z}_M}{\bar{Z}_H + \bar{Z}_M}. \quad (2.14)$$

Z odvození rovnic lze získat kvadratickou rovnici, která umožňuje získat dvě různá řešení dílčích impedancí náhradního obvodu transformátoru ZH, ZX a ZM z této soustavy 4 rovnic. Jako vstupní hodnoty pro výpočet jsou pro tyto vztahy použity hodnoty získané z měření jako Z0P, Z0S Pro snadný výpočet kořenů v komplexních číslech byl použit program Matlab. Kód užitý pro výpočet je v příloze D.

V tabulce 19 jsou shrnuty výsledky jednotlivých měření.

Tabulka 19: Hodnoty impedancí transformátoru stanovené měřením

	L1	L2	L3
$\bar{Z}_{0P} (\Omega)$	1122,319+j273,001	537,08+j913,307	558,179+j1233,01
$\bar{Z}_{0S} (\Omega)$	1127,37+j398,137	853,343+j1464,35	950,977+j1058,887
$\bar{Z}_{kP} (\Omega)$	1,825+j0,371	1,584+j0,548	1,543+j0,251
$\bar{Z}_{kS} (\Omega)$	2,149+j0,490	1,564+j0,680	1,602+j0,072

Výsledky z tabulky 19 byly dále použity pro výpočet v programu Matlab. V dalším kroku byla sestrojena tabulka s vypočtenými hodnotami z odvozených rovnic. Ty vychází ze soustavy čtyř rovnic o třech neznámých. Pomocí tří rovnic lze vypočítat veškeré veličiny a pomocí čtvrté rovnice, která nebyla zahrnuta při odvozování, lze ověřit, které ze dvou řešení je správné. Výsledky byly zapsány do tabulky 20 a 21.

Tabulka 20: Hodnoty impedancí vypočtené odvozením pro kořen X_1

	L1	L2	L3
$\bar{Z}_{X1} (\Omega)$	2252,90+ j732,87	1529,30+ j2620,50	1709,00+ j2221,00
$\bar{Z}_{M1} (\Omega)$	-1125,50- j334,73	-675,99- j1156,10	-757,98- j1162,10
$\bar{Z}_{H1} (\Omega)$	2247,80+ j607,73	1213,10+ j2069,40	1316,20+ j2395,10
$\bar{Z}_{kP1} (\Omega)$	1,83+ j0,37	1,58+ j0,55	1,54+ j0,25
$\bar{Z}_{kS1} (\Omega)$	1,84+ j0,57	2,53+ j0,89	1,63- j0,24

Tabulka 21: Hodnoty impedancí vypočtené odvozením pro kořen X_2

	L1	L2	L3
$\bar{Z}_{X2} (\Omega)$	1,89+ j63,41	177,35+ j308,23	193,00- j103,24
$\bar{Z}_{M2} (\Omega)$	1125,50+ j334,73	675,99+ j1156,10	757,98+ j1162,10
$\bar{Z}_{H2} (\Omega)$	-3,16- j61,73	-138,91- j242,81	-199,80+ j70,88
$\bar{Z}_{kP2} (\Omega)$	1,83+ j0,37	1,58+ j0,55	1,54+ j0,25
$\bar{Z}_{kS2} (\Omega)$	564,63+ j230,77	515,35+ j886,29	571,99+ j477,82

Dle výsledků z tabulek lze usuzovat, že kořen X_1 se více přibližuje změřeným hodnotám z tabulky 19, je zde totiž menší odchylka kontrolního výpočtu impedance \bar{Z}_{kS1} . Odchylka vzniklá při výpočtu kořene X_1 mohla vzniknout v důsledku zaokrouhlování.

Dále byly porovnány hodnoty zkoušky nakrátko s výsledky obou kořenů kvadratické rovnice, výsledky byly zapsány do tabulky 22.

Tabulka 22: Porovnání výsledků zkoušky nakrátko

	$\bar{Z}_{kP} (\Omega)$	$\bar{Z}_{X1} (\Omega)$	$\bar{Z}_{X2} (\Omega)$
L1	1,825+j0,37	1,83+ j0,37	1,83+ j0,37
L2	1,584+j0,55	1,58+ j0,55	1,58+ j0,55
L3	1,543+j0,25	1,54+ j0,25	1,54+ j0,25

Z tabulky 22 je zřejmé, že výsledky, které vzešli z výpočetní metody jsou velmi blízké změřeným. Tyto malé odchylky mohly být zapříčiněny zaokrouhlováním matematických výpočtů.

Bylo také provedeno porovnání zkoušky naprázdno s vypočtenými výsledky. Výsledky by měli představovat hodnotu impedance magnetizační větve. Při zkoušce naprázdno je v této větvi částečně zahrnuta i podélná impedance. Výsledky, které vznikly z kvadratické rovnice tuto část podélné impedance neuvažují, a proto by měla být výsledná impedance nižší, než je změřená. Porovnání výsledků lze vidět v tabulce 23.

Tabulka 23: Porovnání výsledků zkoušky naprázdno

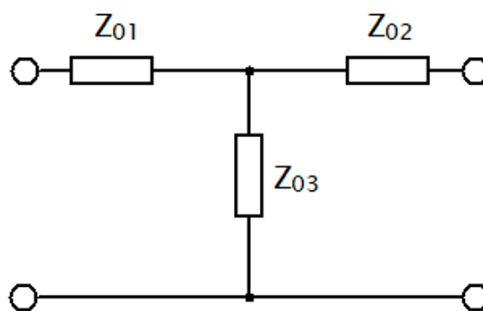
	$\bar{Z}_{0S} (\Omega)$	$\bar{Z}_{X1} (\Omega)$	$\bar{Z}_{X2} (\Omega)$
L1	1127,37 +j398,137	-1125,50- j334,73	1125,50+ j334,73
L2	853,343+j1464,35	-675,99- j1156,10	675,99+ j1156,10
L3	950,977+j1058,887	-757,98- j1162,10	757,98+ j1162,10

Z výsledků v tabulce 23 je zřejmé, že kořen X_1 neobsahuje správné výsledky, protože pokud by byl odpor záporný znamenalo by to, že dodává elektrickou energii do obvodu. Z toho vyplývá, že kořen X_2 je blíže správnému výsledku, ale v hodnotě reaktance se stále velmi liší.

2.1.7 Měření netočivé složky transformátoru v zapojení YNyn0

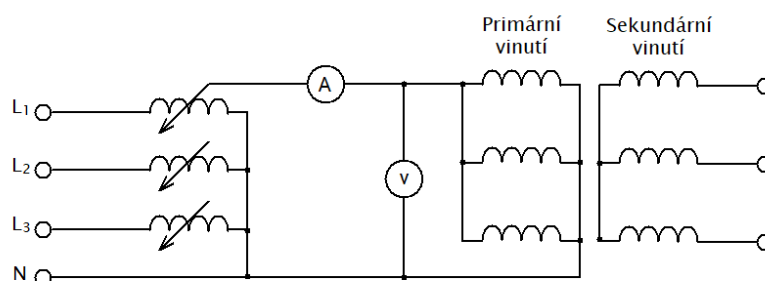
Měření netočivé složky se skládalo ze tří měření, pomocí kterých bylo možné stanovit impedance jednotlivých větví transformátoru. Dále bylo vytvořeno čtvrté zapojení s cílem provést obdobný výpočet jako u sousledné složky.

Pomocí prvního měření lze stanovit impedanci Z_{012} . Druhé měření umožnilo stanovit impedanci Z_{013} a třetí měření stanovilo impedanci Z_{023} . Z těchto impedancí se následně vypočetly jednotlivé impedance větví zobrazené na obrázku 2.14.

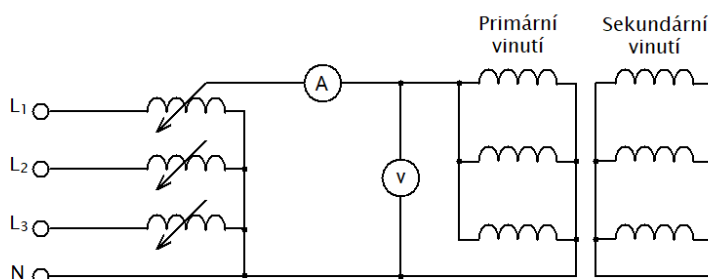


Obrázek 2.14 Impedance jednotlivých vinutí a magnetizační větve [11]

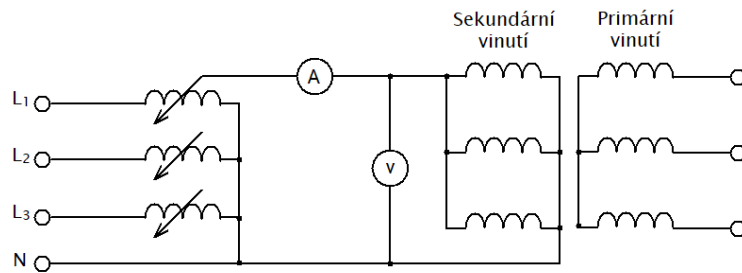
Na následujících obrázcích jsou schémata zapojení pro 1.-4. měření impedance. Čtvrté měření bylo provedeno s cílem ověřit, zda lze umožnit opětovný výpočet impedance, jako u sousledné. Tudiž se při klasickém postupu nebude uvažovat.



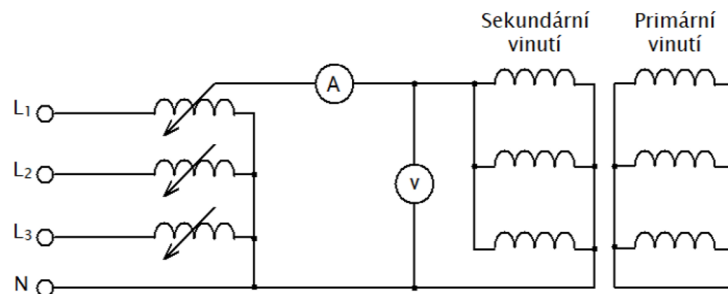
Obrázek 2.15 Schéma č.1 zapojení pro měření impedance Z_{013} [11]



Obrázek 2.16 Schéma č.2 zapojení pro měření impedance Z_{012} [11]



Obrázek 2.17 Schéma č.3 zapojení pro měření impedance Z_{023} [11]



Obrázek 2.18 Schéma č.4 zapojení pro měření impedance

V tabulce 24 jsou uvedené změřené a vypočtené hodnoty impedance netočivých složek ze všech měření.

Tabulka 24: Měření netočivé složky pro zapojení YNyn0

	1. měření Z_{013}	2. měření Z_{012}	3. měření Z_{023}	4. měření Z_{021}
U (V)	2,310	8,420	5,380	5,238
I (A)	1,330	1,400	2,500	2,573
$\cos\varphi$ (-)	0,950	0,144	0,197	0,186
Z (Ω)	5,211	18,043	6,456	6,107
R (Ω)	4,950	2,598	1,272	1,136
X (Ω)	1,627	17,855	6,329	6,001

Tyto hodnoty je nutno, pro výpočet, nejprve převést na stejnou stranu. Výsledky byly tedy převedeny na sekundární stranu transformátoru, jak lze vidět v tabulce 25. Z hodnot měření č. 1–3 byly následně vypočteny jednotlivé impedance větví viz. tabulka 26.

Tabulka 25: Vypočtené veličiny převedené na stranu sekundárního napětí

	1. měření Z_{013}	2. měření Z_{012}	3. měření Z_{023}	4. měření Z_{021}
$Z (\Omega)$	1,737	6,014	6,456	6,107
$R (\Omega)$	1,650	0,866	1,272	1,136
$X (\Omega)$	0,542	5,952	6,329	6,001
$\bar{Z} (\Omega)$	1,650+j0,542	0,866+j5,952	1,272+j6,329	1,136+j6,001

Tabulka 26: Vypočtené hodnoty netočivých složek impedancí pro zapojení YNyn0

	Primární vinutí Z_{01}	Sekundární vinutí Z_{02}	Magnetizační větev Z_{03}
$\bar{Z}_{(0)} (\Omega)$	0,622 + j0,083	0,244+j5,865	1,028 + j0,460

Primární vinutí \bar{Z}_{01} lze vypočíst dle vztahu (2.15), který byl sestrojen na základě literatury [3] a [11].

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{01} &= \frac{\bar{Z}_{012} + \bar{Z}_{013} - \bar{Z}_{023}}{2} = \\ &= \frac{(0,866 + j5,952) + (1,650 + j0,542) - (1,272 + j6,329)}{2} = \\ &= 0,622 + j0,083 \Omega.\end{aligned}\quad (2.15)$$

Sekundární vinutí \bar{Z}_{02} lze vypočíst dle vztahu:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{02} &= \frac{\bar{Z}_{012} + \bar{Z}_{023} - \bar{Z}_{013}}{2} = \\ &= \frac{(0,866 + j5,952) + (1,272 + j6,329) - (1,650 + j0,542)}{2} = \\ &= 0,244 + j5,870 \Omega.\end{aligned}\quad (2.16)$$

Vinutí magnetizační větve \bar{Z}_{03} lze vypočíst dle vztahu:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{03} &= \frac{\bar{Z}_{013} + \bar{Z}_{023} - \bar{Z}_{012}}{2} = \\ &= \frac{(0,866 + j5,952) + (1,272 + j6,329) - (1,650 + j0,542)}{2} = \\ &= 1,028 + j0,460 \Omega.\end{aligned}\quad (2.17)$$

Výsledná netočivá složka lze vypočíst dle rovnice (2.18) uvedené v literatuře [3].

$$\bar{Z}_{(0)} = \bar{Z}_{(01)} + \bar{Z}_{(02)} = 0,622 + j0,083 + 0,244 + j5,865 = 0,866 + j5,948\Omega \quad (2.18)$$

Dále byla opět provedena zkouška, která měla za úkol replikovat postup čtyř měření, tzn. byl pokus spočítat jednotlivé větve pomocí kvadratické rovnice jako tomu bylo v kapitole 2.1.6.

Pro tyto výpočty byly opět použity rovnice (2.11)-(2.14, protože se jedná o stejný princip. Také byl využitý stejný kód v programu Matlab. Jediný rozdíl, který zde nastal byl v zapojení. V tabulce 27 se nacházejí hodnoty impedancí pro jednotlivá zapojení, která byla již zmíněna výše.

Tabulka 27: Hodnoty impedancí z měření

$\bar{Z}_{0P} (\Omega)$	1,650+j0,542
$\bar{Z}_{0S} (\Omega)$	1,272+j6,329
$\bar{Z}_{kP} (\Omega)$	0,866+j5,952
$\bar{Z}_{kS} (\Omega)$	1,136+j6,001

Pomocí impedancí, které jsou zapsány v tabulce 27 byly vypočteny jednotlivá řešení $X_{(0)1}$ a $X_{(0)2}$ pro netočivou složku. Postup byl stejný jako v kapitole 2.1.7 .

Tabulka 28: Hodnoty impedancí vypočtené odvozením pro kořen $X_{(0)1}$

$\bar{Z}_{(0)01} (\Omega)$	7,588+j0,380
$\bar{Z}_{(0)02} (\Omega)$	7,210+j6,167
$\bar{Z}_{(0)03} (\Omega)$	-5,938+j0,162
$\bar{Z}_{(0)kP1} (\Omega)$	0,866+j5,952
$\bar{Z}_{(0)kS1} (\Omega)$	-17,659+j13,711

Dle výsledků v tabulce 28 je zřejmé, že první kořen kvadratické rovnice není správný kvůli záporným hodnotám impedancí.

Tabulka 29: Hodnoty impedancí vypočtené odvozením pro kořen $X_{(0)2}$

$\bar{Z}_{(0)01} (\Omega)$	-4,288+j0,704
$\bar{Z}_{(0)02} (\Omega)$	-4,666+j6,491
$\bar{Z}_{(0)03} (\Omega)$	5,938- j0,162
$\bar{Z}_{(0)kP2} (\Omega)$	0,866+j5,952
$\bar{Z}_{(0)kS2} (\Omega)$	-1,697+j6,410

Výsledky v tabulce 29 ukazují, že kořen $X_{(0)2}$ je bližší než kořen $X_{(0)1}$, ale zároveň si lze povšimnout, že hodnota netočivých složek se velmi odlišuje a je záporná, tím pádem je tato metoda nespolehlivá.(2.18)

Tabulka 30: Porovnání výsledků netočivých složek ve vinutí

	Původní výpočet	Kořen $X_{(0)1}$	Kořen $X_{(0)2}$
Primární vinutí $\bar{Z}_{01} (\Omega)$	0,622 + j0,083	7,588+j0,380	-4,288+j0,704
Sekundární vinutí $\bar{Z}_{02} (\Omega)$	1,028 + j0,460	7,210+j6,167	-4,666+j6,491
Magnetizační větev $\bar{Z}_{03} (\Omega)$	0,244 + j5,870	-5,938+j0,162	5,938- j0,162

2.1.8 Porovnání jednotlivých složek transformátorů

Tato podkapitola obsahuje srovnání jednotlivých složek impedancí. Ty byly pro přehlednost a možnost jednoduchého srovnání zapsané do tabulek 31 a 32.

V následující tabulce jsou zaznamenány hodnoty impedancí pro veškerá měřená zapojení. Lze si povšimnout, že se změnou zapojení transformátoru se impedance mírně měnila.

Tabulka 31: Srovnání sousledných složek různých zapojení

Sousledná složka $\bar{Z}_{(1)}$ (Ω)			
	L1	L2	L3
Dyn1	1,775+j0,079	1,884+j0,671	1,283+j0,440
Dy1	2,166+j0,353	1,354+j0,839	1,247+j0,056
YNd11	0,625+j0,145	0,623+j0,145	0,624+j0,142
YNyn0	1,825+j0,371	1,584+j0,548	1,543+j0,251

V tabulce 32 jsou uvedena data z měření netočivých složek, zapojení Dy1 zde není uvedeno, protože v tomto zapojení tato složka nevzniká.

Tabulka 32: srovnání netočivých složek různých zapojení

Netočivá složka $\bar{Z}_{(0)}$ (Ω)	
Dyn1	1,811+j0,507
YNd11	1,693+j0,551
YNyn0	0,866+j5,948

Výsledná netočivá složka v zapojení YNd11 byla převedena na stranu nižšího napětí, aby bylo možné srovnat jednotlivá měření.

2.2 Měření na trojvinut'ovém transformátoru

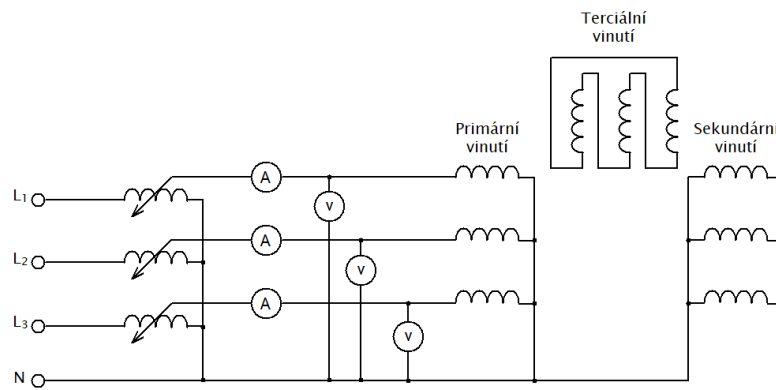
Měření na trojvinut'ových transformátorech je obdobné, jako u dvojvinut'ových, tzn. provádí se na nich také zkoušky nakrátko a naprázdno.

U těchto transformátoru je nutné tyto zkoušky provést pro více zapojení, protože se zde vyskytuje vinutí navíc.

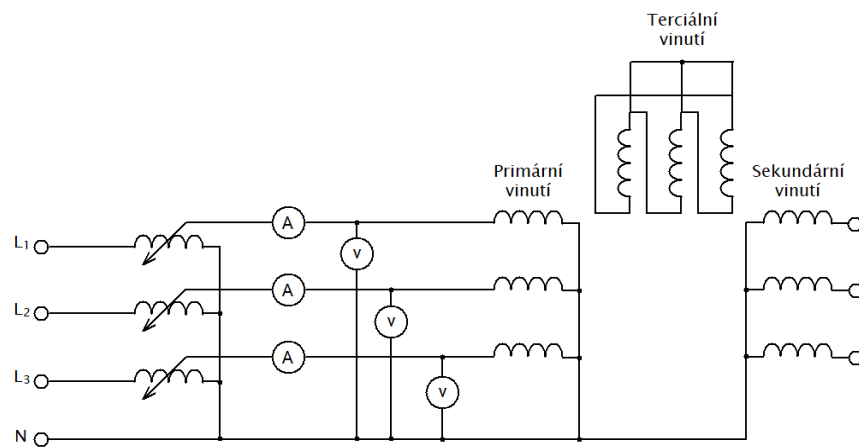
2.2.1 Měření sousledné složky transformátoru v zapojení YNynd

Jakou první se provedla zkouška nakrátko. Tato zkouška se skládala ze tří měření. Vždy se měřily dvojice vinutí tzn. jedna strana zapojena nakrátko, dále byla jedna rozpojena a k poslední straně byl připojen zdroj napájení. Pokud byl zdroj připojen k primárnímu vinutí a sekundární bylo zapojeno nakrátko, tak byl index značen 12, toto zapojení lze vidět na obrázku 2.19.

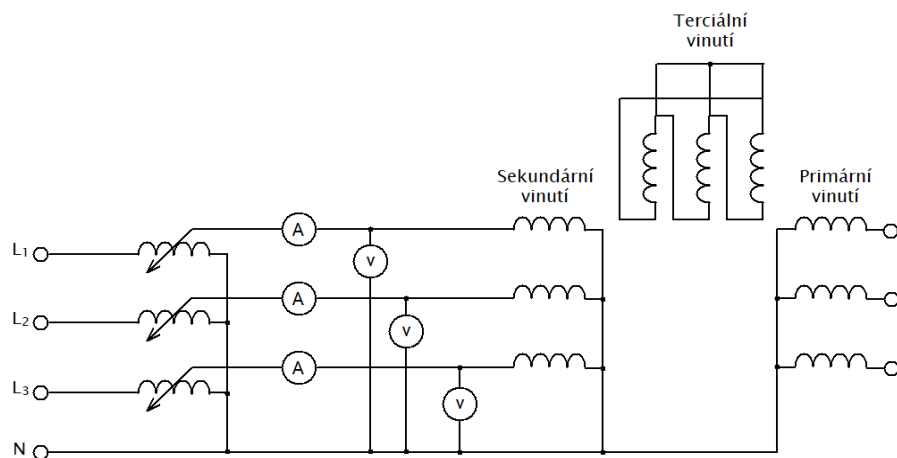
Při zkoušce nakrátko bylo nutné veličiny nastavovat velmi opatrně, aby proud na žádném vinutí nepřekročil svoji maximální hodnotu a nedošlo k poškození transformátoru.



Obrázek 2.19 Schéma zapojení měření nakrátko pro impedanci Z_{12}



Obrázek 2.20 Schéma zapojení měření nakrátko pro impedanci Z_{13}



Obrázek 2.21 Schéma zapojení měření nakrátko pro impedanci Z_{23}

Výstupem z těchto měření byly opět hodnoty napětí, proudů a účinitků. Z těchto veličin byla v dalším kroku dopočtena impedance, činný odpor a reaktance. Ze vzešlých hodnot bylo následně možné získat pomocí výpočtu jednotlivé impedance vinutí nakrátko.

Pro větší přehlednost byly tabulky rozděleny dle jednotlivých zapojení.

Tabulka 33: Změřené a vypočtené veličiny pro měření Z_{12}

	L1	L2	L3
U (V)	6,016	6,828	5,688
I (A)	2,589	2,993	2,545
$\cos\varphi$ (-)	0,973	0,958	0,951
Z_{k12} (Ω)	2,324	2,281	2,235
R_{k12} (Ω)	2,261	2,186	2,125
X_{k12} (Ω)	0,536	0,654	0,691
\bar{Z}_{k12} (Ω)	2,261+j0,536	2,186+j0,654	2,125+j0,691

Tabulka 34: Změřené a vypočtené veličiny pro měření Z_{13}

	L1	L2	L3
U (V)	12,02	11,88	9,92
I (A)	2,688	2,856	2,333
$\cos\varphi$ (-)	0,991	0,991	0,995
Z_{k13} (Ω)	4,472	4,160	4,252
R_{k13} (Ω)	4,431	4,122	4,231
X_{k13} (Ω)	0,599	0,557	0,425
\bar{Z}_{k13} (Ω)	4,431+j0,599	4,122+j0,557	4,231+j0,425

Tabulka 35: Změřené a vypočtené veličiny pro měření Z_{23}

	L1	L2	L3
U (V)	1,859	2,797	1,047
I (A)	5,97	10,10	3,63
$\cos\varphi$ (-)	0,990	0,987	0,999
Z_{k23} (Ω)	0,311	0,277	0,288
R_{k23} (Ω)	0,308	0,273	0,288
X_{k23} (Ω)	0,044	0,045	0,013
\bar{Z}_{k23} (Ω)	0,308+j0,044	0,273+j0,045	0,288+j0,013

Z hodnot impedancí, které jsou v tabulkách 33-35 byly v dalším kroku vypočteny impedance jednotlivých vinutí pomocí následujících vzorců, které jsou vztaženy na fázi L1:

Primární vinutí \bar{Z}_1 lze vypočíst dle následujícího vztahu:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_1 &= \frac{\bar{Z}_{k12} + \bar{Z}_{k13} - \bar{Z}_{k23}}{2} \\ &= \frac{(2,2610 + j0,536) + (4,431 + j0,599) - (0,308 + j0,044)}{2} = \\ &= 3,19 + j0,55 \Omega.\end{aligned}\quad (2.19)$$

Sekundární vinutí \bar{Z}_2 lze vypočíst dle vztahu:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_2 &= \frac{\bar{Z}_{k12} + \bar{Z}_{k23} - \bar{Z}_{k13}}{2} = \\ &= \frac{(2,2610 + j0,536) + (0,308 + j0,044) - (4,431 + j0,599)}{2} = \\ &= -0,93 - j0,01 \Omega.\end{aligned}\quad (2.20)$$

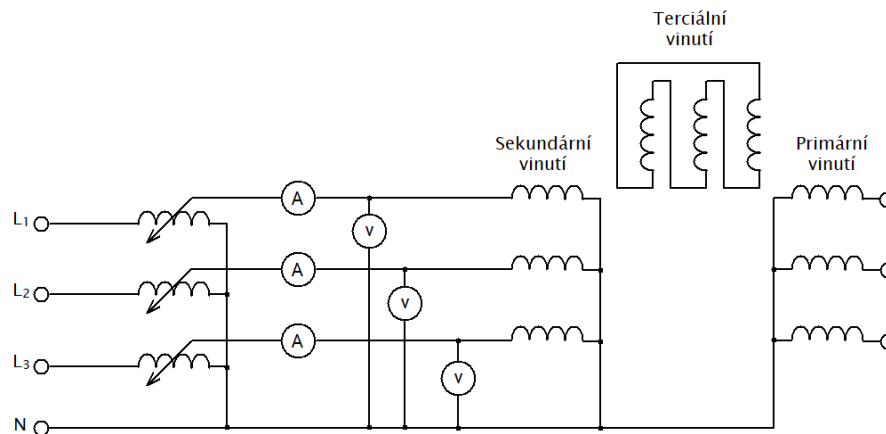
Terciální vinutí \bar{Z}_3 lze vypočíst dle vztahu:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_3 &= \frac{\bar{Z}_{k13} + \bar{Z}_{k23} - \bar{Z}_{k12}}{2} = \\ &= \frac{(4,431 + j0,599) + (0,308 + j0,044) - (2,2610 + j0,536)}{2} = \\ &= 1,24 + j0,054 \Omega.\end{aligned}\quad (2.21)$$

Tabulka 36: Vypočtené impedance jednotlivých vinutí

	L1	L2	L3
$\bar{Z}_1 (\Omega)$	3,19+ j0,55	3,02+ j0,58	3,03+ j0,55
$\bar{Z}_2 (\Omega)$	-0,93- j0,01	-0,83+ j0,07	3,03+ j0,55
$\bar{Z}_3 (\Omega)$	1,24+j0,054	1,11- j0,03	1,2- j0,13

Dále byla provedena zkouška naprázdno, při této zkoušce bylo měřeno ze sekundárního vinutí transformátoru, jak lze vidět na obrázku 2.22.



Obrázek 2.22 Schéma zapojení měření naprázdno pro zapojení YNyd

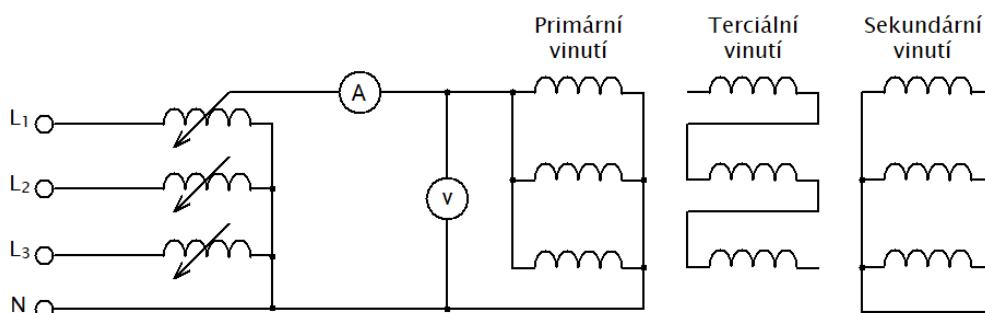
Hodnoty, které byly změřeny a vypočteny jsou v tabulce 37. Tyto hodnoty se opět počítaly dle vzorců (2.7) - (2.9).

Tabulka 37: Změřené a vypočtené hodnoty pro zapojení YNynd

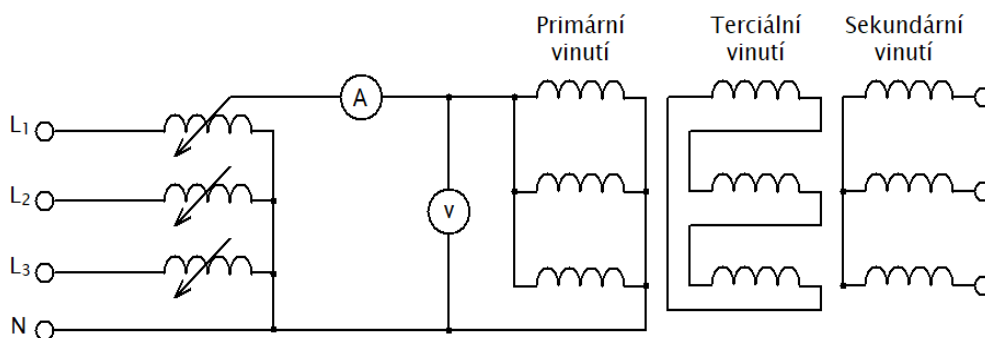
	L1	L2	L3
U (V)	56,16	57,02	56,22
I (A)	1,222	1,317	0,977
$\cos\varphi$ (-)	0,103	0,545	0,849
Z_m (Ω)	45,957	43,295	57,544
R_{Fe} (Ω)	446,189	79,441	67,778
X_m (Ω)	46,203	51,638	108,903

2.2.2 Měření netočivé složky transformátoru v zapojení YNynd

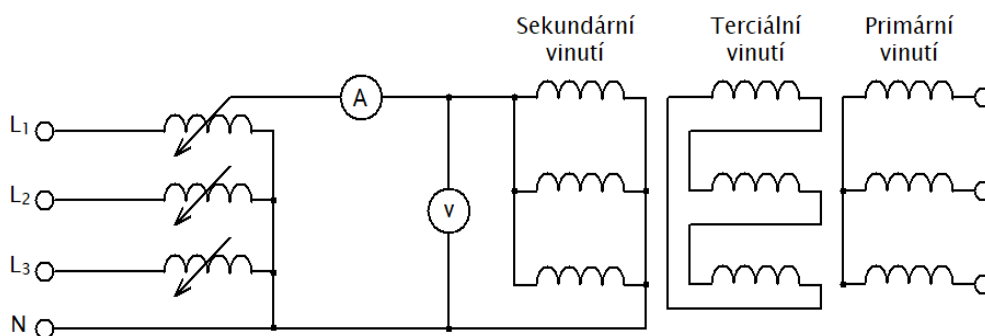
Pro měření netočivé složky je nutno změřit následující tři zapojení. Tato zapojení jsou dostupná v literatuře [11].



Obrázek 2.23 Schéma zapojení měření impedance Z_{012}



Obrázek 2.24 Schéma zapojení měření impedance Z_{013}



Obrázek 2.25 Schéma zapojení měření impedance Z_{023}

Pro správné srovnání výsledků byly hodnoty napětí a proudu převedeny pomocí rovnice (1.68) na stranu sekundárního vinutí. Pro tuto potřebu byl změřen převod transformátoru z primárního na sekundární vinutí $k = 3,993$. Převedené výsledky měření jsou zapsány v tabulce 38.

Tabulka 38: Měření netočivé složky trojvinutového transformátoru

	1. měření Z_{012}	2. měření Z_{013}	3. měření Z_{023}
U (V)	0,556	0,575	1,050
I (A)	9,035	8,029	11,500
$\cos\varphi$ (-)	0,884	0,883	0,920
Z (Ω)	0,185	0,215	0,274
R (Ω)	0,163	0,190	0,252
X (Ω)	0,086	0,101	0,107

Z veličin v tabulce 38 byly dále vypočteny hodnoty jednotlivých impedancí. Každá z vypočtených impedancí představuje netočivou složku pro jednotlivé vinutí, respektive impedance Z_{01} je netočivá složka primárního vinutí, impedance Z_{03} terciálního. Při výpočtech byly použity rovnice (2.15) - (2.17). Výsledné hodnoty jsou zapsány v tabulce 39.

Tabulka 39: Výsledné impedance netočivé složky

	Z_{01}	Z_{02}	Z_{03}
$Z_{(0)}$ (Ω)	0,064	0,122	0,152
$R_{(0)}$ (Ω)	0,051	0,113	0,140
$X_{(0)}$ (Ω)	0,040	0,046	0,061
$\bar{Z}_{(0)}$ (Ω)	$0,051 + j0,040$	$0,113 + j0,046$	$0,140 + j0,061$

3. NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ TRANSFORMÁTORU

Tato kapitola se zabývá modelováním transformátoru a určením jeho parametrů numerickým výpočtem. K tomuto účelu byl použit dvojvinutový transformátor se sériovým číslem 55056, který byl změřen v předchozí kapitole.

Modely transformátoru byly tvořeny v programech PeMag a Ansys Electronics [12]. Postupy, které byly použity pro tvorbu jednotlivých modelů se řídily návody, které lze dohledat v sekci Help v každém z těchto programů. V následujících podkapitolách budou popsány jednotlivé postupy a zhodnocení jejich proveditelnosti. Výstupy z těchto simulací jsou následně zaznamenány.

3.1 Určení parametrů transformátoru

Parametry transformátoru TOC 34040-0126 se sériovým číslem 55056, byly zjištěny přímo od výrobce.

Výrobce udává, že jádro transformátoru bylo střídavě složeno z výlisů 3UI120 tedy EI200x200 a jejich materiál je označen jako M330-50 A.

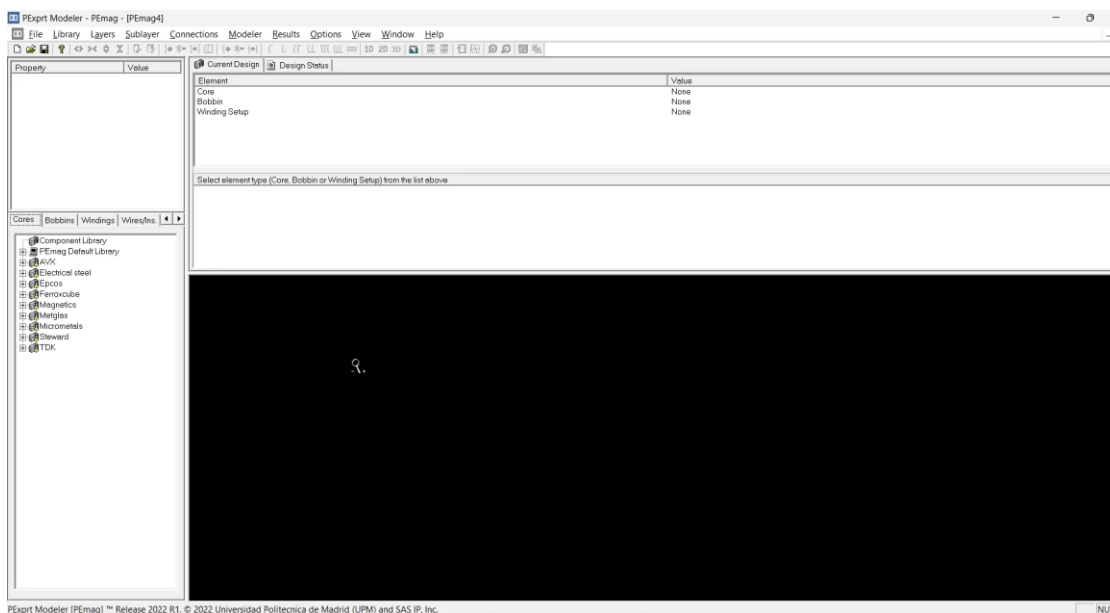
Vinutí transformátoru jsou tvořena měděnými lakovanými vodiči. Primární vinutí je tvořeno 514 závitů s vodičem o průměru 1 mm. Sekundární vinutí je tvořeno 310 závitů s vodičem o průměru 1,25 mm. Mezi jednotlivými vinutími je izolační vrstva skládající se z izolační folie. Tato folie má pět vrstev a jedna vrstva má tloušťku 0,075mm.

Vinutí jsou navinuta na jednodílnou izolační kostru UI120/40/1 OD Wz6301/1 OD. Rozměry izolační kostry lze nalézt v katalogovém listu [13].

3.2 Tvorba modelu v programu PeMag

V programu PeMag lze vytvořit transformátor s použitím předem definovaných součástí. Součásti v defaultní knihovně jsou vhodné pro modelování malých transformátorů, tudíž jejich rozměry nedostačovaly pro tvorbu modelu. Bylo tedy nutné jednotlivé díly vytvořit. Tvorba jednotlivých dílů byla provedena na základě technických informací, které byly zmíněny výše.

Pro vytvoření modelu je nutné postupně nadefinovat jednotlivé záložky, které jsou zobrazeny na obrázku 3.1 v levé části rozhraní.

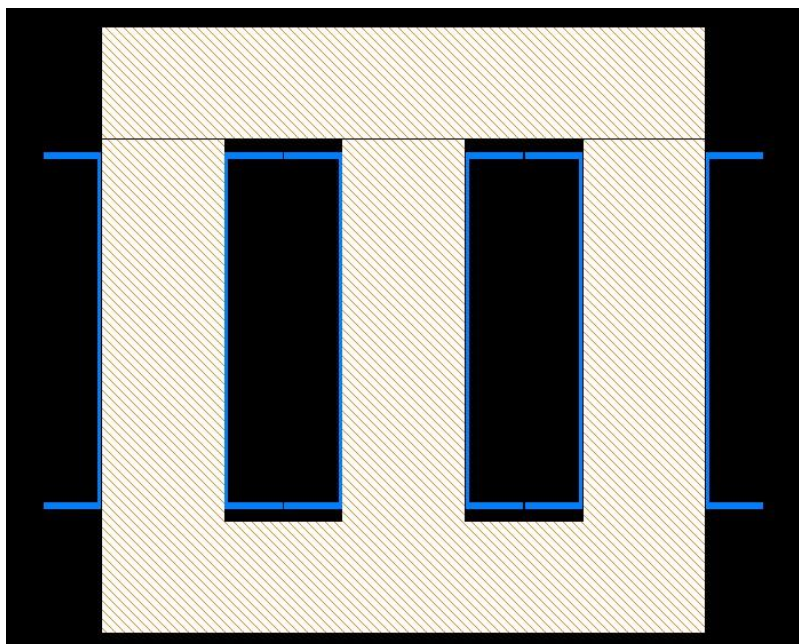


Obrázek 3.1 Rozhraní programu PeMag

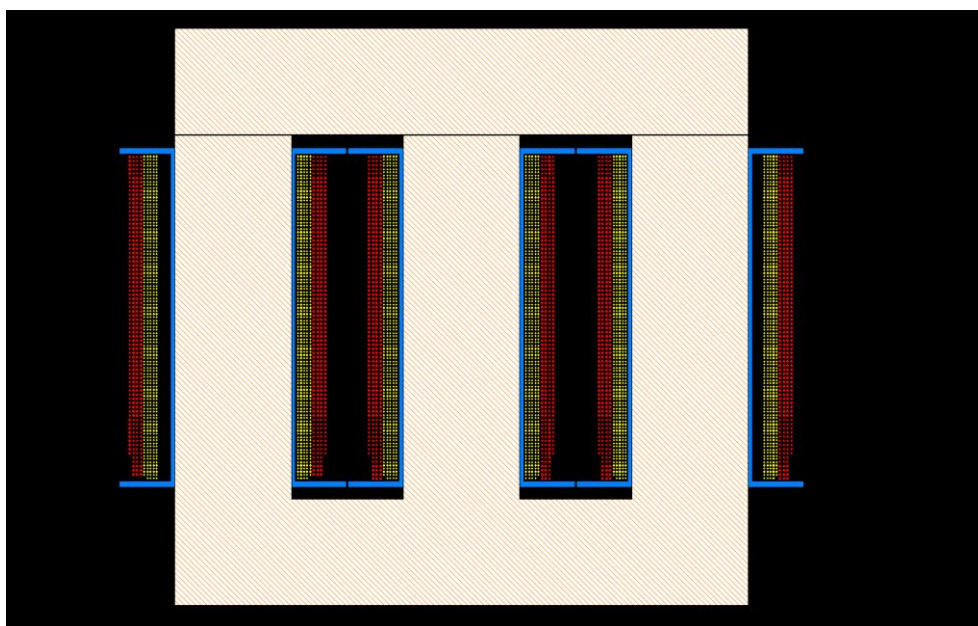
Nejprve bylo nutné nadefinovat rozměry železného jádra. Na základě těchto rozměrů byl programem vypočten objem a obsah jádra. Vytvořené jádro transformátoru bylo poté přidáno do vytvářeného modelu přetažením do černé pracovní plochy.

Následně byly definovány rozměry kostry vinutí transformátoru v sekci Bobbins. Kostra byla poté taktéž přidána na pracovní plochu.

Na obrázku 3.2 je zobrazeno programem vytvořené železné jádro s kostrami vinutí.



Obrázek 3.2 Železné jádro s kostrou vinutí v programu PeMag



Obrázek 3.4 Detail modelu transformátoru

Ve složce Core Material byly nadefinovány parametry materiálu pro jádro transformátoru a v nastavení jádra byla spuštěna kalkulace materiálu.

Následně po zadání veškerých parametrů bylo nezbytné provést kontrolu ve složce design status a poté bylo možné spustit generování modelu. Model lze vygenerovat 2D, nebo 3D. Tyto modely, lze následně použít v programu Ansys Electronics a Ansys Twinbuilder.

Tvorba 3D modelu do programu Ansys Electronics nebyla vhodná kvůli způsobu generace vinutí a náročnosti generace modelu. Programem vygenerovaný 3D model transformátoru byl nevhodný pro simulaci jednotlivých složek, protože zde nebyla možnost vytvořit jednotlivá zapojení jednotlivých vinutí (Y_d, Y_{Nd} atp.). Úprava vygenerovaného modelu pro požadované simulace různých zapojení vinutí by byla časově náročná a výsledný model by byl velmi komplexní, což by vyžadovalo velmi vysokou výpočetní paměť. Proto bylo od automatického generování 3D modelu programem PeMag a jeho výpočtu upuštěno.

Dále se nabízí možnost tvorby 2D modelu programem PeMag, který je následně importován do programu Twinbuilder. V programu Twinbuilder se následně zapojila jednotlivá vinutí dle schématu a byla provedena simulace. Tato možnost se prokázala taktéž jako nevhodná, neboť program PeMag nebyl schopný vygenerovat takto velký model transformátoru.

Z provedených modelování a výpočtů se tedy jeví, že použití programu PeMag je vhodnější pro tvorbu menších modelů a pro tvorbu řešeného silového transformátoru se jeví jako nevhodný

3.3 Tvorba modelu v programu Ansys Electronics 2024

Program PeMag umožňuje dle zjednodušeného zákresu automatickou generaci modelu pro program Ansys Electronics. Nicméně model transformátoru lze v programu Ansys Electronic provést i manuálně, přičemž při modelování je možné provést určitá další zjednodušení. Program disponuje vlastním grafickým rozhraním a umožňuje tvorbu 2D i 3D modelů, které jsou následně počítány metodou konečných prvků.

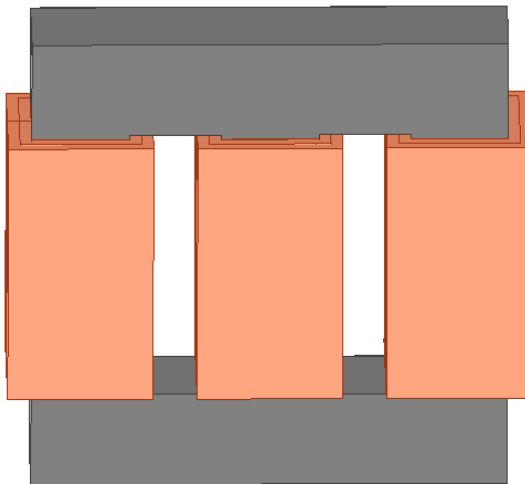
Modely, byly tvořeny v 3D rozhraní a musely být zjednodušeny kvůli nárokům na výpočetní paměť. Zjednodušeným modelům se následně nadefinoval počet závitů a vinutí bylo nastaveno jako externí. Následně se vytvořil externí obvod pomocí modulu External circuits. Tato funkce umožňuje vytvořit zapojení pro zjednodušené modely tak, že každé vinutí zde má přiřazenou značku s popisem. Nevýhodou tohoto modulu bylo, že pokud byl nastaven druh řešení pro vířivé proudy, lze používat jen pasivní prvky v externím obvodu, což ale není v tomto případě omezující.

V práci bylo zkoumáno několik druhů modelů. Tyto modely byly různě zjednodušovány a bylo zkoumáno, zda se některý z nich přiblíží naměřeným výsledkům. Skutečný transformátor, dle kterého byly tvořeny modely je na obrázku 3.5.



Obrázek 3.5 Transformátor se sériovým číslem 55056

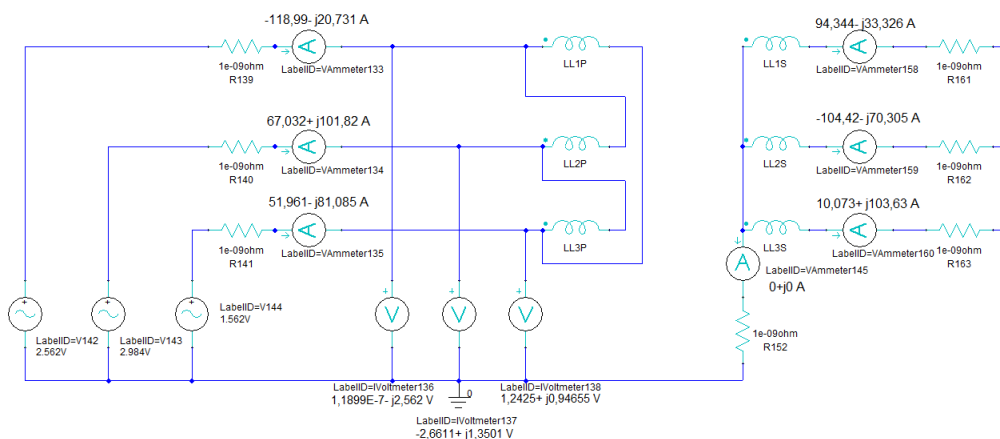
Na obrázku 3.6 je vyobrazen transformátor s pracovním označením jako Model 3. Tento model dosahoval nejnižší chyby v porovnání se skutečnými výsledky v zapojení Dyn1. Tento model je složen ze železného jádra transformátoru a hranolů, které představují jednotlivá vinutí. Pro tento model nebyla uvažována kostra cívek transformátoru a izolační folie mezi jednotlivým vinutím. Ostatní vytvořené modely včetně jejich popisu jsou k nalezení v příloze E. Výsledky pro tyto ostatní modely jsou uvedeny v příloze F. V této příloze jsou rovněž obsaženy simulace pro zapojení YNyn0.



Obrázek 3.6 Zjednodušený model transformátoru

3.3.1 Simulace zkoušky nakrátko

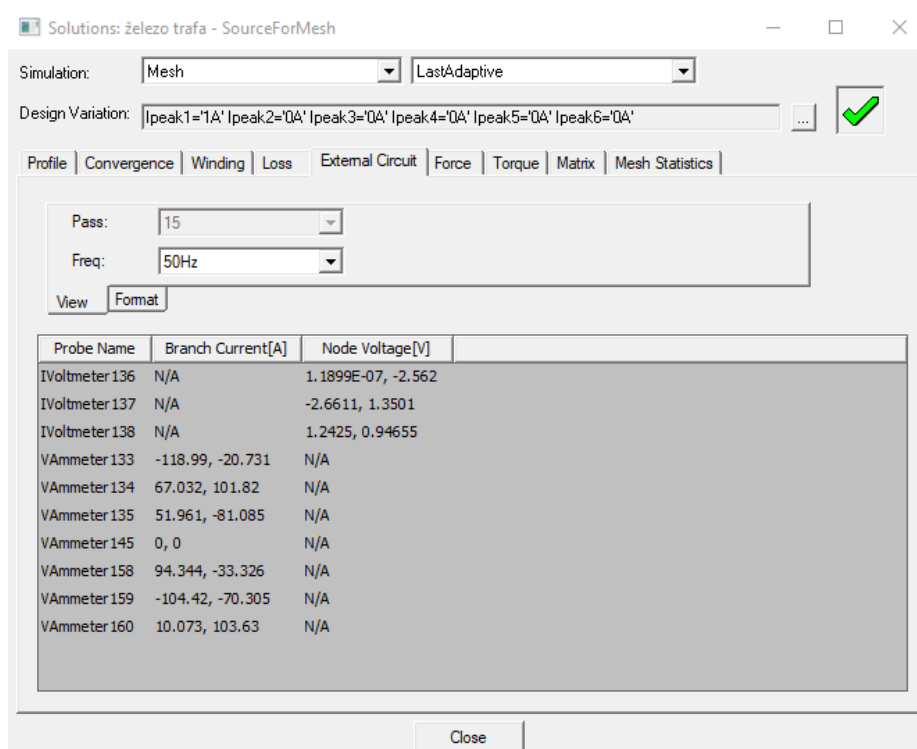
Zapojení externího obvodu pro model transformátoru nakrátko v modulu External circuits bylo navrženo dle obrázku 2.1 a je vyobrazeno na obrázku 3.7. Na tomto obrázku si lze povšimnout, že na stranu nižšího napětí byly přidány ampérmetry, díky kterým bylo možné diagnostikovat chování programu. Tyto ampérmetry musí mít kvůli numerické stabilitě výpočtu připojený nenulový odpor zapojený do série. Do schématu byl tedy přidán velmi nízký odpor, který neměl vliv na chování simulovaného obvodu nakrátko.



Obrázek 3.7 Schéma zapojení nakrátko v modulu External circuits

Po provedení analýzy bylo možné v sekci Solutions, záložce External circuits nalézt výsledky simulovaného měření pro jednotlivé měřicí přístroje. Výsledky simulace transformátoru v zapojení Dyn1 nakrátko lze nalézt na obrázku 3.8. Na tomto obrázku se nachází názvy jednotlivých měřících přístrojů jako Probe Name, ke kterým byly

přidružený jednotlivé výsledky. Pro každý měřicí přístroj byla stanovena reálná a imaginární složka, přičemž program je od sebe navzájem odděluje desetinnou čárkou. Hodnota před desetinnou čárkou představuje reálnou složku a hodnota za desetinnou čárkou představuje složku imaginární.



Obrázek 3.8 Výsledky simulace v zapojení Dyn1 nakrátko

Výsledné hodnoty potřebné pro stanovení požadovaných impedancí byly přepsány do tabulky 40 a 41. V tabulce se také nachází absolutní hodnoty těchto veličin, které lze určit z rovnic (3.1) a (3.2). Tyto výpočty jsou uvedeny pro fázi L1.

Tabulka 40: Simulované proudy nakrátko pro zapojení Dyn1

	$I_{k\check{c}_{sim}} \text{ (A)}$	$I_{kj_{sim}} \text{ (A)}$	$I_{k_{sim}} \text{ (A)}$
L1	-118,990	-20,731	120,782
L2	67,032	101,820	121,904
L3	51,961	-81,085	96,305

Tabulka 41: Simulované napětí nakrátko pro zapojení Dyn1

	$U_{k\check{c}_{sim}} \text{ (V)}$	$U_{kj_{sim}} \text{ (V)}$	$U_{k_{sim}} \text{ (V)}$
L1	1,190E-07	-2,562	2,562
L2	-2,661	1,350	2,984
L3	1,243	0,947	1,562

$$U_{k_sim} = \sqrt{U_{k\check{c}_sim}^2 + U_{kj_sim}^2} = \sqrt{1,19E-07^2 + -2,562^2} = 2,562 \text{ V}, \quad (3.1)$$

$$I_{k_sim} = \sqrt{I_{k\check{c}_sim}^2 + I_{kj_sim}^2} = \sqrt{-118,99^2 + (-20,731)^2} = 120,782 \text{ A}. \quad (3.2)$$

Po zjištění absolutních hodnot napětí a proudu byla vypočtena velikost impedance pomocí vzorce (3.3).

$$Z_{k_sim} = \frac{U_{k_sim}}{I_{k_sim}} = \frac{2,562}{120,782} = 0,021 \Omega. \quad (3.3)$$

Z hodnot byla také vypočtena impedance v komplexním tvaru pomocí rovnice (3.4).

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{k_sim} &= \frac{\bar{U}_{k_sim}}{\bar{I}_{k_sim}} = \frac{-118,990 - j20,731}{1,19 \cdot 10^{-7} - j2,562} = 0,004 + j0,021 \Omega = \\ &= 0,021 \angle 79,216^\circ \Omega. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Výsledkem se zjistil z činné složky odpor a z jalové reaktance. Následně se výsledek převedl ze složkového tvaru na polární a zjistil se úhel, ze kterého bylo možné stanovit účinník $\cos\varphi$.

Výsledné hodnoty simulace nakrátko jsou zapsány v 42.

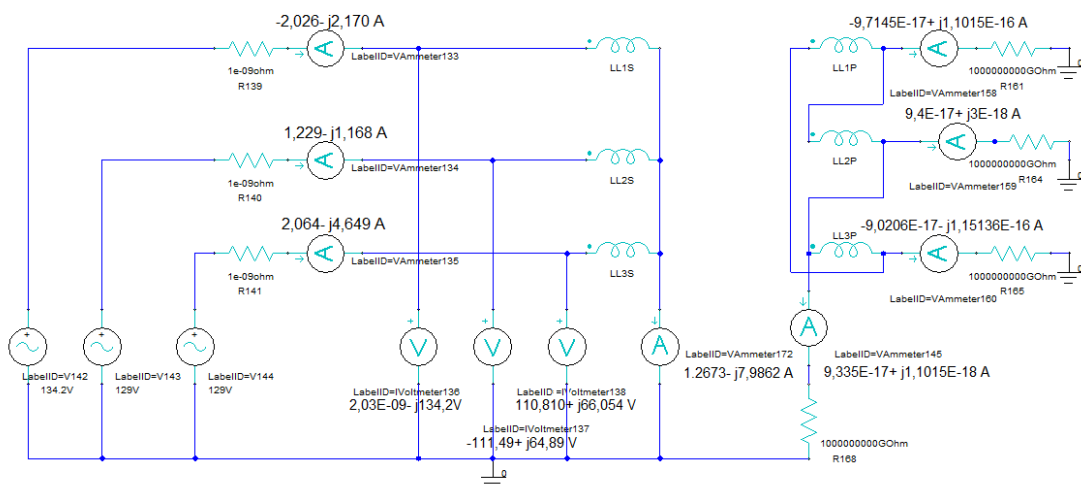
Tabulka 42: Simulace zkoušky nakrátko Dyn1

	L1	L2	L3
U_{k_sim} (V)	2,562	2,984	1,562
I_{k_sim} (A)	120,782	121,904	96,305
$\cos\varphi$ (-)	0,172	-0,113	-0,081
\bar{Z}_{k_sim} (Ω)	0,004+j0,021	-0,003+j0,024	-0,001+j0,016
Z_{k_sim} (Ω)	0,021	0,024	0,016
R_{k_sim} (Ω)	0,004	-0,003	-0,001
X_{k_sim} (Ω)	0,021	0,024	0,016

Transformační převod transformátoru byl roven jedné, tudíž jednotlivé veličiny budou totožné.

3.3.2 Simulace zkoušky naprázdno

V této kapitole byly stanoveny výsledky pro zapojení naprázdno. Postup byl proveden obdobně. Schéma, které bylo použito v programu je na obrázku 3.9. Výsledky byly zapsány do tabulek 43 a 44.



Obrázek 3.9 Schéma zapojení naprázdno v modulu External circuits

Tabulka 43: Simulované proudy naprázdno pro zapojení Dyn1

	$I_{0\check{c}_{sim}}$ (A)	$I_{0j_{sim}}$ (A)	$I_{0_{sim}}$ (A)
L1	-2,026	-2,170	2,968
L2	1,229	-1,168	1,695
L3	2,064	-4,649	5,087

Tabulka 44: Simulované napětí naprázdno pro zapojení Dyn1

	$U_{0\check{c}_{sim}}$ (V)	$U_{0j_{sim}}$ (V)	$U_{0_{sim}}$ (V)
L1	2,030E-09	-134,200	134,200
L2	-111,490	64,890	128,999
L3	110,810	66,054	129,004

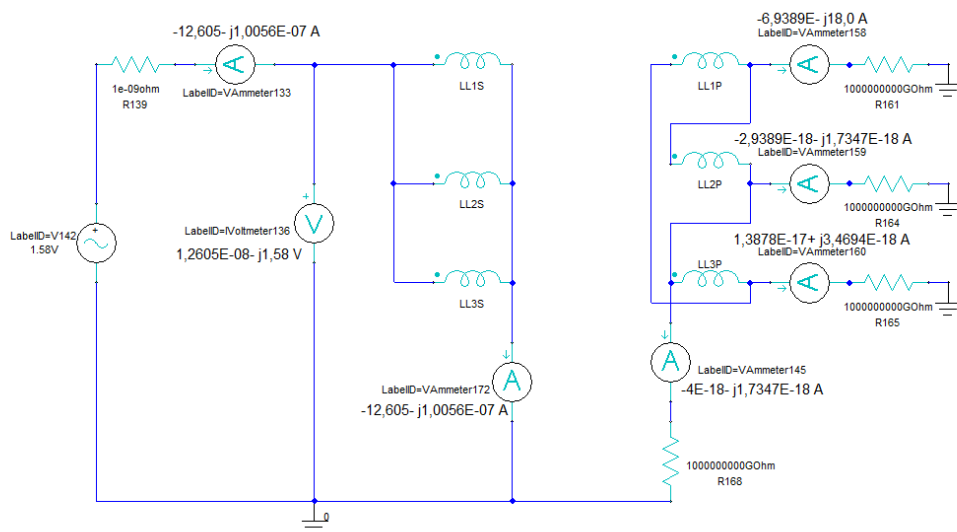
Rovnice (2.7) - (2.9) byly použity pro výpočet zkoušky naprázdno. Výsledky jsou zapsány v tabulce 45.

Tabulka 45: Simulace zkoušky naprázdno Dyn1

	L1	L2	L3
$U_{0_{sim}}$ (V)	134,200	128,999	129,004
$I_{0_{sim}}$ (A)	2,968	1,695	5,087
$\cos\varphi$ (-)	0,731	-0,973	-0,119
$\bar{Z}_{0_{sim}}$ (Ω)	61,844+j66,251	-78,224+j329,769	-212,404+j25,544
$Z_{0_{sim}}$ (Ω)	45,208	76,112	25,361
$R_{0_{sim}}$ (Ω)	61,844	-78,224	-212,404
$X_{0_{sim}}$ (Ω)	66,251	329,769	25,544

3.3.3 Simulace měření netočivé složky

V této kapitole byla provedena simulace pro zapojení měření netočivé složky transformátoru. Schéma zapojení této simulace se nachází na obrázku 3.10.



Obrázek 3.10 Schéma zapojení pro měření netočivé složky v modulu External circuits

Získané hodnoty proudu a napětí byly zapsány v tabulce 46 a 47.

Tabulka 46: Simulované proudy nakrátko pro netočivou složku v zapojení Dyn1

$I_{(0)\check{c}_{sim}} \text{ (A)}$	$I_{(0)j_{sim}} \text{ (A)}$	$I_{(0)_{sim}} \text{ (A)}$
-12,605	-1,0056E-07	12,605

Tabulka 47: Simulované napětí nakrátko pro netočivou složku v zapojení Dyn1

$U_{(0)\check{c}_{sim}} \text{ (V)}$	$U_{(0)j_{sim}} \text{ (V)}$	$U_{(0)_{sim}} \text{ (V)}$
1,2605E-08	-1,58	1,58

Výpočty pro netočivou složku byly provedeny dle rovnice (2.10) a výsledky byly poté zapsány do tabulky 48.

Tabulka: 48: Simulace netočivé složky

$U_{(0)_{sim}} \text{ (V)}$	1,58
$I_{(0)_{sim}} \text{ (A)}$	12,605
$\cos\phi \text{ (-)}$	-6,17E-14
$\bar{Z}_{(0)_{sim}} \text{ (\Omega)}$	-2,319E-14+j0,376
$Z_{(0)_{sim}} \text{ (\Omega)}$	0,376
$R_{(0)_{sim}} \text{ (\Omega)}$	-2,319E-14
$X_{(0)_{sim}} \text{ (\Omega)}$	0,376

4. SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ Z MĚŘENÍ A MODELOVÁNÍ

Tato kapitola pojednává o srovnání výsledků z kapitol 2 a 3. Dále jsou zde uvedeny předpokládané důvody, kvůli kterým mohlo dojít k nepřesnostem. Tyto důvody byly následně zkoumány.

4.1 Srovnání výsledku

V této podkapitole byly srovnány hodnoty změřené a simulované, přičemž se zkoumalo, zda se simulovaná hodnota přiblíží k změřené. Srovnání bylo provedeno pro zapojení Dyn1 a YNyn0. Výsledky byly poté zapsány do tabulek a následně vyneseny do grafů, které lze vidět na obrázcích 4.1 a 4.2 v podkapitole 4.1.3.

4.1.1 Srovnání výsledků Dyn1

Pro následující výpočty byl použit stejný model jako v podkapitole 3.3, hodnoty pochází z tabulek 3 a 45. Pro stanovení míry shody mezi změřenými hodnotami a simulovanými byly stanoveny relativní chyby mezi danými hodnotami a dále pak jejich průměrné hodnoty přes všechny fáze a obě zapojení naprázdno a nakrátko. Příklad výpočtu jednotlivé relativní chyby velikosti impedance (4.1) je vztažen k impedanci první fáze v zapojení naprázdno a lze pomoci něj stanovit relativní chybu výsledků pro impedanci, odpor i reaktanci.

$$\delta_z = \frac{|Z_{0_sim} - Z_m|}{Z_m} \cdot 100 = \frac{|45,208 - 180,134|}{180,134} \cdot 100 = 74,90 \%. \quad (4.1)$$

Výsledné relativní chyby byly zapsány do tabulky 49.

Tabulka 49: Relativní chyba výsledků naprázdno pro Dyn1

	L1	L2	L3
δ_{Z0} (%)	74,90	64,24	86,69
δ_{R0} (%)	71,78	124,58	174,13
δ_{X0} (%)	79,06	15,14	89,99

Relativní chyby byly stejným způsobem stanoveny i pro zapojení nakrátko a pro netočivou složku. Výsledky jsou zapsány v tabulkách 50 a 51.

Tabulka 50: Relativní chyba výsledků nakrátko pro Dyn1

	L1	L2	L3
δ_{Zk} (%)	98,81	98,78	98,80
δ_{Rk} (%)	99,79	100,15	100,10
δ_{Xk} (%)	73,69	96,38	96,32

Tabulka 51: Relativní chyba výsledků pro netočivou složku Dyn1

	Měření 1
$\delta_{Z(0)}$ (%)	80,01
$\delta_{R(0)}$ (%)	100,00
$\delta_{X(0)}$ (%)	25,82

Následně byla vypočtena průměrná relativní chyba pro jednotlivé veličiny podle vztahu (4.2). Tyto hodnoty byly následně zapsány do tabulky 52.

$$\begin{aligned} \delta_{Z_AVG} &= \frac{\delta_{ZkL1} + \delta_{ZkL2} + \delta_{ZkL3} + \delta_{Z0L1} + \delta_{Z0L2} + \delta_{Z0L3} + \delta_{Z(0)}}{7} = \\ &= \frac{76,45 + 20,83 + 44,24 + 74,90 + 64,24 + 86,69 + 80,01}{7} = \\ &= 86,03 \%. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Tabulka 52: Průměrná relativní chyba veličin v zapojení Dyn1

δ_{Z_AVG} (%)	86,03
δ_{R_AVG} (%)	110,08
δ_{X_AVG} (%)	68,06

Výsledky pro ostatní modely v zapojení Dyn1, lze nalézt v příloze G.

4.1.2 Srovnání výsledků YNyn0

V této podkapitole byly provedeny výpočty k určení jednotlivých rozdílů v zapojení YNyn0.

Nejprve byly opět vypočteny jednotlivé rozdíly pro zapojení naprázdno, nakrátko a pro netočivou složku. Pro tyto výpočty byla použita rovnice (4.1). Výsledné hodnoty byly následně zapsány do tabulek 53 - 55. V těchto tabulkách si lze povšimnout, že rozdíly mezi danými hodnotami byly ve většině případech vyšší, než tomu bylo při srovnání zapojení Dyn1.

Tabulka 53: Relativní chyba výsledků naprázdno pro YNyn0

	L1	L2	L3
δ_{ZO} (%)	98,42	98,30	97,07
δ_{RO} (%)	108,54	96,63	104,56
δ_{XO} (%)	95,15	58,11	85,60

Tabulka 54: Relativní chyba výsledků nakrátko pro YNyn0

	L1	L2	L3
δ_{Zk} (%)	98,82	98,76	98,80
δ_{Rk} (%)	99,95	100,11	99,94
δ_{Xk} (%)	94,08	96,23	92,53

Tabulka 55: Relativní chyba výsledků pro netočivou složku YNyn0

	Měření 1	Měření 2	Měření 3
$\delta_{Z(0)}$ (%)	78,82	93,84	94,02
$\delta_{R(0)}$ (%)	100,00	100,00	100,00
$\delta_{X(0)}$ (%)	31,49	93,77	93,90

Dále byly opět vypočteny hodnoty pro průměrný rozdíl jednotlivých veličin dle rovnice (4.2) a ty byly zapsány do tabulky 56.

Tabulka 56: Průměrná relativní chyba veličin v zapojení YNyn0

$\delta_{Z_{AVG}}$ (%)	95,205
$\delta_{R_{AVG}}$ (%)	101,081
$\delta_{X_{AVG}}$ (%)	82,318

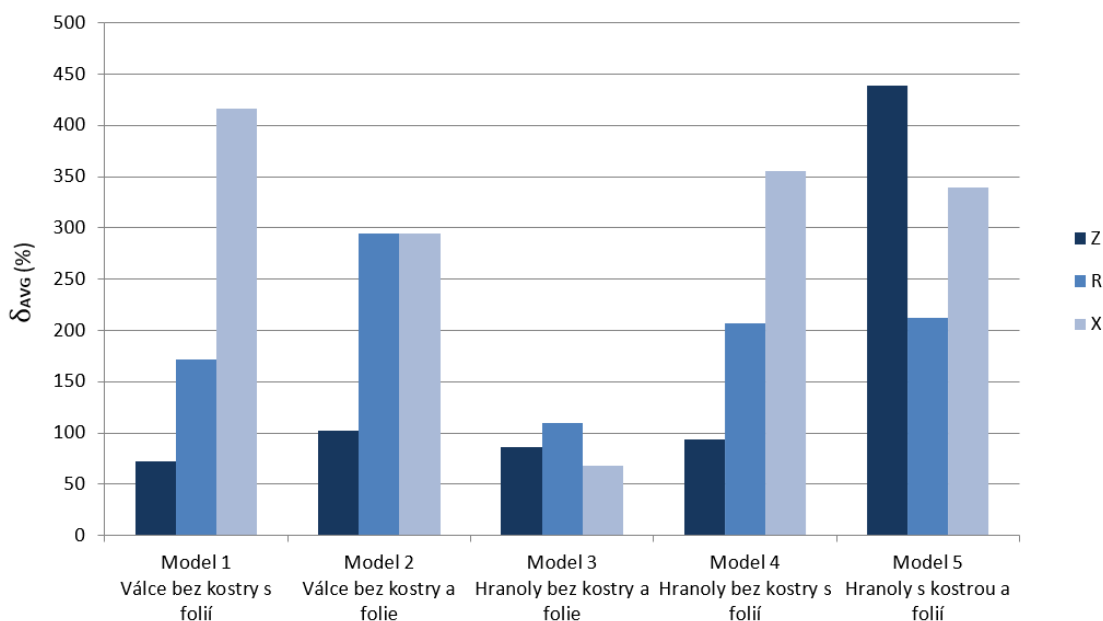
Výsledky pro ostatní modely v zapojení YNyn0 jsou zapsány v příloze H.

4.1.3 Celkové zhodnocení

Z výsledku v podkapitole 4.1.1 lze usoudit, že průměrná relativní chyba mezi měřením a simulací byla velmi vysoká. Tyto rozdíly lze zaznamenat na reálné a imaginární složce impedance, která dosahuje i více než dvojnásobku oproti měřenému výsledku.

V podkapitole 4.1.2 si lze povšimnout, že pro stejný model se celkový rozdíl mezi naměřenými a simulovanými hodnotami snížil použitím zapojení YNyn0.

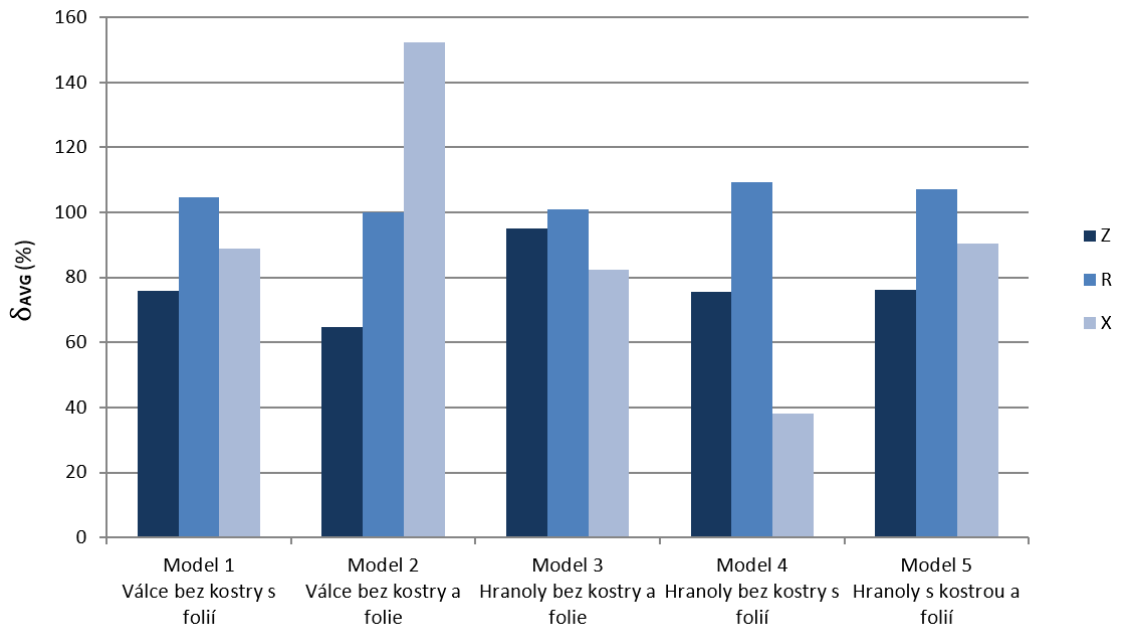
Na obrázku 4.1 byly graficky vyobrazeny jednotlivé průměrné relativní chyby pro různé modely (značené podle přílohy E) v zapojení Dyn1.



Obrázek 4.1 Graf průměrných relativních chyb jednotlivých veličin pro zapojení Dyn1

Na Obrázku 4.1 si lze povšimnout, že model s nejnižší průměrnou relativní chybou byl nejvíce zjednodušený, což by dle předpokladu měl být nejméně přesný model. Ačkoliv má tento model nejnižší odchylku, tak je tato odchylka od měřených hodnot stále velmi odlišná.

Dále byly na obrázku 4.2 graficky zobrazeny hodnoty průměrných relativních chyb pro zapojení YNyn0.



Obrázek 4.2 Graf průměrných relativních chyb jednotlivých veličin pro zapojení YNyn0

Na obrázku 4.2 je možné vidět, že jednotlivé chyby pro různé modely v zapojení YNyn0 se snížily. Tyto hodnoty se pro různé modely více ustálily a byly na přibližně stejné úrovni.

Rozdíly mezi jednotlivými výsledky mohly být způsobeny více faktory. Hlavním faktorem může být špatné vyhodnocení odporu. Kdy program Ansys výpočtem stanovoval příliš malé hodnoty (v řádech desítek $m\Omega$), které nekorespondovaly se změřenými (v řádech jednotek Ω).

Dále mohl být rozdílný výsledek částečně způsoben zapojením samotného obvodu, kdy bylo zapotřebí obě strany spojit, což v některých případech bylo provedeno přes velmi vysoký odpor. Možnou příčinou mohly být také nesymetrické zdroje kvůli kterým zde docházelo k velkým rozdílům.

Na tyto problémy byla zaměřena kapitola 5.

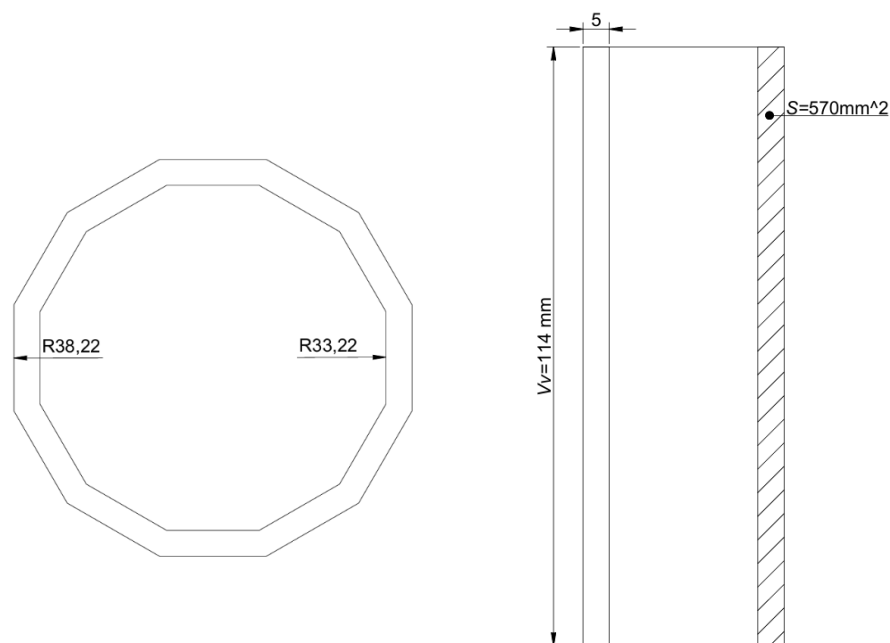
5. VALIDACE METODIKY NUMERICKÉHO MODELOVÁNÍ

Tato kapitola je rozdělena na dílčí kapitoly. V těchto kapitolách byly provedeny experimenty s cílem ověřit, zda jsou modely z předchozích kapitol tvořeny a simulovány správně.

5.1 Simulace válce

Tato podkapitola obsahuje simulace jednoduchého válce o rozměrech sekundárního vinutí modelu transformátoru. Cílem této podkapitoly bylo ověřit, zda by bylo možné docílit stejných výsledků pomocí analytického výpočtu a pomocí programu Ansys electronic s modulem External circuits pro jednoduchou válcovou vzduchovou tlumivku.

Rozměry této válcové vzduchové tlumivky jsou odvozeny z rozměrů kostry vinutí a Modelu 2. Rozměry tohoto modelu jsou zaznamenány na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1 Rozměry vzduchové válcové tlumivky

Z obrázku 5.1 je zřejmé, že tloušťka válcové vzduchové tlumivky je 5 mm.

5.1.1 Analytický výpočet

Impedanci jednoduché válcové tlumivky lze stanovit analyticky z rovnice (5.1), kdy R představuje její činný odpor, který lze vyjádřit pomocí Ohmova zákona a X její reaktanci. Jak činný odpor, tak i reaktance jsou veličiny závislé na materiálu tlumivky a jejích rozměrech. Pro stanovení reaktance tlumivky je použit vztah (5.5).

$$\bar{Z} = R + jX, \quad (5.1)$$

V případě odporu tlumivky se v porovnání se způsobem definování takového modelu v prostředí Ansys nabízí několik variant výpočtu. Celkem tak byly vyzkoušeny 3 varianty. První a druhá se lišily velikostí použitého průřezu vodiče tlumivky, kdy v prvním případě bylo uvažováno, že celá plocha podélného řezu tlumivkou byla plně vyplněna vodičem (např. pro 100 závitů byl pak průřez jednoho vodiče roven 1/100 celkové plochy řezu tlumivkou). V tomto prvním případě tak byl průřez vodiče definován rozměry daného vinutí a nikoli samotného vodiče. V druhém případě pak byl použit štítkový průřez drátu vinutí, a tedy celková plocha N závitové tlumivky pak byla jako $N \cdot S_{\text{vodič}}$. Poslední třetí varianta výpočtu pak byla obměnou druhé varianty, kdy bylo uvažováno kroucení vodičů pomocí součinitele kroucení a celkový odpor se tak zvýšil.

- A) Model využíval průřez samotné válcové tlumivky, který se následně rozdělil dle počtu závitů. Pro výpočty odporu byla využita střední délka válce, která se stanovila z obvodu válce, jak vyplývá ve vztahu (5.2).

$$l_s = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot 35,717 = 224,416 \text{ mm}. \quad (5.2)$$

Poloměr byl získán odečtem z programu Ansys electronic, takto byl získán i samotný průřez válcové tlumivky. Materiály, které zde byly použity jsou součástí knihovny programu Ansys electronic. Tudíž odsud byla převzata rezistivita a permeabilita mědi, pro výpočet odporu a indukčnosti.

Odpor tlumivky lze stanovit pomocí rovnicí (5.3), kde plocha S je vypočtena, jako výška a tloušťka tlumivky. V této rovnici bylo uvažováno sto závitů a výsledky byly zapsány do tabulky 57, kde byly také zaznamenány hodnoty pro různé počty závitů.

$$R = \rho \cdot \frac{l_s \cdot N}{\frac{S}{N}} = \frac{1}{58000000} \cdot \frac{224,416 \cdot 10^{-3} \cdot 100}{\frac{570 \cdot 10^{-6}}{100}} = 0,068 \Omega. \quad (5.3)$$

Tabulka 57: Výsledky analytického výpočtu dle A – odpor s průřezem válce

Počet závitů	$R (\Omega)$
1	6,788E-06
10	6,788E-04
50	0,017
100	0,068
310	0,652

V dalším kroku byla vypočtena indukčnost, která byla taktéž vypočtena pro různé počty závitů (v rovnici (5.4) pro sto závitů) a hodnoty jsou zapsány v tabulce 58.

V rovnici (5.4) je uvedena plocha S_0 . Tato plocha představuje celkovou plochu podstavy tlumivky tzn. jedná se o plný kruh o vnějším poloměru vzduchové cívky.

$$L = \mu \cdot N^2 \cdot \frac{S_0}{v_v} = 1 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 100^2 \cdot \frac{4,38 \cdot 10^{-3}}{0,114} = 0,483 \cdot 10^{-3} \text{ H}. \quad (5.4)$$

Na závěr byla dopočtena reaktance s pomocí již vypočtené indukčnosti pro síťovou frekvenci 50 Hz dle rovnice (5.5). Výsledky pro různé počty závitů a byly taktéž uvedeny v tabulce 58.

$$X = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 3,192 \cdot 10^{-9} = 0,1517 \Omega. \quad (5.5)$$

Tabulka 58: Výsledky analytického výpočtu indukčnosti a reaktance

Počet závitů	L (H)	X (Ω)
1	48,300E-09	15,170E-06
10	4,830E-06	1,517E-03
50	0,121E-03	37,930E-03
100	0,483E-03	0,1517
310	4,642E-03	1,458

Hodnoty reaktance a indukčnosti byly vypočteny pouze jednou, protože rovnice neumožnila zohlednění těchto parametrů, tak jako u odporu.

B) Tato varianta modelu využívala pro výpočet odporu tlumivky průměr zadaný hodnotou. Tedy celková plocha všech N závitů nevyplňovala úplně plochu podélného řezu tlumivkou. Jelikož pro tlumivku byl zvolen vodič totožný jako pro modelovaný transformátor s průměrem vodiče vinutí 1,25 mm (viz. kap 3.1.), tak byla stanovena plocha průřezu jednoho vodiče dle vztahu (5.6).

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1,25^2}{4} = 1,227 \text{ mm}^2. \quad (5.6)$$

Dále byl stanoven odpor pro tuto variantu dle vztahu (5.7).

$$R = \rho \cdot \frac{l_s \cdot N}{S} = \frac{1}{58000000} \cdot \frac{224,416 \cdot 10^{-3} \cdot 100}{1,227 \cdot 10^{-6}} = 0,315 \Omega. \quad (5.7)$$

Výsledné hodnoty odporu, stanovené na základě rovnice (5.7), byly vypočteny a zaznamenány pro různý počet závitů v tabulce 59.

Tabulka 59: Výsledky analytického výpočtu dle B – odpor s průřezem vodiče

Počet závitů	R (Ω)
1	3,15E-03
10	0,0315
50	0,1577
100	0,3153
310	0,9776

C) Poslední třetí varianta modelu uvažovala se zvýšenou délkou vodiče, jež byla způsobena navíjením na cívku. Pro tento účel zde byl použit součinitel délky kroucení.

Pro výpočet odporu se zohledněním součinitele délky kroucení byla použita rovnice (5.8). V rovnici byl použit součinitel délky kroucení $k = 1,04$.

$$R = \rho \cdot \frac{k \cdot l_s \cdot N}{S} = \frac{100}{58000000} \cdot \frac{1,04 \cdot 224,416 \cdot 10^{-3} \cdot 100}{1,227 \cdot 10^{-6}} = 0,328 \, \Omega. \quad (5.8)$$

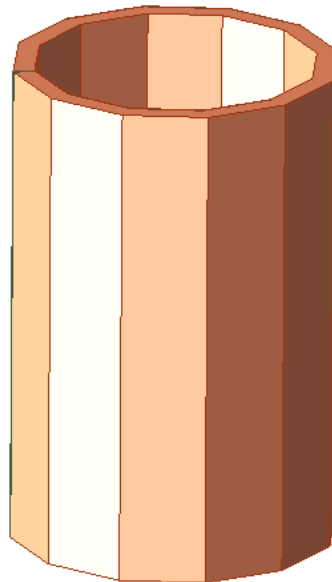
Výsledky, které vzešli z rovnice (5.8), byly zaznamenány do tabulky 60, kde jsou uvedeny i pro ostatní počty závitů.

Tabulka 60: Výsledky analytického výpočtu dle C – odpor se součinitelem délky kroucení

Počet závitů	$R (\Omega)$
1	0,003
10	0,033
50	0,164
100	0,328
310	1,017

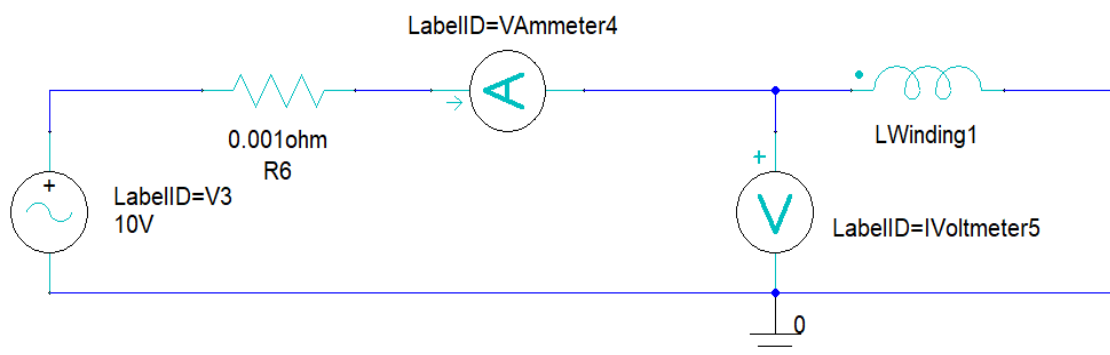
5.1.2 Simulace válce programem Ansys electronic

Jak již bylo zmíněno pro simulaci bylo použito samostatné sekundární vinutí jedné fáze transformátoru bez jádra. Model tlumivky je vyobrazen na obrázku 5.2.



Obrázek 5.2 Model válce představující vinutí

Tento model byl opět zapojen přes funkci External circuits a schématické zapojení lze vidět na obrázku 5.3. Na napěťovém zdroji, který byl použit bylo nastaveno napětí 10 V.



Obrázek 5.3 Schéma zapojené pro simulaci válce

Následně byla spuštěna simulace pro model A, který uvažoval celkový průřez válce. Výsledky jsou zapsány v tabulce 61 a 62. K těmto výsledkům byly numericky získány absolutní hodnoty dle rovnic (3.1) a (3.2).

Tabulka 61: Výsledky proudů s uvažovaným průřezem válce

Počet závitů	I_{ε} (A)	I_j (A)	I (A)
1	-98,1400	-9999,0000	9999,4816
10	-4999,1000	-5093,4000	7136,7867
50	-406,8700	-16,5820	407,2078
100	-101,8800	-1,0380	101,8853
310	-10,6040	-0,0112	10,6040

Tabulka 62: Výsledky napětí s uvažovaným průřezem válce

Počet závitů	U_{ε} (A)	U_j (A)	U (A)
1	0,09814	-0,00096	0,09814
10	4,99910	-4,90660	7,00469
50	0,40687	-9,98340	9,99169
100	-0,10188	-9,99900	9,99952
310	0,01060	-10,00000	10,00001

Následně byly dle výsledků získány hodnoty účinníků pomocí rovnice (3.4). Výsledky účinníků pro jednotlivé počty závitů jsou zapsány v tabulce 63.

Tabulka 63: Účinníky pro simulace s uvažovaným průřezem válce

	$\text{Cos}\varphi$ (-)
1	-1,25E-07
5	5,51E-06
10	3,79E-07
100	2,04E-02
310	4,89E-08

Pomocí rovnice (3.4) byly stanoveny hodnoty odporu a reaktance. Indukčnost byla poté vypočtena pomocí rovnice (5.9) z reaktance.

$$L = \frac{X}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,09812}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,3123 \cdot 10^{-3} \text{ H.} \quad (5.9)$$

Následně byly tyto výsledky pro jednotlivé počty závitů zapsány v tabulce 64.

Tabulka 64: Výsledky simulace s uvažovaným průřezem válce

Počet závitů	R (Ω)	L (H)	X (Ω)
1	-1,228E-12	3,124E-08	9,815E-06
10	5,412E-09	3,124E-06	9,815E-04
50	9,299E-09	7,810E-05	2,454E-02
100	2,002E-03	3,123E-04	9,812E-02
310	4,610E-08	3,002E-03	9,430E-01

Dále byla provedena simulace s rozdělením válce na jednotlivé průřezy vodičů tedy v souladu s analytickým způsobem výpočtu B a C. Tato funkce lze nastavit přímo v nastavení materiálu. Byl tedy zvolen kruhový průřez vodiče s průměrem 1,25 mm.

Simulace byla provedena pro součinitel délky kroucení 1 a 1,04. Vzhledem k identickým výsledkům obou simulací byly postupy a výsledky uvedeny společně.

Výsledky proudů a napětí vzniklé simulací s rozdělením válce na jednotlivé průřezy vodičů byly zapsány do tabulek 65 a 66. Rozdíly výsledků byly tak malé, že bylo nutné jednotlivé výsledky uvést se čtyřmi desetinnými místy.

Tabulka 65: Výsledky proudů s uvažováním průřezu vodiče

Počet závitů	I_c (A)	I_j (A)	I (A)
1	-98,120	-9999,000	9999,481
10	-4999,100	-5094,400	7137,500
50	-406,950	-16,588	407,288
100	-101,900	-1,038	101,905
310	-10,604	-0,011	10,604

Tabulka 66: Výsledky napětí s uvažováním průřezu vodiče

Počet závitů	U_c (A)	U_j (A)	U (A)
1	0,09812	-0,00096	0,09812
10	4,99910	-4,90560	7,00399
50	0,40695	-9,98340	9,99169
100	-0,10190	-9,99900	9,99952
310	0,01060	-10,00000	10,00001

Z výsledků se opět stanovily účinníky dle rovnice (3.4) a jejich výsledné hodnoty byly zapsány do tabulky 67.

Tabulka 67: Účinitky pro simulace s uvažováním průřezu vodiče

	$\text{Cos}\varphi (-)$
1	2,80E-09
5	1,76E-06
10	-9,00E-07
100	2,04E-02
310	4,89E-08

V dalším kroku byl stanoven odpor a reaktance z algebraického tvaru rovnice (3.4). Pomocí vztahu (5.9) byla vypočtena indukčnost. Výsledky byly zapsány do tabulky 68.

Tabulka 68: Výsledky simulace s uvažováním průřezu vodiče

Počet závitů	$R (\Omega)$	$L (H)$	$X (\Omega)$
1	2,750E-14	3,124E-08	9,813E-06
10	1,724E-09	3,124E-06	9,813E-04
50	-2,208E-08	7,809E-05	2,453E-02
100	-6,244E-08	3,123E-04	9,813E-02
310	4,610E-08	3,002E-03	9,430E-01

Z výsledků simulací si lze povšimnout že výsledné hodnoty odporu při uvážení průřezu jednotlivých závitů na cívce klesají, avšak by jejich hodnota měla stoupat kvůli narůstající celkové délce vinutí.

Výsledné hodnoty indukčností a reaktancí byly téměř ve všech případech totožné, nebo jen s menšími rozdíly.

5.1.3 Srovnání výsledků

Pro účel srovnání výsledku byla změřena skutečná hodnota odporu vinutí na transformátoru ze strany nižšího napětí. Měření proběhlo na každé fázi. Výsledek měření byl stejný, tedy na každé fázi byl naměřen odpor $R = 1,02 \Omega$.

Takto měřená hodnota skutečného vinutí byla použita jako referenční při výpočtu relativní chyby různých výpočetních metod. Výpočet byl proveden dle rovnice (4.1) a výsledky byly zapsány do tabulky 69.

Tabulka 69: Výsledky rozdílů jednotlivých metod pro 310 závitů

Model	$\delta_R (\%)$
Analytický dle A – průřez válce	36,05
Analytický dle B – průřezy vodiče	4,16
Analytický dle C – s činitelem kroucení	0,33
Simulace dle A – průřez válce	100,00
Simulace dle B a C – průřez vodiče	100,00

V tabulce 69 si lze povšimnout, že analytická metoda se postupným zpřesňováním modelu dokázala více přiblížit skutečné hodnotě odporu. Výsledný odpor ze simulací pro různé varianty byl téměř neměnný, jeho hodnota byla velmi nízká.

Dále byly porovnány rozdíly mezi analytickou metodou a simulací. Výpočty byly opět uskutečněny pomocí rovnic (4.1). Srovnání pro variantu výpočtu s průřezem válce bylo zapsáno do tabulky 70.

Tabulka 70: Srovnání rozdílů hodnot s průřezem válce

	δ_R (%)	δ_L (%)	δ_X (%)
1	100,00	35,32	35,32
5	100,00	35,32	35,32
10	100,00	35,32	35,32
100	97,05	35,33	35,33
310	100,00	35,33	35,33

Obdobně byla vytvořena tabulka 71, kde došlo ke srovnání veličin s uvažováním průřezů vodičů, jelikož indukčnost byla stanovena jen jedním způsobem, tak byla výsledná hodnota ze simulace této varianty B porovnána se stejnými hodnotami indukčnosti jako pro variantu A. Veličiny byly takto porovnány i v tabulce 72.

Tabulka 71: Srovnání rozdílů hodnot s průřezem vodiče

	δ_R (%)	δ_L (%)	δ_X (%)
1	100,00	35,33	35,33
5	100,00	35,33	35,33
10	100,00	35,33	35,33
100	99,37	35,34	35,34
310	100,00	35,33	35,33

Výsledky srovnání s uvažováním průřezu vodiče a prodloužení vodiče pomocí součinitel délky kroucení byly zapsány do tabulky 72.

Tabulka 72: Srovnání rozdílů hodnot s průřezem vodiče s uvažováním prodloužení

	δ_R (%)	δ_L (%)	δ_X (%)
1	100,00	35,33	35,33
5	100,00	35,33	35,33
10	100,00	35,33	35,33
100	100,00	35,33	35,33
310	100,00	35,33	35,33

Z tabulek 70 - 72 si lze povšimnout, že rozdíly mezi jednotlivými odpory byly vysoké, tyto rozdíly byly způsobeny velmi nízkým odporem, který byl vypočten programem Ansys Electronics.

Rozdíly pro reaktanci a indukčnost byly průměrně 35,33 %. Tyto rozdíly mohly být způsobeny do jisté míry zjednodušujícími předpoklady, které vznikly výpočtem analytickou metodou rozdíly.

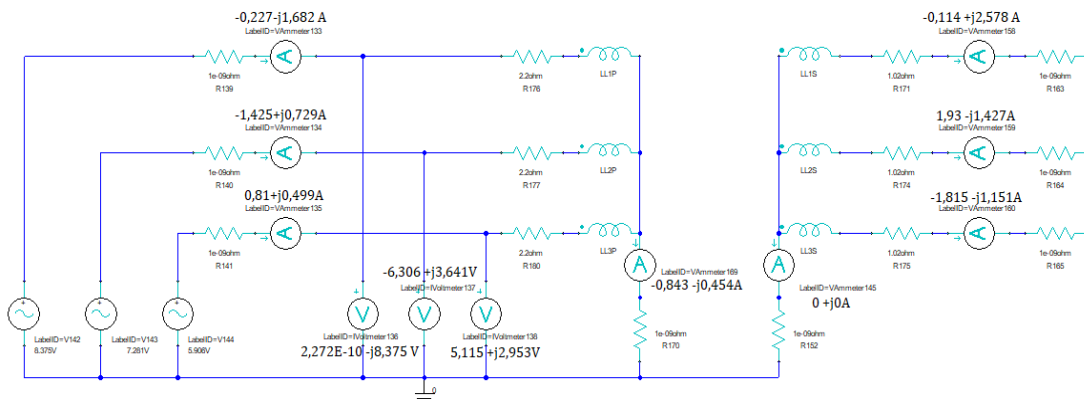
5.2 Simulace se sériově řazeným odporem k vinutím

Následující podkapitola se zabývala přiřazením odporu vinutí do série s vinutím v modulu External circuits. Cílem bylo zjistit, zda bude obvod ve funkci External circuit schopný správně nasimulovat jednotlivé zkoušky, kterými byl již podroben a vyhodnotit je správně. Byly tak provedeny simulace obdobné jako v kapitole 3.3 s tím, že k daným vinutím transformátoru byly přidány navíc odpory do každé fáze. Tyto odpory byly zvoleny s ohledem na provedené měření DC odporů skutečného transformátoru, které byly pro primární vinutí změřena $2,2 \Omega$ a pro sekundární $1,02 \Omega$.

Přiřazením odporu k vinutí by se mohl změnit celkový účinník a mohlo by tak dojít k přesnějším výsledkům, které by mohly posloužit jako orientační pro návrh transformátoru. Pro simulaci byl vybrán model, ve kterém byly jednotlivé cívky ve tvaru hranolů, bez kostry vinutí a bez folie (Model 3). Model transformátoru obsahoval zapojení YNyn0. Tento model byl vybrán kvůli rovnoměrnosti relativních chyb jednotlivých veličin.

5.2.1 Zkouška nakrátko

Tato kapitola se zabývala zkouškou nakrátko, ta byla uskutečněna dle schématu na obrázku 5.4.



Obrázek 5.4 Zkouška nakrátko s předřazeným odporem

Výsledky této zkoušky byly zapsány do tabulky 73 a 74, kde se také nachází absolutní hodnoty jednotlivých veličin vypočtených dle rovnic (3.1) a (3.2).

Tabulka 73: Simulované proudy nakrátko s předřazeným odporem

	$I_{k\check{c}_{sim}} \text{ (A)}$	$I_{kj_{sim}} \text{ (A)}$	$I_{k_{sim}} \text{ (A)}$
L1	-0,227	-1,682	1,697
L2	-1,425	0,729	1,601
L3	0,810	0,499	0,951

Tabulka 74: Simulované napětí nakrátko s předřazeným odporem

	$U_{k\acute{e}_sim}$ (V)	$U_{k_j_sim}$ (V)	U_{k_sim} (V)
L1	2,270E-10	-8,375	8,375
L2	-6,306	3,641	7,281
L3	5,115	2,953	5,906

Dále byly stanoveny hodnoty pro impedance a účinník z rovnic (3.3) a (3.4). Z rovnice (3.4) byla také stanovena reaktance a odpor. Výsledky byly zapsány do tabulky 75.

Tabulka 75: Výsledky simulace zkoušky nakrátko s předřazeným odporem

	L1	L2	L3
U_{k_sim} (V)	8,375	7,281	5,906
I_{k_sim} (A)	1,697	1,601	0,951
$\cos\varphi$ (-)	0,991	0,544	0,999
\bar{Z}_{k_sim} (Ω)	4,890+j0,661	2,472+j3,818	6,206+j0,176
Z_{k_sim} (Ω)	4,934	4,548	6,209
R_{k_sim} (Ω)	4,890	2,472	6,206
X_{k_sim} (Ω)	0,661	3,818	0,176

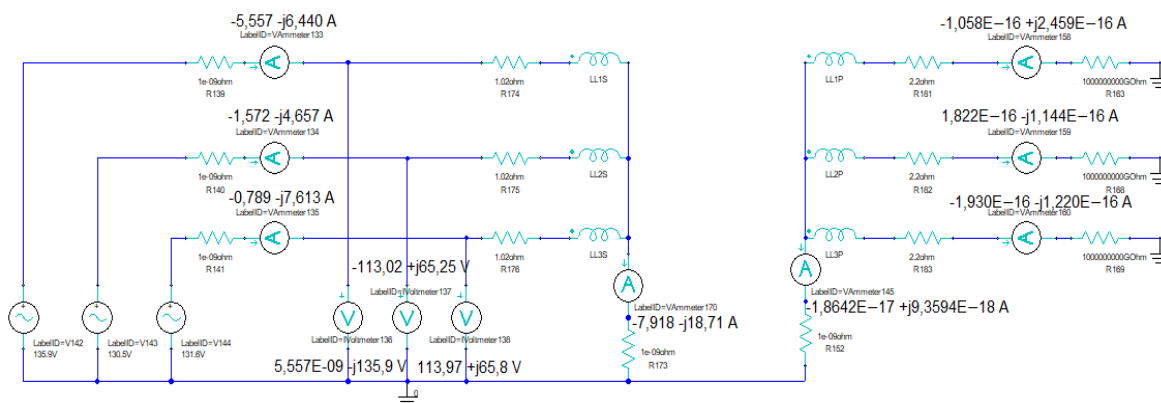
Výsledky z tabulky 75 byly převedeny na stranu nižšího napětí dle rovnic (2.4) - (2.6). Výsledky byly následně zapsány v tabulce 76.

Tabulka 76: Převedené veličiny zkoušky nakrátko s předřazeným odporem

Z_{k_sim} (Ω)	1,645	1,516	2,070
R_{k_sim} (Ω)	1,630	0,824	2,069
X_{k_sim} (Ω)	0,220	1,273	0,059

5.2.2 Zkouška naprázdno

V této kapitole byla uskutečněna zkouška naprázdno její schéma zapojení je na obrázku 5.5.



Obrázek 5.5 Zkouška naprázdno s předřadným odporem

Výsledky zkoušky naprázdno byly zapsány v tabulkách 77 a 78, do tabulek byly dále vypočteny absolutní hodnoty proudu a napětí, které byly spočteny na základě rovnic (3.1) a (3.2).

Tabulka 77: Simulované proudy naprázdno s předřazeným odporem

	$I_{0\check{c}_{sim}}$ (A)	$I_{0j_{sim}}$ (A)	$I_{0_{sim}}$ (A)
L1	-5,557	-6,440	8,506
L2	-1,572	-4,657	4,915
L3	-0,789	-7,613	7,654

Tabulka 78: Simulované napětí naprázdno s předřazeným odporem

	$U_{0\check{c}_{sim}}$ (V)	$U_{0j_{sim}}$ (V)	$U_{0_{sim}}$ (V)
L1	5,56E-09	-135,900	135,900
L2	-113,020	65,250	130,503
L3	113,970	65,800	131,601

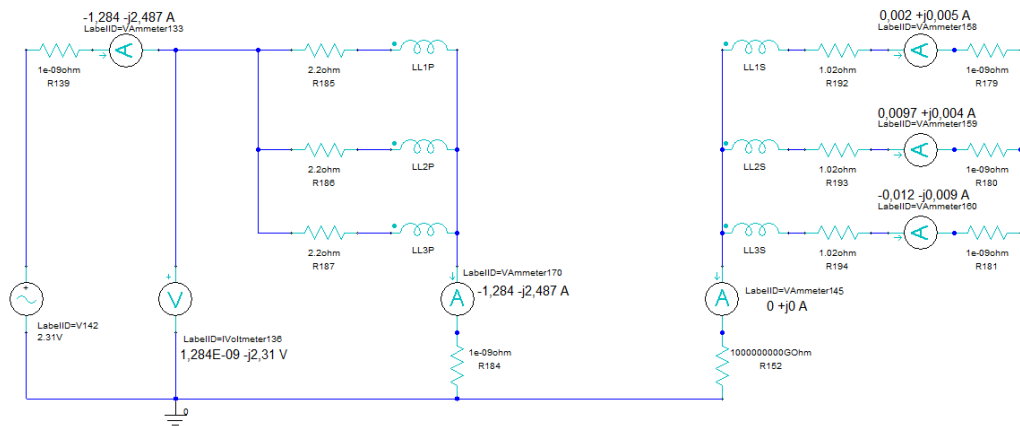
Následně byly použity rovnice (3.3) a (3.4) pro zjištění impedance a účinníku a rovnice (2.7) - (2.9) pro výpočet zkoušky naprázdno. Výsledky byly následně zapsány do tabulky 79.

Tabulka 79: Simulace zkoušky naprázdno s předřazeným odporem

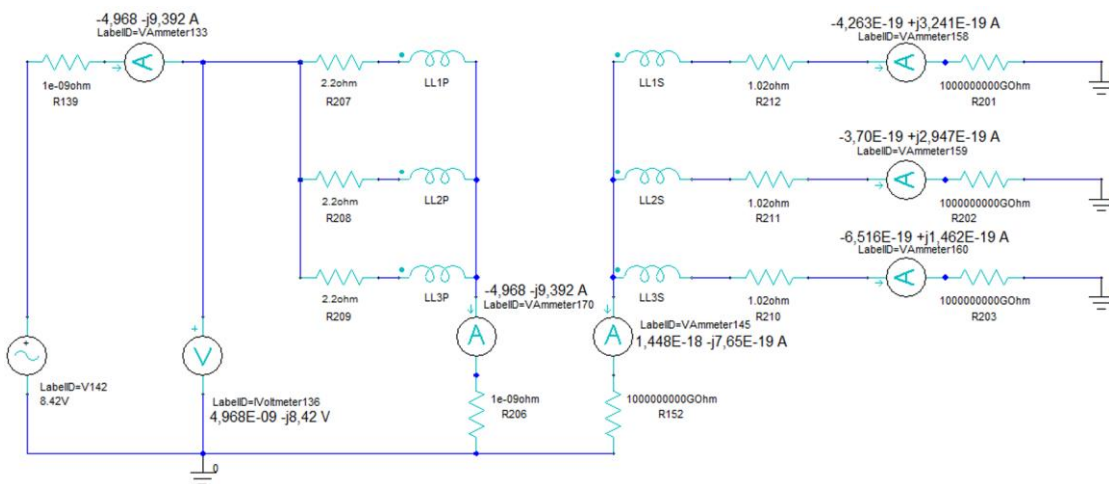
	L1	L2	L3
$U_{0_{sim}}$ (V)	135,900	130,503	131,601
$I_{0_{sim}}$ (A)	8,506	4,915	7,654
$\cos\varphi$ (-)	0,757	-0,197	-0,587
$\bar{Z}_{0_{sim}}$ (Ω)	21,102+j24,455	-134,912+j27,080	-29,312+j21,231
$Z_{0_{sim}}$ (Ω)	15,976	26,551	17,195
$R_{0_{sim}}$ (Ω)	21,102	-134,912	-29,312
$X_{0_{sim}}$ (Ω)	24,455	27,080	21,231

5.2.3 Zkoušky pro netočivé složky

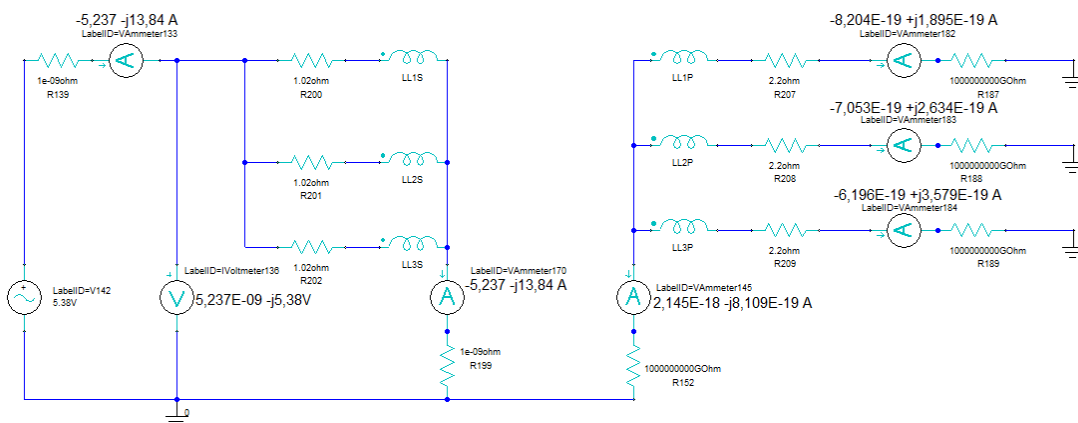
V následující kapitole byla provedena simulace pro zapojení obsahující netočivé složky. Schémata pro jednotlivá zapojení byla uvedena na obrázcích 5.6 - 5.8.



Obrázek 5.6 Schéma zapojení pro netočivou složku Měření 1



Obrázek 5.7 Schéma zapojení pro netočivou složku Měření 2



Obrázek 5.8 Schéma zapojení pro netočivou složku Měření 3

Výsledné hodnoty proudu a napětí byly zapsány v tabulce 80 a 81, kde byly doplněny o absolutní hodnoty, které byly vypočteny dle rovnic (3.1) a (3.2).

Tabulka 80: Simulované proudy netočivých složek s předřazeným odporem

	$I_{(0)\varepsilon_sim}$ (A)	$I_{(0)j_sim}$ (A)	$I_{(0)_sim}$ (A)
Měření 1	-1,284	-2,487	2,799
Měření 2	-4,968	-9,392	10,625
Měření 3	-5,237	-13,840	14,798

Tabulka 81: Simulované napětí netočivých složek s předřazeným odporem

	$U_{(0)\varepsilon_sim}$ (V)	$U_{(0)j_sim}$ (V)	$U_{(0)_sim}$ (V)
Měření 1	1,284E-09	-2,310	2,310
Měření 2	4,968E-09	-8,420	8,420
Měření 3	5,237E-09	-5,380	5,380

Výpočty pro netočivé složky byly provedeny pomocí rovnice (2.10) a výsledky byly posléze zapsány v tabulce 82.

Tabulka: 82: Výsledky simulací netočivých složek s předřazeným odporem

	Měření 1	Měření 2	Měření 3
$U_{(0)_sim}$ (V)	2,310	8,420	5,380
$I_{(0)_sim}$ (A)	2,799	10,625	14,798
$\cos\varphi$ (-)	0,889	0,884	0,935
$\bar{Z}_{(0)_sim}$ (Ω)	2,200+j1,136	2,102+j1,111	1,020+j0,386
$Z_{(0)_sim}$ (Ω)	2,476	2,377	1,091
$R_{(0)_sim}$ (Ω)	2,200	2,102	1,020
$X_{(0)_sim}$ (Ω)	1,136	1,111	0,386

5.2.4 Srovnání výsledků

Tato kapitola obsahuje výsledky relativních chyb jednotlivých zkoušek. Následně v této kapitole došlo k výpočtu průměrné relativní chyby, která byla vynesena do grafu k srovnání výsledků.

Pro výsledky z kapitol 5.2.1 - 5.2.3 byla vypočtena relativní chyba dle rovnice (4.1), jako referenční hodnoty byly zvoleny výsledky z měření. V tabulkách 83 až 85 byly zapsány jednotlivé výsledné hodnoty relativních chyb.

Tabulka 83: Relativní chyba výsledků naprázdno s předřazeným odporem

	L1	L2	L3
δ_{Z0} (%)	98,66	98,43	98,79
δ_{R0} (%)	98,13	115,81	103,08
δ_{X0} (%)	93,86	98,15	97,99

Tabulka 84: Relativní chyba výsledků nakrátko s předřazeným odporem

	L1	L2	L3
δ_{Zk} (%)	11,68	9,55	32,35
δ_{Rk} (%)	10,69	47,97	34,04
δ_{Xk} (%)	40,59	132,13	76,71

Tabulka 85: Relativní chyba výsledků pro netočivou složku s předřazeným odporem

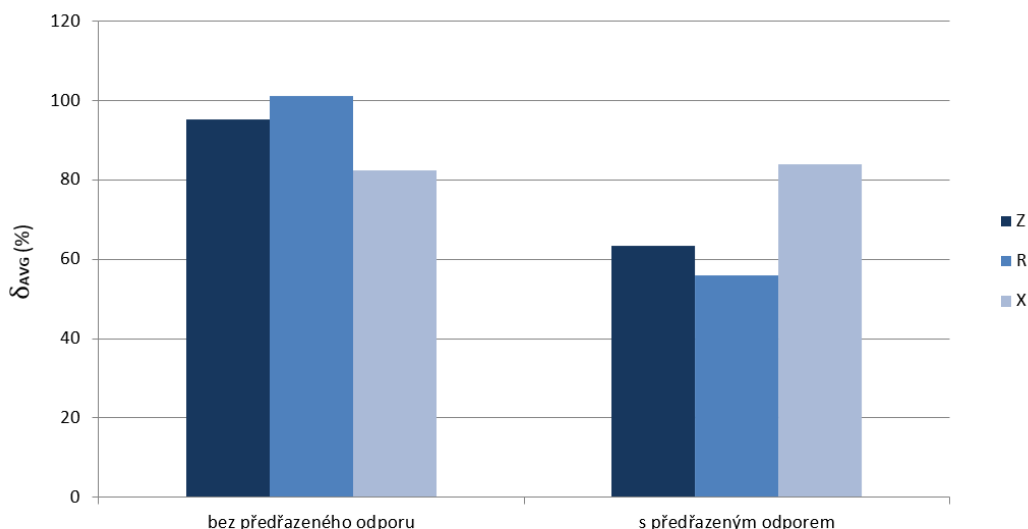
	Měření 1	Měření 2	Měření 3
$\delta_{Z(o)}$ (%)	51,63	86,82	83,11
$\delta_{R(o)}$ (%)	54,80	19,11	19,79
$\delta_{X(o)}$ (%)	28,24	93,78	93,90

Následně byly vypočteny hodnoty průměrného rozdílu jednotlivých veličin dle rovnice (4.2) a poté byly zapsány do tabulky 86.

Tabulka 86: Průměrná relativní chyba veličin s předřazeným odporem

δ_{Z_AVG} (%)	63,45
δ_{R_AVG} (%)	55,94
δ_{X_AVG} (%)	83,93

Výsledné hodnoty z tabulky 86 byly porovnány s hodnotami z kapitoly 4.1.2. Graf s porovnáním jednotlivých metod je zobrazen na obrázku 5.9.



Obrázek 5.9 Grafické porovnání výsledků jednotlivých metod

Z obrázku 5.9. lze usuzovat, že přidáním odporu vinutí se relativní průměrná chyba odporu a impedance snížila. Přidáním odporu zároveň došlo ke malému zvýšení průměrné relativní chyby reaktance.

Snížení nastalo u zkoušky nakrátko a u zkoušek pro netočivé složky. Ačkoliv došlo k snížení jednotlivých chyb, tyto chyby stále dosahovaly vysokých hodnot, což může být

částečně zaviněno nesymetriemi změřenými na transformátoru, které se následně promítly při výpočtu relativních chyb.

U zkoušky naprázdno měly chyby tendenci spíše stoupat, což mohlo být ovlivněno nesprávnou funkcí modulu External circuits.

5.3 Simulace se symetrickými zdroji

V této kapitole byly simulovány zkoušky naprázdno a nakrátko pro Model 3 se symetrickým zdrojem napětí. Cílem bylo zjistit, zda se výsledný odpor z jednotlivých simulací zvýší díky symetrii v napájení.

Způsob zapojení jednotlivých zkoušek je obdobný jako v kapitole 3.3.

Při simulaci nakrátko byl použitý napěťový zdroj s napětím o velikosti 2,5 V. Pro simulaci naprázdno byly taktéž zvoleny napěťové zdroje, velikost napětí na těchto zdrojích byla 130 V.

5.3.1 Zkouška nakrátko s použitím symetrických zdrojů

Výsledky napětí a proudu, které byly získány provedením zkoušky nakrátko byly zapsány do tabulek 87 a 88.

Tabulka 87: Simulované proudy nakrátko pro zapojení Dyn1 se symetrickými zdroji

	$I_{k\check{c}_{sim}} \text{ (A)}$	$I_{kj_{sim}} \text{ (A)}$	$I_{k_{sim}} \text{ (A)}$
L1	-80,292	-0,72915	80,295
L2	40,777	72,490	83,172
L3	39,514	-71,761	81,921

Tabulka 88: Simulované napětí nakrátko pro zapojení Dyn1 se symetrickými zdroji

	$U_{0\check{e}_{sim}} \text{ (V)}$	$U_{0j_{sim}} \text{ (V)}$	$U_{0_{sim}} \text{ (V)}$
L1	8,03E-08	-2,5	2,500
L2	-2,1651	1,25	2,500
L3	2,1651	1,25	2,500

Dále byly z těchto výsledků vypočteny hodnoty impedancí a účinnků dle vztahu (3.4). Z tohoto vztahu se následně stanovil odpor a reaktance.

Tabulka 89: Simulace zkoušky nakrátko Dyn1 se symetrickými zdroji

	L1	L2	L3
$U_{k_{sim}} \text{ (V)}$	2,500	2,500	2,500
$I_{k_{sim}} \text{ (A)}$	80,295	83,172	81,921
$\cos\varphi \text{ (-)}$	0,009	0,011	-0,020
$\bar{Z}_{k_{sim}} \text{ (\Omega)}$	2,83E-04+ j0,031	3,37E-04+ j0,030	-0,001+ j0,031
$Z_{k_{sim}} \text{ (\Omega)}$	0,031	0,030	0,031
$R_{k_{sim}} \text{ (\Omega)}$	2,83E-04	3,37E-04	-0,001
$X_{k_{sim}} \text{ (\Omega)}$	0,031	0,030	0,031

Z tabulky 89 je zřejmé, že se odpor při uvažování symetrických zdrojů nezvýšil.

5.3.2 Zkouška naprázdno s použitím symetrických zdrojů

V tabulce 90 a 91 byly zapsány výsledné hodnoty napětí a proudů zkoušky naprázdno.

Tabulka 90: Simulované proudy naprázdno pro zapojení Dyn1 se symetrickými zdroji

	$I_{0\check{c}_{sim}} \text{ (A)}$	$I_{0j_{sim}} \text{ (A)}$	$I_{0_{sim}} \text{ (A)}$
L1	-4,565	0,782	4,631
L2	-1,194	1,832	2,187
L3	-0,4744	-1,515	1,587

Tabulka 91: Simulované napětí naprázdno pro zapojení Dyn1 se symetrickými zdroji

	$U_{0\check{c}_{sim}} \text{ (V)}$	$U_{0j_{sim}} \text{ (V)}$	$U_{0_{sim}} \text{ (V)}$
L1	4,57E-09	-130	130,000
L2	-112,58	65	129,997
L3	112,58	65	129,997

Rovnice (2.7) - (2.9) byly využity pro výpočet zkoušky naprázdno. Výsledky byly následně zapsány do tabulky 92.

Tabulka 92: Simulace zkoušky naprázdno Dyn1 se symetrickými zdroji

	L1	L2	L3
$U_{0_{sim}} \text{ (V)}$	130,000	129,997	129,997
$I_{0_{sim}} \text{ (A)}$	4,631	2,187	1,587
$\cos\varphi \text{ (-)}$	-0,169	0,892	-0,736
$\bar{Z}_{0_{sim}} \text{ (\Omega)}$	-166,392+ j28,479	66,673+ j131,349	-111,273+ j120,973
$Z_{0_{sim}} \text{ (\Omega)}$	28,070	59,452	81,897
$R_{0_{sim}} \text{ (\Omega)}$	-166,392	66,673	-111,273
$X_{0_{sim}} \text{ (\Omega)}$	28,479	131,349	120,973

5.3.3 Vyhodnocení zkoušek s použitím symetrických zdrojů

Veškeré výsledky, které vznikly ze simulací provázela i přes použití symetrických zdrojů značná nesymetrie napětí.

V tabulce 89 si lze povšimnout, že výsledné proudy, které vzešly ze simulace byly poměrně symetrické. Odpory zkoušky nakrátko, které byly numericky namodelované byly nižší než při použití nesymetrických zdrojů napětí, a tedy značně menší než skutečně naměřené odpory na transformátoru. Výsledná reaktance zkoušky nakrátko se zvýšila.

U zkoušky naprázdno v tabulce 92 došlo ke zvýšení odporu na první fázi, kde zároveň došlo k snížení reaktance.

Z těchto výsledků nelze dobře vyvodit výsledky, protože transformátor nebyl změřen se symetrickým napájecím napětím.

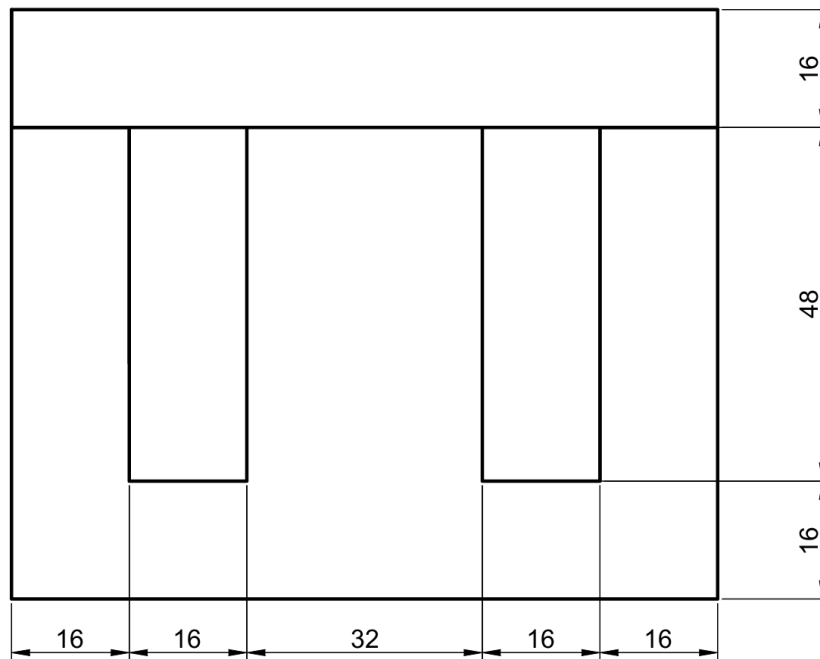
5.4 Ověření postupu modelování

Tato kapitola slouží k ověření, zda jsou modely v programu Ansys electronic správně modelovány. K ověření byl vytvořen příklad jednoduché jádrové tlumivky. Příklad byl tvořen na základě předloh z předmětu BESB2. Tento příklad byl analyticky spočten a následně byl zadán do 2D programu Femm [14] a 3D programu Ansys electronic. V programu Ansys electronic byl tento příklad zkoušen pomocí funkcí v běžném rozhraní s použitím proudového zdroje (bez external circuits) a s použitím modulu External circuits.

5.4.1 Parametry modelu

Při tvorbě modelu bylo uvažováno napětí $U_{ef} = 230$ V, frekvence $f = 50$ Hz, amplituda magnetické indukce byla stanovena na $B_{max} = 1,2$ T. Dále byla uvažována konstantní relativní permeabilita $\mu_{rM800-50A} = 3500$. Činitel plnění železa byl uvažován jako ideální tzn. $K_{PFc}=1$ a činitel plnění mědi byl uvažován $k_{pCu} = 0,5$.

Geometrie železného jádra složeného z EI plechů je zobrazena na obrázku 5.10. Tloušťka (hloubka) tohoto jádra v ose Z (tj. ve směru do výkresu) je rovna 40 mm.



Obrázek 5.10 Rozměry železného jádra

5.4.2 Analytická metoda výpočtu magnetického obvodu

Pomocí analytické metody byly stanoveny základní prvky, které se následně zadaly do programů.

Pro analytickou metodu bylo uvažováno zjednodušení Ampérova zákona v integrálním tvaru na tvar, který je zobrazen v rovnici (5.10).

$$H \cdot l = N \cdot I. \quad (5.10)$$

Takovéto zjednodušení lze provést, pokud pro střední siločáru uvažujeme rovnice (5.11) a (5.12).

$$H^{\rightarrow} \parallel dl^{\rightarrow}, \quad (5.11)$$

$$|H^{\rightarrow}| = \text{konstantní na celé délce.} \quad (5.12)$$

Nejprve bylo nutné určit průřez sloupku jádra. Jeho výpočet je zobrazen v rovnici (5.13).

$$S_A = a \cdot c = 32 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cdot 10^{-3} = 1,28 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2. \quad (5.13)$$

Pomocí průřezu sloupku byl následně stanoven počet závitů z rovnice (5.14).

$$N = \frac{U_i}{\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot B_{max} \cdot S_A \cdot f \cdot K_{PFe}} = \frac{230}{\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot 1,2 \cdot 1,28 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 1} = 674 \text{ závitů.} \quad (5.14)$$

Poté byla pomocí rovnice (5.15) stanovena délka siločáry, ta byla nutná k určení proudu z rovnice (5.16)

$$l_A = 2 \cdot 16 + 2 \cdot 48 + 2 \cdot 32 = 192 \cdot 10^{-3} \text{ m}, \quad (5.15)$$

$$I_{max} = \frac{\frac{B_{max}}{\mu_r \cdot \mu_0} \cdot l_A}{N} = \frac{\frac{1,2}{3500 \cdot \mu_0} \cdot 192 \cdot 10^{-3}}{674} = 77,72 \text{ mA.} \quad (5.16)$$

Dále byl dopočten průřez cívky, který využíval geometrií ze zadání. K výpočtu průřezu cívky byl použit vzorec (5.17).

$$S_{cívky} = 16 \cdot 48 = 768 \text{ mm}^2. \quad (5.17)$$

Z průřezu cívky se následně pomocí činitele plnění stanovil průřez celkové mědi z rovnice (5.18).

$$S_{Cu} = S_{cívky} \cdot K_{PCu} = 768 \cdot 0,5 = 384 \text{ mm}^2. \quad (5.18)$$

Z průřezu celkové mědi se následně pomocí zadaného počtu závitů určil průřez vodiče z rovnice (5.19).

$$S_v = \frac{S_{Cu}}{N} = \frac{384}{674} = 0,57 \text{ mm}^2. \quad (5.19)$$

Z průřezu vodiče se následně dopočetl průměr vodiče pomocí rovnice (5.20), který byl zadán do programu Femm a Ansys electronic.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S_v}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,57}{\pi}} = 0,85 \text{ mm.} \quad (5.20)$$

Dále byla vypočtena indukčnost z rovnice (5.21).

$$L = \frac{N^2}{R_m} = \frac{N^2}{\frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S}} = \frac{674^2}{\frac{1}{\mu_0 \cdot 3500} \cdot \frac{192 \cdot 10^{-3}}{32 \cdot 40 \cdot 10^{-6}}} = 13,32 \text{ H.} \quad (5.21)$$

Následně byla z geometrie vinutí vypočtena střední délka vodiče, tato délka byla vypočtena dle rovnice (5.22) s uvažováním, že průřez vinutí byl ve všech místech stejný.

$$l_s = 2 \cdot (2 \cdot 32 - 16) + 2 \cdot (40 + 16) = 208 \cdot 10^{-3} \text{ m.} \quad (5.22)$$

Ze střední délky vinutí byl následně vypočten odpor vinutí. V rovnici (5.23) si lze povšimnout, že střední délka vodiče byla násobena počtem závitů, kvůli dosažení celkové délky vinutí.

$$R = \rho \cdot \frac{l_s \cdot N}{S} = \frac{1}{58000000} \cdot \frac{208 \cdot 10^{-3} \cdot 674}{0,57 \cdot 10^{-6}} = 4,24 \Omega. \quad (5.23)$$

Dále byla vypočtena reaktance z rovnice (5.5). Výsledná hodnota byla zapsána v tabulce 93. Do této tabulky byla taktéž zapsána impedance vinutí, která byla vypočtena z rovnice (5.24).

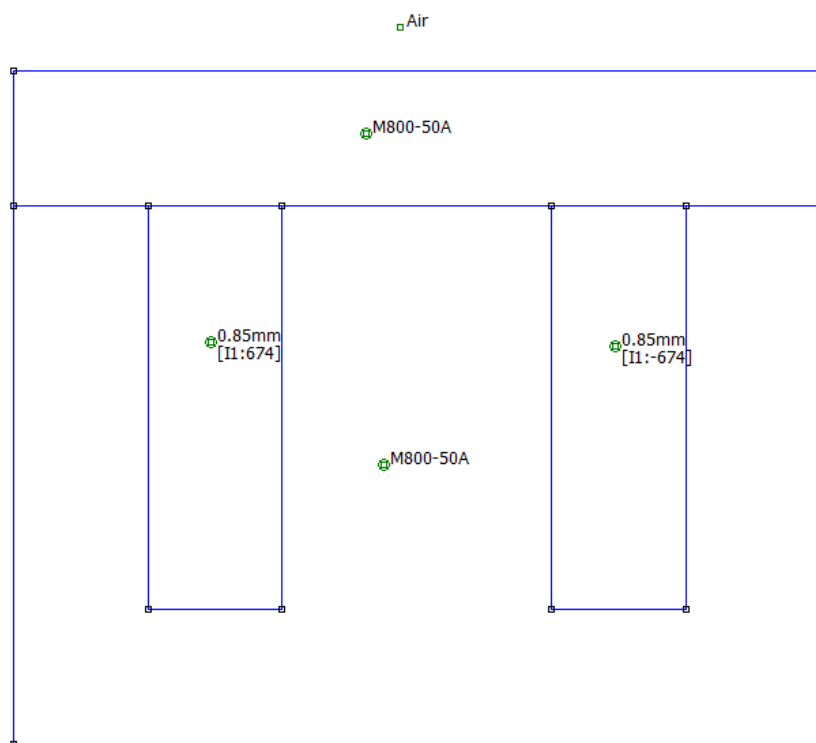
$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{5,66^2 + 4184,601^2} = 4184,604 \Omega. \quad (5.24)$$

Tabulka 93: Výsledné hodnoty analytické metody

$R (\Omega)$	4,240
$L (\text{H})$	13,320
$X (\Omega)$	4184,601
$Z (\Omega)$	4184,604

5.4.3 Model cívky v programu Femm

V programu Femm byl vytvořen model cívky. Pomocí zadání byla sestrojena geometrie a byly nadefinovány materiály. Dále byl dosazen počet závitů a průměr vodiče. Tyto parametry byly zjištěny pomocí analytické metody. Výsledný model je zobrazen na obrázku 5.11. Pro model musela být vytvořena okrajová podmínka, bez které by program nefungoval správně.



Obrázek 5.11 Model cívky v programu Femm

Po dokončení modelu byla spuštěna funkce Mesh a následně byla spuštěna analýza. Výsledky analýzy byly zapsány do tabulky 94, ve které je dále doplněná reaktance vypočtená dle rovnice (5.5) a impedance z rovnice (5.24).

Tabulka 94: Výsledné hodnoty programu Femm

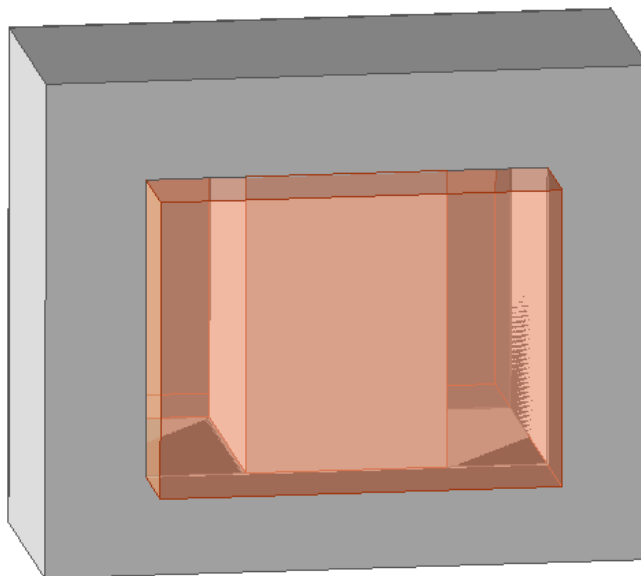
R (Ω)	1,638
L (H)	15,662
X (Ω)	4920,362
Z (Ω)	4920,363

V tabulce 94 si lze povšimnout, že odpor, který byl vyhodnocen program Femm byl nižší než předpokládaný, může to být dáno faktem, že program není primárně uzpůsoben na vyhodnocování odporu ve vinutí, ale na elektromagnetické děje ve strojích.

Výsledná indukčnost je v akceptovatelném rozsahu. Rozdíl, který zde nastal je dán použitím již zmíněným zjednodušením.

5.4.4 Model cívky v programu Ansys electronic

V programu Ansys byl vytvořen model na základě údajů ze zadání a analytického výpočtu. Opět byly nadefinovány materiály a na cívce byl vytvořen coil terminal, ke kterému bylo přiřazeno vinutí. Výsledný model cívky je zobrazen na obrázku 5.12.



Obrázek 5.12 Model cívky v programu Ansys electronic

Následně přes záložku parameters byla vytvořena matice, kde bylo zahrnuto vinutí. Díky této funkci bylo následně možné požadované parametry zobrazit ve výsledcích analýzy.

Po spuštění analýzy vinutí byly získány výsledky pro indukčnost a odpor. Z výsledné hodnoty indukčnosti byla vypočtena reaktance dle rovnice (5.5). Následně se pomocí odporu a reaktance stanovila impedance dle rovnice (5.24), veškeré výsledky byly zapsány do tabulky 95.

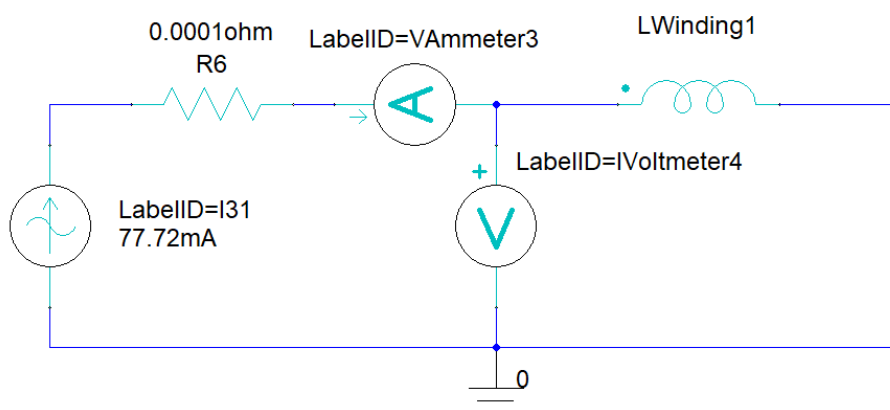
Tabulka 95: Výsledné hodnoty programu Ansys electronic

$R (\Omega)$	4,003
$L (H)$	15,681
$X (\Omega)$	4926,331
$Z (\Omega)$	4926,333

5.4.5 Model cívky v programu Ansys electronic v modulu External circuits

Pro následující simulaci byl použit totožný model jako v kapitole 5.4.4. Pro externí obvod byly vytvořeny dva modely. Modely se lišily pouze použitím zdroje napětí, nebo proudu.

Schéma zapojení s použitím proudového zdroje lze nalézt na obrázku 5.13.



Obrázek 5.13 Schéma zapojení s použitím proudového zdroje

Výsledky ze simulace s proudovým zdrojem byly následně zapsány do tabulky 96, ve které byly doplněny o absolutní hodnoty napětí a proudů pomocí rovnic (3.1) a (3.2).

Tabulka 96: Výsledky analýzy s použitím proudového zdroje

	Re	Im	Abs
I (A)	-4,21E-06	-0,07772	0,078
U (V)	382,87	-0,02075	382,870

Z hodnot napětí a proudu byl dle rovnice (3.4) získán účinník, odpor a reaktance, následně byla dopočtena impedance dle rovnice (3.3). Tyto hodnoty poté byly zapsány do tabulky 97.

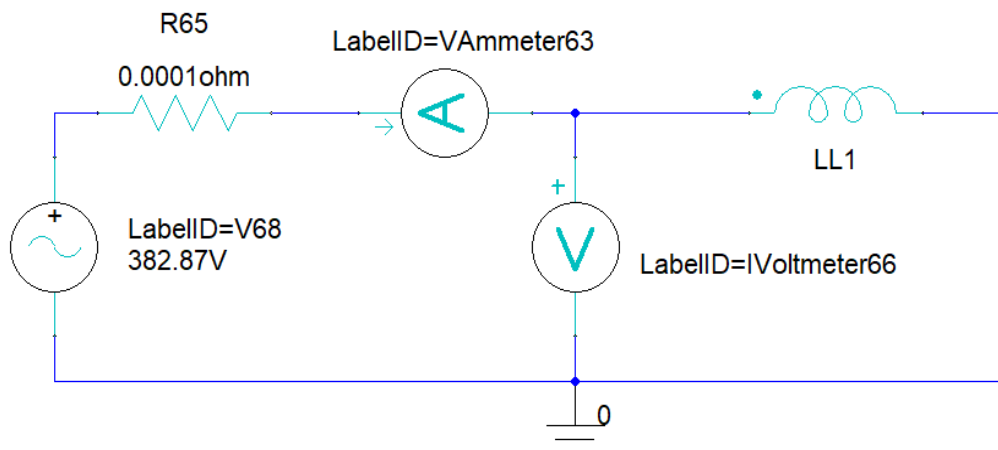
Tabulka 97: Výsledné hodnoty analýzy s použitím proudového zdroje

U (V)	382,870
I (A)	0,078
$\cos\varphi$ (-)	-1,290E-09
\bar{Z} (Ω)	-6,37E-06+ j4926,274
Z (Ω)	4926,274
R (Ω)	-6,370E-06
X (Ω)	4926,274

Následně byla ze vzorce (5.9) stanovena indukčnost cívky. Výsledkem byla indukčnost $L = 15,681$ H.

V návaznosti na to byla provedena simulace s použitím napěťového zdroje. Na napěťovém zdroji bylo nastaveno napětí o velikosti jednoho voltu. Z této simulace bylo následně zjištěno, jak velké napětí musí mít napěťový zdroj, aby bylo dosaženo proudu 77,72 mA. Bylo zjištěno, že napětí, které bylo třeba k dosažení požadovaného proudu bylo $U = 382,870$ V.

Na obrázku 5.14 je zobrazeno schéma obvodu obsahující napěťový zdroj.



Obrázek 5.14 Schéma zapojení s použitím proudového zdroje

Výsledky simulace byly zapsány do tabulky 98, v tabulce byly taktéž obsazeny absolutní hodnoty napětí a proudů, které byly dopočteny pomocí rovnic (3.1) a (3.2).

Tabulka 98: Výsledky analýzy s použitím napěťového zdroje

	Re	Im	Abs
I (A)	-7,77E-02	-1,58E-09	0,078
U (V)	7,77E-06	-382,87	382,870

Z hodnot napětí a proudu byl dle rovnice (3.4) získán účinník a následně dle rovnice (3.3) byla spočtena impedance ze které byly určeny hodnoty pro odpor a reaktanci. Tyto hodnoty poté byly zapsány do tabulky 99.

Tabulka 99: Výsledné hodnoty analýzy s použitím napěťového zdroje

U (V)	382,870
I (A)	0,078
$\cos\varphi$ (-)	-4,06E-08
\bar{Z} (Ω)	-2,00E-04+ j4926,274
Z (Ω)	4926,274
R (Ω)	-2,00E-04
X (Ω)	4926,274

Následně byla pomocí rovnice (5.9) stanovena indukčnost cívky. Výsledná indukčnost poté byla rovna 15,681 H.

Při porovnání zdrojů si lze povšimnout, že proudový zdroj dokázal nasimulovat vyšší hodnotu odporu, ačkoliv je tato hodnota stále nízká, přibližuje se více skutečné hodnotě, proto byl v následující kapitole porovnáván proudový zdroj.

5.4.6 Zhodnocení

Výsledky jednotlivých zkoušek jsou zrekapitulovány do tabulky 100.

Tabulka 100: Výsledky jednotlivých analýz

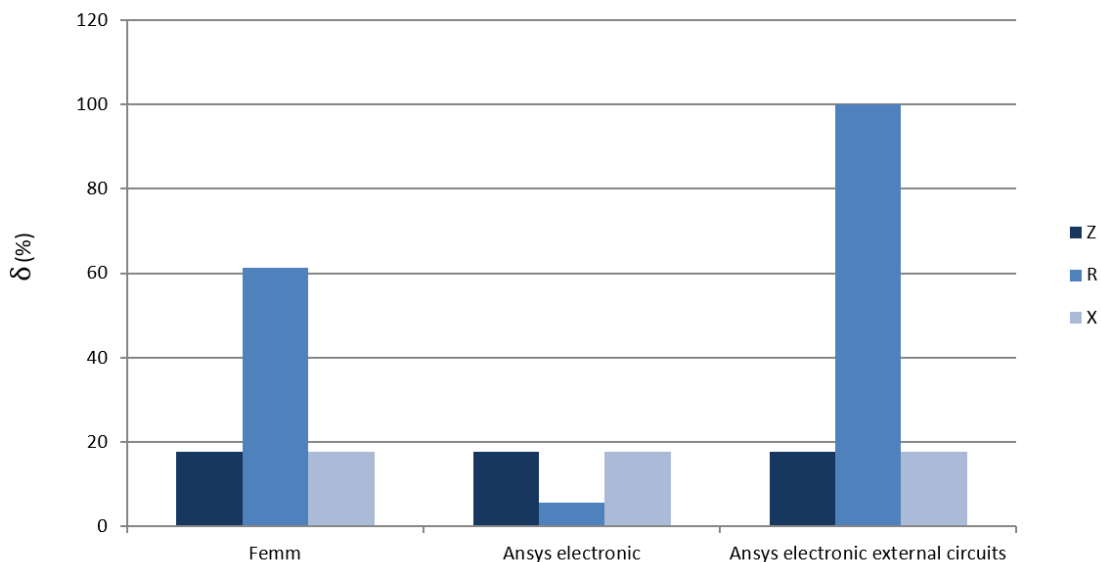
	$R (\Omega)$	$L (H)$	$X (\Omega)$	$Z (\Omega)$
Analytické	4,24	13,32	4184,601	4184,604
Femm	1,638	15,662	4920,362	4920,363
Ansys electronic	4,003	15,681	4926,331	4926,333
Ansys electronic external circuits	-6,37E-06	16,681	4926,274	4926,274

Z výsledků v tabulce 100 byla následně vypočtena relativní chyba dle rovnice (4.1), jako referenční hodnoty byly použity výsledky analytické analýzy. Následně byly tyto výsledky zapsány v tabulce 101.

Tabulka 101: Relativní chyby analýz

	$\delta_R (\%)$	$\delta_L (\%)$	$\delta_X (\%)$	$\delta_Z (\%)$
Femm	61,368	17,583	17,583	17,583
Ansys electronic	5,590	17,725	17,725	17,725
Ansys electronic external circuits	100,000	17,725	17,724	17,724

Z tabulky 101 byly výsledky jednotlivých chyb přeneseny do grafu na obrázku 5.15.



Obrázek 5.15 Graf průměrných relativních chyb jednotlivých metod

Z grafu na obrázku 5.15 je zřejmé, že nejvyšší chybu při výpočtu odporu dosahovala metoda s použitím programu Ansys electronic v modulu External circuits.

Z grafu si lze také povšimnout, že hodnoty relativních chyb impedancí a reaktancí jsou téměř stejné, díky tomuto lze usoudit, že program správně spočetl indukčnost.

Indukčnosti, které vypočetly jednotlivé programy, lze považovat za správné, protože při analytickém výpočtu byly zohledněny zjednodušující předpoklady.

Odpor, který byl vypočten jednotlivými programy se velmi lišil. Z výsledků lze vyvodit, že modul external circuits nedokáže správně simulovat odpor vinutí. Odpor s použitím Ansys electronic by mohl být považován za přesnější.

6. ZÁVĚR

První část této práce byla zaměřena na měření složkových impedancí transformátorů. Byla uskutečněna měření dvou dvojinuťových transformátorů, pro čtyři různá zapojení vinutí, a jednoho trojvinuťového transformátoru. U všech transformátorů byly změřeny sousledné a netočivé složky. Měření netočivé složky bylo provedeno pro všechna vybraná zapojení, která to umožnila. Porovnání těchto měření pro dvojinuťový transformátor lze najít v kapitole 2.1.8.

V tabulce 31 si lze povšimnout značných nesymetrií mezi jednotlivými fázemi, tyto nesymetrie byly způsobeny mnoha faktory, avšak nejvýznamnějším faktorem byl autotransformátor, který byl použit pro regulaci napájení. Pro napájení byly vyzkoušeny různé autotransformátory, které byly dostupné na ústavu elektroenergetiky, avšak žádný z nich nebyl dostatečně přesný na to, aby tato nesymetrie téměř vymizela. Měření by bylo tedy vhodné opakovat s regulovatelným zdrojem s lepšími parametry.

Dále byla snaha získat parametry jednotlivých větví náhradního obvodu tvaru T u dvojinuťového transformátoru v zapojení YNyn0. To bylo provedeno v kapitole 2.1.6. Výsledkem bylo zjištění, že tyto hodnoty nejsou přesné natolik, aby mohly být považovány za relevantní.

V druhé části této práce byl vybraný dvojinuťový transformátor numericky modelován. Pro numerické modelování bylo použito několik programů od společnosti Ansys.

Prvním z těchto programů byl software PeMag. Jeho nevhodnost pro tento úkol byla ovšem určena na základě nemožnosti vytvořit dostatečně velký model, který by následně sloužil k simulaci. Program měl problém s generováním, tak velkého modelu, i ve 2D rozhraní, a proto byl pro tuto aplikaci nevhodný. Kvůli nemožnosti vygenerovat model programem PeMag bylo následně zavrhnuto také simulování transformátoru použitím programu Twinbuilder do kterého by se tento 2D model importoval a byl testován.

Dále byl testován program Ansys electronic a jeho nastavba external circuits. Výsledky z nastavby external circuits se velmi lišily od měřených veličin, tyto výsledky jsou porovnány v kapitole 4.

Kvůli vysokým nepřesnostem, které dosahovaly až 440 %, byla provedena série experimentálních pokusů, kdy bylo cílem zjistit, zda jsou modely správně navrženy a sestaveny v programu Ansys electronic. Byla tedy navržena simulace se symetrickými zdroji, kde bylo zkoumáno, zda nejsou chyby vysoké kvůli nesymetriím jednotlivých zdrojů. Ačkoliv se nesymetrie získaných impedancí v jednotlivých fázích částečně snížila, tak i přesto byla výsledná nesymetrie výsledků velmi vysoká. Jelikož transformátor nebyl měřen se symetrickým napájecím zdrojem, tak nebylo možné tuto simulaci dobře vyhodnotit, jako další postup by bylo tedy vhodné tohle měření uskutečnit. Dále byla vytvořena zjednodušená simulace s jednoduchým měděným válcem, který

představoval cívku sekundárního vinutí neboli jednoduchou vzduchovou tlumivku. V tomto modelu byly porovnány výsledky analytického výpočtu, numerického modelování a skutečného měření. Bylo zjištěno, že odpor, který byl vypočten programem Ansys electronic v modulu external circuit zdaleka nedosahoval předpokládaných výsledků. Indukčnost, která byla vypočtena pomocí simulace se přibližovala analytickému výsledku, rozdíl hodnot byl 35 %. Výsledek se mohl odlišovat kvůli zjednodušujícím předpokladům, které se uvažují při analytickém výpočtu. Z toho plyne, že modul external circuits nedokáže spolehlivě nasimulovat odpor vinutí.

Kvůli nízkému odporu vinutí byla provedena zkouška, kdy se změřili jednotlivé odpory vinutí na skutečném transformátoru, tyto odpory byly poté sériově vřazeny do obvodu, tak aby simulovaly odpor vinutí. Tato zkouška dokázala částečně snížit celkovou chybu odporu a impedance, ale kvůli tomuto vřazení odporu se celková chyba reaktance mírně zvýšila.

Posledně pro ověření správnosti postupu modelování byl vytvořen příklad cívky s železným jádrem v kapitole 5.4. Tento příklad byl vypočten analyticky a poté byl numericky modelován v programech Femm a Ansys electronic. V programu Ansys electronic byl tento příklad modelován v klasickém rozhraní programu, které neumožňuje zapojení složitějších obvodu a i v modulu external circuits. Výsledkem této kapitoly bylo porovnání jednotlivých postupů, přičemž všechny programy dokázaly vypočítat přibližnou hodnotu indukčnosti a k výslednému odporu se nejvíce přiblížil program Ansys electronic v běžném rozhraní, které neumožňuje tvorbu složitých zapojení, ta jsou potřebná k simulaci jednotlivých složek.

Závěrem lze tedy konstatovat, že žádný z těchto zkoumaných programů se nedokázal dostatečně přiblížit k měřeným výsledkům z první části práce. Rozsah chyb numerického modelování byl od 40 % do 440 %. Provedené experimentální pokusy prokázaly správný postup při modelování a byla potvrzena teze, že v modulu external circuits je špatně simulován odpor vinutí a kvůli tomuto jej nelze použít. Na základě dosažených výsledků v této práci se tak jeví, že program Ansys electronic nelze použít pro dostatečně přesnou simulaci složkových impedancí měřených transformátorů.

Literatura

- [1] TOMAN, Petr; DRÁPELA, Jiří; MIŠÁK, Stanislav a, et al. *Provoz distribučních soustav*. Online. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/cvut-7-provoz.pdf>. [cit. 2024-10-22].
- [2] DOUDA, Vojtěch. *Dopady nasazování moderních technologií na zkratové poměry v průmyslových distribučních soustavách*. Online, Diplomová práce, vedoucí Ing. Martin Čerňan, Ph.D. České vysoké učení technické v Praze, Technická 1902/2, 166 27 Praha 6 - Dejvice-Praha 6: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky, 2023. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/109260/F3-DP-2023-Douda-Vojtech-Diplomova%20prace%20-%20Vojtech%20Douda%20\(elektronicka%20verze\).pdf](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/109260/F3-DP-2023-Douda-Vojtech-Diplomova%20prace%20-%20Vojtech%20Douda%20(elektronicka%20verze).pdf). [cit. 2024-10-25].
- [3] MEŠTER, Marián. *Výpočet skratových prúdov v trojfázových striedavých sústavách*. Banská Bystrica: ABB Elektro, 2005. ISBN 80-89057-10-1.
- [4] BLAŽEK, Vladimír a SKALA, Petr. *Distribuce elektrické energie*. Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2004.
- [5] TOMAN, Petr. *Teorie souměrných složek: Nesymetrické soustavy*. Online. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2024. [cit. 2024-10-26]. Přednášková prezentace z předmětu BPC-DEE.
- [6] PNE 33 3430-3, *Parametry kvality elektrické energie – Část 3: Nesymetrie a změny kmitočtu napětí*. Online. 3. 2011. Dostupné z: https://www.mojeenergie.cz/?download=/_/ld891/PNE_33-3430-3-3.v-tisk.pdf. [cit. 2024-10-26].
- [7] TOMAN, Petr. *Souměrné složky: Výpočet zkratů pomocí metody souměrných složek*. Online. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2024. [cit. 2024-10-27]. Přednášková prezentace z předmětu BPC-DEE.
- [8] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. ČSN 33 3051, *Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení*. 01.11.1992.
- [9] ONDRŮŠEK, Čestmír. *Elektrické stroje: skripta*. 2021.
- [10] BÁRTA, Jan. *BPC-ESB – ELEKTRICKÉ STROJE: Transformátory II*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2024. [cit. 2024-11-17].
- [11] CARLSON, Ake; FUHR, Jitka; SCHEMEL, Gottfried a WEGSCHEIDER, Franz. *Testing of Power Transformers: Routine tests, Type tests and Special tests*. Düsseldorf: Pro Print, 2003. [cit. 2024-11-31].
- [12] ANSYS, Inc. *ANSYS Electronics Desktop, Verze 2024 R1* [cit. 2025-05-25].
- [13] WEISSER. *Coil body type OD EI 38 - EI 192: Coil body with open wire exit slots*. Online. [2012]. Dostupné

z: https://www.weisser.de/fileadmin/user_data/datenblaetter/Katalogfolgeseiten_2017/103-107.pdf. [cit. 2025-04-11].

- [14] MEEKER, David C. *FEMM – Finite Element Method Magnetics* 2019 Dostupné z: <http://www.femm.info> [cit. 2025-05-25].

Seznam symbolů a zkratk

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Im	Imaginární složka
L1	První fáze
L2	Druhá fáze
L3	Třetí fáze
Re	Reálná složka
VUT	Vysoké učení technické v Brně

Symbole a veličiny:

<i>Symbol</i>	<i>Popis</i>	<i>jednotka</i>
$\bar{Z}_{(0)sim}$	Simulovaná impedance netočivé složky v komplexním tvaru	(Ω)
\bar{Z}_{0sim}	Simulovaná impedance naprázdno v komplexním tvaru	(Ω)
$\bar{Z}_{k, sim}$	Simulovaná impedance nakrátko v komplexním tvaru	(Ω)
$\bar{Z}_{(0)kP1}$	Impedance zkoušky nakrátko netočivé složky z primárního vinutí 1. kořen	(Ω)
$\bar{Z}_{(0)kP2}$	Impedance zkoušky nakrátko netočivé složky z primárního vinutí 2. kořen	(Ω)
$\bar{Z}_{(0)kS1}$	Impedance zkoušky nakrátko netočivé složky ze sekundárního vinutí 1. kořen	(Ω)
$\bar{Z}_{(0)kS2}$	Impedance zkoušky nakrátko netočivé složky ze sekundárního vinutí 2. kořen	(Ω)
$\bar{Z}_{(0)011}$	Impedance větve 03 pro 1. kořen	(Ω)
$\bar{Z}_{(0)012}$	Impedance větve 01 pro 2. kořen	(Ω)
$\bar{Z}_{(0)021}$	Impedance větve 02 pro 1. kořen	(Ω)
$\bar{Z}_{(0)022}$	Impedance větve 02 pro 2. kořen	(Ω)
$\bar{Z}_{(0)031}$	Impedance větve 03 pro 1. kořen	(Ω)
$\bar{Z}_{(0)032}$	Impedance větve 03 pro 2. kořen	(Ω)
\bar{Z}_{0P}	Impedance zkoušky naprázdno z primárního vinutí	(Ω)
\bar{Z}_{0S}	Impedance zkoušky naprázdno ze sekundárního vinutí	(Ω)
\bar{Z}_1	Impedance vinutí primárního vinutí	(Ω)
\bar{Z}_2	Impedance vinutí sekundárního vinutí	(Ω)
\bar{Z}_3	Impedance vinutí terciálního vinutí	(Ω)
\bar{Z}_{H1}	Impedance větve H pro 1. kořen	(Ω)
\bar{Z}_{H2}	Impedance větve H pro 2. kořen	(Ω)
\bar{Z}_{kP}	Impedance zkoušky nakrátko z primárního vinutí	(Ω)
\bar{Z}_{kP1}	Impedance zkoušky nakrátko z primárního vinutí 1. kořen	(Ω)
\bar{Z}_{kP2}	Impedance zkoušky nakrátko z primárního vinutí 2. kořen	(Ω)
\bar{Z}_{kS}	Impedance zkoušky nakrátko ze sekundárního vinutí	(Ω)

\bar{Z}_{kS1}	Impedance zkoušky nakrátko ze sekundárního vinutí 1. kořen	(Ω)
\bar{Z}_{kS2}	Impedance zkoušky nakrátko ze sekundárního vinutí 2. kořen	(Ω)
\bar{Z}_{M1}	Impedance větve M pro 1. kořen	(Ω)
\bar{Z}_{M2}	Impedance větve M pro 2. kořen	(Ω)
\bar{Z}_{X1}	Impedance větve X pro 1. kořen	(Ω)
\bar{Z}_{X2}	Impedance větve X pro 2. kořen č	(Ω)
μ	Permeabilita	(H/m)
μ_0	Permeabilita vakua	(H/m)
μ_r	Relativní permeabilita	(H/m)
a	Operátor	(-)
a	Rozměr modelu	(m)
B_{max}	Amplituda magnetické indukce	(T)
c	Rozměr modelu	(m)
d	Průměr	(m)
E_1	Ekvivalentní zdroj napětí sousledné složky	(V)
E_A	Ekvivalentní zdroj napětí fáze A	(V)
H	Intenzita magnetického pole	(A/m)
I	Proud	(A)
$I_{(0)_{sim}}$	Absolutní hodnota simulovaného proudu netočivé složky	(A)
$I_{(0)č_{sim}}$	Činná složka simulovaného proudu netočivé složky	(A)
$I_{(0)j_{sim}}$	Jalová složka simulovaného proudu netočivé složky	(A)
I_0	Netočivá složka proudu	(A)
$I_{0_{sim}}$	Absolutní hodnota simulovaného proudu naprázdno	(A)
$I_{0č_{sim}}$	Činná složka simulovaného proudu naprázdno	(A)
$I_{0j_{sim}}$	Jalová složka simulovaného proudu naprázdno	(A)
I_1	Sousledná složka proud	(A)
I_A	Proud fáze A	(A)
I_B	Proud fáze B	(A)
I_C	Proud fáze C	(A)
I_G	Proud zemí	(A)
$I_{k_{sim}}$	Absolutní hodnota simulovaného proudu nakrátko	(A)
$I_{kč_{sim}}$	Činná složka simulovaného proudu nakrátko	(A)
$I_{kj_{sim}}$	Jalová složka simulovaného proudu nakrátko	(A)
I_{max}	Amplituda proudu	(A)
k	Součinitel délky kroucení	(-)
K_{PCu}	Činitel plnění mědi	(-)
K_{PFe}	Činitel plnění železa	(-)
l_A	Délka siločáry	(m)
l_s	Střední délka vodiče	(m)
N	Závit	(-)
r	Poloměr	(m)

R	Odpor	(Ω)
$R_{(0)_sim}$	Simulovaný odpor netočivé složky	(Ω)
$R_{(0)}$	Odpor zátěže netočivé složky	(Ω)
$R_{(1)}$	Odpor zátěže sousledné složky	(Ω)
R_{0_sim}	Simulovaný odpor naprázdno	(Ω)
R_{Fe}	Odpor železa v transformátoru	(Ω)
R_k	Odpor transformátoru nakrátko	(Ω)
R_{k_sim}	Simulovaný odpor nakrátko	(Ω)
R_{k12}	Odpor nakrátko měřená z primárního vinutí ku sekundárnímu	(Ω)
R_{k13}	Odpor nakrátko měřená z primárního vinutí ku terciálnímu	(Ω)
R_{k23}	Odpor nakrátko měřená ze sekundárního vinutí ku terciálnímu	(Ω)
R_m	Magnetický odpor	(A/Wb)
S	Průřez vodičem	(m^2)
S_A	Průřez sloupku magnetického jádra	(m^2)
$S_{cívky}$	Průřez cívky	(m^2)
S_{Cu}	Průřez mědi	(m^2)
S_o	Obsah průřezu cívky	(m^2)
S_v	Průřez vodiče	(m^2)
U	Napětí	(V)
$U_{(0)_sim}$	Absolutní hodnota simulovaného napětí netočivé složky	(V)
$U_{(0)č_sim}$	Činná složka simulovaného napětí netočivé složky	(V)
$U_{(0)j_sim}$	Jalová složka simulovaného napětí netočivé složky	(V)
U_0	Netočivá složka napětí	(V)
U_{0_sim}	Absolutní hodnota simulovaného napětí naprázdno	(V)
$U_{0č_sim}$	Činná složka simulovaného napětí naprázdno	(V)
U_{0j_sim}	Jalová složka simulovaného napětí naprázdno	(V)
U_1	Sousledná složka napětí	(V)
U_A	Napětí fáze A	(V)
U_B	Napětí fáze B	(V)
U_C	Napětí fáze C	(V)
U_{ef}	Efektivní hodnota napětí	(V)
U_{k_sim}	Absolutní hodnota simulovaného napětí nakrátko	(V)
$U_{kč_sim}$	Činná složka simulovaného napětí nakrátko	(V)
U_{kj_sim}	Jalová složka simulovaného napětí nakrátko	(V)
v_v	Výška válce	(m)
X	Reaktance	(Ω)
$X_{(0)_sim}$	Simulovaná reaktance netočivé složky	(Ω)
$X_{(0)}$	Reaktance zátěže netočivé složky	(Ω)
$X_{(1)}$	Reaktance zátěže sousledné složky	(Ω)
X_{0_sim}	Simulovaná reaktance naprázdno	(Ω)
X_k	Reaktance transformátoru nakrátko	(Ω)
X_{k_sim}	Simulovaná reaktance nakrátko	(Ω)

X_{k12}	Reaktance nakrátko měřená z primárního vinutí ku sekundárnímu	(Ω)
X_{k13}	Reaktance nakrátko měřená z primárního vinutí ku terciálnímu	(Ω)
X_{k23}	Reaktance nakrátko měřená ze sekundárního vinutí ku terciálnímu	(Ω)
X_m	Rozptylová reaktance v transformátoru	(Ω)
Z	Impedance	(Ω)
$Z_{(0)_sim}$	Simulovaná absolutní hodnota impedance netočivé složky	(Ω)
$Z_{(0)}$	Netočivá složka impedance	(Ω)
$Z_{(1)}$	Sousledná složka impedance	(Ω)
Z_0	Netočivá složka impedance	(Ω)
Z_{0_sim}	Simulovaná absolutní hodnota impedance naprázdno	(Ω)
Z_1	Sousledná složka impedance	(Ω)
Z_k	Impedance transformátoru nakrátko	(Ω)
Z_{k_sim}	Simulovaná absolutní hodnota impedance nakrátko	(Ω)
Z_{k12}	Impedance nakrátko měřená z primárního vinutí ku sekundárnímu	(Ω)
Z_{k13}	Impedance nakrátko měřená z primárního vinutí ku terciálnímu	(Ω)
Z_{k23}	Impedance nakrátko měřená ze sekundárního vinutí ku terciálnímu	(Ω)
Z_m	Impedance magnetizační větve transformátoru	(Ω)
δ_{R_AVG}	Průměrná relativní chyba odporu	(%)
δ_{R0}	Relativní chyba odporu naprázdno	(%)
δ_{Rk}	Relativní chyba odporu nakrátko	(%)
$\delta_{X(0)}$	Relativní chyba reaktance netočivé složky	(%)
δ_{X_AVG}	Průměrná relativní chyba reaktance	(%)
δ_{X0}	Relativní chyba reaktance naprázdno	(%)
δ_{Xk}	Relativní chyba reaktance nakrátko	(%)
$\delta_{Z(0)}$	Relativní chyba impedance netočivé složky	(%)
δ_{Z_AVG}	Průměrná relativní chyba impedance	(%)
δ_{Z0}	Relativní chyba impedance naprázdno	(%)
δ_{Zk}	Relativní chyba impedance nakrátko	(%)
ρ	Rezistivita	(Ωm)
ω	Úhlová frekvence	(rad/s)

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - SEZNAM LABORATORNÍHO VYBAVENÍ	101
PŘÍLOHA B - MĚŘENÍ NA DVOJVINUŤOVÉM TRANSFORMÁTORU SE SÉRIOVÝM ČÍSLEM 49586.....	102
PŘÍLOHA C - ODVOZENÍ ROVNIC.....	103
PŘÍLOHA D - KÓD VÝPOČTU V MATLABU.....	104
PŘÍLOHA E - MODEL Y TRANSFORMÁTORŮ	105
PŘÍLOHA F - VÝSLEDKY PRO OSTATNÍ MODEL Y	108
PŘÍLOHA G - SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ PRO MODEL Y V ZAPOJENÍ DYN1	109
PŘÍLOHA H - SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ PRO MODEL Y V ZAPOJENÍ YNYN0	110

Příloha A - Seznam laboratorního vybavení

A.1 Seznam použitého vybavení v laboratoři

Název	v.č	i.č
Autotransformátor	21350	-
Power quality analyzer SMP 44	-	001000218949-0000
Power quality analyzer SMP 45	-	001000218950-0000
Dvojvinuťový transformátor Yy0	55056/08/2014	-
Dvojvinuťový transformátor Dy1	49586/07/2012	00100021234-0000
Trojvinuťový transformátor YNd1vn0	11974/2011	-

Příloha B - Měření na dvojvinutovém transformátoru se sériovým číslem 49586

Příloha je dostupná elektronicky v ZIP souboru.

Příloha C - Odvození rovnic

$$\bar{Z}_{kP} = \bar{Z}_H + \frac{\bar{Z}_X \cdot \bar{Z}_M}{\bar{Z}_X + \bar{Z}_M}$$

$$\bar{Z}_{kP} = \bar{Z}_{0P} - \bar{Z}_M + \frac{\bar{Z}_X \cdot \bar{Z}_M}{\bar{Z}_X + \bar{Z}_M}$$

$$\bar{Z}_{kP} \cdot \bar{Z}_X + \bar{Z}_{kP} \cdot \bar{Z}_M = \bar{Z}_{0P} \cdot \bar{Z}_X + \bar{Z}_{0P} \cdot \bar{Z}_M - \bar{Z}_M \cdot \bar{Z}_X - \bar{Z}_M^2 + \bar{Z}_X \cdot \bar{Z}_M$$

Nahradíme $\bar{Z}_M = \bar{Z}_{0S} - \bar{Z}_X$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{kP} \cdot \bar{Z}_X + \bar{Z}_{kP} \cdot \bar{Z}_{0S} - \bar{Z}_{kP} \cdot \bar{Z}_X &= \\ &= \bar{Z}_{0P} \cdot \bar{Z}_X + \bar{Z}_{0P} \cdot \bar{Z}_{0S} - \bar{Z}_{0P} \cdot \bar{Z}_X + \bar{Z}_X^2 - \\ &\quad - (\bar{Z}_{0S} - \bar{Z}_X)^2 + \bar{Z}_X \cdot \bar{Z}_{0S} - \bar{Z}_X^2 \\ \bar{Z}_{kP} \cdot \bar{Z}_{0S} - \bar{Z}_{0P} \cdot \bar{Z}_{0S} &= -(\bar{Z}_{0S} - \bar{Z}_X)^2 \end{aligned}$$

$$\bar{Z}_{0S} \cdot (\bar{Z}_{0P} - \bar{Z}_{kP}) = (\bar{Z}_{0S} - \bar{Z}_X)^2$$

$$\bar{Z}_{0S} \cdot (\bar{Z}_{0P} - \bar{Z}_{kP}) = \bar{Z}_{0S}^2 - 2\bar{Z}_{0S} \cdot \bar{Z}_X + \bar{Z}_X^2$$

$$\bar{Z}_X^2 - 2\bar{Z}_{0S} \cdot \bar{Z}_X - \bar{Z}_{0S} \cdot (\bar{Z}_{0P} - \bar{Z}_{kP}) + \bar{Z}_{0S}^2 = 0$$

Příloha D - Kód výpočtu v Matlabu

Výpočet je vztažen na fázi L1

```
ZOP=1122.319+i*273.001
```

```
ZOS=1127.37+i*398.137
```

```
ZKP=1.825+i*0.371
```

```
ZKS=2.149+i*0.49
```

```
a=1
```

```
b=-2.*ZOS
```

```
c=-ZOS.*(ZOP-ZKP)+ZOS.^2
```

```
D=(b.^2)-4.*a.*c)
```

```
ZX1=sqrt((-b+D)/(2.*a))
```

```
ZX2=sqrt((-b-D)/(2.*a))
```

```
ZM1=ZOS-ZX1
```

```
ZM2=ZOS-ZX2
```

```
ZH1=ZOP-ZM1
```

```
ZH2=ZOP-ZM2
```

```
ZKP1=ZH1+((ZX1.*ZM1)./(ZX1+ZM1))
```

```
ZKP2=ZH2+((ZX2.*ZM2)./(ZX2+ZM2))
```

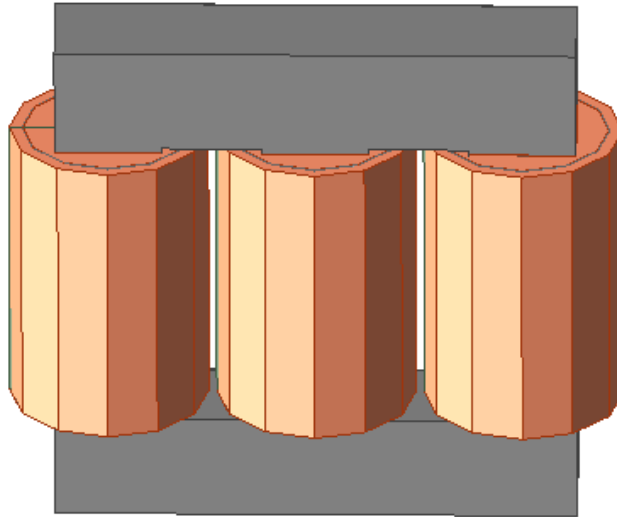
```
ZKS1=ZX1+((ZH1.*ZM1)./(ZH1+ZM1))
```

```
ZKS2=ZX2+((ZH2.*ZM2)./(ZH2+ZM2))
```

Příloha E - Modely transformátorů

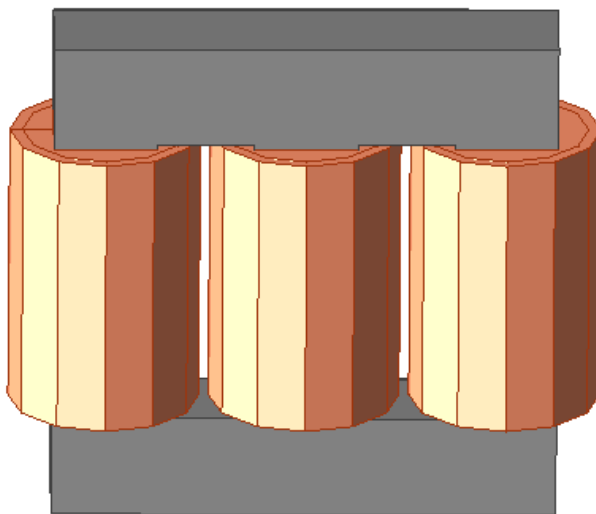
E.1 Model 1

Pro tento model byly uvažovány jednotlivá vinutí jako válce a mezi nimi byla izolační folie.



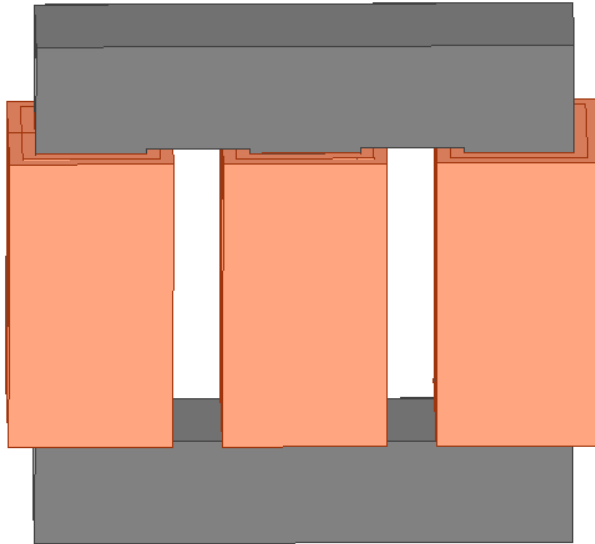
E.2 Model 2

Pro tento model byly uvažovány jednotlivá vinutí jako válce. Tento model neobsahuje kostru vinutí a izolační folii mezi jednotlivým vinutím.



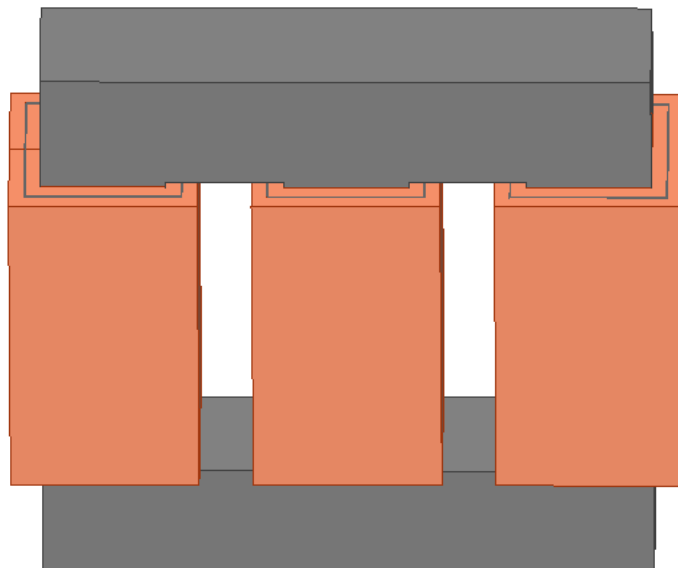
E.3 Model 3

Pro tento model byly uvažovány jednotlivá vinutí jako hranoly. Model neobsahuje kostru vinutí a folii mezi jednotlivým vinutím.



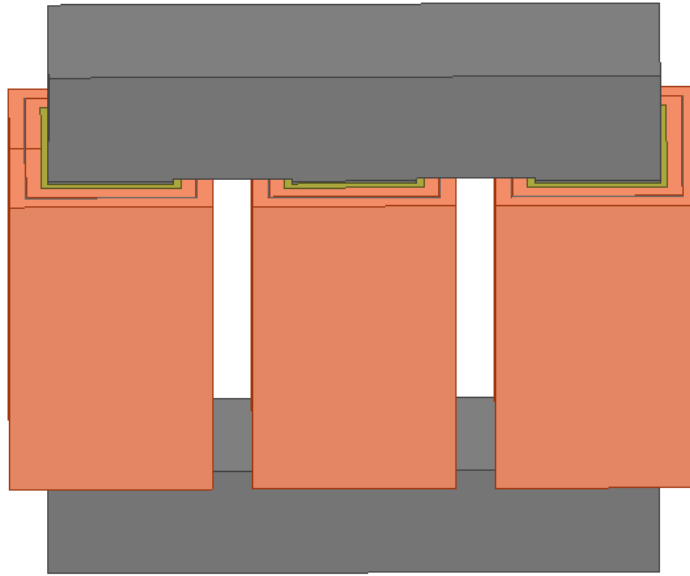
E.4 Model 4

Pro tento model byly uvažovány jednotlivá vinutí jako hranoly. Model obsahuje folii mezi jednotlivým vinutím.



E.5 Model 5

Pro tento model byly uvažovány jednotlivá vinutí jako hranoly. Model obsahuje kostru vinutí a folii mezi jednotlivým vinutím.



Příloha F - Výsledky pro ostatní modely

Příloha je dostupná elektronicky v ZIP souboru.

Příloha G - Srovnání výsledků pro modely v zapojení Dyn1

Příloha je dostupná elektronicky v ZIP souboru.

Příloha H - Srovnání výsledků pro modely v zapojení Ynyn0

Příloha je dostupná elektronicky v ZIP souboru.