



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

MATEMATICKÝ MODEL PROUDOVÉHO
CHRÁNIČE CITLIVÉHO NA PULZUJÍCÍ
STEJNOSMĚRNÉ PROUDY
MATHEMATICAL MODEL OF RCCB SENSITIVE TO PULSATING DIRECT CURRENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Jakub Kaser

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Jakub Kaser

ID: 186107

Ročník: 2

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Matematický model proudového chrániče citlivého na pulzující stejnosměrné proudy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište princip funkce proudového chrániče s důrazem na citlivost na pulzující stejnosměrné proudy a zpracujte požadavky výrobních norem na ověření citlivosti na tyto proudy.
2. Vypracujte matematický popis daného proudového chrániče.
3. Uvedený model implementujte do vybraného simulačního prostředí a proveďte potřebné simulace.
4. Získané výsledky přehledně zpracujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Patočka, M.: Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice, VUTIUM, Brno, 2011, ISBN 978-80-214-4003-6
- [2] Havelka, O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL, 1985
- [3] ČSN EN 61008-1 ed. 3
- [4] ČSN EN 61009-1 ed. 3

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 1.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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 problematikou proudového chrániče a jeho možného vyřazení z provozu kvůli stejnosměrným složkám. Budou zde podrobně popsány magnetické jevy, které se dějí uvnitř přístroje. Následně se vytvoří matematický model chrániče v programu Simulink. Provede se porovnání B-H křivek jádra transformátoru a získané výsledky se použijí do vytvořeného modelu, aby se ověřila správná činnost chrániče a reakce na jednotlivé situace. Součástí práce bude i ověření symetrie magnetického pole chrániče v programu Ansys Maxwell.

Klíčová slova

Proudový chránič, matematický model, Simulink, B-H křivky, Ansys Maxwell

Abstract

This Thesis deals with problematics of residual current circuit breaker and its eventual operation malfunction due to DC components. There are magnetic phenomena described in details which occur inside of the apparatus. Consequently, there is proposed a mathematical model of the circuit breaker in Simulink program. The comparison of B-H curves of transformer core is composed and achieved results are incorporated into the proposed model in order to verify a correct operation of the circuit breaker and its reaction to different conditions. The verification of the symmetry of the magnetic field in residual current circuit breaker in Ansys Maxwell program is also a part of the study.

Keywords

Residual-current device, mathematical model, Simulink, B-H curves, Ansys Maxwell

Bibliografická citace:

KASER, J. *Matematický model proudového chrániče*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. Vedoucí práce: prof. Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Matematický model proudového chrániče jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 8. 1. 2020

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Jiří Valenta, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Za specifické konzultace v programu Simulink děkuji Ing. Ivu Pazderovi Ph.D. a doc. Ing. Radku Cipínovi Ph.D.

V Brně dne 1. 6. 2020

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	12
1 Proudový chránič.....	13
1.1 Funkce a jeho činnost.....	13
1.2 Dělení.....	14
2 Norma EN 61008-1 pro RCCB.....	16
2.1 Obecné definice	16
2.1.1 Definice týkající se působení a funkcí proudových chráničů.....	16
2.2 Souhrn charakteristických vlastností	17
2.2.1 Jmenovitý reziduální nevybavovací proud $I_{\Delta no}$	17
2.2.2 Minimální hodnota jmenovité zapínací a vypínací schopnosti I_m	17
2.2.3 Normalizované hodnoty jmenovitého podmíněného zkratového proudu I_{nc} pro RCCB	18
2.2.4 Minimální hodnota nevybavovacího nadproudu.....	18
2.2.5 Mezní hodnoty doby vypínání a nepůsobení	19
2.3 Zkoušky.....	20
2.3.1 Ověření jmenovité reziduální zapínací a vypínací schopnosti $I_{\Delta m}$	20
2.3.2 Ověření správné činnosti plynulého zvyšování reziduálního pulzujícího stejnosměrného proudu	21
2.3.3 Ověření správné činnosti v případě náhlé reziduální pulzující stejnosměrné složky	21
2.3.4 Ověření činnosti reziduálních pulzujících proudů superponovaných hladkým stejnosměrným proudem	23
3 Magnetické Obvody	24
3.1 Třídění magnetických obvodů.....	24
3.2 Lineární magnetický obvod	24
3.3 Nelineární magnetický obvod.....	27
3.3.1 Výpočet indukovaného napětí	27
3.4 Nelineární magnetický obvod s hysterezí	28
3.4.1 Feromagnetické látky	28
3.4.2 Základní pojmy magnetických vlastností hysterezní smyčky	28
4 Transformátor	32
4.1 Model transformátoru ve tvaru impedanční Z-matice.....	32
4.1.1 Stupně volnosti	33
4.2 Model transformátoru napětí ve tvaru H_u -matice	33
4.3 Matematický model transformátoru napětí.....	35
5 Proudový chránič v programu ansys	36
5.1 Návrh 3D modelu součtového transformátoru.....	36

5.2	Seznámení s programem	39
5.3	Nastavení simulace	41
5.4	Průběh a výsledky simulací	43
5.4.1	VITROPERM 500F	43
5.4.2	VITROPERM 800F	47
5.4.3	Materiál pro proudový chránič typu AC.....	50
5.5	Zhodnocení simulací.....	53
5.5.1	Nesymetrie	53
6	Matematický model proudového chrániče v Simulinku.....	55
6.1	Základní matematický model.....	55
6.1.1	Průběhy základního modelu.....	56
6.2	Poruchová smyčka	57
6.2.1	Průběhy poruchové smyčky	58
6.3	Matematický model jádra součtového transformátoru.....	60
6.3.1	Tvorba rovnic	60
6.3.2	Vliv hystereze jádra.....	61
6.3.3	Zjednodušení modelu.....	63
6.3.4	Výsledky simulací a zhodnocení	63
7	Závěr	72
	Literatura	74
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	75

Seznam obrázků

Obr. 1.1. Schéma proudového chrániče (převzato z [5])	13
Obr. 1.2. Magnetizační křivky jader proudových chráničů typu AC a A (z [10])	15
Obr. 2.1. Obvod na ověření reziduálních pulzujících ss proudů (převzato z [3]).....	22
Obr. 2.2. Obvod se superponovaným hladkým proudem 6 mA (převzato z [3]).....	23
Obr. 3.1. Lineární charakteristiky (převzato z [6])	25
Obr. 3.2. Lineární diskrétní magnetický obvod (převzato z [6])	26
Obr. 3.3. Závislost diferenciální indukčnosti na nelineárním průběhu (z [4])	27
Obr. 3.4. Hysterezní smyčka feromagnetika (převzato z [4])	31
Obr. 4.1. Základní model transformátoru (převzato z [4])	32
Obr. 4.2. Obvodový model transformátoru napětí (převzato z [4])	34
Obr. 4.3. Blokový model transformátoru napětí s char. B(H) (převzato z [4])	35
Obr. 5.1. Vnitřní provedení proudového chrániče.....	36
Obr. 5.2. Součtový transformátor bez sekundárního vinutí	37
Obr. 5.3. Součtový transformátor se sekundárním vinutím	37
Obr. 5.4. Horizontální a vertikální řez feromagnetickým jádrem	37
Obr. 5.5. Vertikální řez feromagnetickým jádrem	38
Obr. 5.6. Součtový transformátor v programu Ansys.....	39
Obr. 5.7. Přiřazení materiálu.....	39
Obr. 5.8. Nadefinování B-H křivky	40
Obr. 5.9. Výběr řezu feromagnetickým jádrem	40
Obr. 5.10. Nadefinování proudu vodičem.....	41
Obr. 5.11. Spočítání magnetického toku v jádře.....	42
Obr. 5.12. B-H křivka VITROPERM 500F.....	43
Obr. 5.13. Prvotní magnetizace VITROPERM 500F.....	44
Obr. 5.14. Rozložení magnetické indukce při 30 mA (500F)	45
Obr. 5.15. Rozložení magnetické indukce při 60 mA (500F)	45
Obr. 5.16. Nesymetrie proudem 3 kA (přesycení 500F)	46
Obr. 5.17. B-H křivka VITROPERM 800F.....	47
Obr. 5.18. Prvotní magnetizace VITROPERM 800F.....	47
Obr. 5.19. Rozložení magnetické indukce při 30 mA (800F)	48
Obr. 5.20. Nesymetrie proudem 3 kA mezi L3 a N (800F)	49
Obr. 5.21. Nesymetrie proudem 3 kA mezi L2 a N (800F)	50
Obr. 5.22. B-H křivka materiálu pro chránič typu AC	50
Obr. 5.23. Prvotní magnetizace materiálu pro typ AC	51
Obr. 5.24. Rozložení magnetické indukce při 30 mA (Typ AC)	51
Obr. 5.25. Rozložení magnetické indukce při 60 mA (Typ AC)	52
Obr. 6.1. Schéma chrániče s poruchou (převzato z [11]).....	55

Obr. 6.2. Prvotní matematický model proudového chrániče	56
Obr. 6.3. Zdroj trojfázového proudu	56
Obr. 6.4. Nesymetrie sítě od fázových vodičů	57
Obr. 6.5. Kompletní poruchová smyčka i s řízeným pulzním signálem	58
Obr. 6.6. Střídavý reziduální proud 30 mA s hladkou ss složkou 10 mA.....	58
Obr. 6.7. Pulzní řízené stejnosměrné reziduální proudy (30 mA)	59
Obr. 6.8. Zadávání hodnot do look-up tabulky.....	61
Obr. 6.9. Magnetizační charakteristika a hystereze v programu Simulink.....	61
Obr. 6.10. Kladná hysterezní smyčka (800F)	62
Obr. 6.11. Kladná magnetizační charakteristika (800F)	62
Obr. 6.12. Smyčka jádra materiálu VITROPERM 500F	63
Obr. 6.13. Reziduální a magnetizační proud 0° (VITROPERM 500F).....	64
Obr. 6.14. Spřažený magnetický tok 0° (VITROPERM 500F)	64
Obr. 6.15. Průběhy magnetických veličin 0° (VITROPERM 500F)	65
Obr. 6.16. Výsledný spřažený magnetický tok 90° (500F).....	65
Obr. 6.17. Smyčka jádra materiálu VITROPERM 800F	66
Obr. 6.18. Poruchový a magnetizační proud (VITROPERM 800F)	66
Obr. 6.19. Spřažený magnetický tok 0° (VITROPERM 800F)	67
Obr. 6.20. Průběhy magnetických veličin 0° (VITROPERM 800F)	67
Obr. 6.21. Průběhy magnetických veličin 135° (VITROPERM 800F)	68
Obr. 6.22. Smyčka jádra materiálu pro typ AC.....	69
Obr. 6.23. Reziduální a magnetizační proud materiálu typu AC	69
Obr. 6.24. Spřažený tok materiálu typu AC	70
Obr. 6.25. Průběhy magnetických veličin (materiál typu AC).....	70

Seznam tabulek

Tab. 2.1 Účinníky pro zkratové zkoušky (převzato z [3])	18
Tab. 2.2. Doby vypínání a nepůsobení pro stř. reziduální proudy (z [3])	19
Tab. 2.3. Celkové doby vypínání pro pulzní reziduální proudy (převzato z [3]).....	19
Tab. 2.4. Rozsahy vypínacích proudů RCCB typu A	21
Tab. 5.1. Parametry součtového transformátoru.....	38
Tab. 5.2. Vlastnosti feromagnetických materiálů	43
Tab. 5.3. Reziduální stejnosměrný proud (500F)	44
Tab. 5.4. Nesymetrie proudem 10A a 3kA (500F)	46
Tab. 5.5. Reziduální stejnosměrný proud (800F)	48
Tab. 5.6. Nesymetrie proudem 10 A a 3 kA (800F)	49
Tab. 5.7. Reziduální stejnosměrný proud (Typ AC)	51
Tab. 5.8. Nesymetrie proudem 10 A a 250 A (Typ AC)	52

ÚVOD

Každý, kdo se rozhodl postavit svůj vysněný dům, nebo se konečně rozhodl provést jeho rekonstrukci, přemýšlí, jak co nejvíce ušetřit. A to se týká i elektroinstalace. Zároveň ale každý chce mít jistotu, aby byl ve svém domě chráněn, že nešikovný dotyk lidského těla s živou částí vedení, neskončí bolestivou nehodou.

Právě proto se do každého rozvaděče instalují nezbytné ochranné prvky, jako jsou jističe, svodiče přepětí nebo proudové chrániče. Jednotlivé prvky plní svou jedinečnou funkci ochrany, nezbytnou k bezpečnému provozu.

Přístroje jsou nové, odzkoušené a použitelné do trvalého provozu. S výbavou je uživatel zcela spokojen, jelikož za takovéto nemalé finanční náklady nabývá dojmu, že je plně chráněn a že se nemůže nic neočekávaného stát. Tato představa může být však v určitých situacích mylná.

Ano, ochranná zařízení v rozvaděči chrání před úrazy a nehodami elektrickým proudem. Fyzikální jevy jsou ale neúprosné a vždy může nastat kritická situace.

Největším problémem jsou atmosférické blesky, které v sobě hromadí obrovské množství energie. Kolikrát takové, na které svodiče přepětí nejsou dimenzovány.

A pak je tu známý, nebezpečný dotyk na živé části. Právě proudový chránič zajišťuje naši nezbytnou ochranu. Technika je ve velkém rozkvětu, neustálým zdokonalováním systémů a náročností uživatelů se tento chránič může zcela vyřadit z provozu, zatím, co se bude stále považovat za plně funkční. Jak je to ale možné? Na vině jsou stejnosměrné složky, které produkují převážně polovodičové systémy, jako jsou frekvenční měniče. Některé druhy chráničů právě tuto složku nerozeznají a nedojde k požadovanému vybavení obvodu.

Tato diplomová práce se podrobně zaměřuje na činnost proudových chráničů citlivých na pulzující stejnosměrné proudy, které mohou běžný chránič zcela vyřadit z provozu. Návrhem matematického modelu ve výpočetním programu Simulink se takové jádro chrániče podrobí simulaci na různé typy poruch s různými vlastnostmi a ověří se, jak se při těchto situacích následně zachová. V práci nebude chybět ani vysvětlení, nebo odvození magnetických jevů, které v chrániči probíhají a které jsou nezbytné k tvorbě samotného matematického modelu.

Součástí diplomové práce bude i ověření symetrie magnetického pole chrániče hladkým stejnosměrným proudem v programu Ansys Maxwell.

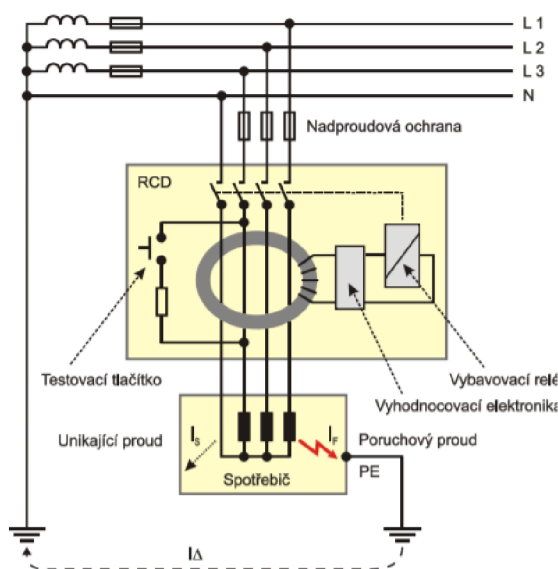
1 PROUDOVÝ CHRÁNIČ

1.1 Funkce a jeho činnost

Proudový chránič (hovorově „fičko“) je nezbytnou součástí nízkonapěťových rozvaděčů. V dnešní době jsou součástí většiny zásuvkových obvodů, či světelných okruhů, kam mají přístup laici. Chrání člověka **před dotykem na živé části**, anebo když dojde **ke zkratu na kostru**. Můžeme tedy o proudovém chrániči říci, že odpojí elektrický obvod, pokud část elektrické energie uniká mimo tento obvod. Všechny pracovní vodiče (fáze a nulový vodič) prochází do spotřebiče přes součtový transformátor. Aby došlo k vypnutí při zemním spojení, nelze zapojit do součtového transformátoru i zemní vodič PE.

Součtový transformátor porovnává součet proudů tekoucích do obvodu s proudem, který se z obvodu vrací zpět ke zdroji. Za normálních provozních podmínek je vektorový součet okamžitých hodnot proudů nulový. Při dotyku, nebo zkratu na zemní vodič vznikne rozdíl mezi porovnávacími proudy. Nastane tak nenulový součet, a pokud unikající proud překročí vybavovací proud chrániče, odpojí chránič obvod od zdroje. Na jádře součtového transformátoru je navinuto sekundární vinutí. Proudovým rozdílem vznikne magnetický tok v jádře, zároveň se na sekundárním vinutí naindukuje proud a napětí, které vybudí proud cívkou relé. Magnetické pole cívky pak působí proti poli trvalého magnetu. Kotva odpadne a rozpojí kontakty. Součástí proudového chrániče je i testovací tlačítko. [5]

Citlivost proudových chráničů tedy určuje vybavovací **reziduální proud $I_{\Delta n}$** , který se za normálního stavu nesmí překročit. [1]



Obr. 1.1. Schéma proudového chrániče (převzato z [5])

1.2 Dělení

Dle velikosti reziduálního proudu $I_{\Delta n}$:

Chrániče se vyrábí nejčastěji s citlivostí **30 mA, 100 mA a 300 mA**. V bytových rozvaděčích se běžně instalují s relativně vysokou citlivostí 30 mA. Nejcitlivější proudový chránič 10 mA se příliš nepoužívá. Někdy ho je možné objevit v nemocnicích. Velikost $I_{\Delta n}$ 300 mA je vhodná pro ochranu proti požáru. Chránič může dosahovat citlivosti i 500 mA.

Dle citlivosti jádra transformátoru na druh proudu:

- **Typ AC** je citlivý pouze na střídavé reziduální proudy. Stejnoseměrné reziduální proudy ho již mohou vyřadit z provozu. [2]
- **Typ A** je citlivý na střídavé reziduální proudy a na **pulzující** stejnosměrné reziduální proudy. Ovšem stejnosměrné reziduální proudy **větší než 6 mA** jej mohou vyřadit z provozu. Proto se velikost této stejnosměrné složky musí hlídat. [2]

Rozdíl mezi typem A a AC ukazuje obrázek 1.2.

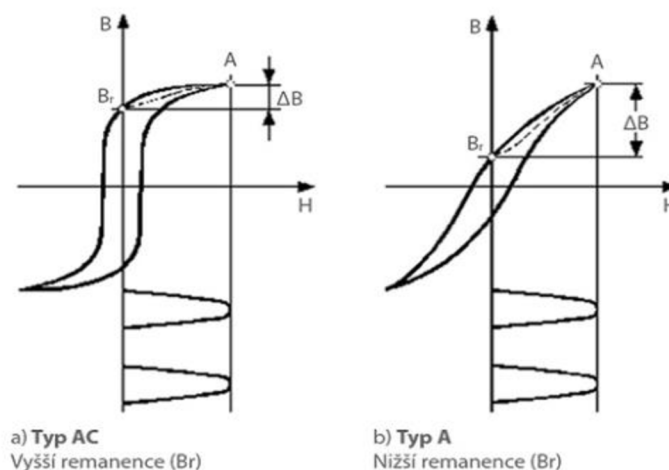
- **Typ F** reaguje jak na sinusové reziduální proudy, tak i na stejnosměrné pulzující proudy. Jeho další vlastnost je umění detekovat proudy až do 1 kHz. Stejnoseměrné reziduální proudy **větší než 10 mA** jej už mohou vyřadit z provozu. Vydrží tedy větší stejnosměrné složky jak typ A. [2]
- **Typ B** je citlivý na střídavé, pulzující, ale hlavně i na **hladké** stejnosměrné reziduální proudy. Pro unikající stejnosměrné složky je tedy nejvhodnější. Hodnota stejnosměrné složky může **přesáhnout 10 mA**. S lepšími vlastnostmi samozřejmě stoupá i cena. [2]

Součtový transformátor má speciální provedení, jelikož je buzen vysokofrekvenčním generátorem. Vytvoří se tedy pomocný střídavý magnetický tok. Reziduálním proudem nastává změna intenzity magnetického pole a je-li změna významná, vyhodnocovací relé vybaví obvod. Přesycením jádra od stejnosměrného reziduálního proudu se magnetická indukce pohybuje nad kolenem B-H křivky a klesne naindukované napětí. Nastává tedy změna a dochází k vypnutí obvodu. [10]

- **Typ B+** je vylepšená verze zmíněného typu B. Hodnota může také **přesáhnout 10 mA**. Používá se ale i v obvodech, kde předpokládáme reziduální proudy o vyšších frekvencích až do 1 kHz. [2]

Dle počtu pólů:

- 2 pólové pro jednofázové použití
- 4 pólové pak pro třífázové použití [2]



Obr. 1.2. Magnetizační křivky jader proudových chráničů typu AC a A (z [10])

Dle časové závislosti vybavení:

- **Bez zpožděného vybavení.** Chrániče jsou na všeobecné použití. Odolnost proti rázovým proudům se pohybuje od 250 A do 1 kA. [2]
- **Typ G** má dobu nepůsobení minimálně **10 ms** proti nežádoucímu vypnutí. Doporučuje se instalovat před zařízení, která způsobují krátkodobé chybové proudy, jako jsou indukční motory, velkoplošná topná tělesa, nebo odrušovací kondenzátory. Tento typ dosahuje odolnosti proti rázovým proudům až 3 kA.
- **Typ S** se používá na kaskádní řazení proudových chráničů pro dosažení selektivity s dobou nepůsobení **40 ms**. Opět se používá před zařízení způsobující chybové proudy jako typ G. Tento typ je však konstruován na proudové rázy dosahující hodnoty **až 5 kA**. [2]

Dle ochrany proti nadproudům:

Proudové chrániče se vyrábí s vypínací schopností **do 6 kA nebo do 10 kA**. Abychom lehce poznali, o jakou vypínací schopnost chrániče jde, označují se **LFE** (6 kA) a **LFN** (10 kA). [2]

Součástí proudového chrániče může být i **nadproudová ochrana typu B nebo C** (hovorově se takovému zařízení říká „jističochránič“). Označují se **OLE** (6 kA) a **OLI** (10 kA). Představují tedy nejen ochranu před dotykem živých a neživých částí, ale i před zkratem a přetížením. Vyrábějí se pouze s typem jádra AC nebo A. [2]

Nadproudová ochrana typu B je spíše využívána v domovních instalacích bez proudových rázů. Zkratová spoušť je nastavena na (3–5) I_n . Typ C je pro zařízení, která způsobují proudové rázy. Nejčastěji se využívají u motorů. Zkratová spoušť je nastavena na (5–10) I_n .

Všechny tyto hodnoty (od citlivosti po vypínací schopnost) jsou natištěné na štítku každého proudového chrániče.

2 NORMA EN 61008-1 PRO RCCB

Tato norma pojednává o proudových chráničích bez vestavěné nadproudové ochrany pro domovní a podobné použití (zkratku mají RCCB). [3]

Norma je velice obsáhlá, tudíž jsou zde pouze informace, které úzce souvisí s tématem diplomové práce.

2.1 Obecné definice

2.1.1 Definice týkající se působení a funkcí proudových chráničů

Proudový chránič bez vestavěné nadproudové ochrany (RCCB) je zařízení, které není navrženo pro provádění funkcí ochrany proti přetížení nebo zkratu. [3]

Proudový chránič s vestavěnou nadproudovou ochranou (RCBO) je zařízení, navržené pro provádění funkcí ochrany proti přetížení a zkratu. Tato norma se jím ale nezajímá. Je vysvětlen v normě **61009-1**. [3]

Celková doba vypínání RCCB je doba, která uplyne mezi okamžikem, kdy je náhle dosaženo reziduálního pracovního proudu, a okamžikem zhasnutí oblouku ve všech pracovních pólech. [3]

Mezní doba nepůsobení je maximální doba, po kterou může na RCCB působit vyšší hodnota reziduálního proudu, než je reziduální nevybavovací proud, aniž by chránič zapůsobil. [3]

RCCB se zpožděním je speciálně navržený přístroj k dosažení předem stanovené hodnoty mezní doby nepůsobení, odpovídající dané hodnotě reziduálního proudu. Vypnutý stav je poloha, ve které je zajištěna předem stanovená vzdušná vzdálenost mezi rozpojenými kontakty hlavního obvodu. [3]

Spínaný nulový pól je určený pouze ke spínání nulového vodiče, který nemá mít zkratovou schopnost. [3]

Hlavní obvod jsou všechny vodivé části RCCB zahrnuté do pólů. [3]

Řídící obvod (jiný než proudová dráha hlavního obvodu) je určený pro spínání RCCB. [3]

Pomocným obvodem rozumíme všechny vodivé části ke spínání kromě hlavního a řídicího obvodu. [3]

2.2 Souhrn charakteristických vlastností

- Počet pólů
- Jmenovitý proud I_n
- Jmenovitý reziduální proud $I_{\Delta n}$
- Jmenovitý reziduální nevybavovací proud $I_{\Delta no}$
- Jmenovité napětí U_n
- Jmenovitý kmitočet
- Jmenovitá zapínací a vypínací schopnost I_m
- Jmenovitá reziduální zapínací a vypínací schopnost $I_{\Delta m}$
- Časové zpoždění
- Pracovní charakteristiky v případě reziduálních proudů se stejnosměrnými složkami
- Stupeň ochrany krytem
- Jmenovitý podmíněný zkratový proud I_{nc}
- Jmenovitý podmíněný reziduální zkratový proud $I_{\Delta c}$
- Způsob montáže
- Způsob připojení
- Rozsah teploty okolního vzduchu [3]

2.2.1 Jmenovitý reziduální nevybavovací proud $I_{\Delta no}$.

Je hodnota proudu přiřazená výrobcem, při které RCCB za stanovených podmínek nevybaví. Hodnota činí **0,5 $I_{\Delta n}$** . [3]

Vztahuje se pouze na sinusový proud. Pro reziduální proudy obsahující stejnosměrnou složku jsou mezní hodnoty nevybavení uvedeny v tabulce 2.4.

Jmenovitý reziduální pracovní proud $I_{\Delta n}$ je pak hodnota, při které RCCB zapůsobit musí. Širší vysvětlení spolu s časovým zpožděním je již v kapitole 1.1.

2.2.2 Minimální hodnota jmenovité zapínací a vypínací schopnosti I_m

Tato hodnota je vztažena i pro jmenovitou reziduální zapínací a vypínací schopnost $I_{\Delta m}$. Proudový chránič RCCB je bez nadproudové ochrany.

Zapínací a vypínací schopnost chrániče je efektivní hodnota střídavé složky předpokládaného proudu přiřazená výrobcem, který je schopen RCCB zapnout, vést po dobu své vypínací doby a vypínat za stanovených podmínek použití. Zkrátka jedná se o takovou hodnotu, která neohrozí funkci tohoto přístroje. [3]

Minimální hodnota jmenovité zapínací a vypínací schopnosti I_m je **10 I_n nebo 500 A**. Ve zkouškách použijeme právě tu hodnotu, která je větší. [3]

2.2.3 Normalizované hodnoty jmenovitého podmíněného zkratového proudu I_{nc} pro RCCB

Podmíněný zkratový proud je efektivní hodnota předpokládaného zkratového proudu přiřazená výrobcem, kterou může RCCB vydržet za stanovených podmínek, aniž by došlo k poškození a zhoršení jeho funkcí. [3]

Jednoduše řečeno. Není schopen tento proud detekovat, ale musí ho vydržet, **dokud nezareaguje** některá z předřadných ochran jistící před zkraty.

Nutno ještě podotknout, že tento proud a následné zkratové zkoušky jsou důležité jen tehdy, pokud je **RCCB chráněný nadproudovou ochranou**. Výsledky jsou opět stejné i **pro jmenovitý podmíněný reziduální proud $I_{\Delta c}$** .

Do 10 000 A včetně jsou hodnoty I_{nc} normalizované (3000 A–4500 A–6000 A–10 000 A). Pro hodnoty nad 10 000 A do 25 000 A včetně je přednostní hodnota 20 000 A. Hodnoty nad 25 000 A nejsou v této normě zastoupeny neberou se tedy v úvahu.

Každá hodnota zkratu má při zkouškách svůj specifický účinník φ podle předepsané metody. [3]

Tab. 2.1 Účinníky pro zkratové zkoušky (převzato z [3])

Zkratový proud I_{nc} [A]	Účinník φ [-]
$I_{nc} \leq 500$	0,95 až 1,00
$500 \leq I_{nc} \leq 1500$	0,93 až 0,98
$1\ 500 \leq I_{nc} \leq 3000$	0,85 až 0,90
$3000 \leq I_{nc} \leq 4500$	0,75 až 0,80
$4500 \leq I_{nc} \leq 6000$	0,65 až 0,70
$6000 \leq I_{nc} \leq 10\ 000$	0,45 až 0,50
$10\ 000 \leq I_{nc} \leq 25\ 000$	0,20 až 0,25

2.2.4 Minimální hodnota nevybavovacího nadproudu

Normalizovaná hodnota nevybavovacího nadproudu v případě jednofázové zátěže na trojpólovém nebo čtyřpólovém RCCB činí **6 I_n** . [3]

2.2.5 Mezní hodnoty doby vypínání a nepůsobení

2.2.5.1 Mezní hodnoty doby vypínání a nepůsobení pro střídavé reziduální proudy pro typ A a AC

Minimální doba nepůsobení je čas, za který nesmí dojít k vybavení RCCB (pro chránič typu S).

Tab. 2.2. Doby vypínání a nepůsobení pro stř. reziduální proudy (z [3])

		<i>Mezní hodnoty doby vypínání a doby nepůsobení pro RCCB</i>							
Typ	I_n [A]	$I_{\Delta n}$ [A]	$I_{\Delta n}$	$2 I_{\Delta n}$	$5 I_{\Delta n}$	$5 I_{\Delta n}$ nebo 25 A	5 A–200 A	500 A	
Obecný	Jakákoli	<0,03	0,3	0,15	-	0,04	0,04	0,04	Vypínání
		0,03	0,3	0,15	-	0,04	0,04	0,04	
		>0,03	0,3	0,15	0,04	-	0,04	0,04	
S	≥25	>0,03	0,5	0,2	0,15	-	0,15	0,15	Nepůsobení
		>0,03	0,13	0,06	0,05	-	0,04	0,04	

2.2.5.2 Maximální hodnoty celkové doby vypínání pro pulzující reziduální proudy pro typ A

Tab. 2.3. Celkové doby vypínání pro pulzní reziduální proudy (převzato z [3])

		<i>Mezní hodnoty doby vypínání RCCB pro pulzní reziduální proudy (rms)</i>								
Typ	I_n [A]	$I_{\Delta n}$ [A]	$1,4 I_{\Delta n}$	$2 I_{\Delta n}$	$2,8 I_{\Delta n}$	$4 I_{\Delta n}$	$7 I_{\Delta n}$	0,35 A	0,5 A	350 A
Obecný	Jakákoli	<0,03	-	0,3	-	0,15	-	-	0,04	0,04
		0,03	0,3	-	0,15	-	-	0,04	-	0,04
		>0,03	0,3	-	0,15	-	0,04	-	-	0,04
S	≥25	>0,03	0,5	-	0,2	-	0,15	-	-	0,15

2.3 Zkoušky

V této kapitole se ověří pouze zkoušky týkající se stejnosměrných reziduálních proudů a vypínací a zapínací schopnosti proudového chrániče na zkratové proudy.

2.3.1 Ověření jmenovité reziduální zapínací a vypínací schopnosti $I_{\Delta m}$

Zkouška je nezbytná pro ověření RCCB ve stavu zapnutí, vedení zkratového proudu po stanovenou dobu a následného vypnutí, aniž by byla porušena jeho funkce. [3]

2.3.1.1 Podmínky zkoušky

RCCB je zkoušen podle obecných podmínek zkoušky, přičemž do obvodu není zapojeno žádné ochranné zařízení jistící před zkratem (SCPD). Obvod musí být zapojen tak, aby zkratový proud byl zároveň proud reziduální. Proudové dráhy, které se nepodílí na vedení reziduálního zkratového proudu, jsou připojeny k napájecímu napětí na svorkách na straně sítě. Spoje se zanedbatelnou impedancí jsou pak nahrazeny spoji, mající přibližnou impedanci jako SCPD. Zkouška se provádí postupně na každém pólu RCCB. Výjimkou je spínaný nulový pól, pokud je použit v zapojení. [3]

2.3.1.2 Postup zkoušky

Provede se následující sled funkcí:

0-t-CO-t-CO

O Představuje vypnutí zkratu jistícím prvkem RCCB.

CO Představuje zapnutí RCCB do zkratu, kde ihned následuje automatické vypnutí.

t Představuje časový interval mezi dvěma po sobě jdoucími zkraty. Trvá minimálně 3 minuty nebo tak dlouho, jak je potřeba pro nové nastavení. [3]

2.3.2 Ověření správné činnosti plynulého zvyšování reziduálního pulzujícího stejnosměrného proudu

Zkouška se provádí podle obrázku 2.1. Pomocné spínače S1 a S2 spolu s RCCB musí být zapnuty. Příslušný tyristor je řízen tak, aby bylo dosaženo úhlů s proudovým zpožděním 0°, 90° a 135° (viz Tabulka 2.4.). Každý pól proudového chrániče musí být zkoušen dvakrát při každém úhlu proudového zpoždění, v poloze I a v poloze II spínače S3. [3]

Tab. 2.4. Rozsahy vypínacích proudů RCCB typu A

úhel α [°]	Vypínací proud [A]	
	Spodní mez I_n	Horní mez I_n
0	0,35	1,4 nebo 2
90	0,25	
135	0,11	

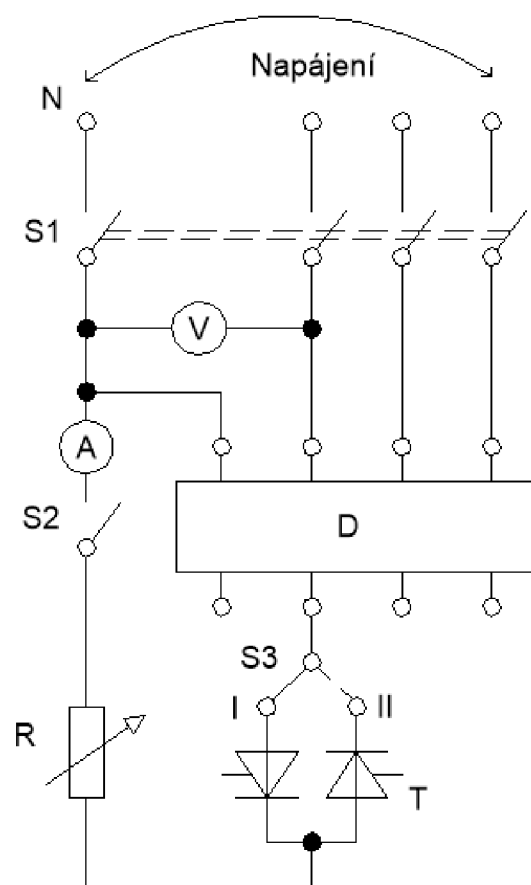
Při každé zkoušce se proud musí plynule zvyšovat od nuly přibližně rychlostí $1,4 I_{\Delta n}/30$ A za sekundu pro RCCB s $I_{\Delta n} > 0,01$ A, a při rychlosti $2 I_{\Delta n}/30$ A za sekundu pro RCCB s $I_{\Delta n} \leq 0,01$ A. [3]

Vypínací proud musí být též v souladu s tabulkou 2.4.

2.3.3 Ověření správné činnosti v případě náhlé reziduální pulzující stejnosměrné složky

Zkouška se provádí opět podle obrázku 2.1. Pomocný spínač S1 a RCCB jsou v zapnuté poloze. Reziduální proud je pak náhle zapnut spínačem S2. Zkouška se provádí při každé hodnotě reziduálního jmenovitého proudu podle tabulky 2.3. pro pulzní reziduální proudy. [3]

Dvě měření celkové doby vypínání se provedou při každé hodnotě $I_{\Delta n}$ (tabulka 2.3.) při úhlu proudového zpoždění 0°. S pomocným spínačem S3 nejprve v poloze I a poté v poloze II pro druhé měření. Žádná hodnota nesmí překročit stanovené mezní hodnoty celkové doby vypínání. [3]

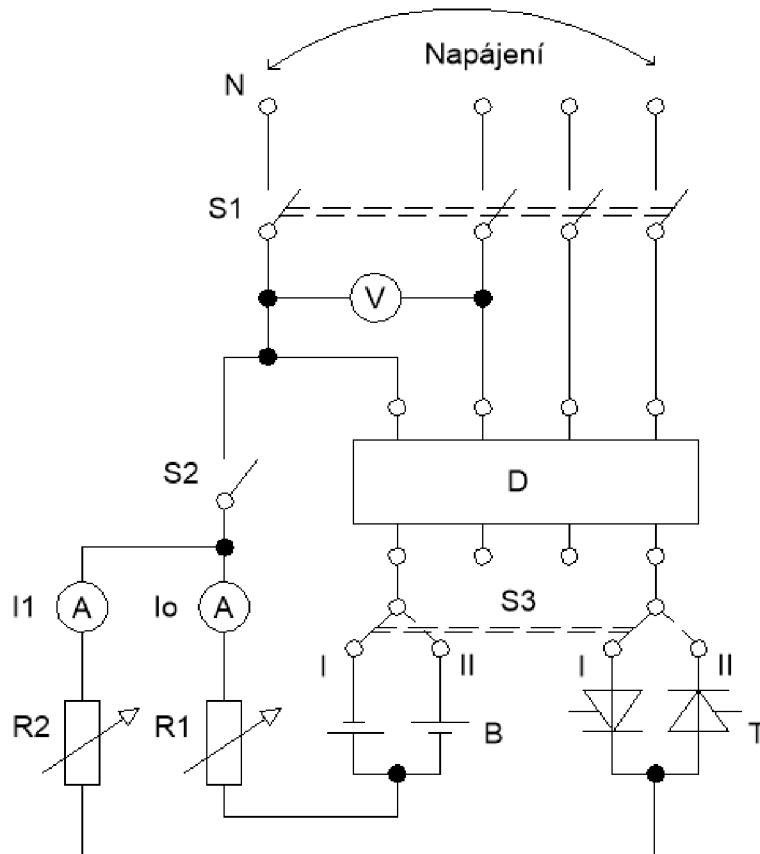


Obr. 2.1. Obvod na ověření reziduálních pulzujících ss proudů (převzato z [3])

- V Voltmetr
- A Ampérmetr měřící efektivní hodnoty proudů
- D Zkoušený RCCB
- T Tyristory s nastavitelným proudovým zpožděním
- R Nastavitelný rezistor
- S1 Vícepólový spínač napájení
- S2 Jednopolový spínač reziduálního proudu
- S3 Dvoupolohový spínač tyristorů [3]

2.3.4 Ověření činnosti reziduálních pulzujících proudů superponovaných hladkým stejnosměrným proudem

Proudový chránič je zkoušen podle zapojení na obrázku 2.2, kde k pulzujícímu stejnosměrnému proudu řízeném tyristory je superponovaný stejnosměrný proud od baterek o hodnotě **6 mA**. Úhel proudové zpoždění bude pouze 0° . Všechny póly se zkouší postupně dvakrát v polohách I a II. RCCB a spínače S1 a S2 jsou zapnuté. Půllný proud I1 se plynule zvyšuje od nuly s rychlostí $1,4 I_{\Delta n}/30 \text{ A za sekundu}$ pro RCCB s reziduálními proudy do $0,01 \text{ A}$ a $2 I_{\Delta n}/30 \text{ A za sekundu}$ pro RCCB s reziduálními proudy nad $0,01 \text{ A}$. Přístroj musí vypnout dříve, než proud dosáhne hodnot překračující $1,4 I_{\Delta n}$ nebo $2 I_{\Delta n}$ (viz tabulka 2.4.). [3]



Obr. 2.2. Obvod se superponovaným hladkým proudem 6 mA (převzato z [3])

- B Baterie
- I1 Pulzující reziduální stejnosměrný proud
- Io Superponovaný hladký stejnosměrný proud [3]

3 MAGNETICKÉ OBVODY

Jedna z důležitých částí proudového chrániče je součtový transformátor. V něm probíhá celá řada magnetických jevů. Proto je znalost této problematiky zcela nezbytná pro zhotovení matematického modelu.

Magnetický obvod může být spojitý nebo diskrétní. Kapitola bude věnována obvodům diskrétním, které obsahují feromagnetické jádro s velkou permeabilitou. **Diskrétní znamená ohraničený.** Veškerý tok tedy prochází ohraničenou cestou, která je vymezena geometrií jádra transformátoru. [4]

Nejprve jsou zde připomenuty základní dělení, termíny a vztahy, které vedou k pochopení složitějších operací a později **k návrhu matematického modelu.**

3.1 Třídění magnetických obvodů

Podle tvaru funkční závislosti spřaženého toku Ψ na proudu i se dělí magnetické obvody na **lineární a nelineární.** [4]

Nezávisle na předešlém třídění mohou být obvody „obyčejné“ **neparametrické a parametrické.** Parametrickým obvodem rozumíme situaci, kdy tok Ψ je funkčně závislý kromě proudu na dalším parametru (délka vzduchové mezery, teplota).

Všechny čtyři možnosti obou vlastností se mohou libovolně nakombinovat. Důležitým typem magnetických obvodů je například **nelineární s hysterezí**, což je zvláštní a složitější druh nelinearity. [4]

Cílem této analýzy je umění z každé situace vypočítat indukované napětí v cívce. Tento výpočet je pak základním prvkem pro vytváření matematických modelů transformátorů. [4]

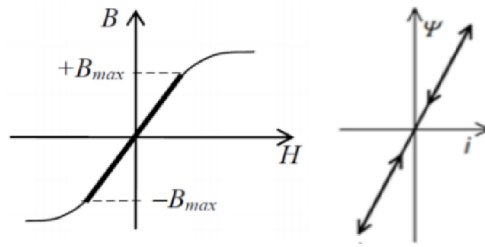
3.2 Lineární magnetický obvod

Pokud je magnetický obvod lineární, platí přímá úměra mezi spřaženým magnetickým tokem a proudem. [4]

$$\Psi = L \cdot I, \quad \Psi = L \cdot i(t) \tag{3-1}$$

Konstanta úměrnosti je zde indukčnost cívky L . Přímá úměra platí jak staticky, tak i dynamicky, pro okamžité hodnoty měnící se libovolně v čase.

V technické praxi lze považovat i feromagnetický obvod za lineární, pokud se pracovní bod pohybuje v lineární oblasti (viz obr. 3.1.). Namísto absolutní magnetizační charakteristiky $\Psi = \Psi(i)$ je výhodnější používat charakteristiku **$B = B(H)$** , která není závislá na geometrických rozměrech jádra. Umožňuje tak **porovnávat magnetické vlastnosti** různých materiálů. [4]



Obr. 3.1. Lineární charakteristiky (převzato z [6])

Magnetický tok jádra lze vyjádřit jako přímá úměra magnetické indukce B a průřezu jádra S . [4]

$$\Phi = B \cdot S \quad (3-2)$$

Pomocí mag. toku Φ a počtu závitů cívky N lze vyjádřit i spřažený tok Ψ . [4]

$$\Psi(t) = N \cdot \Phi(t) = N \cdot S \cdot B(t) \quad (3-3)$$

Má-li magnetický obvod po celé délce l konstantní průřez S i permeabilitu μ , říkáme o něm, že je **homogenní**. Pak lze zavést magneticko-elektrické vztahy:

- Magnetomotorické napětí U_m [A; A/m; m]

$$U_m = N \cdot I_\mu = H \cdot l \quad (3-4)$$

- Magnetický tok Φ [Wb; T; m²]

$$I_m = \Phi = B \cdot S \quad (3-5)$$

- Magnetická vodivost λ_m [H; Wb; A]

$$\lambda_m = \frac{I_m}{U_m} = \frac{B}{H} \cdot \frac{S}{l} = \mu \cdot \frac{S}{l} \quad (3-6)$$

- Permeabilita neboli měrná magnetická vodivost μ [-; T; A/m]

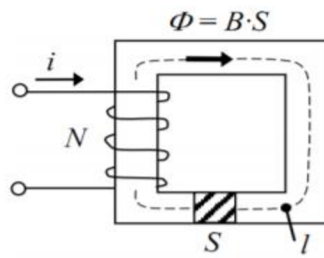
$$\mu = \frac{B}{H} = \mu_o \cdot \mu_r \quad (3-7)$$

- Magnetický odpor R_m [H⁻¹; Wb]

$$R_m = \frac{1}{\lambda_m} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S} \quad (3-8)$$

- Indukčnost magnetického obvodu L [H; z; Wb]

$$L = N^2 \cdot \lambda_m = \frac{N^2}{R_m} \quad (3-9) \text{ (celý odstavec podle [4])}$$



Obr. 3.2. Lineární diskretní magnetický obvod (převzato z [6])

Další nezbytná základní veličina je **indukované napětí** v lineárním magnetickém obvodu. Je to vlastně **časová změna spřaženého magnetického toku Ψ** .

$$u(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt} = N \cdot \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (3-10)$$

Rovnice (3-10) je platná zcela obecně jak v lineárních, tak i v nelineárních obvodech. Rovnice 3-11 pak platí pouze ve zvláštních případech lineárního magnetického obvodu. [4]

Indukčnost se v lineárním stavu podle rovnice nemění. V nelineárních obvodech by tedy byla proměnná dle velikosti proudu. O tom se více dozvíte v kapitole nelineární magnetické obvody.

$$u(t) = \frac{dL \cdot i(t)}{dt} = L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (3-11)$$

Diferenciální přírůstek magnetické energie lze vyjádřit pomocí okamžitého výkonu. [4]

$$dW(t) = p(t)dt = \mathbf{u(t)} \cdot \mathbf{i(t)} dt = \frac{d\Psi(t)}{dt} \cdot i(t) dt = \mathbf{i(t)} \cdot \mathbf{d\Psi(t)} \quad (3-12)$$

Máme dva způsoby výpočtu energie. **První způsob** vychází z **inverzní** magnetické charakteristiky podle rovnice 3-1 a **druhý způsob** podle rovnice 3-11.

$$W(t) = W_o + \int \frac{\Psi(t)}{L} \cdot d\Psi(t) = W_o + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}} \frac{\Psi^2(t)}{L} \quad (3-13)$$

$$W(t) = W_o + \int L \frac{di(t)}{dt} \cdot i(t) dt = W_o + L \int i(t) \cdot di(t) = W_o + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}} L i^2(t) \quad (3-14)$$

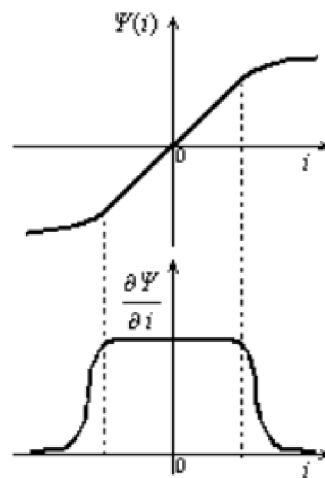
(vše podle [4])

3.3 Nelineární magnetický obvod

Uvažuje se magnetický obvod bez vzduchové mezery. V tomto případě není závislost spřaženého magnetického toku Ψ na proudu i již lineární. Magnetizační charakteristiku (viz obrázek 3.3.) lze získat z funkce $B = B(H)$ a z rozměrů jádra. [4]

$$\Psi = N \cdot \Phi = N \cdot S_{Fe} \cdot B(H) \quad (3-15)$$

$$i = \frac{l_{Fe}}{N} \cdot H \quad (3-16)$$



Obr. 3.3. Závislost diferenciální indukčnosti na nelineárním průběhu (z [4])

3.3.1 Výpočet indukovaného napětí

Magnetizační charakteristiku lze chápat jako složenou funkci dynamickou $\Psi(t) = \Psi[i(t)]$. Hranatými závorkami je znázorněna **vnější statická funkce proudu** a kulatými závorkami **vnitřní dynamická funkce času**.

Výpočet indukovaného napětí pak vyplývá z obecného indukčního zákona zapsaného v diferenciálním tvaru. [4]

$$u(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt} = \frac{d\Psi[i(t)]}{dt} = \frac{\partial\Psi[i]}{\partial i} \cdot \frac{di(t)}{dt} = L_d[i] \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (3-17)$$

Výsledný vztah je velice podobný vztahu s lineární závislostí. Liší se pouze ve významu indukčnosti obvodu. Indukčnost L_d je **diferenciální**. Jinými slovy **se mění s velikostí proudu** (viz rovnice 3-17). V nepřesycené oblasti magnetizační charakteristiky je přibližně konstantní. Při velkých proudech rychle klesá až na indukčnost vzduchové cívky. Jako kdyby v obvodě již nebylo feromagnetické jádro. [4]

3.4 Nelineární magnetický obvod s hysterezí

V této kapitole se podrobně rozebere hysterezní smyčka feromagnetika a jednotlivé jevy, které zde probíhají. Z feromagnetika je vyrobeno i jádro součtového transformátoru proudového chrániče, tudíž **hystereze je nedílnou součástí jakéhokoli návrhu.**

Hystereze vzniká za předpokladu, kdy změny (magnetování) způsobené magnetickým polem jsou již **nevratné**. [4]

3.4.1 Feromagnetické látky

Tyto materiály jsou krystalické a svou přítomností **silně zesilují magnetické pole**. Skupiny atomů v této látce vytvářejí malé oblasti tzv. domény. Dochází zde ke spontánní magnetizaci, tj. že v těchto doménách dochází k samovolnému paralelnímu uspořádání magnetických momentů atomů do jednoho směru. Po vložení do magnetického pole se tyto domény orientují do směru vnějšího magnetického pole a materiál je zmagnetován a pomalu přechází do nasyceného stavu. [7]

Feromagnetické látky jsou čisté prvky jako železo (Fe), nikl (Ni), kobalt (Co) nebo gadolinium (Gd). Často se používají jejich slitiny. Nejznámější a nejpoužívanější je slitina Fe + Ni. Vykazují velikou relativní permeabilitu ($\mu_r \gg 1$).

Další důležité magnetické materiály jsou **ferity**. Patří mezi látky ferimagnetické, což jsou podobné látky jako feromagnetické. Ferimagnetické materiály se skládají z krystalických podmřížek s různou magnetizací, která jim **zůstává**. Jedná se o sloučeniny několika prvků (nejčastěji zastoupeny jsou zinek, mangan a oxidy železa). Používají se především na **permanентní magnety**. [4]

3.4.2 Základní pojmy magnetických vlastností hysterezní smyčky

Všechny tyto poznatky a názvosloví přímo souvisí s tvarem **hysterezní smyčky** feromagnetického materiálu.

3.4.2.1 Magnetická polarizace J

Celkový magnetický tok Φ (tedy i magnetická indukce B uvnitř feromagnetika) se skládá ze dvou složek.

$$B(H) = \mu_0 H + J(H) \quad (3-18)$$

První složka v rovnici 3-18 představuje magnetizaci samotného vakua v meziatomárním prostoru feromagnetika. Nezávisí na materiálu. Je přítomna vždy. **Druhá složka se nazývá magnetická polarizace J.** Jednotku má stejnou jako magnetická indukce (T). Tato polarizace naopak **popisuje chování (natočení)** atomů obsažených v materiálu feromagnetika.

Měřením lze pouze zjistit výslednou závislost $B(H)$. Polarizaci můžeme určit nepřímo výpočtem.

$$J(H) = B(H) - \mu_0 H \quad (3-19)$$

Polarizace J se tedy nepřímo určí odečtením magnetizační charakteristiky vakua. Je to šikmá přímka o rovnici $B = \mu_0 H$. Čím je hysterezní smyčka užší, tím je zanedbatelnější příspěvek vakua a smyčky prakticky splývají. Příspěvek vakua je nulový v remanentních hodnotách J_r, B_r . [4]

3.4.2.2 Magnetizace M

Magnetizace se chápe jako **objemová hustota atomárních magnetických momentů** ve feromagnetiku (viz rovnice 3-29). Nejjednodušeji ji lze vypočítat z magnetické polarizace a permeability vakua.

$$M = \frac{dm_\mu}{dV} = \frac{J}{\mu_0} \quad (3-20)$$

3.4.2.3 Bod nasycení feromagnetika

Je to okamžik, kdy **magnetické momenty všech atomů jsou již plně natočené do jednoho směru** vnějšího magnetického pole. Bod je charakterizován na vrcholu hodnotami B_{sat} , resp. J_{sat} . V praxi není tento stav využíváný, neboť při střídavém magnetování je hysterezní smyčka příliš široká. Z geometrického hlediska se tento bod i obtížně hledá, důvodem je neustálý nárůst křivky $\mu_0 H$. Diferenciální permeabilita klesne a má hodnotu μ_0 . [4]

3.4.2.4 Maximální použitelná pracovní indukce

Tato pracovní indukce B_{max} se nachází přibližně v koleni (označení **K**) křivky prvotní magnetizace hysterezní smyčky. Tato hodnota není přesnou materiálovou konstantou. Určuje se podle pracovního režimu feromagnetika, kde se plánuje využívat. Čím výše je položen bod B_{max} nad kolenem charakteristiky, tím strmější je plocha hysterezní smyčky, a tedy i větší hysterezní ztráty. [4]

3.4.2.5 Křivka prvotní magnetizace

Tato křivka vychází z počátečních podmínek, tj. z pracovního bodu $B = 0$ při $H = 0$. Jsou celkem 4 oblasti, kdy se materiál začne nasycovat.

Oblast počáteční magnetizace. Magnetické momenty se postupně mírně natáčejí do směru vnějšího pole. Tato oblast je vratná.

Oblast snadné magnetizace. Zde se domény již spojují a jejich stěny se posouvají do snadné magnetizace. Dochází k mírným tepelným ztrátám. Tato oblast je již nevratná a nastává hystereze. Křivka má zde největší strmost. V mikroskopickém hledisku má v této oblasti schodovitý charakter, tzv. Barkhausenův jev. Diferenciální permeabilita zde nabývá nejvyšší hodnoty v inflexním bodě (viz obrázek 3.4.).

Oblast postupného nasycování. Dochází k násilnému natočení všech domén magnetických momentů ze snadné magnetizace do směru vnějšího pole.

Oblast úplného nasycení. Zcela všechny magnetické momenty jsou již natočeny do vnějšího pole. Oblast vykazuje hodnoty $B = B_{sat}$, $J = J_{sat}$ a $\mu = \mu_0$. [4]

3.4.2.6 Hysterezní smyčka feromagnetika

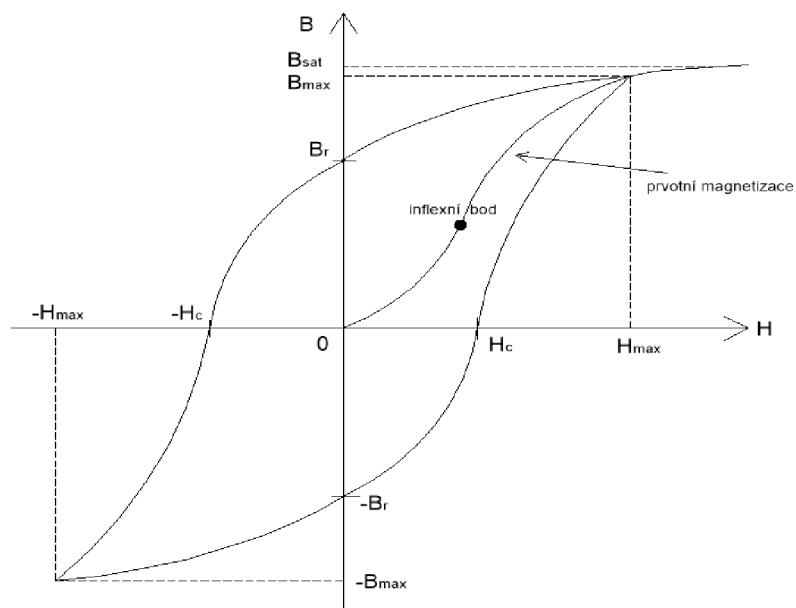
Je to uzavřená smyčka s funkční závislostí $B = B(H)$ (viz obrázek 3.4.). Získává se nejčastěji a nejjednodušeji z osciloskopického měření, napájí-li se cívka střídavým signálem o určité amplitudě. [4]

Plocha hysterezní smyčky vzniká při střídavém přemagnetování. Má význam měrné ztrátové energie přeměňující se na teplo. Plocha smyčky může být úzká (magneticky měkké materiály) nebo široká (magneticky tvrdé materiály). **Magneticky měkké materiály** se dají snadno zmagnetovat. Své vlastnosti pak ztrácí ihned po vyndání z magnetického pole. Vyrábějí se z nich hlavně jádra cívek. **Magneticky tvrdé materiály** si své vlastnosti zachovávají (jsou stále zmagnetovány). K natočení magnetických momentů do daného směru je potřeba mnoho počáteční energie. Takovou hysterezní smyčku mají permanentní magnety (viz kapitola 3.4.1.). [4] [8]

Křivka je složena a charakterizována veličinami B_{max} a H_{max} , což je bod nasycení. Důležité souřadnice pak jsou remanentní indukce B_r při $H = 0$ a koercitivní intenzita pole H_c při $B = 0$. [4]

Remanentní indukce B_r je zbytková indukce, kterou si materiál podrží, i když intenzita magnetického pole již klesla na nulu. [8]

Koercitivní intenzita H_c je intenzita magnetického pole potřebná k odstranění remanentní indukce (magnetické remanence). V tomto stavu nastává **demagnetizace**. [8]



Obr. 3.4. Hysterezní smyčka feromagnetika (převzato z [4])

3.4.2.7 Diferenciální permeabilita

Tato permeabilita je určena diferenciálním přírůstkem již známých magnetických veličin.

$$\mu_{dif} = \frac{dB}{dH} \cong \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (3-21)$$

Matematicky se určuje jako směrnice tečny v určitém pracovním bodě charakteristiky (**v inflexním bodě je největší**, viz kapitola 3.4.2.5.).

Diferenciální permeabilita je funkcí intenzity H . Při vytváření matematických modelů je však lepší znát její funkční závislost s indukcí B . Funkční závislost jde přepočítat pomocí magnetizační charakteristiky $B(H)$. [4]

3.4.2.8 Relativní permeabilita

Tato permeabilita se vztahuje pouze na použitý feromagnetický materiál. Říká, jak je materiál magneticky vodivý. Spočítá se pomocí permeability vakua.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3-22)$$

3.4.2.9 Curieova teplota

Je to teplota, při níž **poklesne počáteční relativní permeabilita na polovinu své hodnoty** oproti 20 °C. Prudkým poklesem permeability klesne i indukčnost transformátoru. Kolikrát indukčnost klesne, tolikrát vzroste magnetizační proud, Joulovy ztráty, a tedy i teplota vinutí. [4]

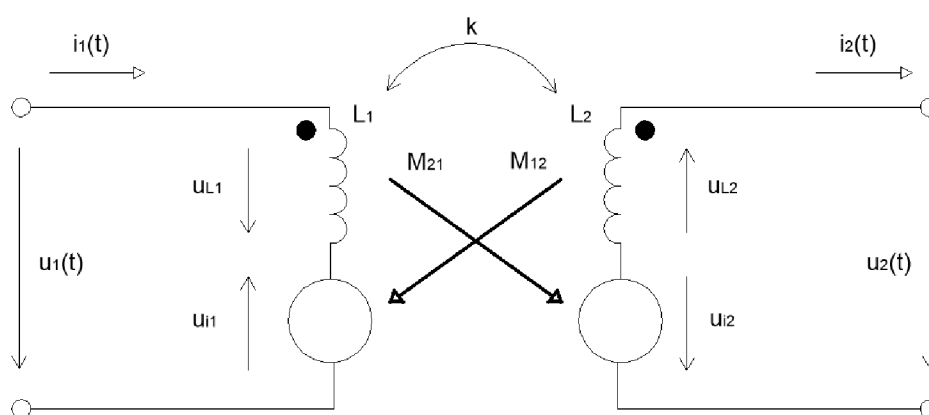
4 TRANSFORMÁTOR

Tato kapitola se zabývá magnetickými ději uvnitř transformátoru. Transformátor je zařízení, sloužící k přeměně parametrů střídavé složky napětí a proudu. Skládá se z primární a sekundární cívky. Mezi těmito cívkami se nachází elektromagnetické jádro. Po přivedení proudu na primární cívku protéká jádrem magnetický tok Φ . Princip přeměny tedy obstarává **elektromagnetická indukce**.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \gg U_2 = U_1 \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad (4-1)$$

Velikost naindukovaného napětí U_2 na sekundárním vinutí závisí na počtu závitů cívky (N_1 a N_2) a také na napětí zdroje U_1 , ke kterému je transformátor připojen. Vlastnosti transformátoru jsou dále závislé na konstrukci a volbě materiálu jádra. Nezbytná je velikost magnetizačního proudu i_μ a hlavně magnetické indukce B v jádře, aby nedocházelo k přesycení.

4.1 Model transformátoru ve tvaru impedanční Z-maticy



Obr. 4.1. Základní model transformátoru (převzato z [4])

Z tohoto obrázku lze vytvořit Z-matici pro okamžité hodnoty.

$$u_1(t) = L_1 \frac{di_1(t)}{dt} - u_{i1} = L_1 \frac{di_1(t)}{dt} - M_{12} \frac{di_2(t)}{dt} \quad (4-2a)$$

$$u_2(t) = u_{i2} - L_2 \frac{di_2(t)}{dt} = M_{21} \frac{di_1(t)}{dt} - L_2 \frac{di_2(t)}{dt} \quad (4-2b)$$

Vlastní indukčnosti primární a sekundární cívky jsou označeny jako L_1 a L_2 . Cívky mají mezi sebou **vzájemnou indukčnost** M_{12} a M_{21} . Vznikají tak zdroje indukovaného napětí při průchodu proudu v opačném vinutí. Indukované napětí je pak i úměrné derivaci proudu na opačné straně (viz obrázek 4.1). [4]

Důležitý je i **činitel vazby** k mezi oběma cívkami. Hodnota je od 0 do 1. Pokud se činitel vazby transformátoru blíží 1, nazývá se těsný a magnetický obvod je plně uzavřený. Transformátor může být také rozptylový ($k < 1$). Cívky nemají těsnou vazbu a tento druh transformátoru pak uzavírá společně se vzduchem kolem feromagnetika rozptylový tok. Rozptyl se dá zvětšit například i vzduchovými mezerami v magnetickém obvodu, nebo zařazením magnetizačního bočnicku. [4][9]

4.1.1 Stupně volnosti

Transformátor má tři stupně volnosti. Jeho vlastnosti jsou popsány **nezávislými přenosovými parametry** ($K_{U,0}$, $K_{I,K}$, Z_{vst}) nebo **nezávislými obvodovými parametry** (L_1 , L_2 a M nebo L_1 , L_2 a k). Čtveřice parametrů (L_1 , L_2 , M a k) jsou na sobě závislé. [4]

$$M = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2} \quad (4-3)$$

Proto je jeden z těchto parametrů nadbytečný. U přenosových parametrů jsou důležité dvě lineární závislosti. [4]

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

Lze to chápat tak, že napětíový přenos „tam“ (\rightarrow) je stejný jako proudový přenos „zpět“ (\leftarrow). Je to tzv. převod (přenos) transformátoru. Je totožný s pojmy **napětíový přenos naprázdno** ($K_{U,0}$) a **proudový přenos nakrátko** ($K_{I,K}$). [4]

4.2 Model transformátoru napětí ve tvaru H_u -matice

Tento model je nejdůležitější z hlediska technického využití transformátoru a pro **návrh blokového schématu**. Rovnice odpovídající Z-matici (viz rovnice 4-2) je nutno algebraicky přetvořit do tvaru H_u matice (rovnice 4-5). [4]

$$i_1(t) = I_{\mu 0} + \frac{1}{L_1} \cdot \int u_1(t) dt + k \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \cdot i_2(t) \quad tj.: i_1(t) = i_{\mu}(t) + i_2'(t) \quad (4-5a)$$

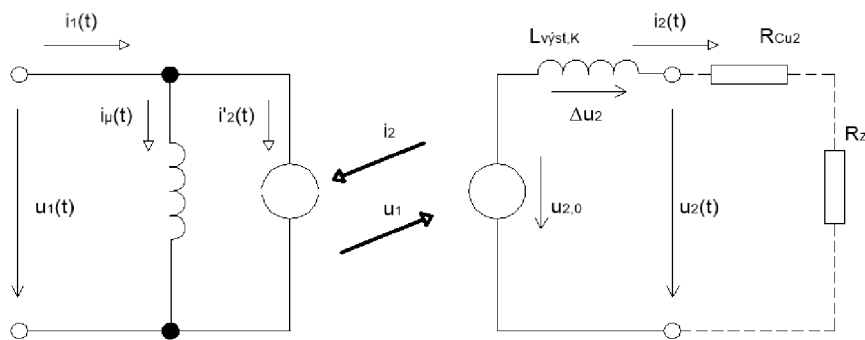
$$u_2(t) = k \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \cdot u_1(t) - L_2(1 - k^2) \cdot \frac{di_2(t)}{dt} \quad tj.: u_2(t) = u_{2,0}(t) - \Delta u_2(t) \quad (4-5b)$$

Přenos (převod) modelu transformátoru napětí je následující:

$$K_{U,21,0} = K_{I,12,K} = \frac{M}{L_1} = k \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \cong k \sqrt{\frac{N_2^2 \cdot \lambda_m}{N_1^2 \cdot \lambda_m}} \cong k \frac{N_2}{N_1} \cong \frac{N_2}{N_1} \quad (4-6)$$

Poslední část rovnice 4-6 platí pouze ve zvláštních případech, kdy k se blíží 1. Magnetické vodivosti jsou přibližně stejné.

Obvodový model, ze kterého se rovnice 4-5 získávají, se chová **na vstupu jako zdroj proudu a na výstupu jako zdroj napětí**. [celý odstavec i s rovnicemi z literatury 4]



Obr. 4.2. Obvodový model transformátoru napětí (převzato z [4])

Nyní je ještě potřeba dovysvětlit význam všech veličin v rovnicích 4-5. Magnetizační „tokotvorný“ primární proud:

$$i_{\mu}(t) = I_{\mu 0} + \frac{1}{L_1} \cdot \int u_1(t) dt \quad (4-7)$$

Proud zátěže přepočítaný na primární stranu:

$$i'_2(t) = k \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \cdot i_2(t) \quad (4-8)$$

Výstupní napětí naprázdno:

$$u_{2,0}(t) = k \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \cdot u_1(t) \quad (4-9)$$

Výstupní indukčnost změřitelná při zkratovaných vstupních svorkách:

$$L_{vyst,K} = L_2(1 - k^2) \quad (4-10)$$

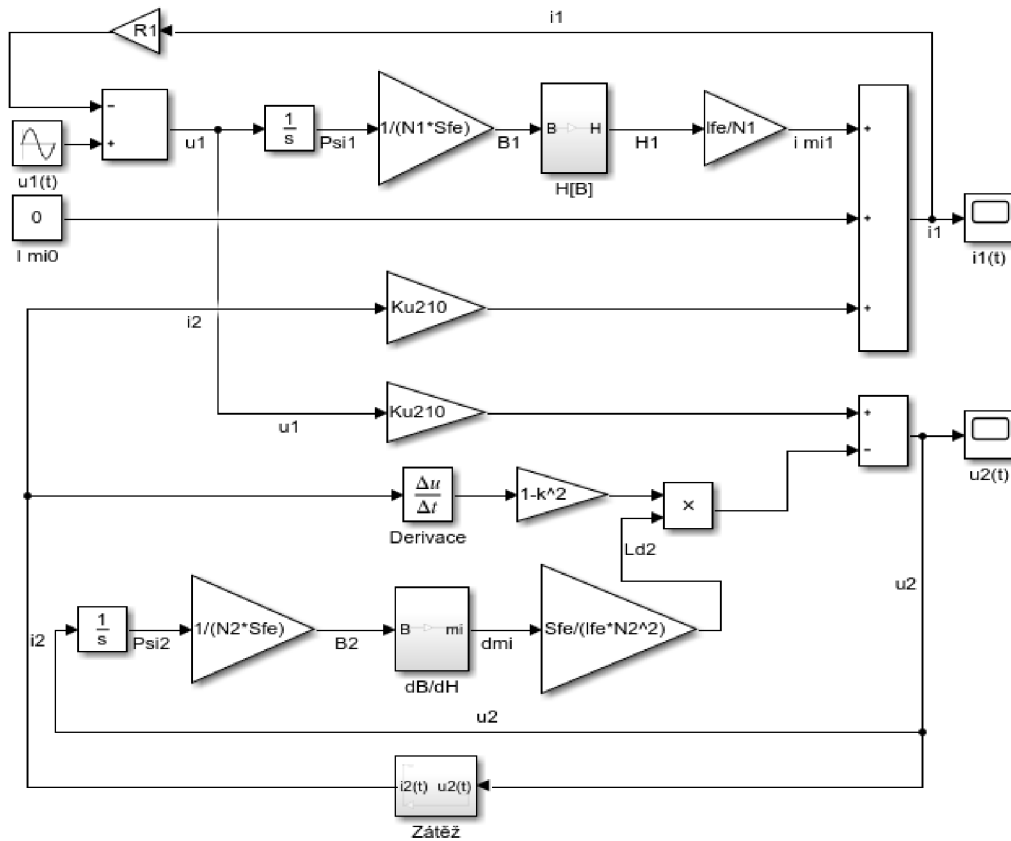
Úbytek na výstupní indukčnosti:

$$\Delta u_2(t) = L_2(1 - k^2) \cdot \frac{di_2(t)}{dt} \quad (4-11)$$

[celý odstavec i s rovnicemi z literatury 4]

4.3 Matematický model transformátoru napětí

Tato kapitola se zaměřuje na nelineární magnetizační charakteristiku $B(H)$ feromagnetika transformátoru napětí a jeho základní blokový model. [4]
 Blokový model je vytvořen v programu Simulink a je proveden podle rovnic 4-5. Magnetická indukce B zde vychází ze spřaženého magnetického toku Ψ (viz rovnice 3-19). Diferenciální indukčnost L_{d2} je vyjádřena podle vztahu 3-9.



Obr. 4.3. Blokový model transformátoru napětí s char. B(H) (převzato z [4])

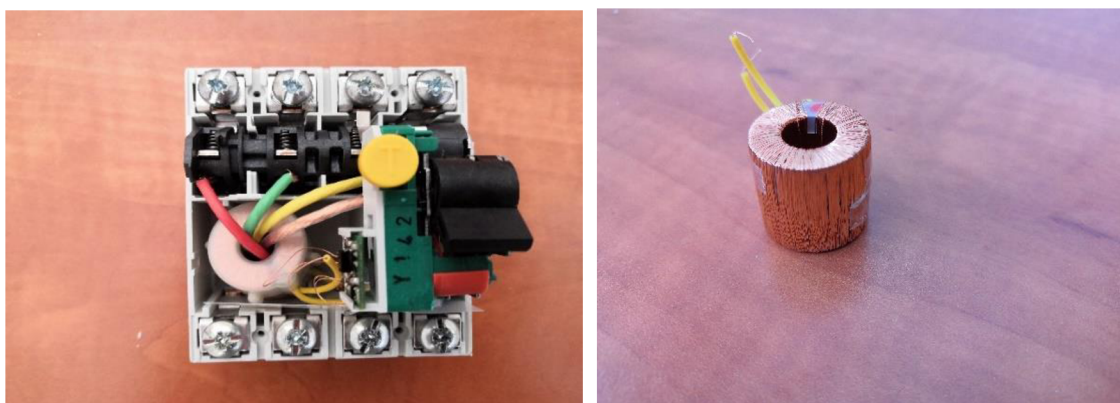
Matematický model transformátoru proudu je velice podobný jako pro napětí. Rozdíl je v tom, že na vstupu se chová jako zdroj napětí a na výstupu jako zdroj proudu. Převod transformátoru je obrácený, tedy i návaznost vztahů pro návrh blokového schématu v programu Simulink se nepatrně liší. Význam a funkci mají ale stejnou. Rovnice a modely jsou vysvětleny v literatuře 4.

5 PROUDOVÝ CHRÁNIČ V PROGRAMU ANSYS

Program ANSYS umožňuje velkou rozmanitost matematických a fyzikálních výpočtů. U součtového transformátoru lze například spočítat silové působení mezi jednotlivými vinutími, nebo spočítat rozptylovou indukčnost vinutí. V této práci je hlavní náplní simulací v Ansysu zkoumat vliv stejnosměrného reziduálního proudu na velikost magnetické indukce a to pro zjednodušení ve stavu naprázdno, tj. při rozpojeném sekundárním vinutí. Ve stejném režimu je spočítána nesymetrie magnetického pole v důsledku rozptylu.

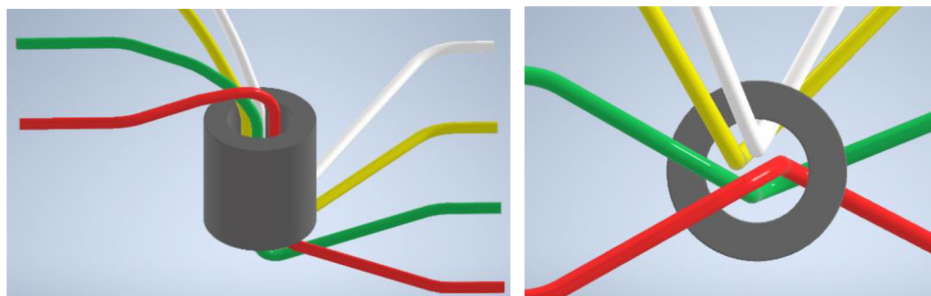
5.1 Návrh 3D modelu součtového transformátoru

Nejprve se vytvořil model součtového transformátoru v 3D prostoru. Použit byl program Autodesk Inventor a **proudový chránič typu A**. Primární vodiče se přesně protáhly a ohnuly podle reálného zapojení (viz. Obrázek 6.1.). Pouzdro jádra (světlý plastový kryt kolem transformátoru) se do modelu nezapočítalo, neboť je z nemagnetického a nevodivého materiálu.



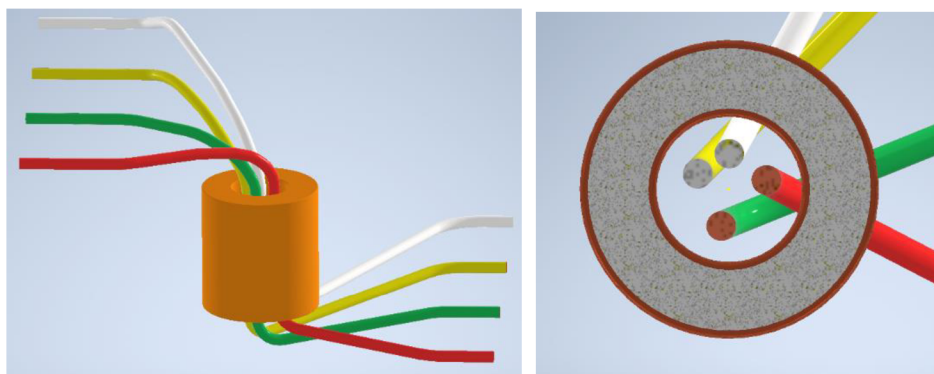
Obr. 5.1. Vnitřní provedení proudového chrániče

Primární vodiče byly zbarvené jako v reálném zapojení. Červená jako první fáze, zelená jako druhá fáze a nakonec žlutá jako fáze třetí. Bílá představovala nulový vodič, který okruh uzavíral. Vodiče měly v reálném zapojení i izolaci. Ta zde ale nebyla započtena (v 3D obrazci byly jen průměry holých vodičů). Šedý válec pod sekundárním vinutím představoval feromagnetické jádro.

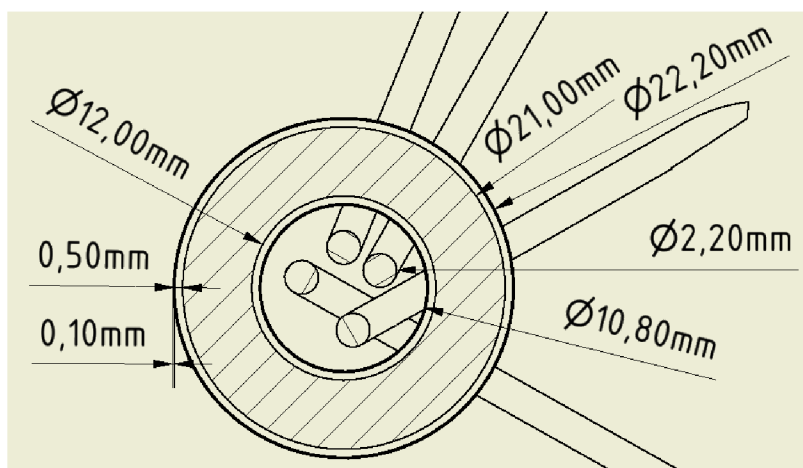


Obr. 5.2. Součtový transformátor bez sekundárního vinutí

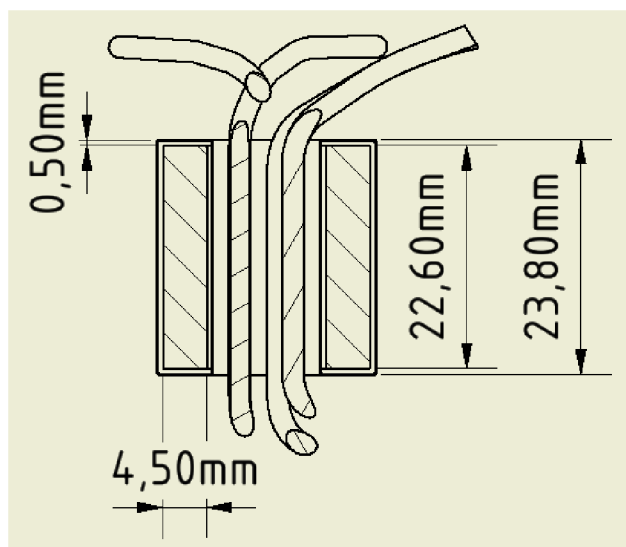
Sekundární vinutí bylo navinuto podél celé plochy feromagnetu. Stačilo tedy vymodelovat pouze plášť kolem celého jádra feromagnetika. Tloušťka pláště je 0,1 mm podle průměru vodiče vinutí. Mezi jádrem a sekundárním vinutím byl ještě další plastový kryt o šířce 0,5 mm. Tento kryt představoval vzduchovou mezeru mezi oběma částmi. V modelu byl samozřejmě započítán. V provedené magnetostatické analýze se však sekundární vinutí neuplatňuje.



Obr. 5.3. Součtový transformátor se sekundárním vinutím



Obr. 5.4. Horizontální a vertikální řez feromagnetickým jádrem



Obr. 5.5. Vertikální řez feromagnetickým jádrem

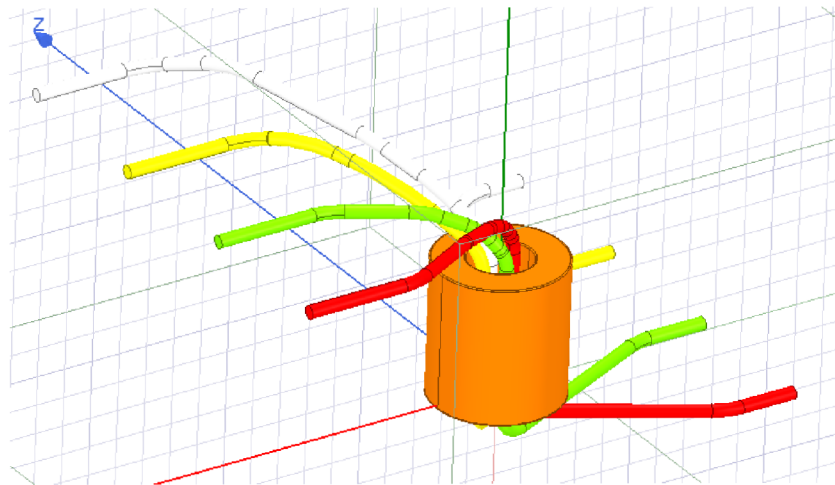
Každý vodič a jádro byly vytvářeny odděleně v jednotlivých součástích, aby se z nich dala zhotovit celková sestava použitelná pro měření.

Tab. 5.1. Parametry součtového transformátoru

Průměr vodiče primárního vinutí	2,2 mm
Průměr vodiče sekundárního vinutí	0,1 mm
Počet primárních závitů N1	1
Počet primárních závitů N2	795
Vnitřní průměr celého pouzdra	8,0 mm
Vnější průměr celého pouzdra	24,0 mm
Výška celého pouzdra	23,0 mm
Vnitřní průměr magnetu	12,0 mm
Vnější průměr magnetu	21,0 mm
Výška magnetu	22,6 mm
Mezera mezi jádrem a sekundárním vinutím	0,5 mm

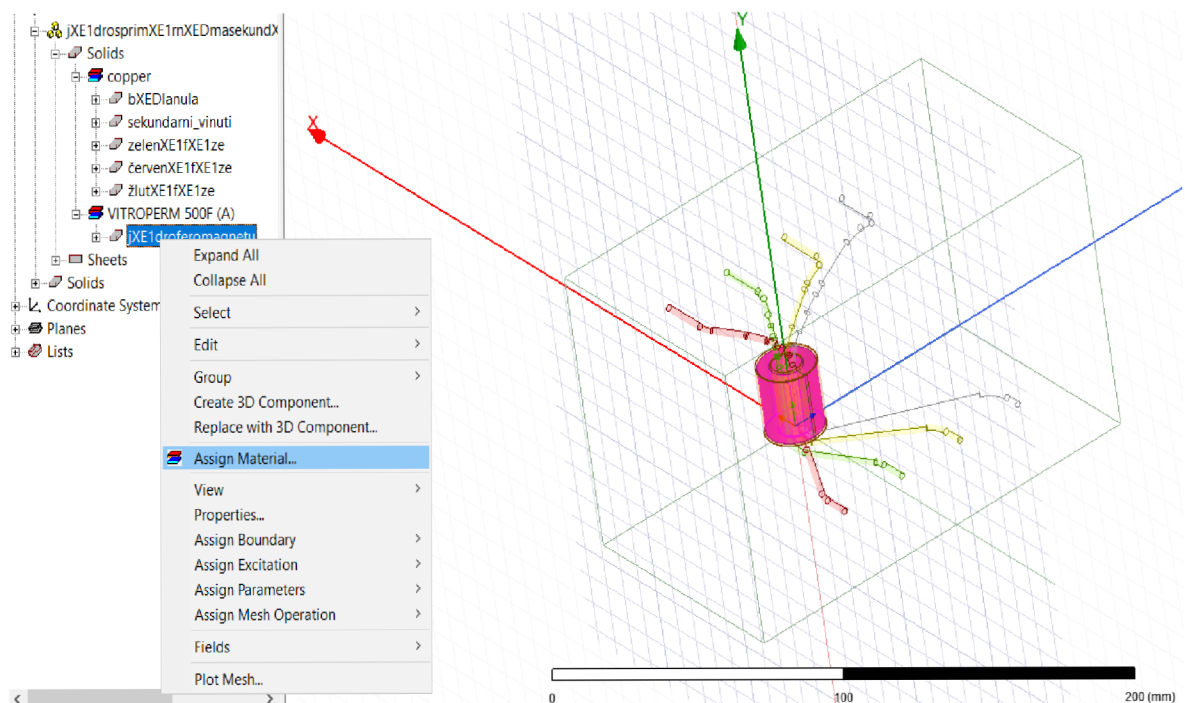
5.2 Seznámení s programem

Do programu Ansys Electronics se nejprve nahrál vytvořený 3D model proudového chrániče.



Obr. 5.6. Součtový transformátor v programu Ansys

Po tomto kroku se jako první všem 4 vodičům, sekundárnímu vinutí a jádru musel přiřadit materiál.



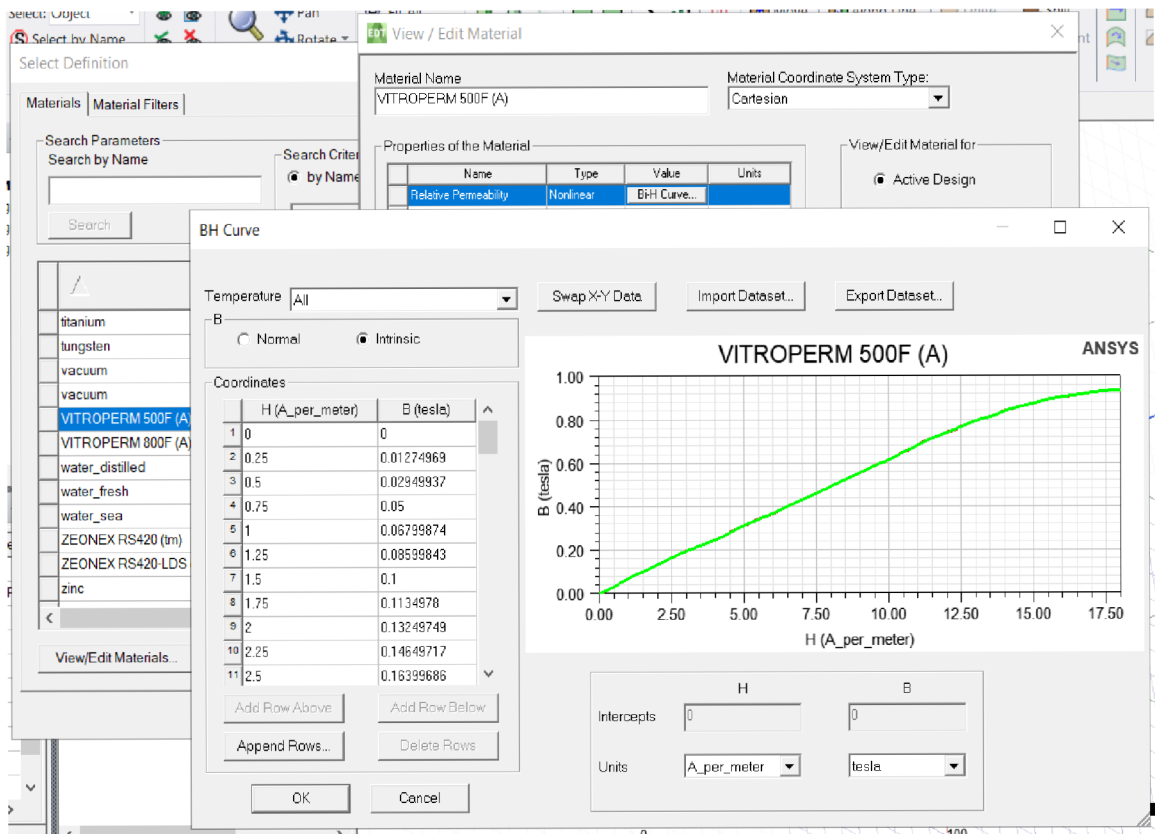
Obr. 5.7. Přiřazení materiálu

Vodiče a sekundární vinutí jsou klasicky z mědi. Feromagnetickému jádru se postupně přiřadily 3 materiály.

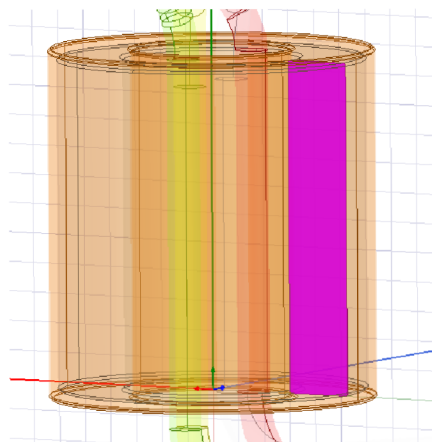
VITROPERM 800F a VITROPERM 500F mají výhodné vlastnosti na pulzující stejnosměrné proudy pro typ A z důvodů nízké remanentní indukce. Třetí materiál je vhodný pro chrániče typu AC z důvodů vysoké permeability.

Tyto materiály ovšem nebyly v knihovně programu, tudíž se musely přidat a vytvořit jejich B-H křivky.

Protože byl proud stejnosměrný, stačilo do materiálů nadefinovat jen křivku prvotní magnetizace odečtenou ze změřených hysterezních smyček.



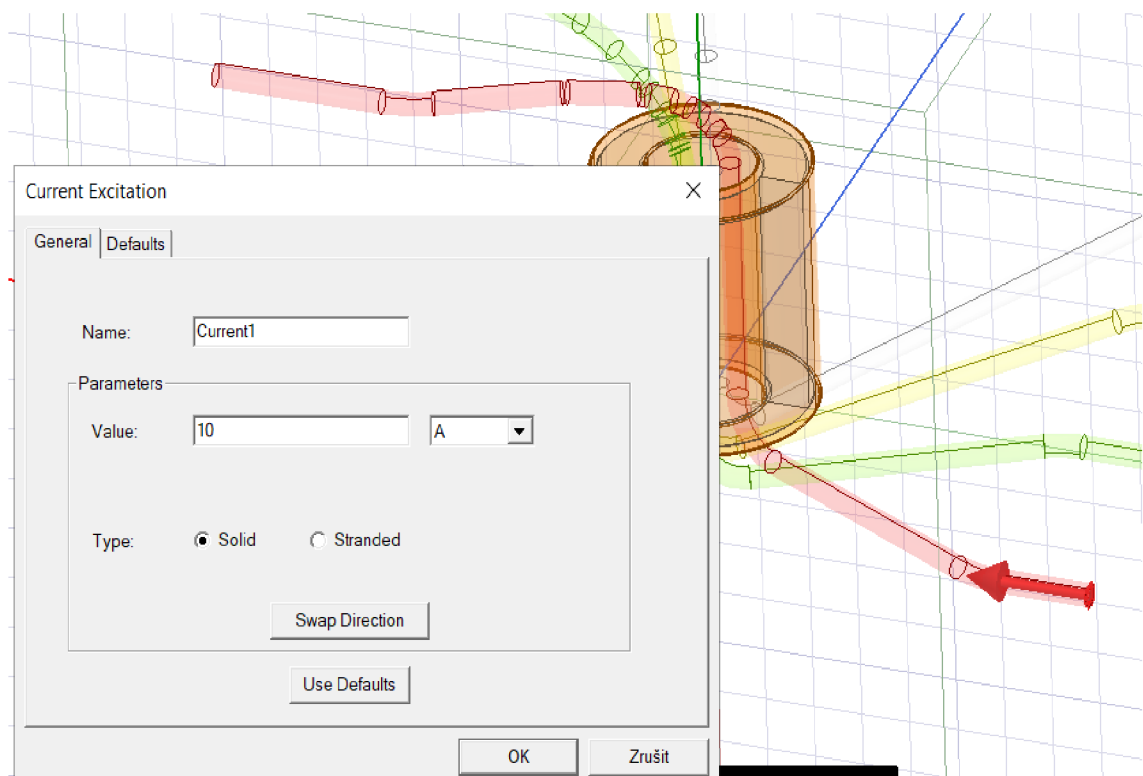
Obr. 5.8. Nadefinování B-H křivky



Obr. 5.9. Výběr řezu feromagnetickým jádrem

5.3 Nastavení simulace

Simulace se prováděly hladkým stejnosměrným proudem. Proud byl nadefinován na každou stranu vodiče a natočil se jeho směr. Proud protékal pouze dvěma vodiči opačného směru. Jelikož byl proud hladký stejnosměrný, sekundární vinutí se mohlo zanedbat, jelikož v něm nebylo indukováno žádné napětí. Pouze se zkoumalo rozložení magnetické indukce a výsledný magnetický tok jádrem. Z tohoto důvodu byl celý primární rozdílový proud zároveň proudem magnetizačním. **Bylo to z důvodů zjednodušení. Ve skutečnosti by byl magnetizační proud jenom určitým procentem proudu primárního rozdílového. Větší část by se přeměnila na sekundární proud. Všechny hodnoty indukci i toků v této kapitole by tedy neodpovídaly skutečným indukci a tokům pro příslušnou hodnotu proudu!**

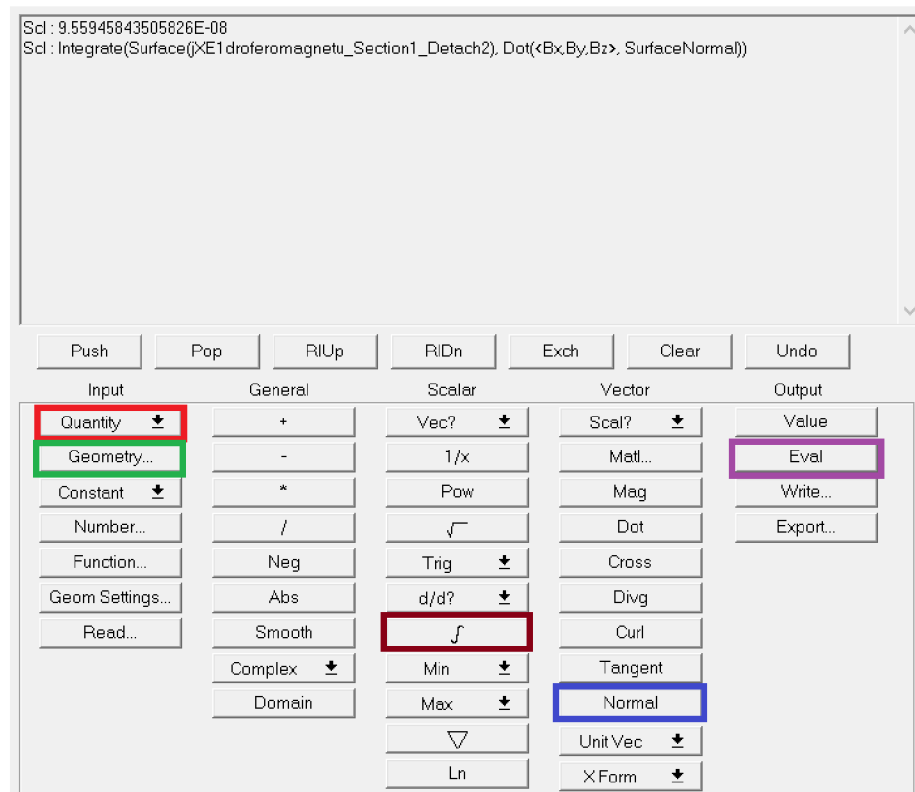


Obr. 5.10. Nadefinování proudu vodičem

Simulace byly prováděny pro reziduální proudy 15 mA, 30 mA a 60 mA. Také se počítala nesymetrie mezi jednotlivými vodiči proudem 10 A. Zajímavostí byla také simulace při proudech odpovídajících **rázové odolnosti**. Modelovala se tedy ještě nesymetrie mezi vodiči, a to proudem 3 kA u chráničů typu A a 250 A u chrániče typu AC.

Následně se spustila analýza, kde výsledkem byla ukázka rozložení magnetické indukce ve zvoleném řezu jádra.

V poslední řadě byl kalkulátorem spočítán magnetický tok v jádře, tj. plošný integrál z magnetické indukce.



Obr. 5.11. Spočítání magnetického toku v jádře

Nejprve se zvolilo políčko *Quantity* a vybrala se magnetické indukce B. Poté v *Geometry* byl zvolen řez jádra a označil se *Normal* pro skalární součin normálových vektorů. Následovalo políčko značené integrálem a výsledek se dostavil stiskem tlačítka *Eval*.

$$\Phi = \int \vec{B} * d\vec{S} \quad (5-1)$$

5.4 Průběh a výsledky simulací

V této kapitole jsou pouze získané hodnoty ze simulací. Závěry a porovnání materiálů lze nalézt v následující kapitole 5.5. B-H křivky všech 3 materiálů, ze kterých se získaly data, byly obdrženy od vedoucího práce pana Ing. Jiřího Valenty, Ph.D.

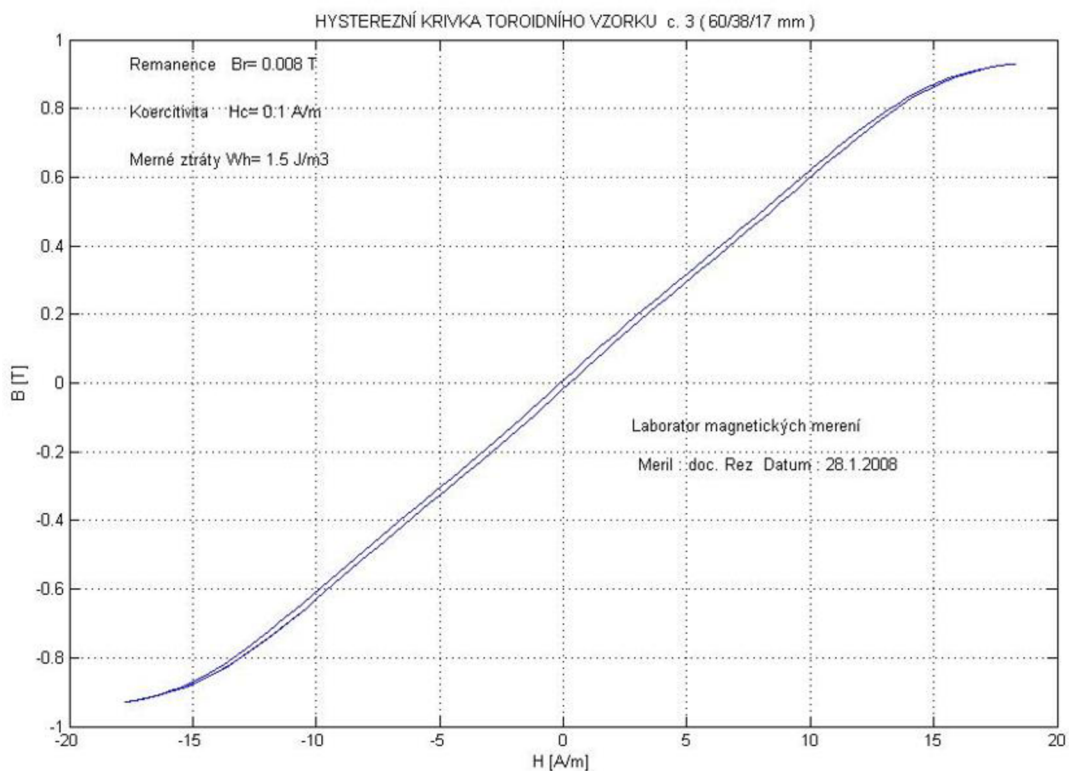
Tab. 5.2. Vlastnosti feromagnetických materiálů

	B_r [T]	H_c [A/m]	μ_r [-]*
VITROPERM 500F	0,008	0,100	63 662
VITROPERM 800F	0,055	0,200	218 838
Vybraný materiál pro typ AC	0,370	0,590	499 045

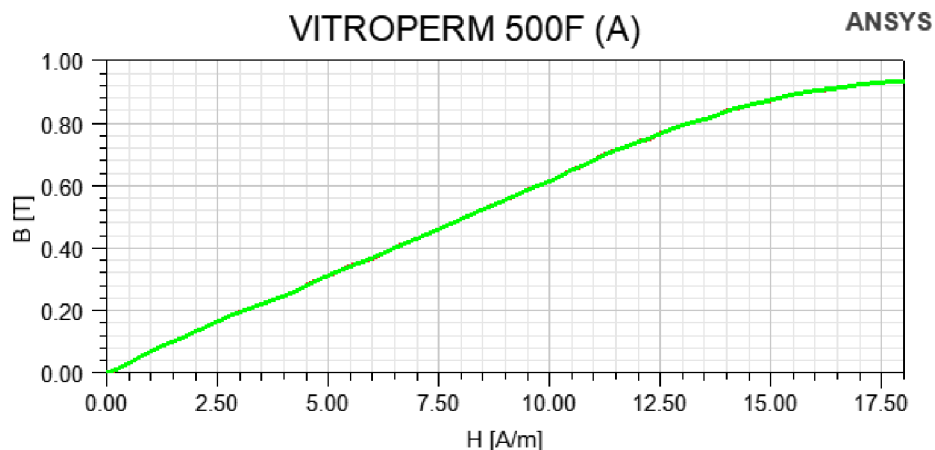
*vztahuje se pouze k lineární části B-H křivek

5.4.1 VITROPERM 500F

Tento materiál měl velmi nízkou remanentní indukci B_r (viz. Tab. 5.2.), což bylo pro pulzující proudy velice přínosné.



Obr. 5.12. B-H křivka VITROPERM 500F



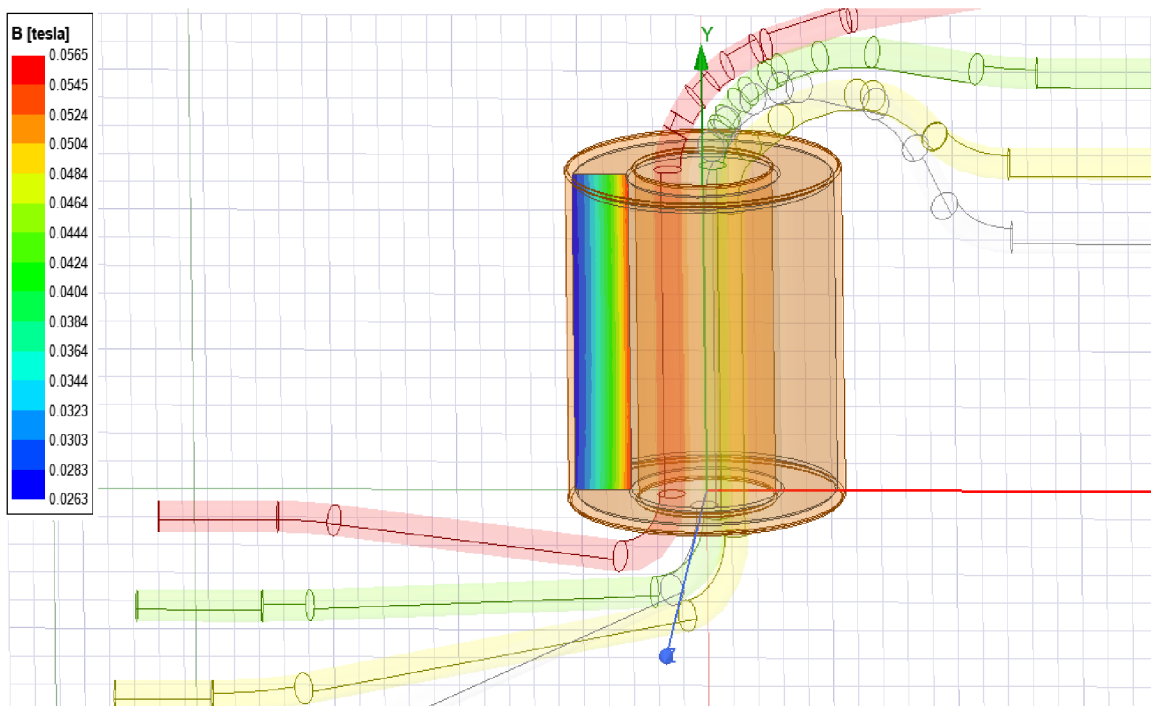
Obr. 5.13. Prvotní magnetizace VITROPERM 500F

5.4.1.1 Simulace reziduálním stejnosměrným proudem

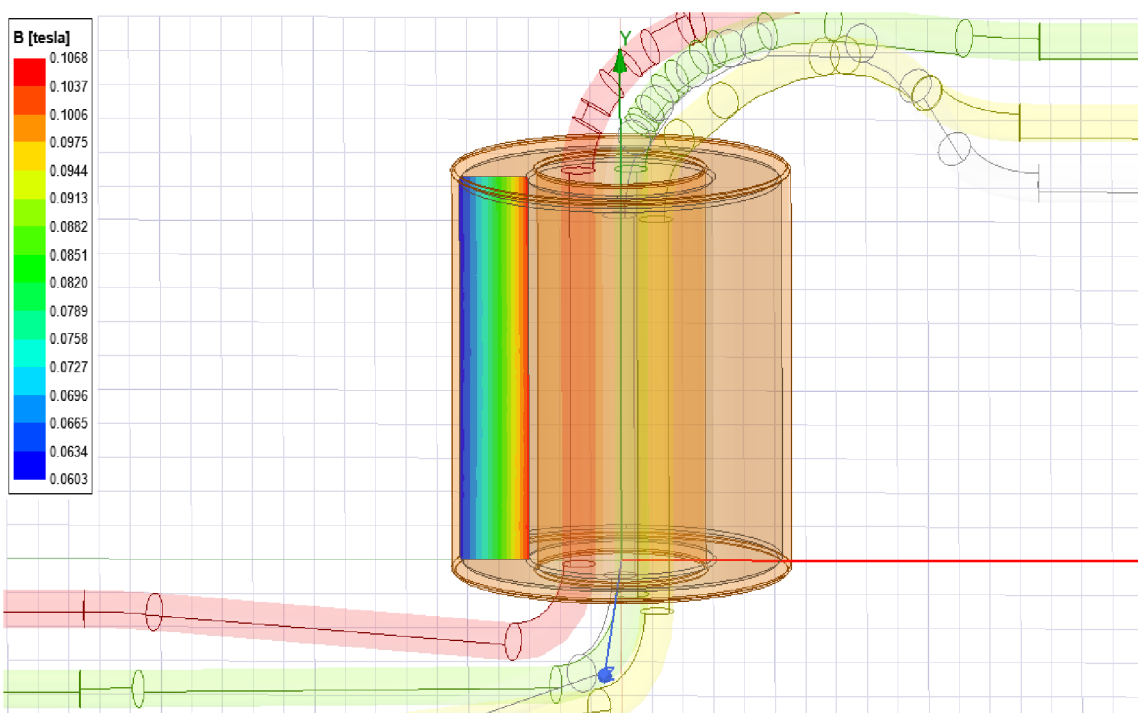
Pro 30 mA se simulace prováděla u všech vodičů. Hlavně byl důležitý celkový procházející tok Φ jádrem a rozložení magnetické indukce B (viz. Obr. 5.14. a 5.15.). Uvedená maximální indukce B_{max} (viz. Tab. 5.3.) se nacházela jen na vnitřní straně jádra, kde primární vodiče byly nejbližší k jádru.

Tab. 5.3. Reziduální stejnosměrný proud (500F)

Zapojení proudu	B_{max} [T]	Φ [Wb]
Reziduální proud 30 mA		
L1 a L2	0,05	3,69E-06
L1 a L3	0,06	3,93E-06
L2 a L3	0,05	3,75E-06
L1 a N	0,06	3,90E-06
L2 a N	0,06	3,80E-06
L3 a N	0,05	3,76E-06
Reziduální proud 60 mA		
L1 a L2	0,11	8,10E-06
L1 a L3	0,11	8,33E-06
L2 a L3	0,11	8,23E-06
Reziduální proud 15 mA		
L1 a L2	0,02	1,53E-06



Obr. 5.14. Rozložení magnetické indukce při 30 mA (500F)



Obr. 5.15. Rozložení magnetické indukce při 60 mA (500F)

Při dvojnásobné velikosti reziduálního proudu rostl úměrně i magnetický tok v jádře. B-H křivka byla v těchto hodnotách lineární.

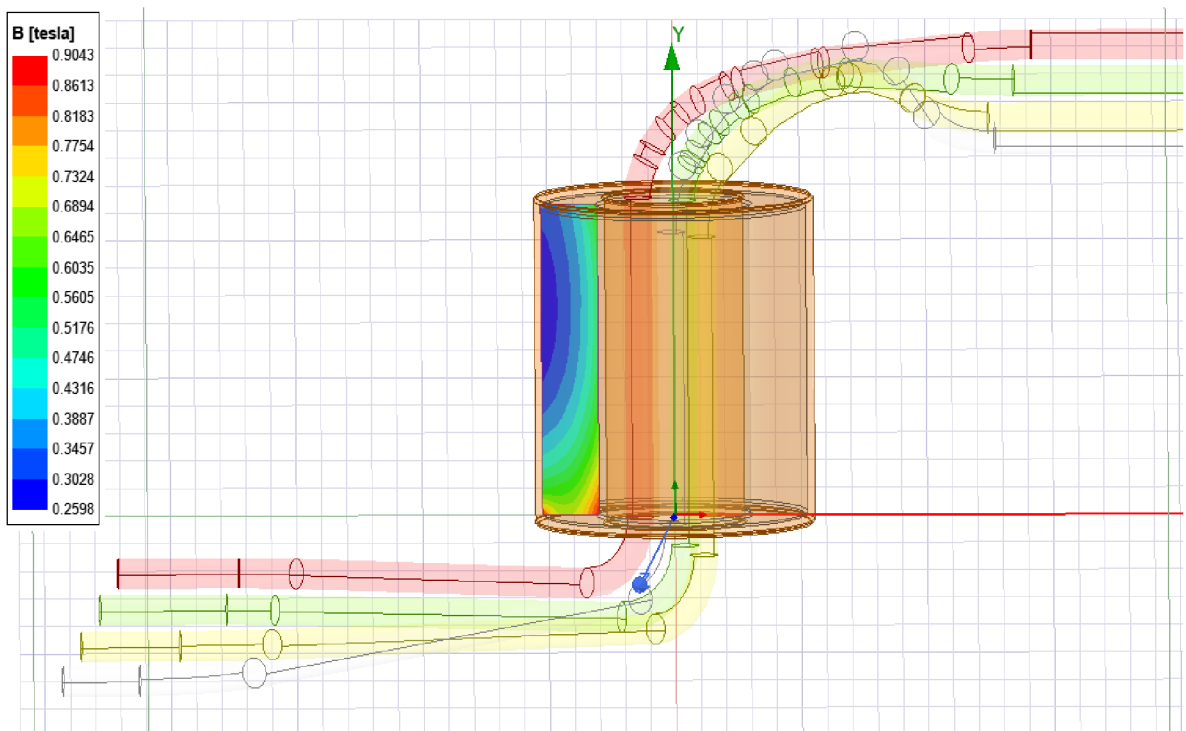
5.4.1.2 Simulace nesymetrie

V této simulaci vodiči tekli proud stejné velikosti tam i zpět a zkoumala se nesymetrie vyvolaná rozložením primárních vodičů.

Tab. 5.4. Nesymetrie proudem 10A a 3kA (500F)

Zapojení proudu	B_{max} [T]	Φ [Wb]
Nesymetrie proudem 10 A		
L1 a L2	0,0023	9,53E-08
L1 a N	0,0032	1,07E-07
Nesymetrie proudem 3 kA		
L1 a L2	0,90	3,22E-05
L1 a L3	0,90	4,17E-05

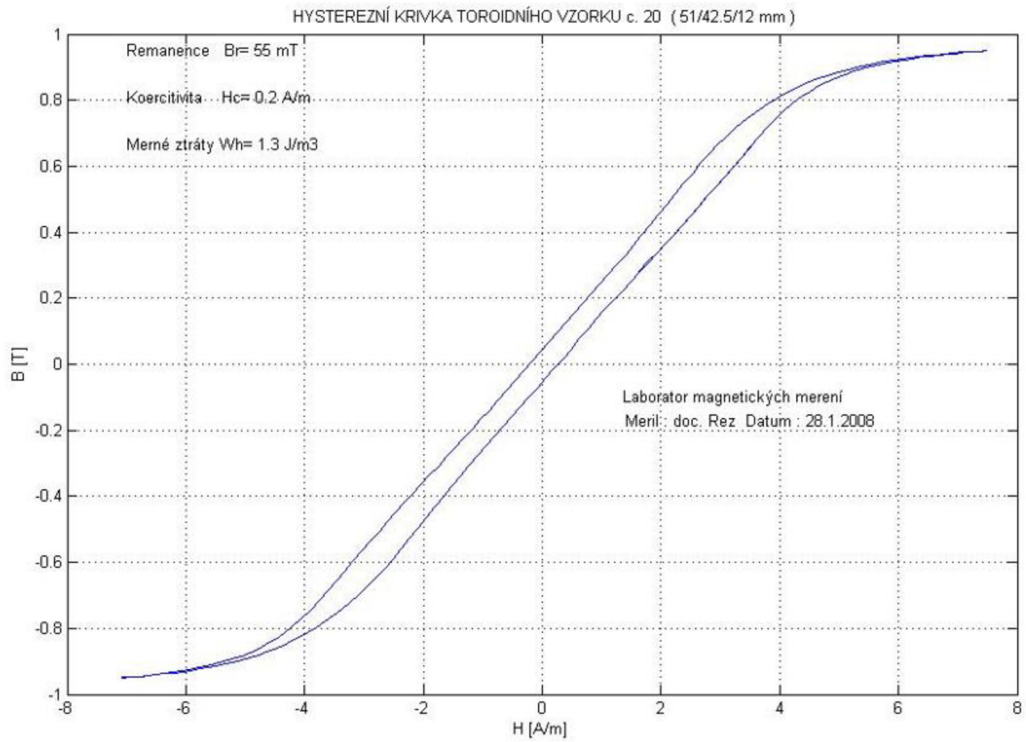
Nesymetrie se odzkoušela pouze na dvou měření, neboť byly výsledky velmi podobné jako u materiálu VITROPERM 800F (viz. kapitola níže). Při proudu 10 A byl tok zanedbatelný, ovšem při zkratovém proudu 3 kA se hodnoty pohybovaly v přesycené oblasti B-H křivky.



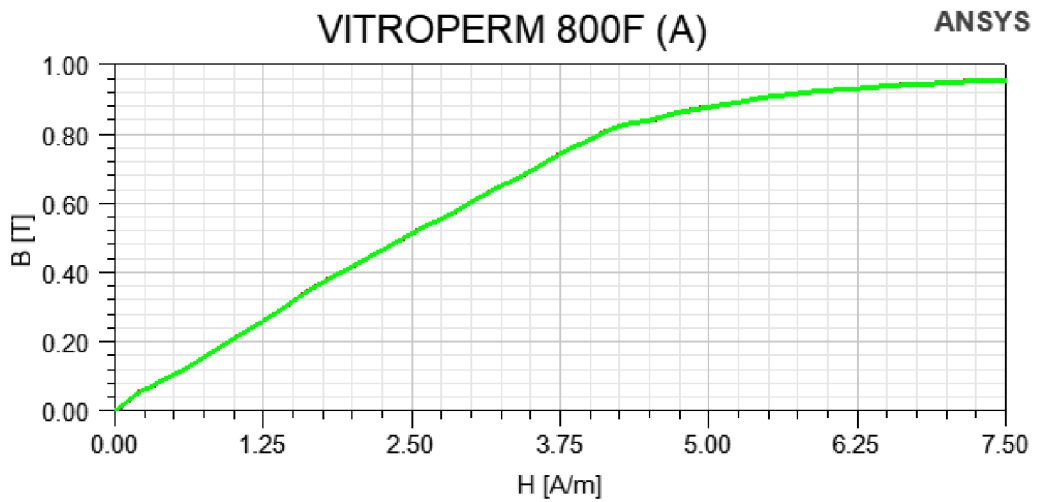
Obr. 5.16. Nesymetrie proudem 3 kA (přesycení 500F)

5.4.2 VITROPERM 800F

Materiál měl větší remanentní indukci než VITROPERM 500F (viz. Tab. 5.2.).



Obr. 5.17. B-H křivka VITROPERM 800F

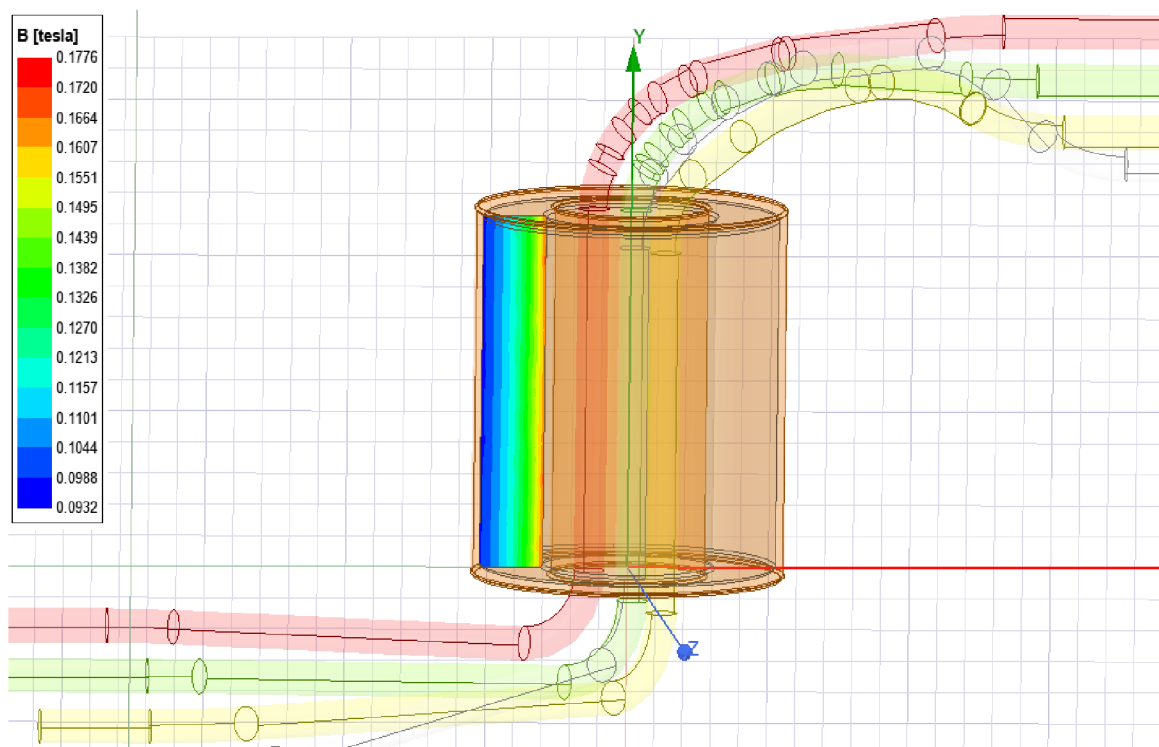


Obr. 5.18. Prvotní magnetizace VITROPERM 800F

5.4.2.1 Simulace reziduálním stejnosměrným proudem

Tab. 5.5. Reziduální stejnosměrný proud (800F)

Zapojení proudu	B_{max} [T]	Φ [Wb]
Reziduální proud 30 mA		
L1 a L2	0,17	1,24E-05
L1 a L3	0,17	1,23E-05
L2 a L3	0,17	1,25E-05
L1 a N	0,18	1,26E-05
L2 a N	0,17	1,25E-05
L3 a N	0,17	1,25E-05
Reziduální proud 60 mA		
L1 a L2	0,36	2,52E-05
L1 a L3	0,34	2,50E-05
L2 a L3	0,34	2,52E-05
Reziduální proud 15 mA		
L1 a L2	0,09	7,10E-06



Obr. 5.19. Rozložení magnetické indukce při 30 mA (800F)

Při simulacích opět platilo pravidlo, že při dvojnásobné velikosti proudu je dvojnásobný i tok. Ovšem při proudu 15 mA byl tok nepatrně vyšší než by odpovídalo polovině hodnoty z proudu 30 mA.

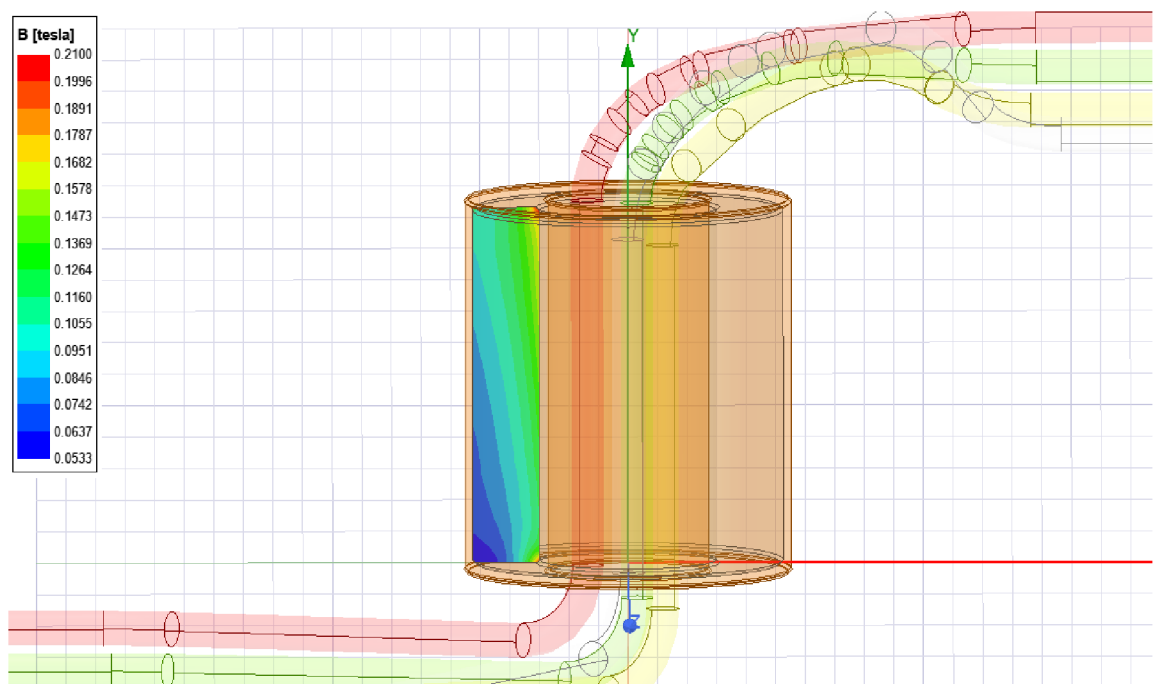
5.4.2.2 Simulace nesymetrie

Tab. 5.6. Nesymetrie proudem 10 A a 3 kA (800F)

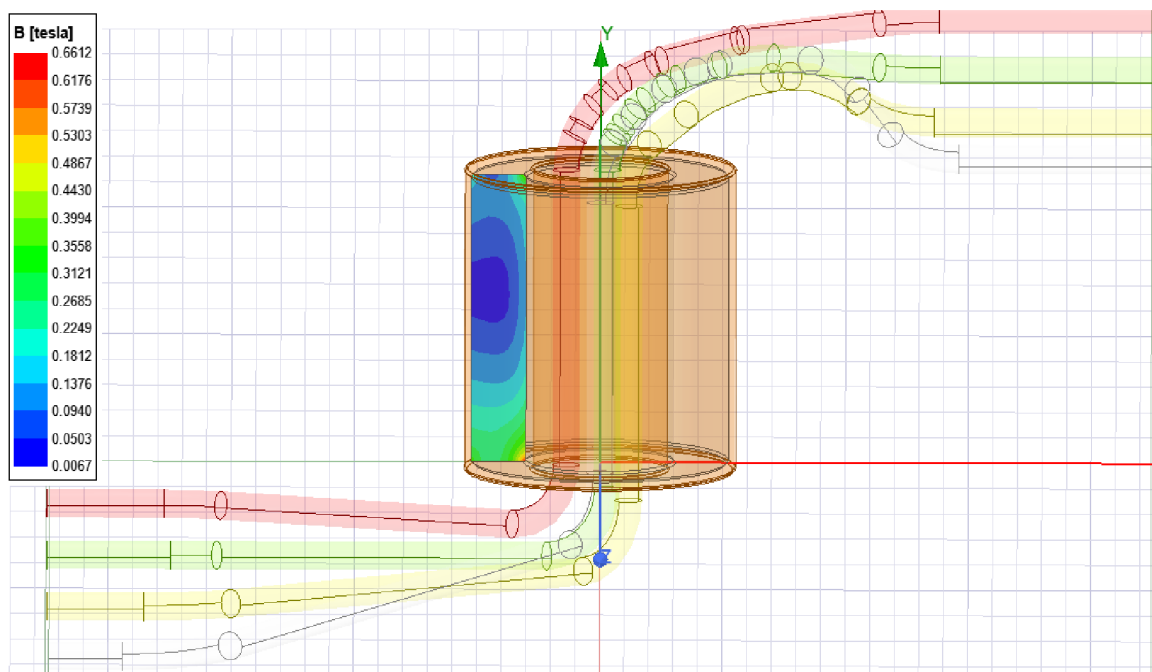
Zapojení proudu	B_{max} [T]	Φ [Wb]
Nesymetrie proudem 10 A		
L1 a L2	2,30E-03	9,53E-08
L1 a L3	3,30E-03	1,39E-07
L2 a L3	1,80E-03	4,35E-08
L1 a N	3,20E-03	1,07E-07
L2 a N	2,20E-03	1,17E-07
L3 a N	7,10E-04	3,18E-08
Nesymetrie proudem 3 kA		
L1 a L2	0,68	2,86E-05
L1 a L3	0,87	4,18E-05
L2 a L3	0,54	1,31E-05
L1 a N	0,88	3,25E-05
L2 a N	0,66	3,80E-06
L3 a N	0,21	9,55E-06

Hodnoty byly velice podobné. Nejmenší nesymetrie při 10 A byla mezi vodiči L3 a N.

Zajímavé byly i průběhy rázovým proudem 3 kA. Největší tok se vyskytl u fází L1 a L3, kde docházelo k přesycení. Stejně tak mezi L1 a N. Naopak nejnižší hodnota toku se ukázala u L2 a N. Nejzajímavější průběh byl mezi L3 a N. K přesycení vůbec nedocházelo ($B_{max} = 0,21$ T), ale magnetický tok byl o dost vyšší než u L3 a N.



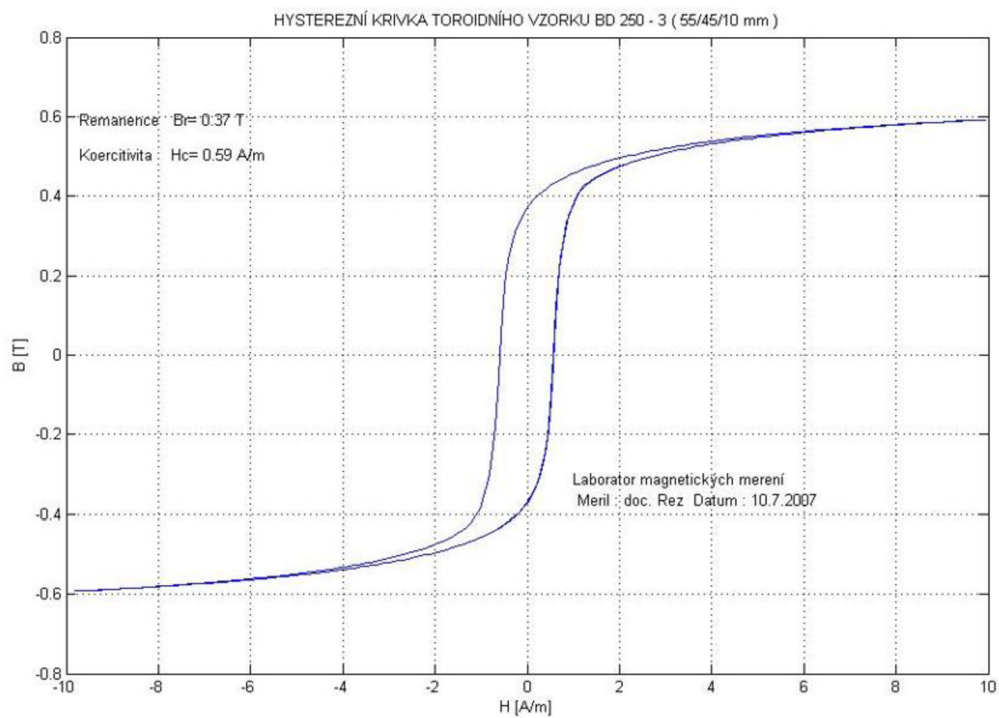
Obr. 5.20. Nesymetrie proudem 3 kA mezi L3 a N (800F)



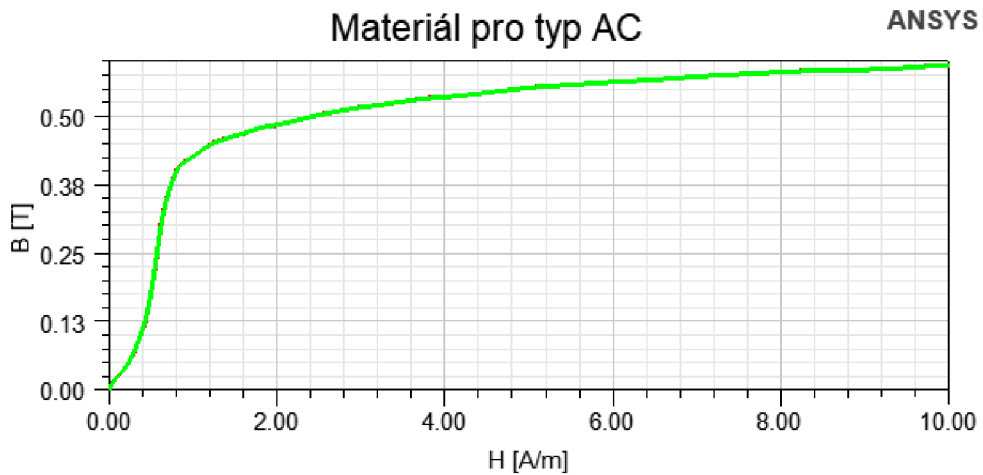
Obr. 5.21. Nesymetrie proudem 3 kA mezi L2 a N (800F)

5.4.3 Materiál pro proudový chránič typu AC

Tento materiál bylo velice zajímavé sledovat. Svoji B-H křivkou se oproti předchozím materiálům lišil tím, že měl daleko vyšší remanenci (0,37 T) a širší obsah smyčky.



Obr. 5.22. B-H křivka materiálu pro chránič typu AC

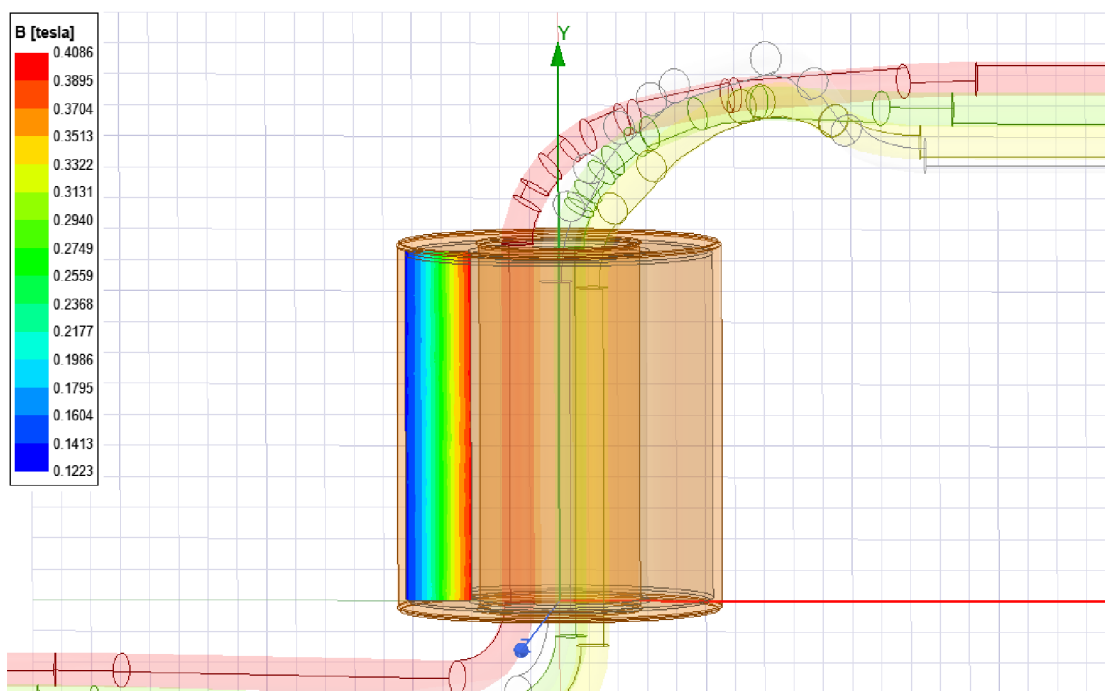


Obr. 5.23. Prvotní magnetizace materiálu pro typ AC

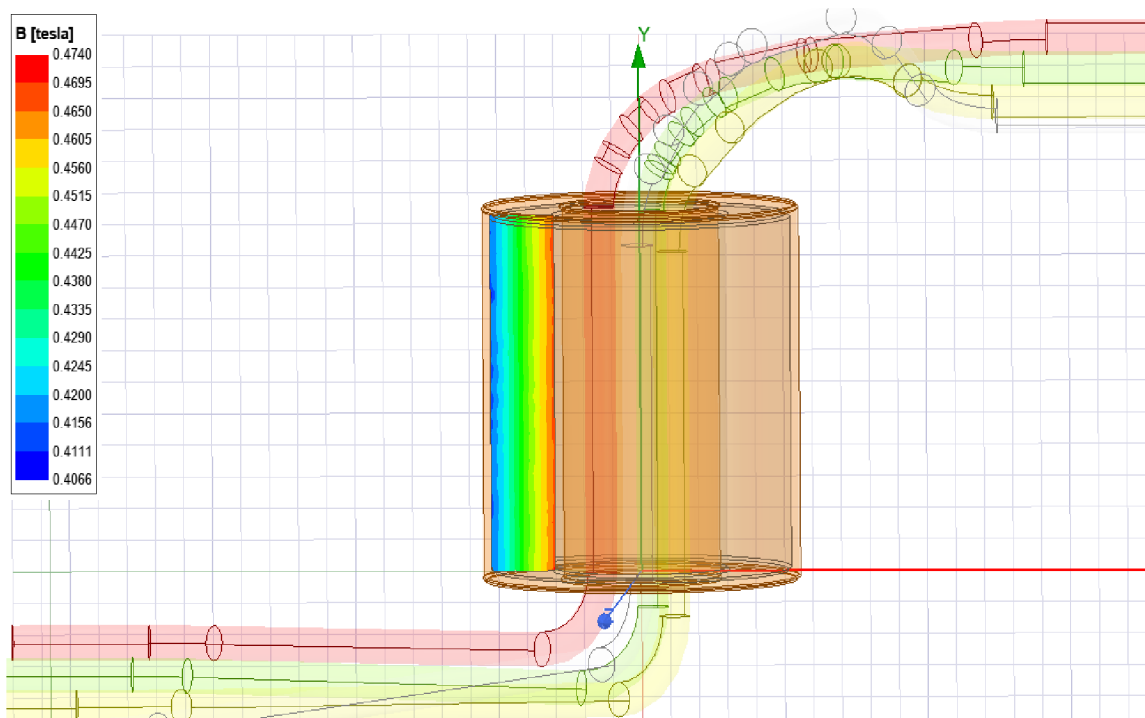
5.4.3.1 Simulace reziduálním stejnosměrným proudem

Tab. 5.7. Reziduální stejnosměrný proud (Typ AC)

Zapojení proudu	B_{max} [T]	Φ [Wb]
Reziduální proud 30 mA		
L1 a L2	0,41	2,62E-05
L1 a L3	0,40	2,62E-05
Reziduální proud 60 mA		
L1 a L2	0,47	4,48E-05
L1 a L3	0,47	4,49E-05
Reziduální proud 15 mA		
L1 a L2	0,12	7,05E-06



Obr. 5.24. Rozložení magnetické indukce při 30 mA (Typ AC)



Obr. 5.25. Rozložení magnetické indukce při 60 mA (Typ AC)

Při simulacích 30 mA a 60 mA bylo vidět, že se jádro přesycovalo. Rozdíl byl v tom, že při 30 mA se přesycení dělo jen na vnitřních stranách, tudíž nebylo tolik významné. Zvýšením na 60 mA se rozšířilo podél celého průřezu.

5.4.3.2 Simulace nesymetrie

Tab. 5.8. Nesymetrie proudem 10 A a 250 A (Typ AC)

Zapojení proudu	B_{max} [T]	Φ [Wb]
Nesymetrie proudem 10 A		
L1 a L2	6,40E-03	9,56E-08
Nesymetrie proudem 250 A		
L1 a L2	0,09	2,33E-06

Nesymetrie 250 A dopadla velmi pozitivně, neboť nedocházelo k přesycení jádra.

5.5 Zhodnocení simulací

Všechny níže uvedené výsledky by platily, pokud by součtový transformátor pracoval v blízkosti stavu naprázdno, tj. veškerý primární proud by byl proudem magnetizačním. V reálné situaci bude magnetizační proud jen určitým zlomkem proudu primárního. Situace z pohledu sycení bude tedy ve skutečnosti **daleko příznivější**.

Nejprve se začalo počítat **reziduálním proudem 30 mA**, na který je dimenzována citlivost většiny proudových chráničů v domácnosti. S nejmenším sycením jádra dopadl VITROPERM 500F, který měl i nejnižší tok Φ 3,93E-06 Wb. VITROPERM 800F měl **více jak dvojnásobné sycení** a magnetický tok se pohyboval kolem 1,25E-05 Wb. Důvodem byla vyšší relativní permeabilita materiálu. U materiálu vhodného na proudový chránič typu AC byla remanence nejvyšší (0,37 T) stejně jako permeabilita, tudíž i magnetický tok byl vysoký (2,62E-05 Wb). Maximální magnetická indukce B_{max} dosahovala hodnot 0,41 T, což už se materiál pohyboval **v přesycené oblasti B-H křivky**. Podle Obr. 5.24. nebylo přesycení v celém průřezu jádra. Hlavně se nacházelo na jeho vnitřních stranách (červená barva). V oblasti modré a azurové barvy nebylo jádro ještě přesycené.

Zkouškou **reziduálním proudem 60 mA** byly magnetické indukce a magnetické toky u materiálů VITROPERM 500F (nejvyšší 8,33E-06 Wb) a VITROPERM 800F (2,52E-05 Wb) v dvojnásobných hodnotách než tomu bylo u 30 mA. Hodnoty se sice zvýšily, ale pohybovaly se stále v lineárních oblastech B-H křivek. Nedochovalo tedy stále k přesycení (viz. Obr. 5.15.). U materiálu pro typ AC se přesycení vyskytovalo již po celém průřezu jádra (viz. Obr. 5.25).

Zkouška unikajícím proudem 15 mA už byla jen doplňkem analýzy. Hodnoty byly v přijatelných mezích, ani v jediném případě nedocházelo k přesycení. Dokonce toky materiálu pro typ AC a VITROPERM 800F se téměř shodovaly (7,10E-06 Wb). VITROPERM 500F měl tok Φ 1,53E-06 Wb.

Z výše uvedených zkoušek na stejnosměrný reziduální proud bylo prokázáno, že **nejlépe dopadl materiál VITROPERM 500F**. V každé simulaci se jeho hodnoty pohybovaly hluboko pod kolenem B-H křivky a měl i nejnižší magnetický tok Φ .

5.5.1 Nesymetrie

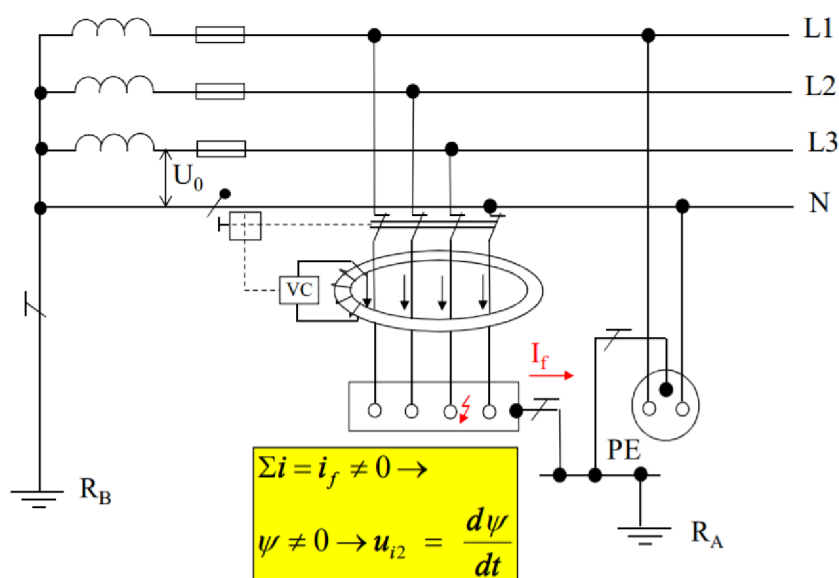
Nesymetrie 10 A ukázala zajímavé výsledky. Ve všech případech protékal podobný nízký tok Φ , nedocházelo by tedy k vypínání při této nesymetrii. Největší nesymetrie byla mezi vodiči L1 a L3.

Nesymetrie rázovým proudem při 3 kA ukázala další zajímavé výsledky. Kdyby tento rázový proud protékal jádrem, oba materiály (500F i 800F) by měly hodnoty s největší pravděpodobností nad kolenem B-H křivky. Největší nesymetrie byla mezi vodiči L1 a L3 a mezi L1 a N.

Nesymetrie proudem 250 A pro chránič typu AC dopadla velmi dobře. Nenastalo přesycení a dokonce měl magnetický tok Φ ještě o dost menší hodnotu ($2,33E-06$ Wb) než při zkoušce stejnosměrným proudem 15 mA ($7,05E-06$ Wb).

6 MATEMATICKÝ MODEL PROUDOVÉHO CHRÁNIČE V SIMULINKU

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.1, proudový chránič sčítá okamžité velikosti proudů v součtového transformátoru. Jestliže celkový součet proudů je nenulový (viz obrázek 5. 1.), vzniká reziduální proud (proudový rozdíl). Přes převod začne sekundárním vinutím protékat proud i_2 , ten vydá impuls k vypnutí. Nulový vodič v chrániči je potřebný na uzavření smyčky jednofázových obvodů a na nesymetrii sítě u obvodů třífázových. Z této základní závislosti započalo vytváření prvotního modelu pro simulace.

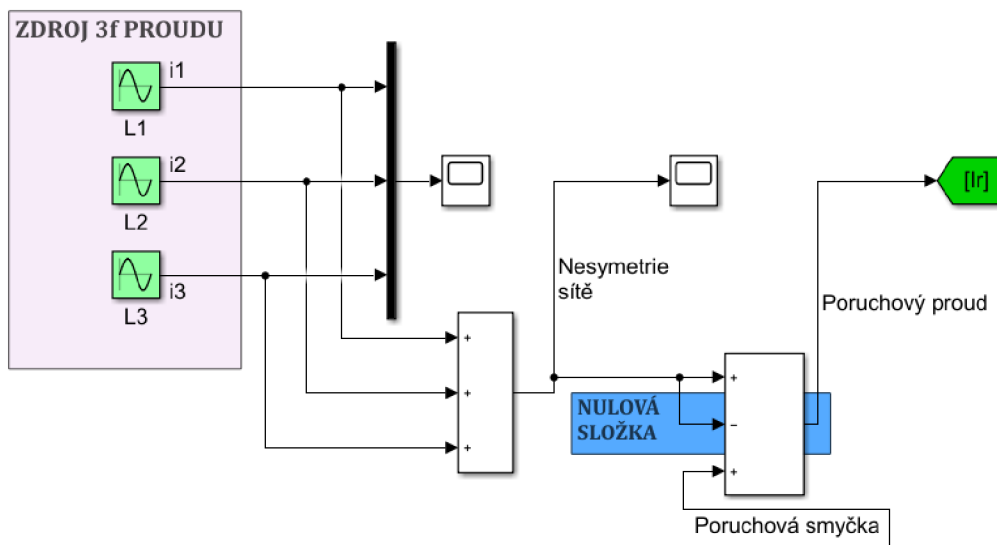


Obr. 6.1. Schéma chrániče s poruchou (převzato z [11])

6.1 Základní matematický model

Na matematický model bylo potřeba vytvořit soustavu rovnic, podle které se dále postupovalo.

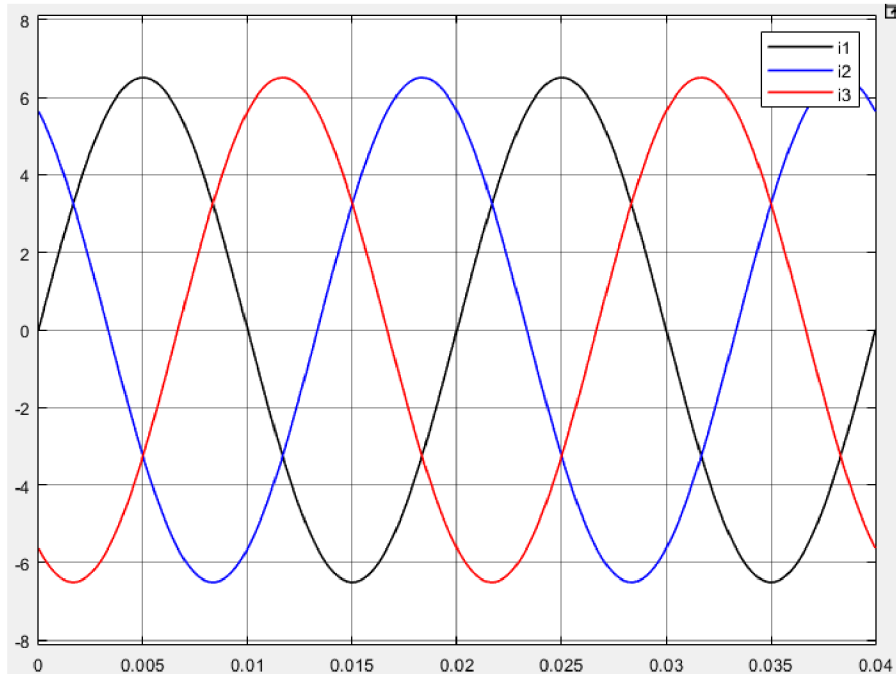
K vytvoření modelu byl použit proudový trojfázový obvod. Nejprve se sečetly fázově posunuté proudy (o 120°) a přes nulový vodič odečetla možná nesymetrie sítě (modrý rámeček). Posledním krokem bylo přičtení poruchové smyčky s reziduálním proudem I_r . Dále pak již poruchový proud vedl do modelu jádra součtového transformátoru, kde se vytvořil magnetický tok (více v kapitole 6.3.).



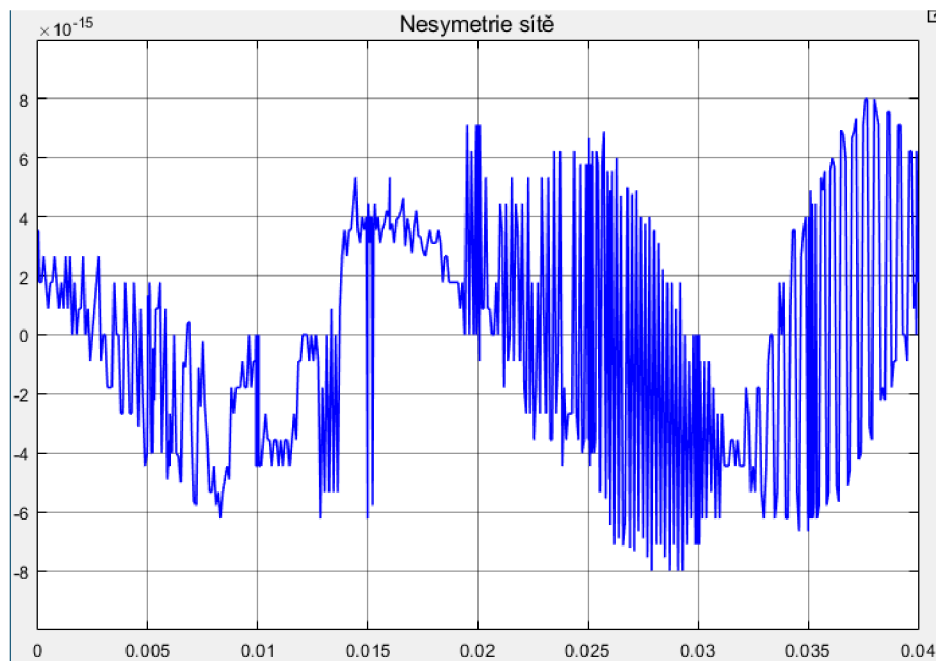
Obr. 6.2. Prvotní matematický model proudového chrániče

6.1.1 Průběhy základního modelu

Každému průběhu na osciloskopu v programu Simulink chybí popis os. Nicméně na ose x je vždy čas. Na ose y je pak hodnota veličiny uvedená v legendě v horním pravém rohu nebo v popisu obrázku.



Obr. 6.3. Zdroj trojfázového proudu



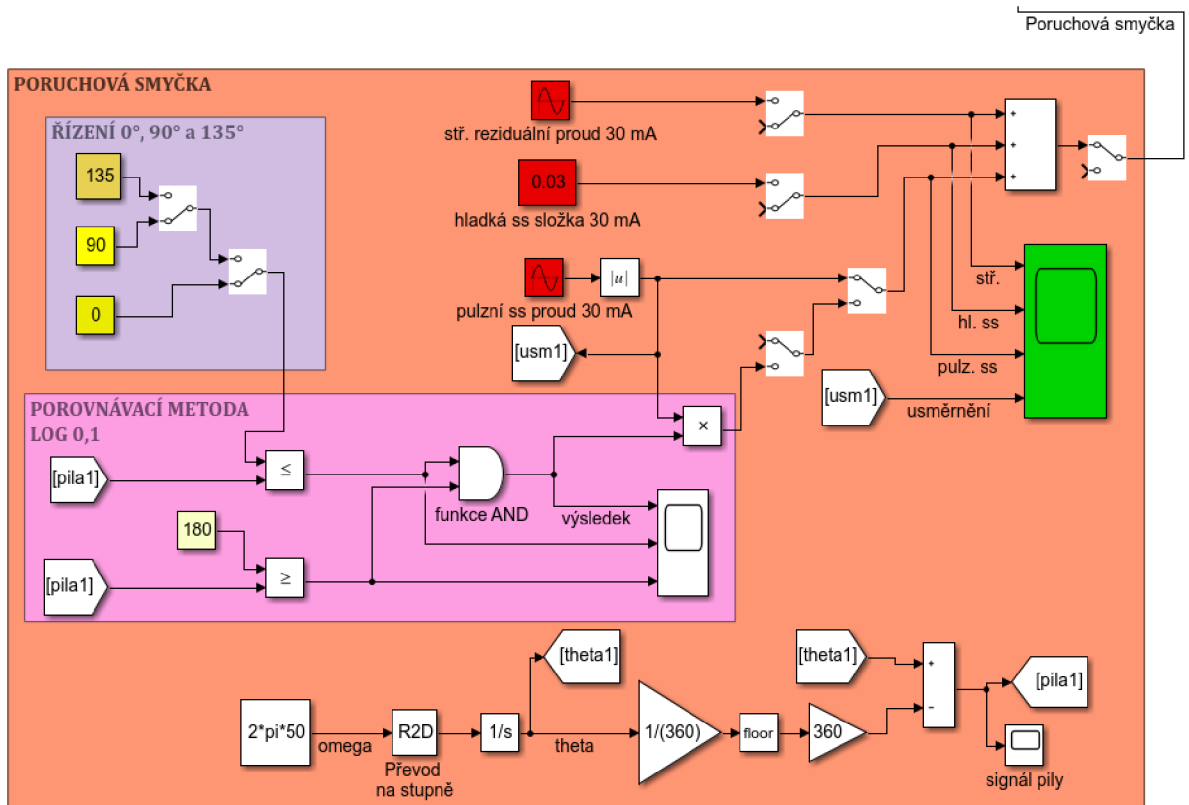
Obr. 6.4. Nesymetrie sítě od fázových vodičů

6.2 Poruchová smyčka

Jako základ poruchové smyčky lze označit střídavý reziduální proud o hodnotě 30 mA. K němu se ještě jako nadstavba mohla superponovat hladká stejnosměrná složka.

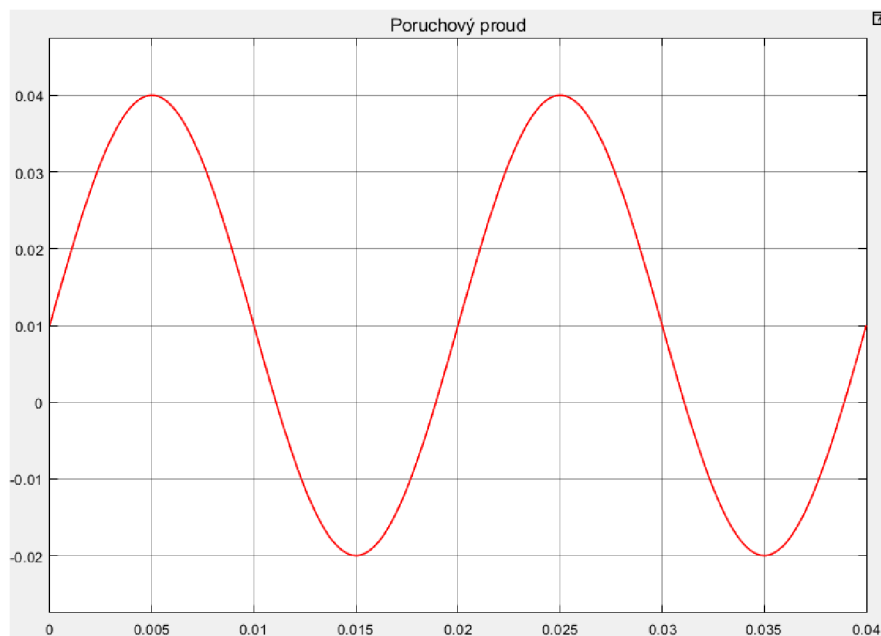
Podle zadání se ale hlavně do poruchové smyčky přidal pulzní reziduální proud. Podle normy EN 61008-1 muselo být proudové sepnutí v **0°, 90° a 135°** (viz tabulka 2.4.).

Pomocí prvků lze vytvořit tyristorový jednocestný usměrňovač s řídicí elektrodou. V prostředí Simulink lze ale nezávislý usměrněný signál získat jednoduše přes porovnávací matematickou operaci. Nejprve se vstupní sinusový průběh o hodnotě **30 mA** usměrnil **přes absolutní hodnotu**. Pomocí logické 0 a 1, získané porovnáním **pilového signálu s proudovým řízením** (0°, 90° a 135°), byl zhotoven z usměrněného průběhu požadovaný řízený pulzní signál. Výsledné průběhy byly přesné a neovlivněné polovodičovou technikou.



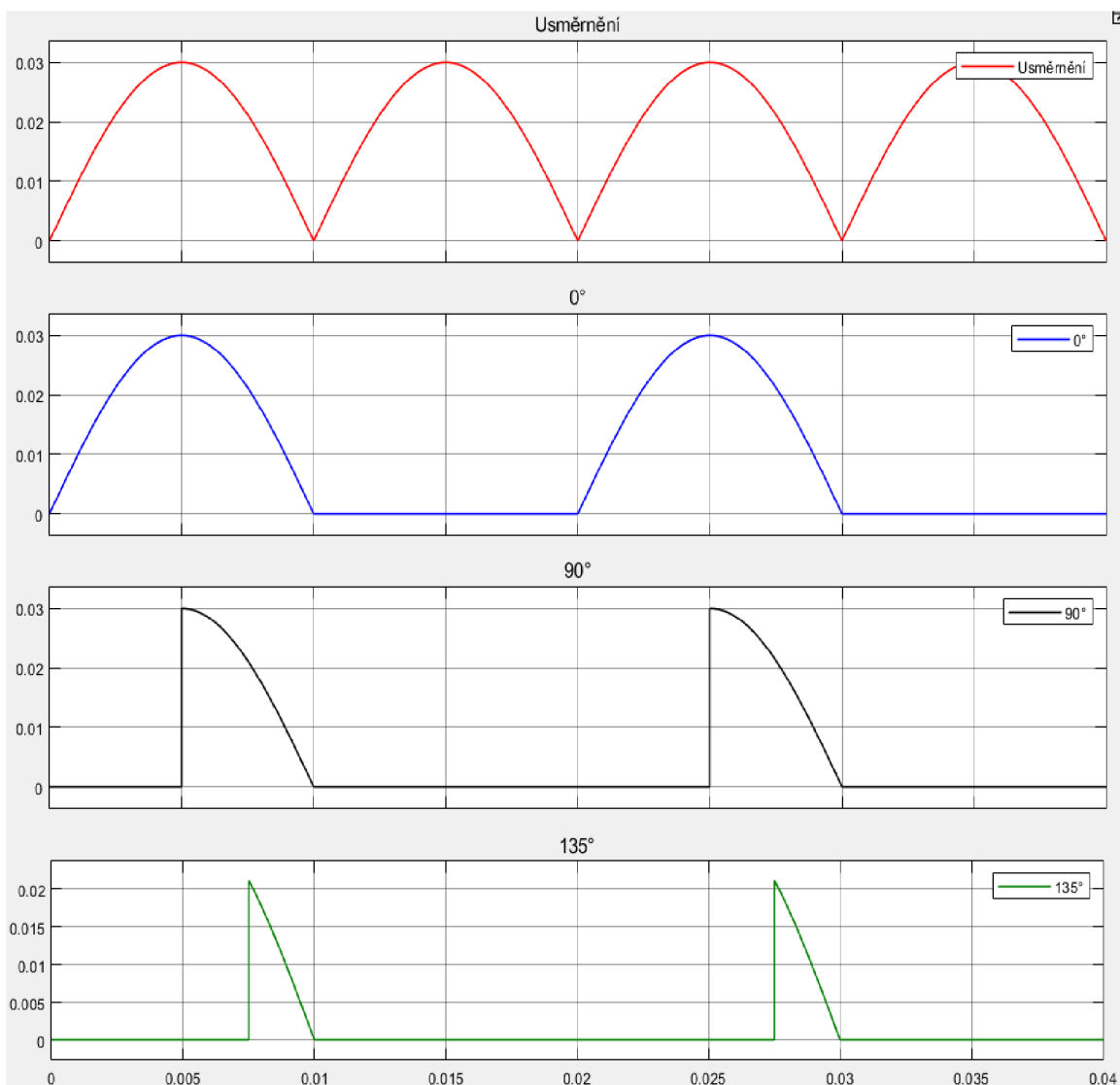
Obr. 6.5. Kompletní poruchová smyčka i s řízením pulzním signálem

6.2.1 Průběhy poruchové smyčky



Obr. 6.6. Střídavý reziduální proud 30 mA s hladkou ss složkou 10 mA

V této práci se podle zadání na celkový matematický model jádra součtového transformátoru použil jen řízený pulzní stejnosměrný proud.



Obr. 6.7. Pulzní řízené stejnosměrné reziduální proudy (30 mA)

6.3 Matematický model jádra součtového transformátoru

Toto byla nejdůležitější část návrhu. Jak již bylo zmíněno v kapitole 5, použily se tři typy materiálů na porovnání spřažených magnetických toků.

6.3.1 Tvorba rovnic

Primárním vodičem teče poruchový proud. Tento proud kolem vytváří magnetické pole. Když feromagnetické jádro o průřezu S obepíná tento vodič, vzniká v něm působením magnetického pole magnetický tok Φ , který dále působí na sekundární vinutí. Podle počtu závitů na sekundárním vinutí vzniká výsledný spřažený magnetický tok Ψ . Ten svými změnami v čase udává velikost indukovaného napětí. Spřažený magnetický tok je závislý na změně primárního proudu a na indukčnosti vinutí. V matematickém modelu jádra se vycházelo z této základní úvahy.

$$\Psi = L_1 * i_1 - M_{12} * i_2' \quad (6-1)$$

Spřažený tok se spočítal z primární strany. L_1 je vlastní indukčnost primárního vodiče. M_{12} je pak vzájemná indukčnost mezi primární stranou a sekundární cívkou. **Sekundární proud i_2 bylo nutno přepočítat na primární stranu.** Rozptylová indukčnost obou vinutí je zanedbána. Navíc na sekundární straně bylo vinutí navinuto kolem celého jádra, tudíž by rozptyl byl minimální. Vlivem tohoto zanedbání spřažený tok na primární straně se rovnal toku na straně sekundární.

$$\Psi = L_1 * i_1 - M_{12} * i_2' = -L_2 * i_2 + M_{21} * i_1' \quad (6-2)$$

Pro sekundární proud přepočítaný na primární stranu dále platí:

$$i_2' = i_1 - i_0 \quad (6-3)$$

Pro vlastní indukčnost platí vztah:

$$L_1 = \frac{N_1^2 * \mu_0 * \mu_r * S}{l} \quad (6-4)$$

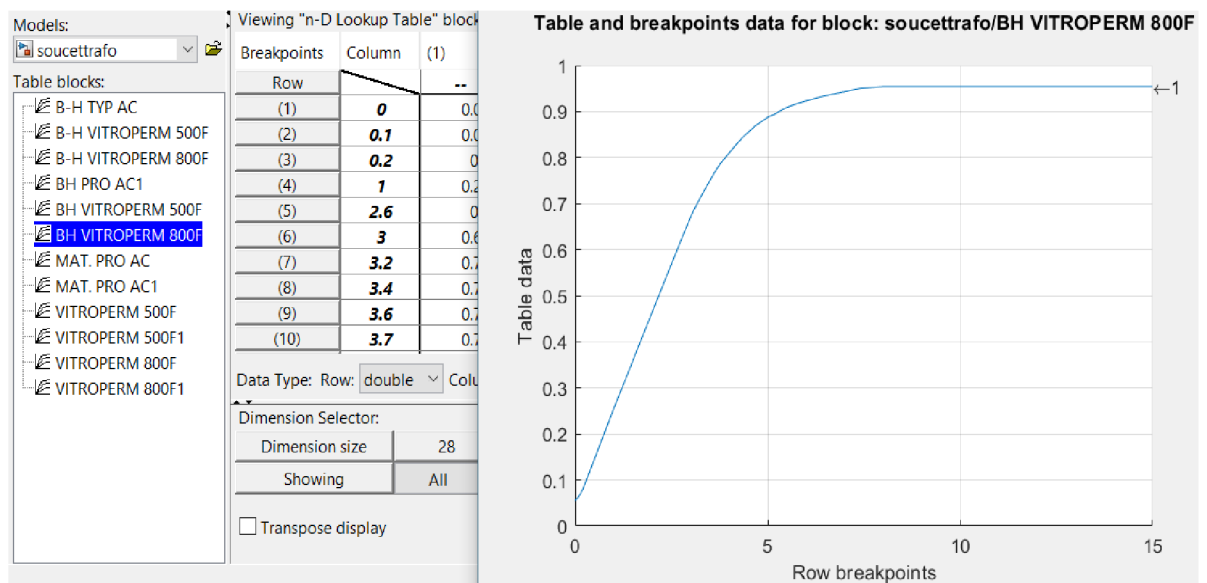
Pro vzájemnou indukčnost platí vztah:

$$M_{12} = \frac{N_1 * N_2 * \mu_0 * \mu_r * S}{l} \quad (6-5)$$

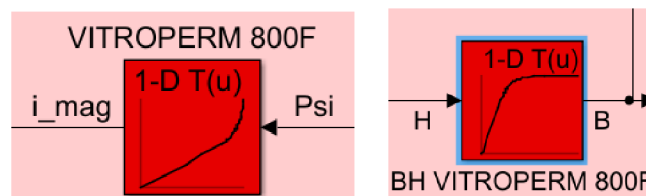
Z rovnic 6-1 a 6-3 se vytvořily uzavřené smyčky výsledných spřažených toků všech materiálů (viz. Obr. 6.12., 6.17. a 6.22.).

6.3.2 Vliv hystereze jádra

Předchozí kapitola 5 ukázala, že každé jádro má určitou hysterezi. Také závislost mezi spřaženým tokem a magnetizačním proudem jádra byla nelineární. Pomocí look-up tabulek bylo možné v programu tyto nelineární závislosti nadefinovat. Vzaly se odečtené hodnoty z grafů B-H křivek a magnetizačních charakteristik a zadaly se do tabulek.



Obr. 6.8. Zadávání hodnot do look-up tabulky

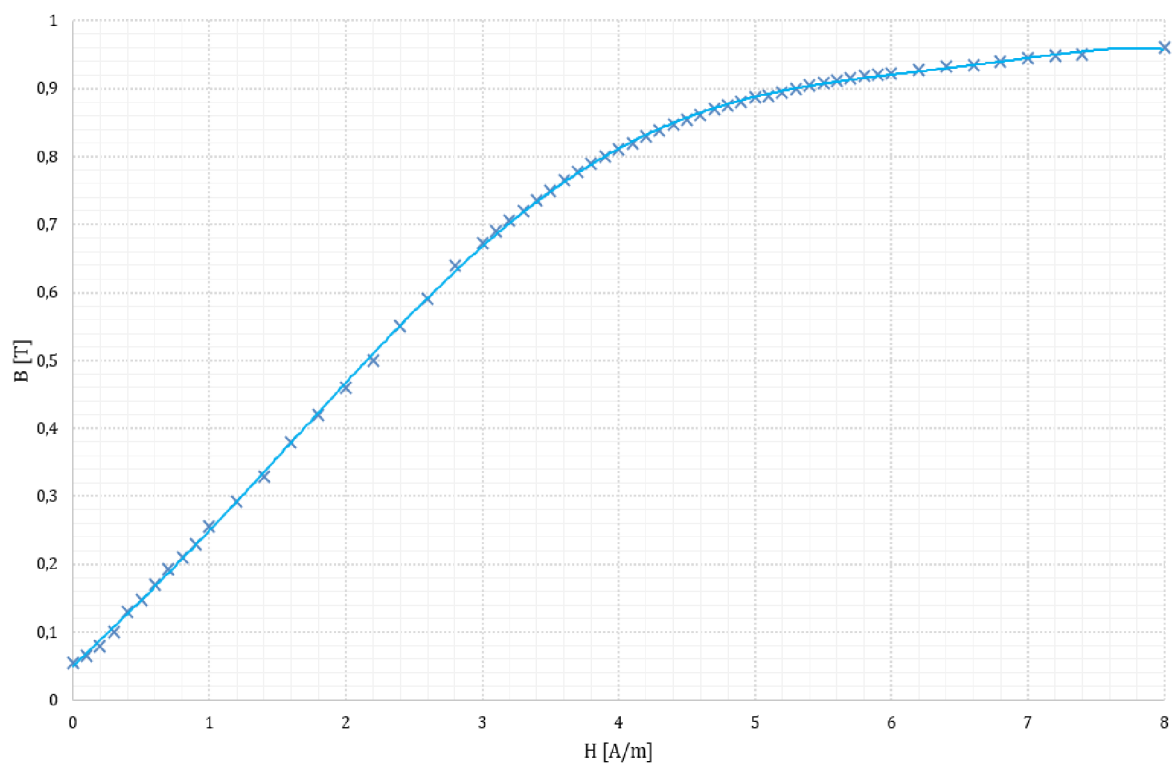


Obr. 6.9. Magnetizační charakteristika a hystereze v programu Simulink

Vzniklé hodnoty patřily materiálu VITROPERM 800F. Do look-up tabulky stačilo zadat jen kladné vyšší hodnoty z grafických průběhů, neboť pro pulzní stejnosměrné proudy nebyly záporné hodnoty třeba.

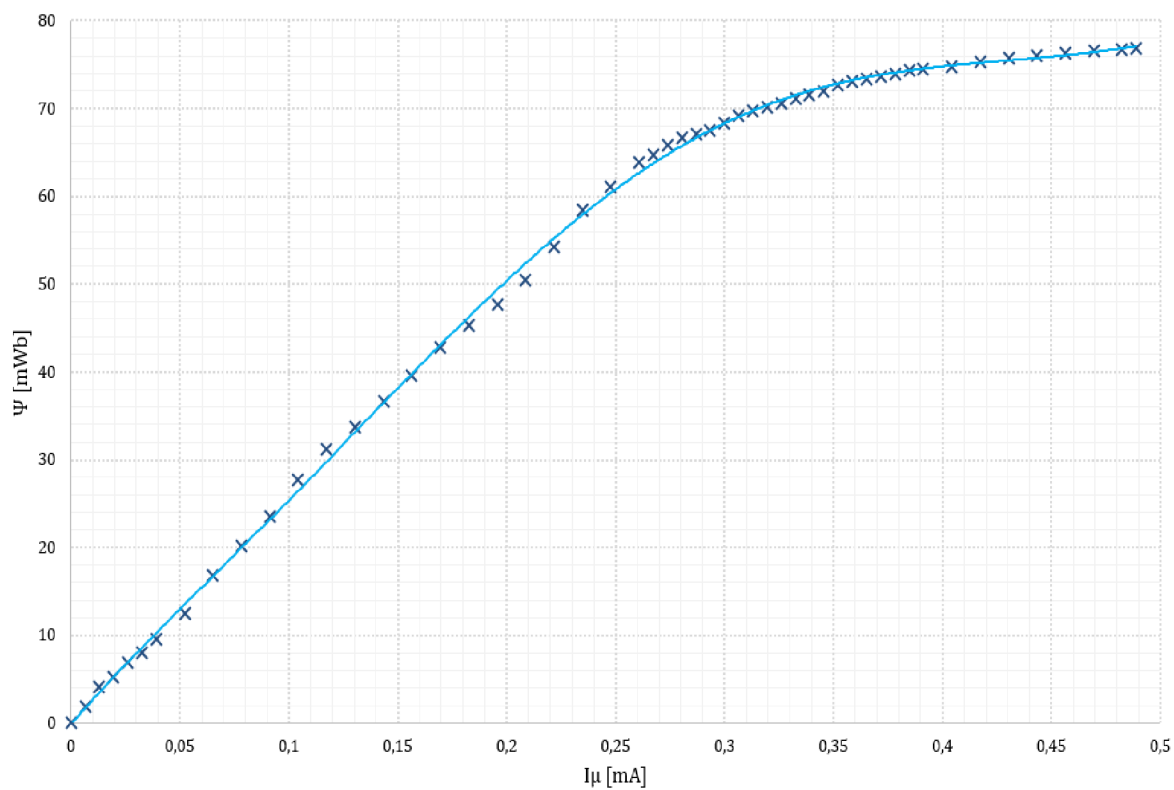
Nelineární závislosti v programu Simulink vypadaly následovně.

VITROPERM 800F



Obr. 6.10. Kladná hysterezní smyčka (800F)

VITROPERM 800F (A)



Obr. 6.11. Kladná magnetizační charakteristika (800F)

Aby tyto grafické závislosti byly proveditelné, musely se v matematickém modelu použít základní rovnice pro magnetické obvody (viz. kapitola 3).

Zde je rovnice pro výpočet intenzity magnetického pole H . Získala se z hodnoty magnetizačního proudu, aby se následně do modelu započítala hystereze.

$$H = \frac{N_2 * I_{\mu}}{l} \quad (6-6)$$

Rovnice pro výpočet spřaženého magnetického toku Ψ na sekundární cívce. Tato rovnice byla potřebná pro zpětné získání spřaženého toku po zavedení hystereze do obvodu.

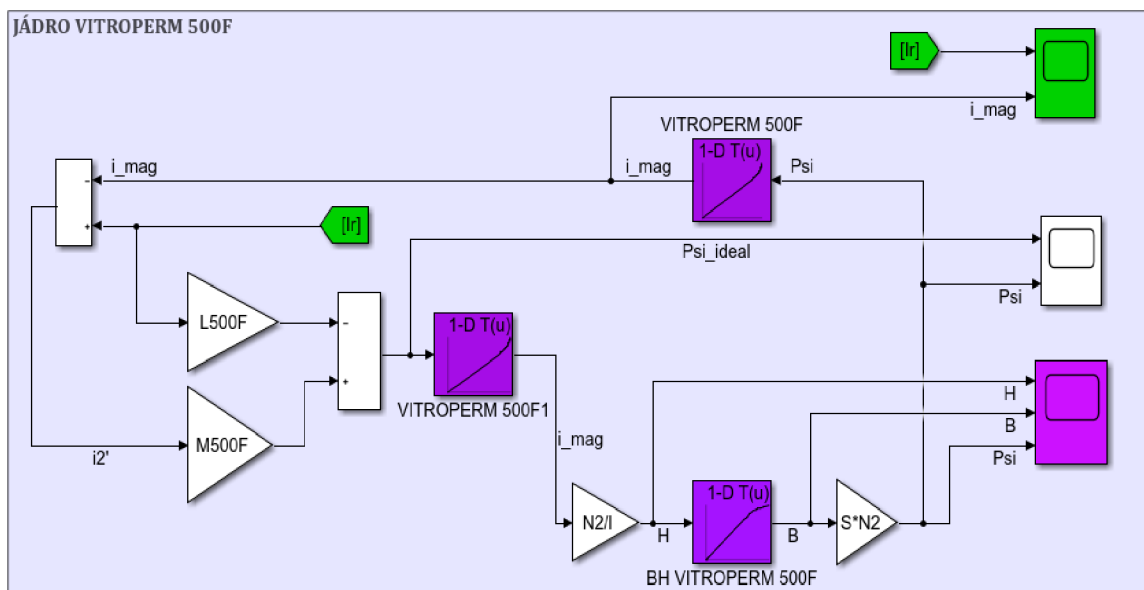
$$\Psi = B * S * N_2 \quad (6-7)$$

6.3.3 Zjednodušení modelu

Vytvořený matematický model nerespektuje skutečné provedení zátěže sekundárního vinutí, protože je v Simulinku obtížně proveditelná – **vede k vysokým numerickým chybám v důsledku přítomnosti operace derivování!** Zátěž je nezbytná pro naindukování sekundárního napětí. Pak i magnetizační proud jádrem by byl o něco vyšší.

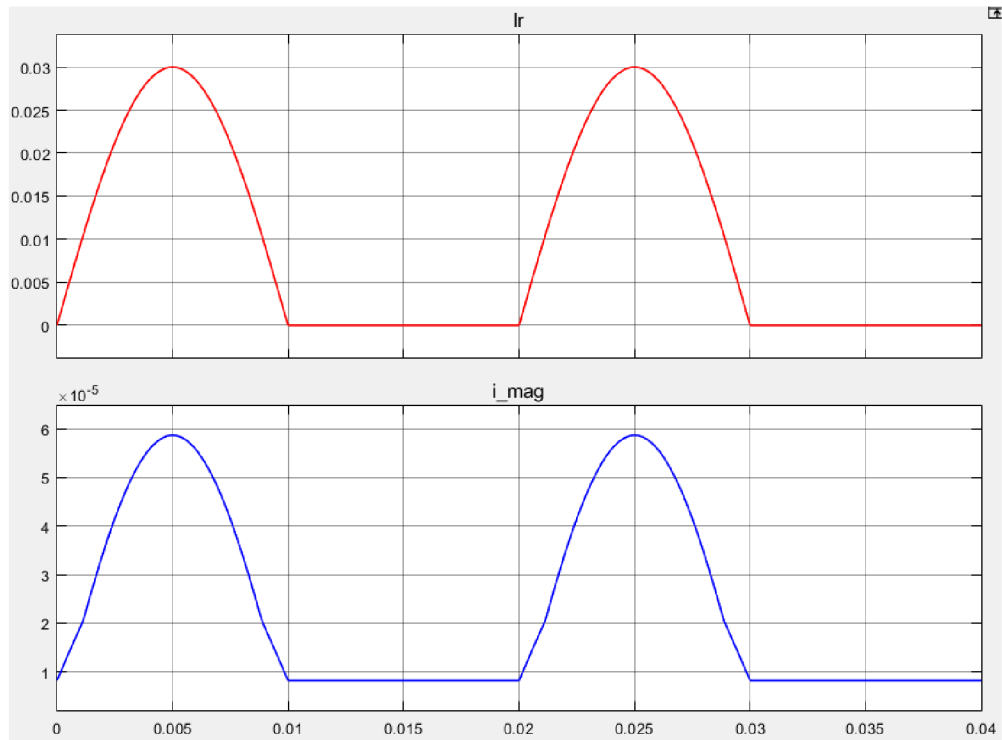
6.3.4 Výsledky simulací a zhodnocení

6.3.4.1 VITROPERM 500F

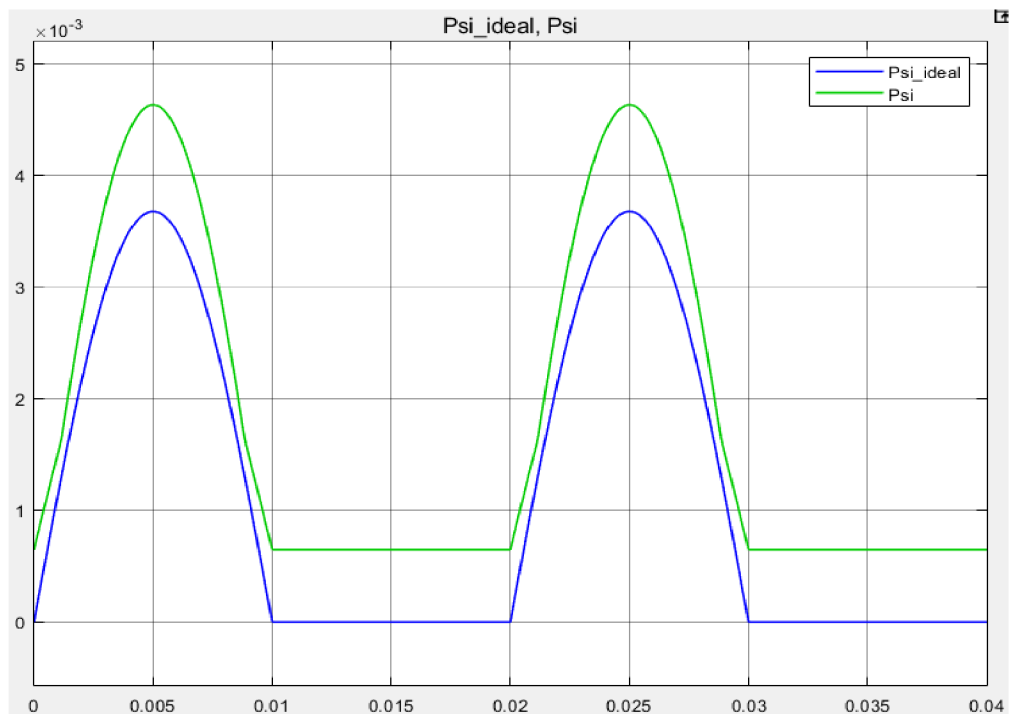


Obr. 6.12. Smyčka jádra materiálu VITROPERM 500F

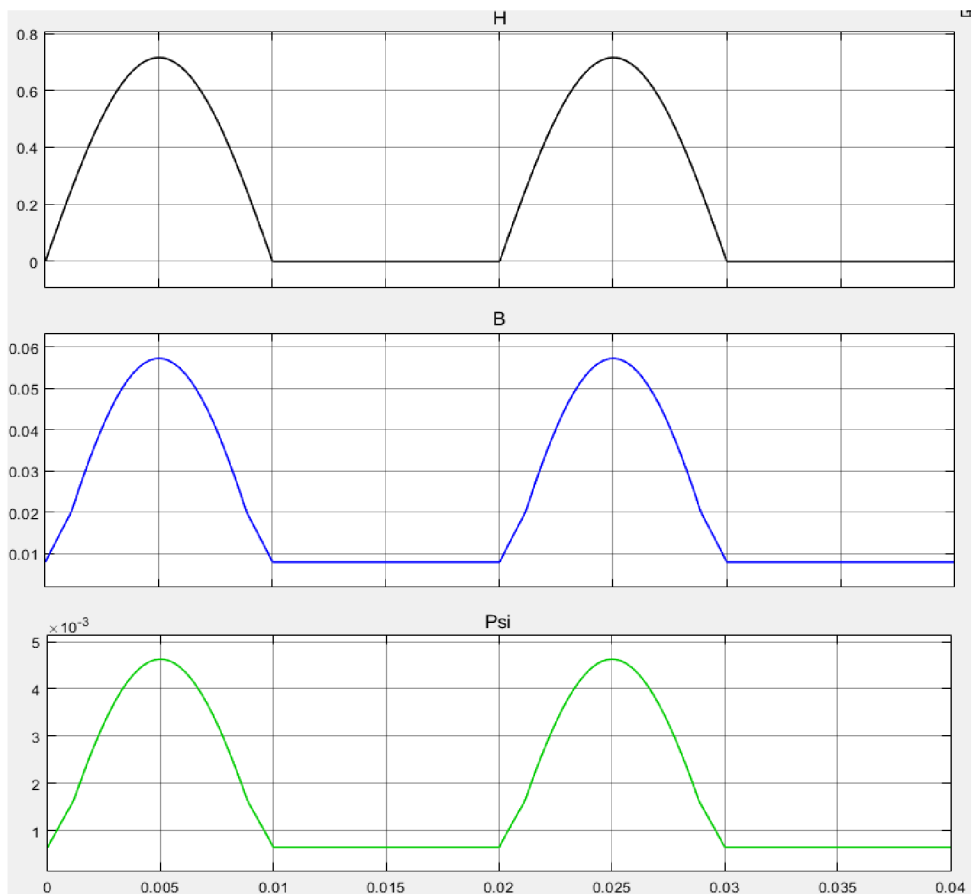
V první simulaci se do obvodu pustil reziduální pulzující proud 30 mA řízený 0°.



Obr. 6.13. Reziduální a magnetizační proud 0° (VITROPERM 500F)



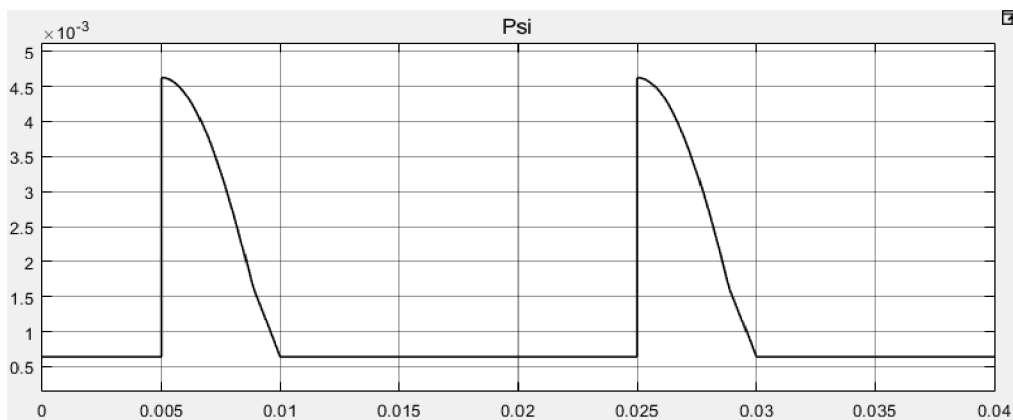
Obr. 6.14. Spřažený magnetický tok 0° (VITROPERM 500F)



Obr. 6.15. Průběhy magnetických veličin 0° (VITROPERM 500F)

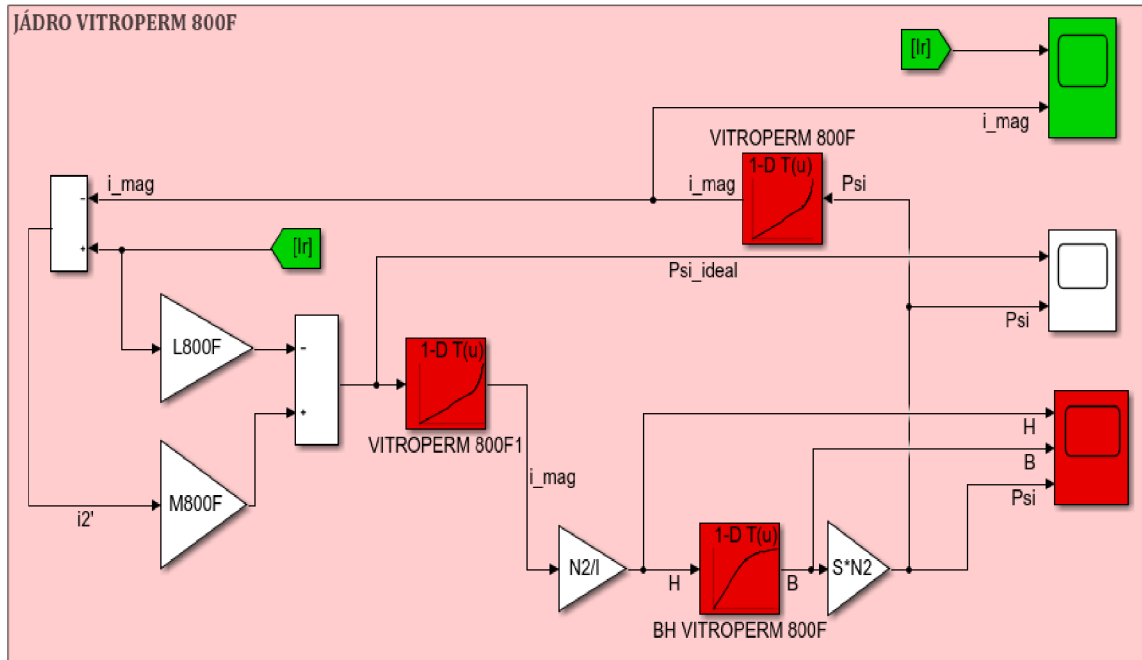
Průběhy ze simulací vyšly velice pozitivně. Jádru mělo k přesycení hodně daleko, neboť hodnoty magnetické indukce se pohybovaly jen od 9 mT do 57 mT. Na Obr. 6.14. se spřažený magnetický tok vlivem remanence trochu posunul po ose y do vyšších hodnot (maximum v 4,6E-03 Wb). Nicméně celkový rozdíl průběhů byl stejný, tudíž by i naindukované napětí na sekundární straně bylo stejné a obvod by dal impuls k vypnutí.

V druhé simulaci byl reziduální pulzní proud 30 mA řízen 90°.



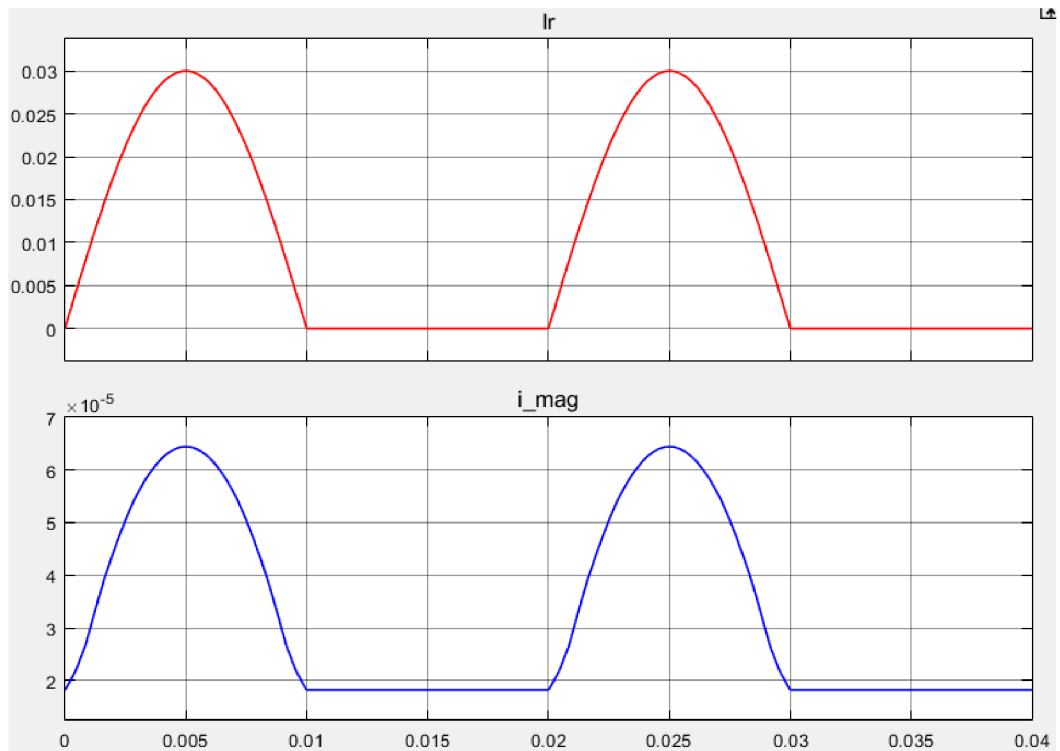
Obr. 6.16. Výsledný spřažený magnetický tok 90° (500F)

6.3.4.2 VITROPERM 800F

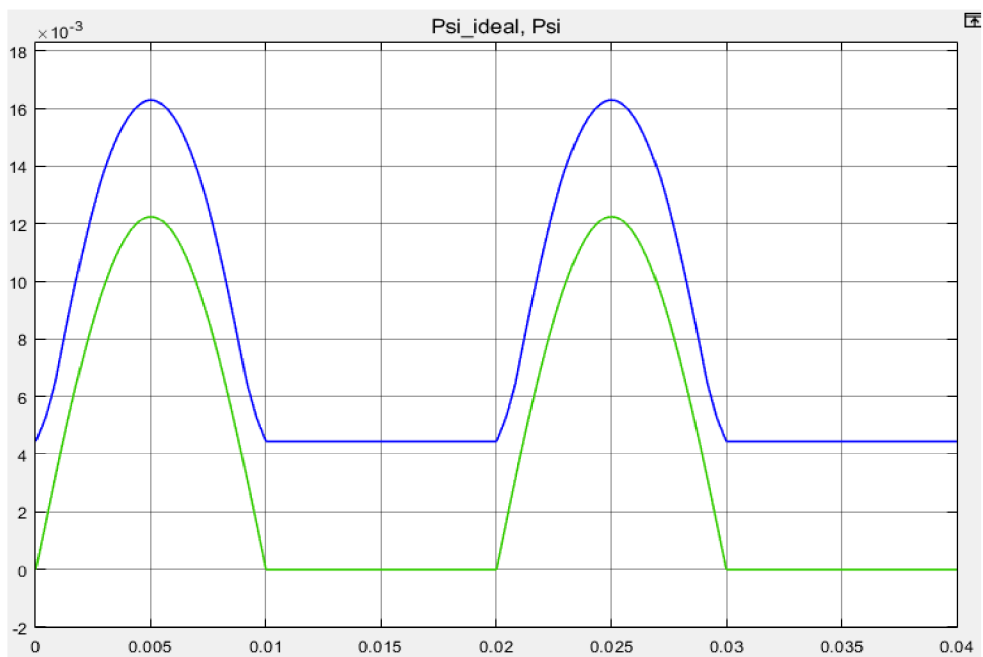


Obr. 6.17. Smyčka jádra materiálu VITROPERM 800F

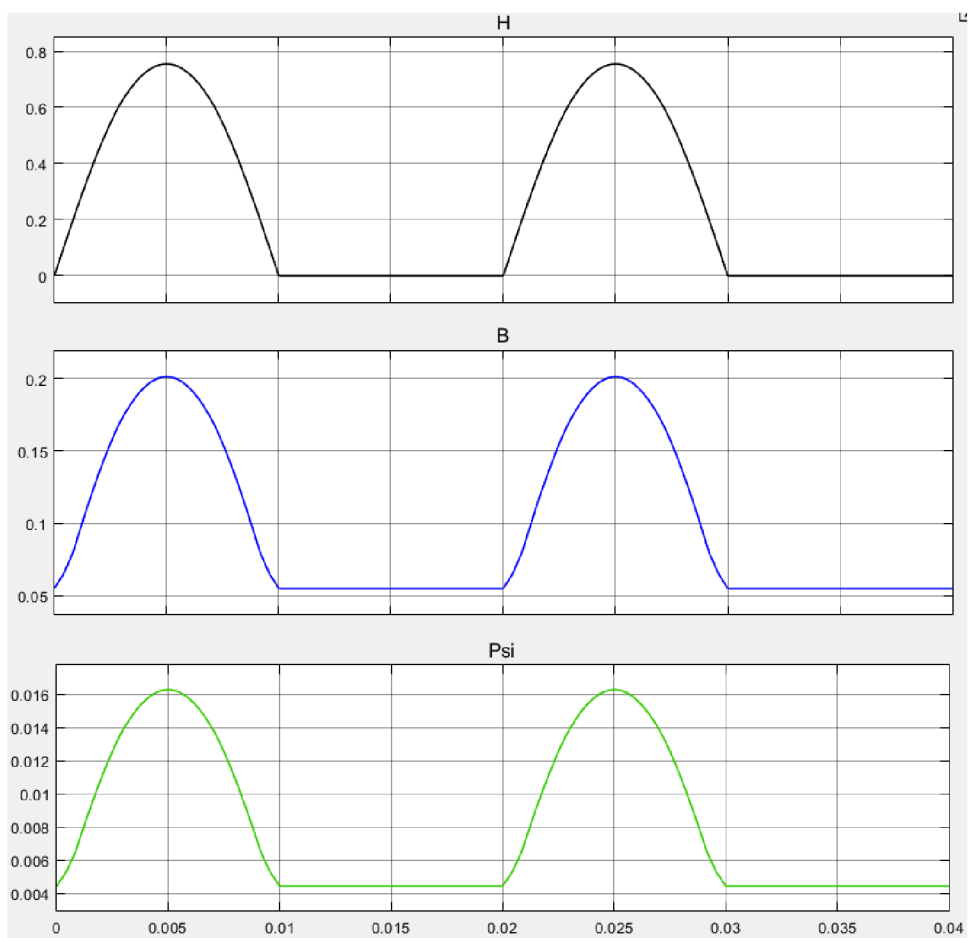
Opět se do obvodu použil pulzní reziduální proud 30 mA řízený 0°.



Obr. 6.18. Poruchový a magnetizační proud (VITROPERM 800F)



Obr. 6.19. Spřažený magnetický tok 0° (VITROPERM 800F)

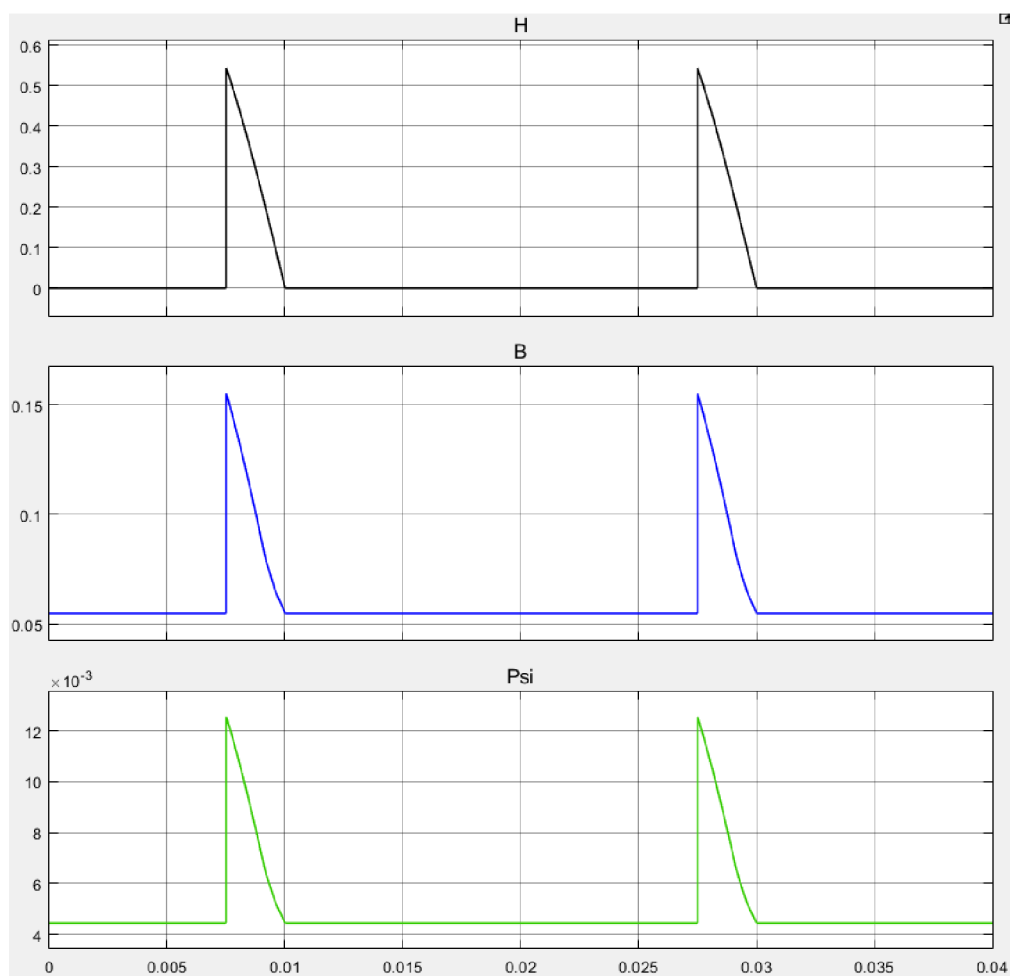


Obr. 6.20. Průběhy magnetických veličin 0° (VITROPERM 800F)

Magnetická indukce, magnetizační proud a hlavně i spřažený magnetický tok vyšly větší než u předešlého materiálu VITROPERM 500F. Magnetická indukce se pohybovala od 0,05 T do 0,2 T. Je to hlavně vlivem vyšší relativní permeability materiálu a také je u materiálu vyšší remanence.

Na Obr. 6.18. měl tok Ψ po hysterezi nepatrně menší rozdíl mezi minimem a maximem jak magnetický tok před hysterezí. Nicméně ani zde nedocházelo k přesycení a materiál VITROPERM 800F na tento pulzující proud také obstál.

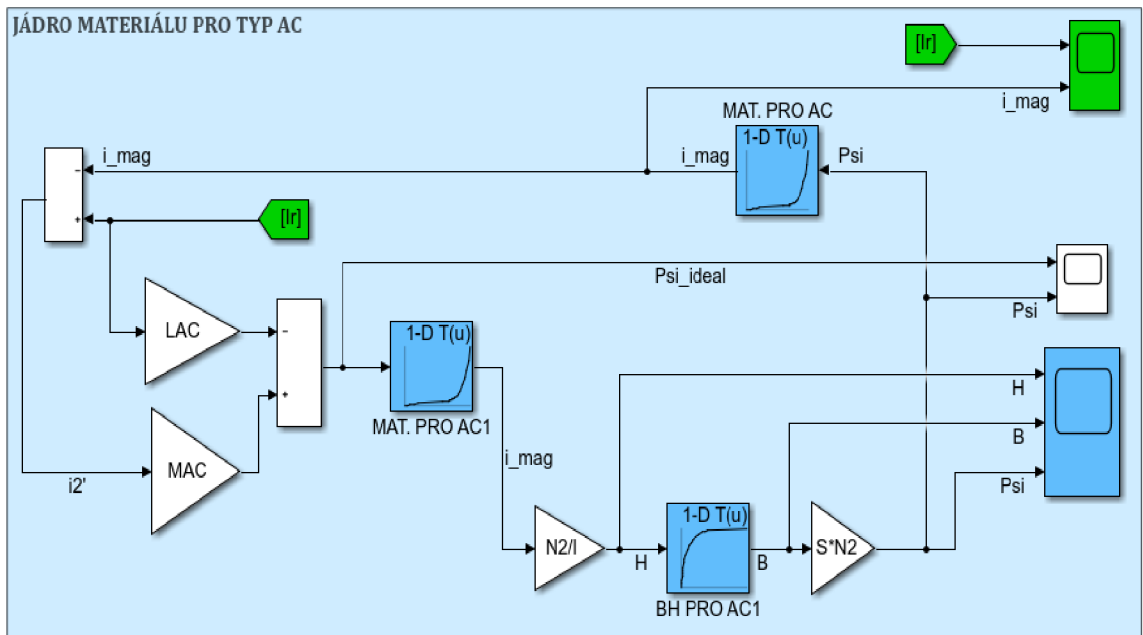
Jako dodatek se ještě provedla simulace s proudovým pulzujícím řízením 135°.



Obr. 6.21. Průběhy magnetických veličin 135° (VITROPERM 800F)

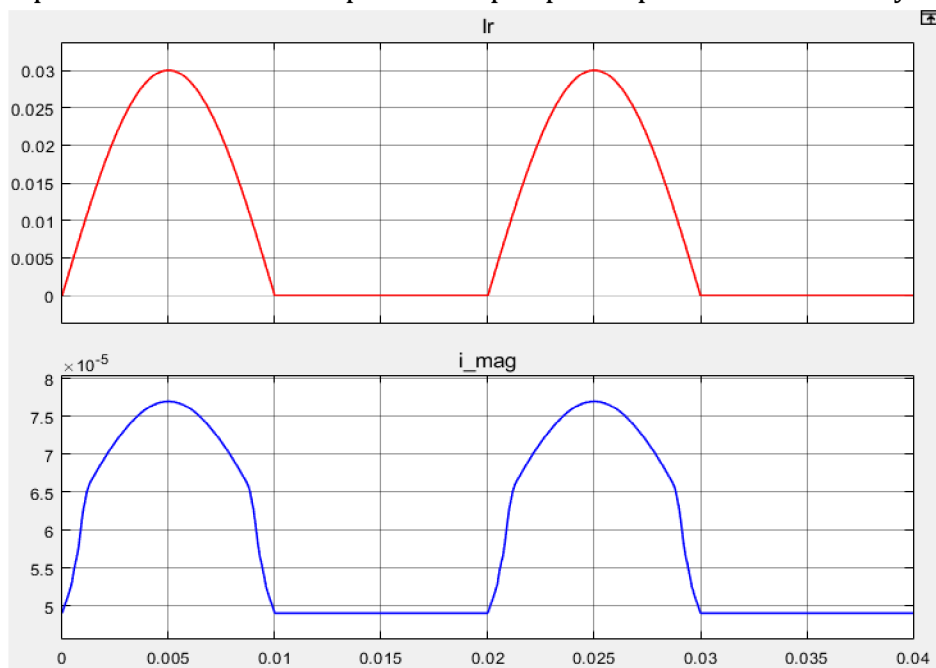
Obr. 6.21 a Obr. 6.16 z předešlé kapitoly 6.3.3.1. ukázaly, že s řízením 90° a 135° klesá střední hodnota všech magnetických veličin. U řízení 135° klesla i jejich maximální hodnota, jelikož řízení spínalo pulz až za jeho maximem.

6.3.4.3 Materiál pro proudový chránič typu AC

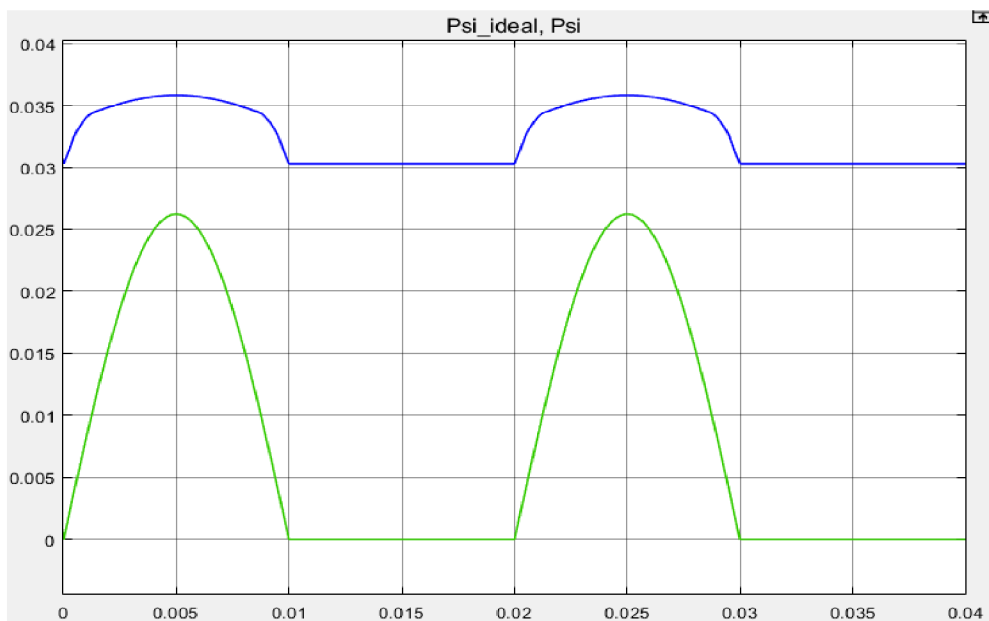


Obr. 6.22. Smyčka jádra materiálu pro typ AC

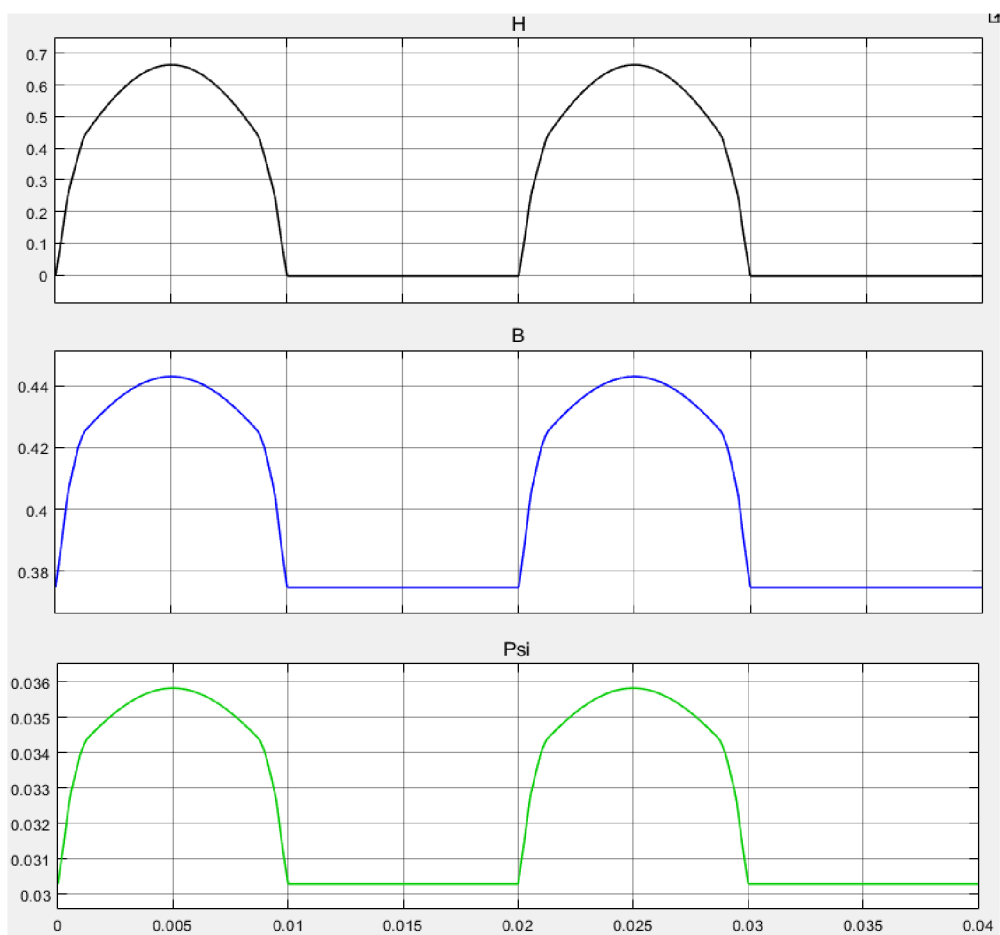
Opět pro porovnání se simulace prováděla pro pulzní proud 30 mA řízený 0° .



Obr. 6.23. Reziduální a magnetizační proud materiálu typu AC



Obr. 6.24. Spřažený tok materiálu typu AC



Obr. 6.25. Průběhy magnetických veličin (materiál typu AC)

Zde už docházelo k přesycení materiálu. Magnetická indukce se vlivem hystereze pohybovala od 0,38 T do 0,44 T. Nejprůkaznější průběh měl spřažený magnetický tok (viz. Obr. 6.24). Jeho průběh z minima do maxima byl čtvrtinový oproti toku bez hystereze a byl už hodně posunutý směrem po ose y . Napětí by se naindukovalo menší a obvod by nevybavil. I magnetizační proud už byl více deformovaný a jeho hodnoty byly nejvyšší ze všech simulací (viz. Obr. 6.23.).

7 ZÁVĚR

Proudový chránič je základní a dnes nezbytná ochrana osob v rozváděči. Musí být ale správně zvolena citlivost jádra podle daného provozu tj. v přítomnosti typu zařízení za chráničem.

První kapitola se věnovala základním informacím o proudovém chrániči. Rozdělení se provedlo podle velikosti reziduálního vybavovacího proud $I_{\Delta n}$, podle časového zpoždění z důvodů selektivity, podle počtu pólů a podle citlivosti jádra na druh reziduálního proudu.

Druhá kapitola se zabývala požadavky na chránič dle normy EN 61008-1. Zaměřovala se především na unikající pulzující reziduální stejnosměrný proud, na který se v praxi provádí dvě základní zkoušky (viz obrázek 2.1. a 2.2.). Součástí byla i zmínka o podmíněném zkratovém proudu chrániče.

Ve třetí kapitole byly rozebrány základní magnetické jevy a jejich následná závislost od základní definice spřaženého magnetického toku, až po magnetickou energii v jádře. Tato kapitola byla důležitá pro pochopení vztahů a problematiky v následujících praktických kapitolách a vytvoření matematického modelu chrániče.

Čtvrtá a poslední teoretická kapitola pak rozebírala již konkrétní magnetické vlastnosti transformátoru, aby se vysvětlil správný princip součtového transformátoru uvnitř chrániče. Na konci kapitoly byl uveden postupný návrh modelu transformátoru napětí pomocí Z a H_u matice a následné zhotovení v programu Simulink (viz obrázek 4.3).

Pátá kapitola již byla kapitola praktická. V programu Ansys Maxwell se zkoumalo rozložení magnetické indukce v jádře a výsledný tok Φ na reálném 3D modelu součtového transformátoru. Proud při těchto simulacích byl hladký stejnosměrný a zanedbalo se sekundárního vinutí. Tudíž výsledný magnetizační proud by byl v reálné situaci menší, neboť by se větší část přetransformovala do sekundární cívk. Cílem těchto situací bylo pouze zjištění kvalitativního působení nesymetrie. Simulace vyšly nejpříznivěji pro feromagnetikum VITROPERM 500F, jelikož měl nejmenší magnetickou indukci v průřezu jádra a nejmenší magnetický tok Φ způsobený nesymetrií. Nejhůře dopadl materiál pro chránič typu AC, který měl při zkoušce reziduálním proudem 30 mA tak velkou magnetickou indukci B a tok Φ ($2,62E-05$ Wb), že již nastalo přesycení jádra. Materiál VITROPERM 800F se nepřesycoval a vyhověl, nicméně se jeho hodnoty pohybovaly výše po B-H křivce než u materiálu VITROPERM 500F. U reziduálního proudu 60 mA již měl celkem vysoký tok Φ ($2,52E-05$ Wb) a při vyšších hodnotách proudu by se už pohyboval v kolenu B-H křivky. Jak již bylo řečeno, ve skutečnosti by ve všech případech byla

situace daleko příznivější, protože větší část reziduálního proudu by se transformovala na sekundární stranu.

Poslední šestá kapitola popisovala návrh matematického modelu chrániče v programu Simulink. Pomocí rovnic na výpočet spřaženého toku, magnetizačního proudu a vlastní nebo vzájemné indukčnosti se zhotovil celkový model jádra. Model se ale zjednodušil z důvodů obtížně proveditelné zhotovení zátěže na sekundární straně, která je nezbytná pro indukování napětí. Skutečný zhotovený model by vedl k velikým numerickým chybám v důsledku přítomnosti operace derivování. Na druhé straně se částečně respektovala hysterese magnetického materiálu – vytvořila se pomocí look-up tabulek. Na vytvoření řízeného pulzního proudu se zhotovila poruchová smyčka a pak se již provedla první simulace. Amplituda pulzních proudů činila opět 30 mA a nejlépe si opět vedl materiál VITROPERM 500F. Dobře dopadl i VITROPERM 800F, a tak se ověřilo, že se oba materiály hodí použít na pulzující reziduální proudy vlivem své nízké remanence. Jejich spřažené toky se sice vlivem remanentní indukce zvětšily, ale průběhy se nijak neovlivnily (viz. Obr. 6.14. a 6.19.). Tudíž naindukované napětí a proud na sekundární straně by také zůstaly neovlivněné a při poruše by daly impuls k vybavení obvodu. Materiál pro chránič typu AC se při tomto reziduálním pulzu řízeného v 0° , 90° a 135° (30 mA) postupně přesycoval (viz. Obr. 6.24.) a i ostatní magnetické veličiny byly deformovány (viz. Obr. 6.23 a 6.25.). Potvrdilo se tak pravidlo, že tento materiál je vhodný pouze na chrániče typu AC, které rozeznají pouze střídavý reziduální proud.

LITERATURA

- [1] Tkotz, K.: Proudový chránič, ProfiElekrika.cz [online], 2002, 2017, 1 [cit. 2017-11-12]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/terminolog/eterminologitem.2005-11-26.9817706810>
- [2] OEZ – Proudové chrániče [online], Letohrad: OEZ, 2019 [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <http://www.oez.cz/produkty/proudove-chronice-minia>
- [3] Norma EN 61008-1: RCCB bez vestavěné nadproudové ochrany pro domovní a podobné použití, 2012, CENELEC, Evropský výbor pro normalizaci v elektrotechnice
- [4] Patočka, M.: Magnetické jevy a obvody, 2011, Brno: FEKT, ISBN 978-80-214-4003-6
- [5] Koupý, L.: Měření při revizích elektrických instalací [online]. ILLKO s.r.o., 2014 [cit. 2019-12-30]. Dostupné z: https://www.illko.cz/images/dokumenty/mereni_proudovych_chranicu.pdf
- [6] Výkonové tlumivky [online]. Brno: FEKT, 2011 [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30298198.pdf>
- [7] Mudruňková, A.: Elektrotechnické materiály I [online]. Praha: VOŠ a SPŠ elektrotechnická Františka Křižíka, 2016 [cit. 2019-12-29]. ISBN 978-80-88058-90-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/Cover.html>
- [8] Kekule, J.: El. motory a přístroje: Magnetické materiály [online], 2004 [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: http://elektross.gjn.cz/elmotor_magnet/elmagnet_1.html
- [9] Vrána, V.: Transformátory [online], 2005 [cit. 2019-12-29]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/BC_FBI/Prednasky/Trafa_bc.pdf
- [10] Proudové chrániče [online], Brno: Elektro Průmysl.cz (Ing. František Štěpán), 2016 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/elektroinstalace/proudove-chronice-2-dil>
- [11] Valenta, J.: Učební text pro předmět Dimenzování a jištění elektrických zařízení, VUT Brno, 2019

Seznam symbolů, veličin a zkratek

RCCB	–	Proudový chránič bez vestavěné nadproudové ochrany
OLE	–	Proudové chrániče s nadproudovou ochranou 6 kA
OLI	–	Proudové chrániče s nadproudovou ochranou 10 kA
LFE	–	Proudové chrániče (6 kA)
LFN	–	Proudové chrániče (10 kA)
Ψ	–	Spřažený magnetický tok
Φ	–	Magnetický tok
B	–	Magnetická indukce
B_r	–	Remanentní indukce
B_{max}	–	Maximální indukce (nasycení)
H	–	Intenzita elektrického pole
H_c	–	Koercitivní síla
H_{max}	–	Maximální intenzita elektrického pole (nasycení)
μ	–	Permeabilita (Měrná magnetická vodivost)
μ_r	–	Relativní permeabilita materiálu
μ_0	–	Permeabilita vakua (1,26E-06)
L	–	Indukčnost cívky (L_d je diferenciální indukčnost cívky)
u	–	Naindukované napětí
U_m	–	Magnetizační napětí
R_m	–	Magnetický odpor
λ_m	–	Magnetická vodivost
S	–	Průřez magnetického jádra
W	–	Magnetická energie
M	–	Magnetizace
J	–	Magnetická polarizace
l	–	Střední délka magnetického obvodu
N1	–	Počet závitů primárního vinutí
N2	–	Počet závitů sekundárního vinutí
M_{12} (M_{21})	–	Vzájemná indukčnost mezi primární a sekundární stranou
i_1 (i_1')	–	Proud na primární straně cívky (přepočítaný na sekundár)
i_2 (i_2')	–	Proud na sekundární straně cívky (přepočítaný na primár)
i_0 (i_{mag} , I_μ)	–	Magnetizační proud v jádře feromagnetika
I_r	–	Reziduální poruchový proud
LAC	–	Vlastní indukčnost materiálu pro typ AC
L500F	–	Vlastní indukčnost materiálu VITROPERM 500F
L800F	–	Vlastní indukčnost materiálu VITROPERM800F
MAC	–	Vzájemná indukčnost materiálu pro typ AC

M500F	-	Vzájemná indukčnost materiálu VITROPERM 500F
M800F	-	Vzájemná indukčnost materiálu VITROPERM 800F
Lin.	-	Lineární
Mag.	-	Magnetický
ss proud	-	stejnoseměrný proud
stř. proud	-	střídavý proud