



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Preisachův model a jeho použití při modelování hystereze v elektrotechnice

Autoreferát disertační práce

M15000001

Studijní program: P2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612V045 – Technická kybernetika

Autor práce: **Ing. Jakub Eichler**

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Novák Ph.D

Konzultant: prof. RNDr. Miloslav Košek CSc.

Liberec 2021



Obsah

Úvod	3
1 Hystereze feromagnetik	5
2 Modely hystereze	7
3 Preisachův model	9
3.1 Obecný Preisachův model	9
3.2 Numerická reprezentace Preisachova modelu	10
3.3 Preisachův model v elektromagnetismu	10
3.4 Implementace Preisachova modelu v Matlabu	10
3.5 Váhová funkce Preisachova modelu	11
4 Identifikace váhové funkce	13
4.1 Měření FORC křivek s programovatelným zdrojem napětí	14
4.2 Identifikace rušivých signálů a analýza šumu	14
4.3 Derivace Everettovy funkce	19
4.4 Využití symetrie magnetizačních smyček	20
5 Výpočetní náročnost modelu	22
5.1 Model s neekvidistantním dělením H	22
6 Preisachův model bez váhové funkce	24
6.1 Redukce reciprokých operací	24
7 Aplikace Preisachova modelu na simulaci ferorezonance	26
7.1 Simulace ferorezonance	26
8 Preisachův model stavu nabití Li-Ion článku	30
8.1 Modelování elektro-chemických článků	30
8.2 Hystereze nabíjecího/vybíjecího procesu	30
8.3 Měření FORC křivek Li-Ion článků	31
Závěr	33
Literatura	35
Publikace autora	37

Úvod

S Preisachovým modelem hystereze jsem se setkal při řešení mé diplomové práce [34], která byla zaměřena na měření magnetických vlastností transformátorových plechů a jejich modelování. V rámci práce jsem sestavil jednoduchou aparaturu a v práci jsem naprogramoval Preisachův model v nejjednodušší skalární variantě pracující s váhovou funkcí v trojúhelníkové matici [41]. Nastavení modelu podle výsledků měření trpělo řadou omezení a algoritmus vyžadoval významné zásahy při změnách materiálu nebo metody měření [37]. Skalární model vykazoval typický schodovitý průběh výstupní veličiny a byl velmi výpočetně náročný [38]. Diplomová práce tak odhalila celou řadu problémů s měřením a modelováním magneticky měkkých látek.

Ústav mechatroniky a technické informatiky, kam jsem nastoupil na doktorské studium, a především můj školitel se dlouhodobě zabývá řešením problematiky hystereze magnetických materiálů v elektrotechnice. Zabýváme se především řešením zapínacích proudů transformátorů [31, 32] a potlačováním ferorezonance u měřicích transformátorů napětí vn [30]. Součástí výzkumu, kam spadá předkládaná práce, je modelování hystereze.

Připomeňme, že u hystereze může pro konkrétní hodnotu nezávislé vstupní veličiny existovat více (i nekonečně mnoho) hodnot výstupní veličiny, která je závislá nejenom na vstupní veličině, ale také na změnách vnitřního stavu látky [3]. Vnitřní stav závisí na předešlých hodnotách vstupní veličiny nebo jejích extrémech.

U jednoduchých úloh lze použít jednoduchý model magnetických prvků. Nejtriviálnější je použít lineární model induktoru, tj. provést linearizaci v pracovním bodě. Pokud je pracovní oblast širší a máme vyšší nároky na přesnost, lze využít aproximaci saturační křivky některou analytickou funkcí. Tento přístup v sobě nezahrnuje reprezentaci ztrát v magnetiku, nedovoluje simulovat remanenci, natož složitější chování minoritních hysterezních smyček.

V elektrotechnice se modely hystereze používají nejenom pro popis magnetických materiálů, ale také pro popis piezoelektrických jevů, supravodivosti, u materiálů s tvarovou pamětí i ve spintronice [3]. Mimo elektrotechniku jsou řešeny okruhy hystereze u elasticity materiálů, v ekonomice při modelování nezaměstnanosti a široké paletě dalších oblastí.

Jak vyplývá z výše zmíněné motivace, je tato práce zaměřena na modelování magneticky měkkých materiálů s vysokou permeabilitou.

Modely hystereze jsou díky své komplexnosti výpočetně náročné. Obzvláště u úloh s mnohonásobnými výpočty, jako jsou simulace metodou konečných prvků, bývá model hystereze implementován, ale často není používán pro značnou časovou

náročnost při větším počtu elementů. Přirozenou součástí této práce je tedy také hledání výpočetně optimálních algoritmů a hodnocení efektivity připravených skriptů.

Na tomto místě je vhodné zdůraznit komplexnost hystereze z pohledu dynamiky změn veličin systému. Např. v magnetizmu je obvykle hystereze řešena jako kvazistatický problém doplněný modelem vířivých proudů, který postihuje závislost ztrát na rychlosti změn (budicí frekvenci) [3, 7]. Při identifikaci parametrů modelu jsem narazil na další dynamický děj - magnetickou viskozitu [8, 22]. Ta velmi znesnadňuje identifikaci parametrů a značně ovlivňuje průběh hysterezních smyček vysokopermeabilitních materiálů ve strmé oblasti.

Cíle práce:

- Seznámit se s problematikou hystereze v elektromagnetizmu
Prostudovat a popsat principy fungování látek v elektromagnetickém poli, a to zejména feromagneticky měkkých látek. Zaměřit se na moderní nízkoztrátové materiály používané v transformátorech a elektromotorech.
- Vybrat vhodný model hystereze ke studiu ferorezonance
Pro výběr vhodného modelu provést krátkou rešerši, jak fungují jednotlivé modely a vybrat z nich model, který se bude jevit jako vhodný pro použití při predikci stavu ferorezonance.
- Implementovat tento model v prostředí Matlab
Pro budoucí studium ferorezonance připravit model do prostředí Matlab simulink, ve kterém bude probíhat řešení vzniku a potlačování ferorezonance na reálných přístrojových transformátorech napětí přiváděných do stavu ferorezonance.
- Vypracovat metodiku měření reálných vzorků pro určení parametrů modelu
Provést nastavení parametrů modelu tak, aby popis co nejvěrněji reprezentoval vybraný magnetický obvod. Toto by měla být nejdůležitější část práce, protože na věrnosti shody modelu s realitou bude záležet úspěšnost aplikace hotového modelu.
- Provést optimalizaci výpočetní náročnosti modelu
Model bude využit na predikci stavů vedoucích ke vzniku ferorezonance a optimalizaci omezovačů ferorezonance. Bude tedy spouštěn mnohonásobně. Pak je nutné, aby doba výpočtu byla co nejkratší.
- Použít vybraný model k modelování odlišné problematiky
Pro ověření univerzálnosti vybraného modelu, vybrat jinou problematiku, kterou je naše pracoviště schopno měřit a model nasadit i na tuto problematiku a tím potvrdit, že model je univerzální (obecný).

1 Hystereze feromagnetik

Pokud se zaměříme na oblast elektrotechniky, najdeme zde množství oblastí, ve kterých se uplatňuje hystereze, příkladem mohou být ferroelektrika a feromagnetické materiály. Zde se zaměříme na oblast hystereze v elektromagnetickém poli. Pro tu je podstatná vnitřní magnetizace/polarizace ve feromagnetických materiálech.

Hysterezi v elektromagnetismu popisujeme podle vztahu

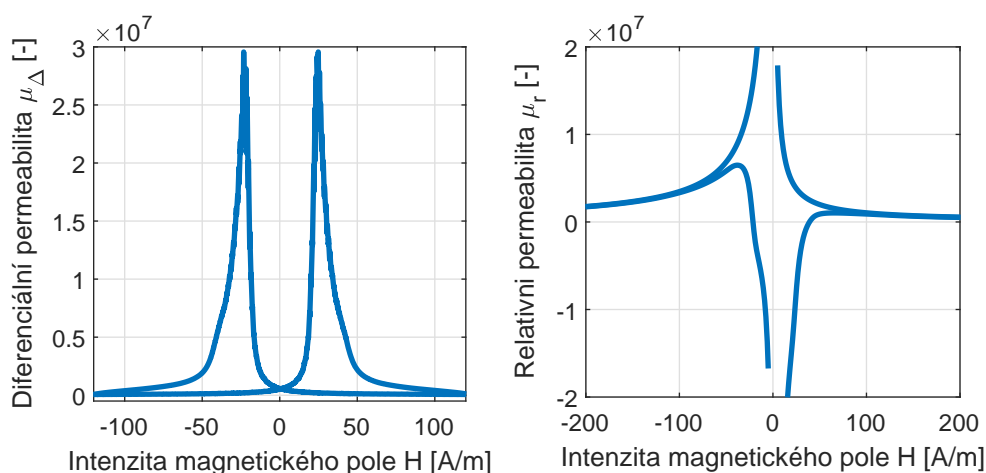
$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = \mu_0 \cdot \mathbf{H} + \mathbf{J} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}), \quad (1.1)$$

ve kterém \mathbf{J} (T) je magnetická polarizace, \mathbf{H} (A/m) je intenzita magnetického pole, \mathbf{M} (A/m) je magnetizací a parametr μ_r (-) je relativní permeabilitou. Jde o bezrozměrnou veličinu udávající kolikanásobek permeability vakua je skutečná permeabilita látky. Podle hodnot, jakých nabývá relativní permeabilita, rozdělujeme látky na následující tři kategorie:

Diamagnetické

Paramagnetické

Feromagnetické

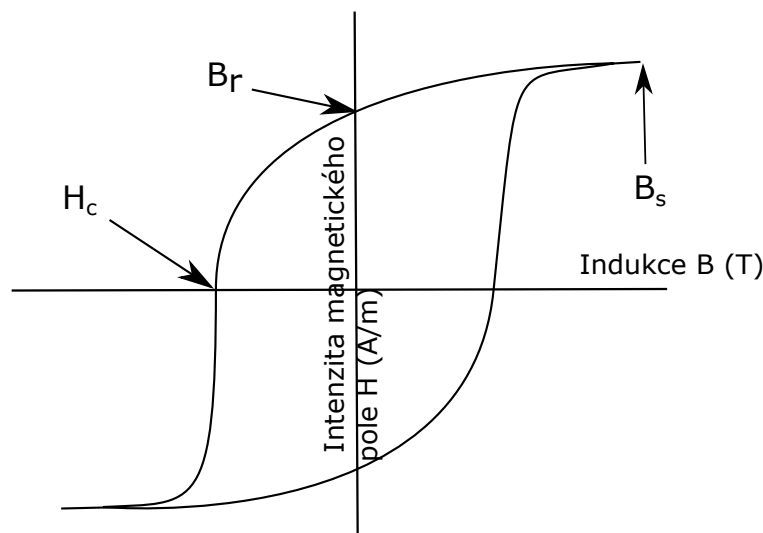


Obrázek 1.1: Grafy diferenciální a relativní permeability téhož feromagnetika

Hystereze je ve feromagnetických materiálech vyvolána samotným mechanismem polarizace látky.

S hysterezí se setkáváme u elektrických strojů, jež obsahují feromagnetické materiály. Tyto stroje jsou často konstruovány z ocelových nebo feritových součástí. Jedná se nejčastěji o motory (DC, asynchronní, synchronní, BLDC), relé, stykače, transformátory a další.

Většina těchto strojů je tvořena magnetickým obvodem z materiálu na bázi železa.



Obrázek 1.2: Příklad hysterezní smyčky

Z makroskopického pohledu vyjadřujeme polarizaci magnetického materiálu nebo obvodu hysterezní smyčkou jako je na obrázku 1.2. Tato smyčka je jednou z charakteristik materiálu a jsou v ní obsaženy údaje, které výrobci materiálů uvádějí jako vlastnost materiálu pro dané podmínky.

Tvar a velikost smyčky jsou značně závislé především na frekvenci a teplotě. Při specifikaci materiálu je nutné vždy uvádět metodu a podmínky měření.

Významné hodnoty na hysterezní smyčce jsou na obrázku 1.2 označeny šipkami. Hodnota B_r je remanentní indukce, je to taková indukce, která se zachová v jádře plně zmagnetizovaném (saturovaném) po odstranění zdroje vnějšího pole, tj. když jeho hodnota klesne na nulu. Bod ve kterém se setkají části smyčky pro rostoucí a klesající vstupní hodnoty intenzity, a od kterého je směrnice těchto křivek stejná a rovna permeabilitě vakua, je nazýván saturací B_s . Je to stav, kdy už nemůže dojít k růstu polarizace v látce. Bod H_c znázorňuje koerzivní sílu. Jedná se o intenzitu magnetického pole při níž dochází k poklesu indukce na nulovou hodnotu. H_c se používá k rozdělení látek na dvě skupiny:

Magneticky měkké látky se používají tam, kde je potřebná častá změna polarizace a minimální ztráty při přemagnetování. Příkladem použití jsou transformátory a motory.

Magneticky tvrdé látky se vyznačují tím, že energie potřebná k přemagnetování je vysoká. Tudíž nemůže dojít ke snadnému poklesu indukce.

2 Modely hystereze

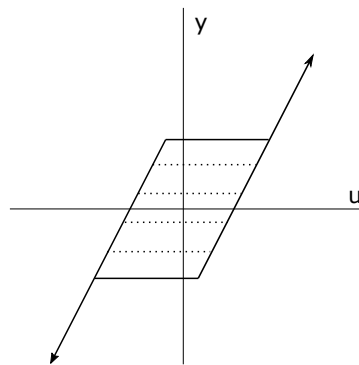
Hystereze je komplikovaný jev. Jeho modelováním se zabývá mnoho vědců, ať už po teoretické stránce, či jako tato disertační práce po stránce aplikační. Modely se liší především ve složitosti. Proto v návrhových softwarech pro elektromagnetické obvody (ansys, comsol ...) je časté jejich nahrazení modelem magnetického materiálu bez hystereze, čímž se podstatně zkrátí doba výpočtu. Modely můžeme z principu dělit na dvě kategorie:

- Modely s lokální pamětí
- Modely s nelokální pamětí

Modely s lokální pamětí jsou charakteristické tím, že výstupní veličina je závislá na vstupní veličině a aktuální výstupní veličině. Modely s nelokální pamětí mají navíc výstupní veličinu závislou i na extrémních vstupních hodnot.

Jiles-Athertonův model Tento model je velmi oblíbený v magnetismu, zejména proto, že jeho parametry odpovídají fyzikálním vlastnostem a charakteristikám modelovaného materiálu. Jeho implementace je rozdělena na řešení anhysterézní magnetizace pomocí diferenciální rovnice [5].

Prandtl-Ishlinského model Prandtl-Ishlinského model je založen na back-slash operátorech, což jsou operátory, jež mají charakteristiku znázorněnou na obrázku 2.1 [6].



Obrázek 2.1: Back-Slash operátor

Bouc-Wenův model Je modelem, který je popsán pohybovou rovnicí s vratnou silou, která vytváří hysterezi[1].

Preisachův model Pro svou jednoduchou implementaci je použit v této práci a je popsán v následující kapitole.

Takácsův model Zvaný též T(x) model je založen na popisu funkcí atan s parametry podle toho v jakém stavu se materiál nachází [9].

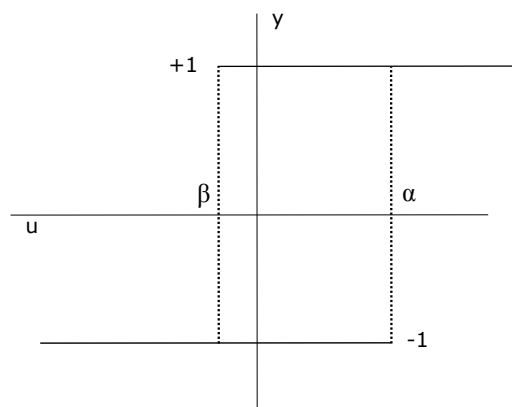
Stoner - Wohlfarth model toner wohlfarth model (S-W) je primárně určen pro modelování magnetických materiálů malých rozměrů, používaných pro záznamy dat [3]. Proto mu zde nebude věnována další pozornost.

3 Preisachův model

Preisachův model byl prvně publikován v roce 1935 a patří společně s modelem Volterra 1912 a Duhema 1897 k nejstarším používaným modelům [17]. Později, když studoval model polský matematik Krasnoselskii, dospěl k závěru, že model obsahuje obecné matematické myšlenky. Tím byl model zpřístupněn k použití ve všech oblastech, ve kterých se hystereze objevuje [3].

3.1 Obecný Preisachův model

Obecný Preisachův model je založen na elementárních částicích, neboli hysterezech $\gamma_{\alpha\beta}$, jejichž hysterezní smyčka je obdélníková. Překlápěcí úrovně hysteronů jsou α a β a mají saturační úrovně o velikosti 1, které se liší pouze znaménkem. Znázornění hysteronu můžeme vidět na obrázku 3.1. Preisachův model je popsán



Obrázek 3.1: Obecný Preisachův hysteron

následující rovnicí:

$$f(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta} u(t) d\alpha d\beta, \quad (3.1)$$

kde $\mu(\alpha, \beta)$ je váhová funkce, $u(t)$ je vstupní veličina a $f(t)$ je výstup modelu.

3.2 Numerická reprezentace Preisachova modelu

Obecný Preisachův model popsaný v kapitole 3.1 je popisován jako množina elementárních hysteronů, z nichž se každý určitou měrou podílí na tvorbě výsledné hysterezní křivky. Tento model je popsán jakožto spojitý systém viz rovnice (3.1). Vycházejme tedy z této rovnice a převedme ji do numerické (diskrétní) formy tak, abychom ji mohli implementovat v libovolném softwaru. Překlápěcí úrovně α a β budou nyní vybírány namísto z původně spojitě množiny z diskrétní množiny hodnot. Uvažujeme pouze model, kde vzorky na osách α a β jsou rozděleny rovnoměrně, tedy $\Delta\alpha = \alpha_{i+1} - \alpha_i$ je konstantní. To samé lze přepsat a musí platit i pro osu β . Integrál se zjednoduší pouze na sumu. Proto přepíšeme (3.1) na následující rovnici, která obsahuje sumu rozepsanou pro oba indexy

$$f(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N-i+1} \mu(\alpha_i, \beta_j) \gamma(\alpha_i, \beta_j) u(t) \Delta\alpha_i \Delta\beta_j. \quad (3.2)$$

Zde již nalezneme sumy pro oba indexy napsané tak, aby obsahovaly pouze Preisachův trojúhelník.

3.3 Preisachův model v elektromagnetismu

Na místo původních označení vstupu $u(t)$ a výstupu $y(t)$ je v magnetismu použita pro vstupní veličinu intenzita magnetického pole $H(t)$ a výstupní veličina je polarizace $J(t)$. Zachovány jsou dvě překlápěcí úrovně hysteronů, nově označované H_u pro překlápění „nahoru“ a H_d pro překlápění „dolů“.

Nyní nenabývají hysterony hodnot $+1$ nebo -1 , ale hodnot $-m$ nebo $+m$, podle stavu, ve kterém se zrovna nacházejí. Hodnota m je určena tak, že celkový součet absolutních hodnot všech hysteronů v modelu je roven 1, tj. $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N-i+1} |m| = 1$. Tato velikost konstanty m zaručuje, že model je invariantní ke kroku diskretizace, tj. není ovlivněn počtem hysteronů.

Pro použití v magnetismu upravíme vzorec (3.2) s tím, že hysterony γ nahradíme jejich ekvivalentem pro intenzitu \hat{m} . Vstupní veličinou je intenzita magnetického pole H

$$J(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N-i+1} \mu(H_{ui}, H_{dj}) \hat{m}(H_{ui}, H_{dj}) \cdot H(t) \cdot \Delta H_u \Delta H_d. \quad (3.3)$$

Operátor \hat{m} aplikovaný na vstupní intenzitu magnetického pole „překlápí“ jednotlivé hysterony mezi jejich kladnou a zápornou hodnotou. $\Delta H_u \Delta H_d$ ve své podstatě reprezentují geometrický rozměr oblasti, jež je reprezentována hysteronem.

3.4 Implementace Preisachova modelu v Matlabu

Samotná implementace modelu je v Matlabu, díky možnostem podmíněného indexování, velice jednoduchá, viz zdrojový kód 1. Parametry funkce jsou: matice

\mathbf{M} , ve které je uloženo, které hysterony jsou překlápěny do kladné a které do záporné hodnoty; vektor diskretizace budicí veličiny \mathbf{H} ; okamžitá hodnota vstupní proměnné u_{oven} ; polarizace v saturaci Mom a směr $rust$, jestli je vstupní veličina zvyšována, nebo snižována.

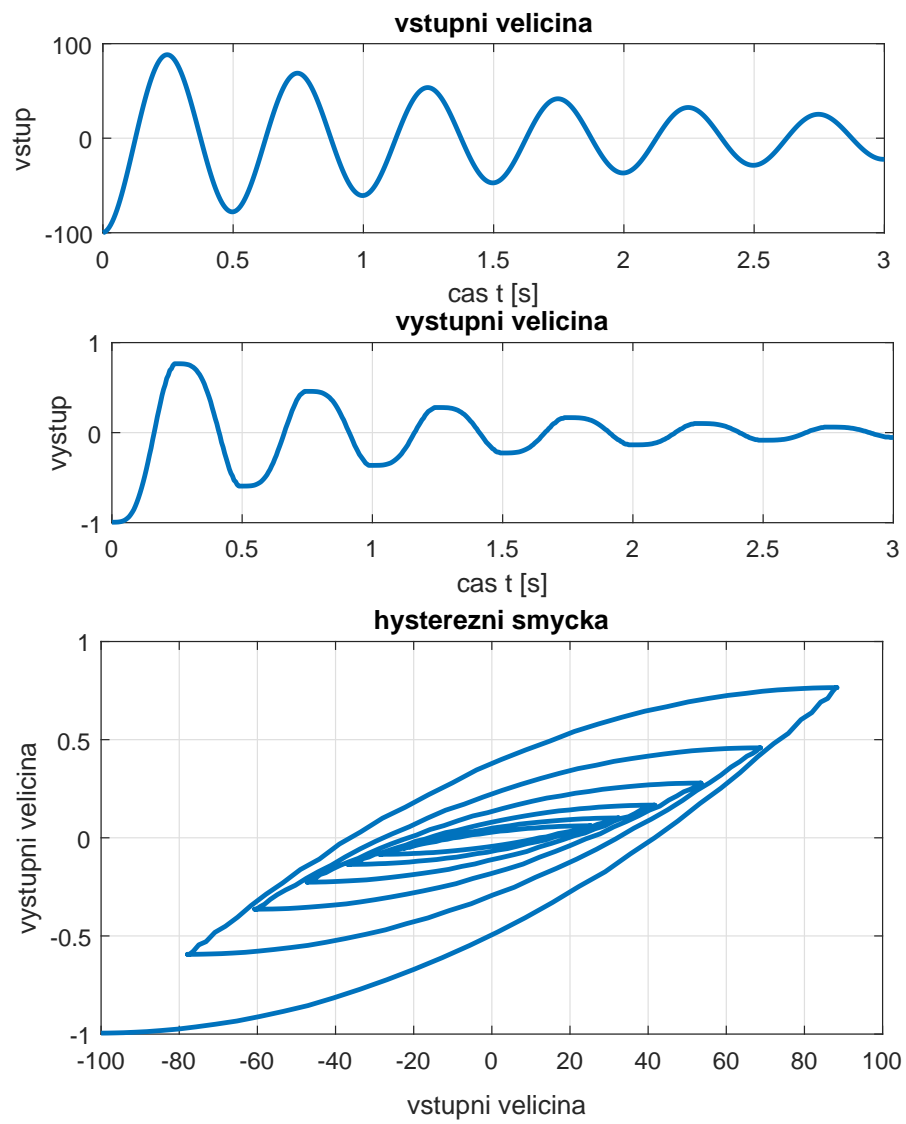
```
function [M] = PM_podpr_polar(M, H, uoven, Mom, rust)
% Nastaveni dipolovych momentu Preisachova modelu.
% M[i,j] je NxN matice dipolu, pouziva se jen její polovina.
% Index j je pro svisly smer, index i je pro smer vodorovny.
% V promenne uoven je hodnota budicího pole a v logicke promenne rust je smysl
% jeho zmeny
% 1 je pro rust, -1 pro pokles a 0 pro konstantni hodnotu.
% Ve vektoru H jsou intensity v bodech mrize,
% vodorovne a svisle.
% Promenne Mp a Mn jsou hodnoty polarizace v bodech mrize.
% Pokud při rustu promenne uoven je překročena hodnota Ha(ja),
% vsechny body M(:, j < ja)
% nad diagonalou a na ni prejdou do stavu Mp.
% Pokud při poklesu promenne uoven klesna její hodnota pod Hb(ib),
% vsechny body M(i > ib, :)
% nad diagonalou a na ni prejdou prejdou do stavu Mn
global PM
N=length(M); if rust==1;
M(H < uoven, (1 : N)) = Mom;
else
M((1 : N), H > uoven) = -Mom;
end;
M=tril(M);
end
```

Zdrojový kód 1:Mechanismus překlápění hysteronů

Samotný kód má pouhých 8 řádků, čehož bylo možné docílit použitím podmíněného indexování. Poslední řádek $M = tril(M)$; je zde pro vybrání Preisachova trojúhelníku. Předchozí řádky funkce operace s nastavováním polarity hysteronů se vykonávají v celé matici. Funkce *tril* nuluje prvky nad dolní trojúhelníkovou maticí, tedy prvky, jež nerepresentují Preisachův model.

3.5 Váhová funkce Preisachova modelu

Váhová funkce $\mu(H_{ui}, H_{uj})$ Preisachova modelu je jediným, a tudíž klíčovým parametrem. Ovlivňuje tvar hysterezních smyček tak, aby odpovídaly reálnému materiálu. Existuje mnoho metod, jak ji můžeme určit. Zde se zaměříme pouze na experimentální přístup, jenž je systematický, a tudíž univerzální. Vzhledem k obtížím při měření experimentální přístup téměř žádný autor pro feromagnetické materiály na bázi železa nepoužívá. Další metody například pomocí aproximace vhodnou funkcí jsou v literatuře např. [2].



Obrázek 3.2: Demonstrace fungování Preisachova modelu

4 Identifikace váhové funkce

V této kapitole bude popsáno, jak je možné určit váhovou funkci Preisachova modelu pomocí experimentů. Popsány budou obtíže při měření, které brání jejímu spolehlivému určení.

Existuje celá řada způsobů, jak váhovou funkci určit. Přímé postupy určení z experimentálních dat lze rozdělit do kategorií:

- **FORC: first order reversal curve**
vratné křivky prvního řádu [3, 4, 29],
- **SORC: second order reversal curve**
vratné křivky druhého řádu [29],
- **MORC: multiple order reversal curve**
vratné křivky vícenásobného řádu [29],
- **CCM: Centered cycle method**
identifikace ze sekvence symetrických křivek [25],
- **MHL: major hysteresis loop**
odhad parametrů z majoritní smyčky [28].

My se zaměříme pouze na nejčastěji používanou metodu FORC zejména z důvodu, že měření vratných křivek vyšších řádů vyžaduje složitější přípravu experimentu, hlavně je potřeba vybavení, které nemáme na pracovišti k dispozici.

Postup, jak získat váhovou funkci z tohoto měření, je již popsán v mnoha publikacích např. [3]. Tento přístup bude proto uveden jen stručně. V literatuře [3] je dokázáno, že váhová funkce je druhou derivací polarizace, jež je odpovídajícím způsobem vložena do Preisachova trojúhelníku. Tímto vložением dostaneme tzv. Everetovu funkci $EW(H_u, H_d)$. Výsledný vzorec pro výpočet váhové funkce Preisachova modelu je

$$W(H_u, H_d) = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 EW(H_u, H_d)}{\partial H_u \cdot \partial H_d}. \quad (4.1)$$

Tvorba Everetovy funkce z měřených křivek FORC je založena na následujících třech krocích:

1. Nalezení maxima budící intenzity magnetického pole $H_u = \max(H)$.
2. Vzorkování polarizace J klesající větve s daným krokem H_d .

3. Přenesení vzorků $J(H)$ této sestupné větve smyčky na prvky trojúhelníku reprezentující daný řádek podle bodu 1, tj. dle H_u .

4.1 Měření FORC křivek s programovatelným zdrojem napětí

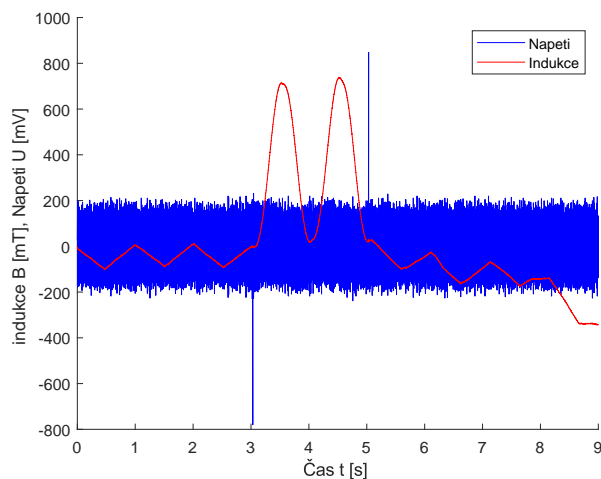
Zde se zaměříme na dokumentaci samotného provedení měření FORC, rozbor nedokonalostí, omezení a důvodů, kvůli kterým není pro feromagnetické materiály s vysokou permeabilitou používána.

Všechna měření této kapitoly byla provedena na programovatelném výkonovém zdroji KIKUSUI PCR 2000LA a měřena měřicí kartou od Natinal Instruments NI USB 6212.

Jak již bylo zmíněno, pro FORC křivky potřebujeme signál takový, jehož výchozím bodem je záporná saturace. Z tohoto bodu se potřebujeme dostat monotónně do definovaného maxima H_u příslušného dané větvi FORC. Z tohoto maxima potřebujeme provést monotónní pokles zpět do výchozího bodu saturace. Tak vytvoříme smyčku s jednou větví FORC.

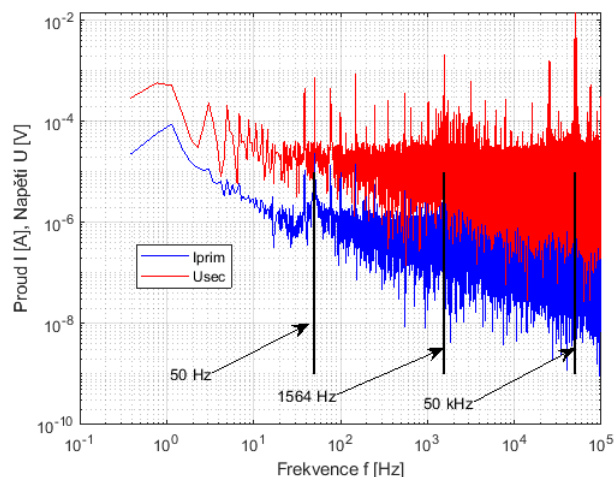
4.2 Identifikace rušivých signálů a analýza šumu

Bohužel v detailu, který je nejlépe vidět na smyčkách s nízkým rozkmitem intenzity magnetického pole, se objevuje rušivý trojúhelníkový signál. Situaci zachycuje obrázek 4.1. Rušivý signál je navíc doplněn nepravidelným driftem, jenž není možné systematicky odstranit.



Obrázek 4.1: Časový průběh intenzity a indukce — detail zvlnění

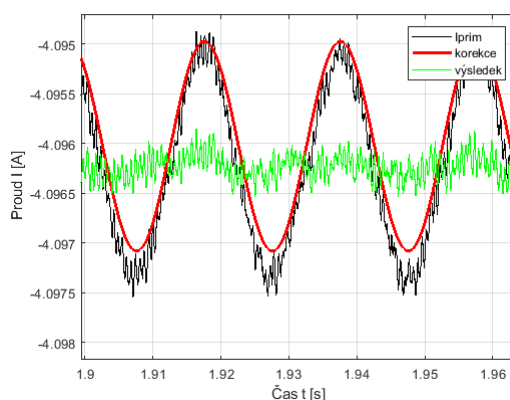
Pro lepší představu o charakteru šumu a dalších EMI rušeních byla provedena frekvenční analýza, viz obrázek 4.2 .



Obrázek 4.2: Frekvenční spektra primárního proudu a sekundárního napětí

Největší problém je dán rušením z elektrické přenosové soustavy. Jeho frekvence 50 Hz leží blízko frekvence měřeného signálu. Není snadné ji efektivně odfiltrovat dolnoproputným filtrem bez poškození užitečného signálu.

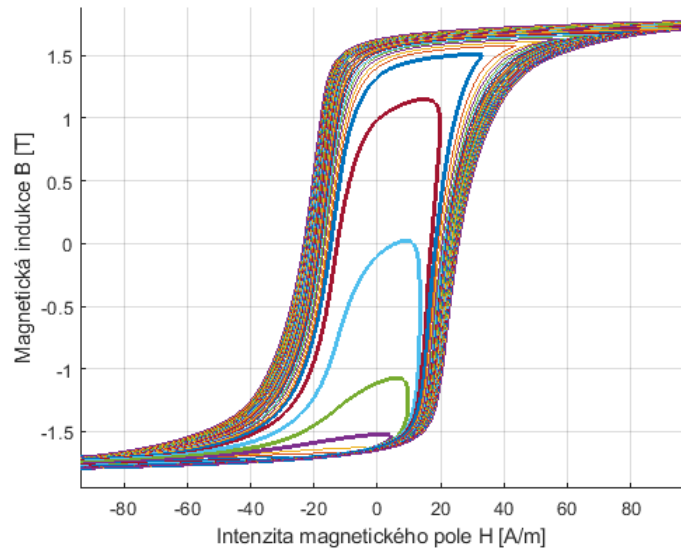
Zvolený mechanismus potlačení 50 Hz signálu je založen na Fourierově frekvenční analýze (FFT). Z FFT získáme pro rušivou frekvenci její fázi a amplitudu. Z těchto informací vygenerujeme korekční signál pro proud i pro napětí. Tyto korekční signály odečteme od měřených signálů, čímž dojde k potlačení jediné frekvence spektra. Výsledek této operace je na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3: Odstranění rušení síťového kmitočtu

Hysterezní smyčky, jež vycházejí ze záporné saturace, jsou na obrázku 4.4. Pro přehlednost je zobrazena každá desátá smyčka a to pouze výřezem kolem strmé oblasti.

Data zobrazená na obrázku 4.4 vypadají na první pohled korektně. Začneme-li ovšem data důkladněji analyzovat, dostaneme se hned k několika nedostatkům. Tyto nedostatky se dají v zásadě rozdělit na čtyři skupiny:



Obrázek 4.4: Změřené smyčky FORC ve strmé části

- neuzavřené hysterezní smyčky,
- nedostatečná počáteční saturace,
- oblé vrcholy smyček,
- neuspořádaná maxima indukci.

Neuzavřené hysterezní smyčky

Po korekci ofsetu měřicího řetězce by měly být měřené smyčky FORC uzavřeny. Měly by opět končit v záporné saturaci. K danému uzavření nedochází a konec smyčky se liší od výchozího bodu o cca 3 až 7 mT. Jde o chyby $< 0,2\%$ z rozsahu. Tyto chyby vznikají částečně nedostatečnou počáteční saturací a $1/f$ šumem, který kvůli obsahu nízkých frekvencí není zcela odstraněn korekcemi ofsetu.

Nedostatečná počáteční saturace

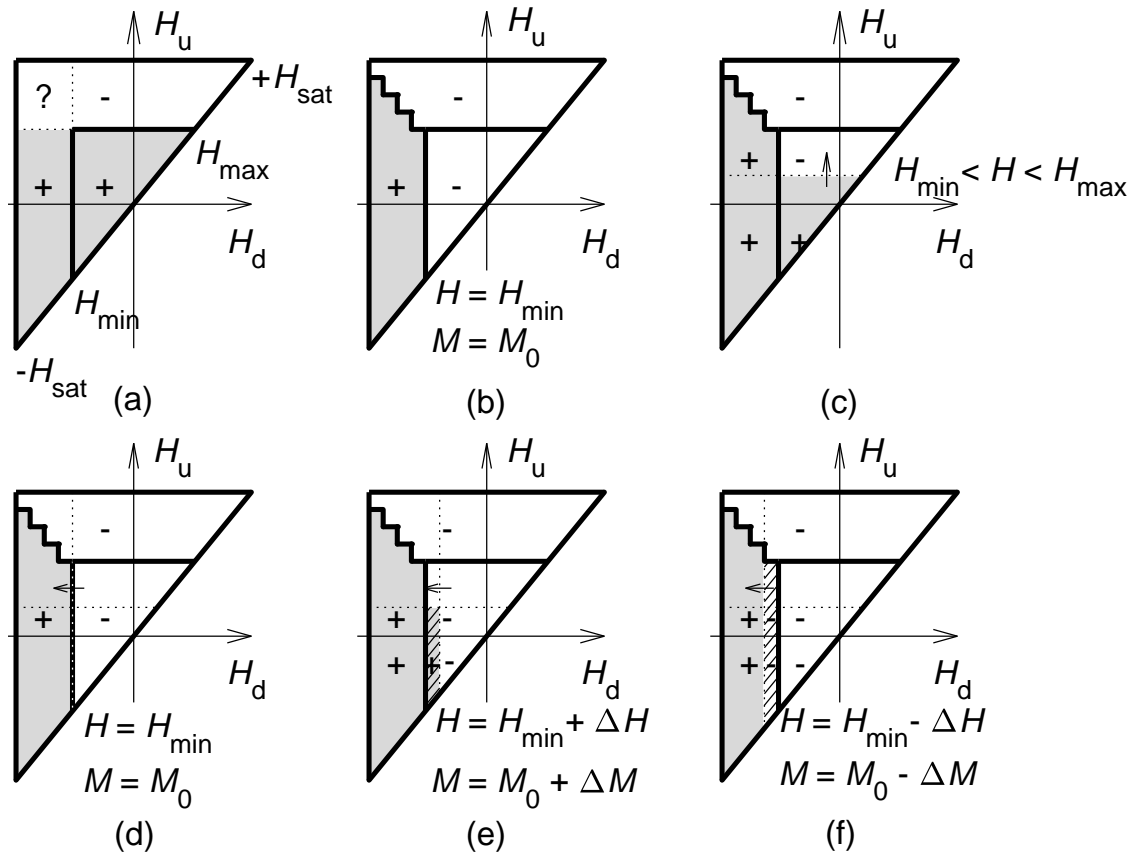
Nedostatečná saturace v počátku měření je závažným problémem. Saturační intenzita magnetického pole je stanovena na -3 kA/m.

Hodnota saturace, která by kompletně zpolarizovala celý materiál, by měla být > 1500 kA/m.

Nedostatečná saturace se projevuje, především ve spojení s magnetickou viskozitou¹ tím, že výchozí vnitřní stav materiálu není při měření jednotlivých FORC smyček stejný. Důsledkem je, že všechny měřené smyčky už v prvotní rostoucí fázi nejdou po jediné trajektorii. Samotná nedostatečně hluboká saturace se projeví tím, že hysterezní smyčka je o nějakou část, která odpovídá zbylým doménám, jež nejsou polarizovány stejným směrem, posunuta [48].

¹Magnetická viskozita je jev, kdy dochází ke změně magnetické indukce poté, co je ukončena změna intenzity magnetického pole.

Pro nedostatečnou saturaci byla provedena simulace jejího chování. Pro simulaci byla v Preisachově trojúhelníku vyčleněna podoblast uvnitř trojúhelníku, jenž tvoří také rovnostranný pravoúhlý trojúhelník, ale má odlišné saturační meze. Meze H trojúhelníku pokrývají celý rozsah možných hodnot od záporné ke kladné saturaci. Limity vstupních hodnot modelu jsou dány plnou saturací ($\pm H_{sat}$). Tím vznikne malý Preisachův trojúhelník, který popisuje pouze stavy, které můžeme vyvolat v materiálu zvolenou měřicí aparaturou, jeho limity vstupních hodnot jsou dány H_{min} a H_{max} .



Obrázek 4.5: Posuny hranice magnetizace při nedostatečné saturaci

Situaci nedostatečné saturace zachycuje obrázek 4.5(a), ve kterém je naznačeno, že oblast malého trojúhelníku je ovladatelná buzením aparatury a oblast označená otazníkem je nedostupná a neznámá.

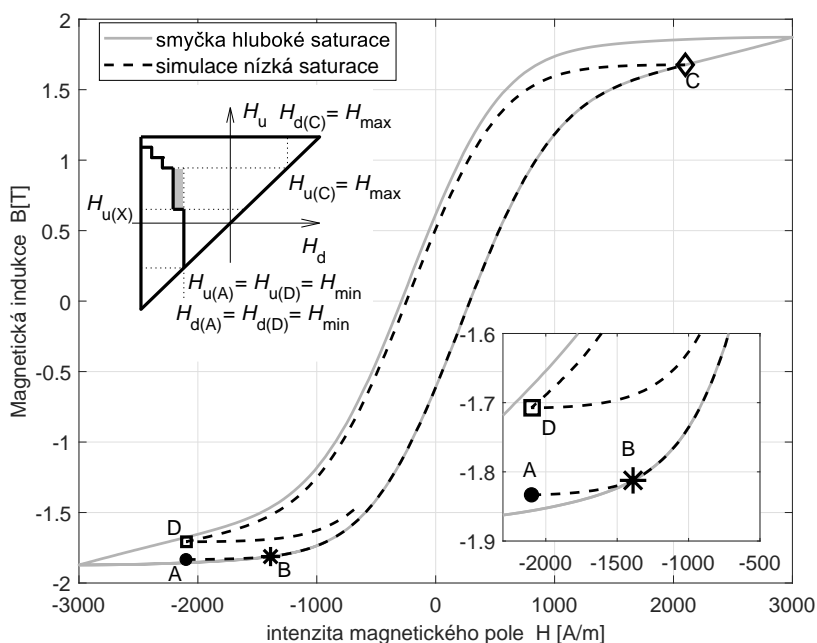
Ve druhé části obrázku 4.5(b) je naznačena oblast, kterou nemůžeme signálem aparatury ovládat, jako demagnetizovaná. Při tomto rozložení nedojde k žádné změně, kterou bychom nebyli schopni pomocí signálů aparatury vrátit.

Standardní chování modelu popisují ještě části obrázku 4.5(c) a (d), na nichž je znázorněn postup monotónního růstu do maxima FORC smyčky a monotónní pokles do výchozího stavu. Pro tyto dané kombinace nenastane případ, kdy by došlo k překročení vstupní intenzity kterou můžeme aparaturou vrátit.

Části obrázku 4.5(e) a (f) znázorňují reálné situace, kdy vlivem šumu, offsetu nebo

jiných nedokonalostí experimentu dojde k neúplnému saturování (případ (e)) nebo naopak (situace (f)) k překročení hodnoty technické saturace a k dalšímu zápornému zpolarizování části materiálu mimo další dosah signálů aparatury.

Na obrázku 4.6 jsou vykresleny dvě hysterezní smyčky. Obě jsou výsledkem modelu, kde jsou upravovány počáteční hodnoty polarizace v Preisachově trojúhelníku. Tato simulace má ověřit předpoklad problematického chování způsobeného nedostatečnou saturací materiálu. První smyčka (šedá) znázorňuje majoritní smyčku, která je popsána od mezních hodnot vstupní intenzity. Druhá smyčka (čárkovaně) je smyčka, kde rozsah vstupních intenzit je dán možnostmi aparatury. Z tohoto obrázku je patrné, že křivka v začátku (bod A) nejde až do bodu B po majoritní smyčce. Od bodu B již došlo k pohlcení šumovým signálem zpolarizovaných částí v Preisachově trojúhelníku. Do bodu C došlo k překlopení všech hysteronů, jež mají úroveň H_u nižší nebo rovnu intenzitě odpovídající tomuto bodu. Od tohoto bodu do bodu D byla monotónně snižována vstupní intenzita magnetického pole. V bodu D jsme dosáhli stejné vstupní intenzity, jako ve výchozím stavu. Indukce, která těmto bodům odpovídá, nemusí být stejná, neboť záleží na tom, jak je nastaven počáteční stav ve velkém trojúhelníku. Nedostatečné zpolarizování a způsob zpracování signálů zapříčiní, že smyčky budou celé o tento rozdíl ΔB posunuty, neboť výchozí bod je pro tuto integrační metodu stanoven pevně.



Obrázek 4.6: Posuny smyčky vlivem nedostatečné saturace v počátku

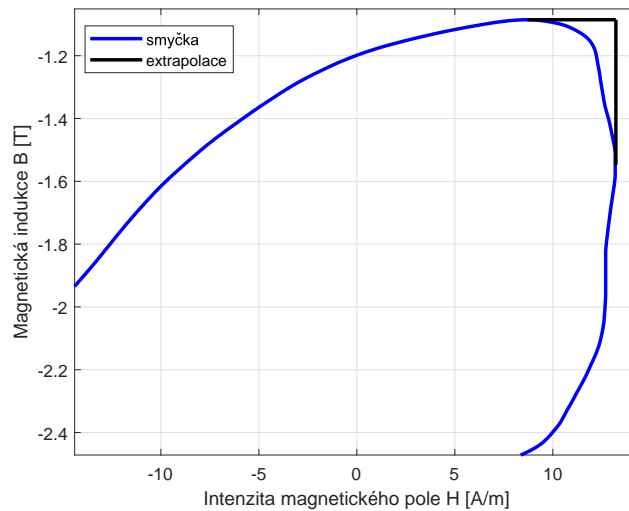
Oblé vrcholy smyček

Třetím bodem seznamu je předpoklad, že měřené smyčky FORC mají „ostrá“ maxima. Při měření ovšem byly naměřeny smyčky, které nemají maximum indukce ve stejném časovém bodě jako maximum intenzity magnetického pole, viz obrázek 4.4.

Vrcholy smyček končící především ve strmé části majoritní smyčky jsou značně zaoblené. Se změnou směru budicí intenzity se ve vrcholech těchto strmých částí smyček výrazně mění strmost dB/dH . Silně se tak mění frekvenční obsah veličin.

První hypotézou důvodu těchto zaoblení vrcholů smyček byly vířivé proudy. Vířivé proudy jsou vyvolány proměnným magnetickým polem a působí proti poli, které je vyvolalo. Takto vyvolané vířivé proudy nezpůsobí změnu tvaru smyček o více než 0,07 A/m. Jak je vidět na obrázku 4.7, posun mezi maximem intenzity a indukce je cca 5 A/m, tedy o tři řády vyšší, než by odpovídalo vířivým proudům.

Na obrázku 4.7 je také doplněná sporná část smyčky černou křivkou, která ukazuje, jak bude do Everettovy plochy doplněna oblouková část smyčky. Použití přímých měřených dat není možné. Důvodem je předpoklad pouze kladných hodnot váhové funkce. Záporné hodnoty váhové funkce jsou pro model nepřijatelné, protože by se chovaly jako smyčky s prohozenými H_u a H_d [27, 40].



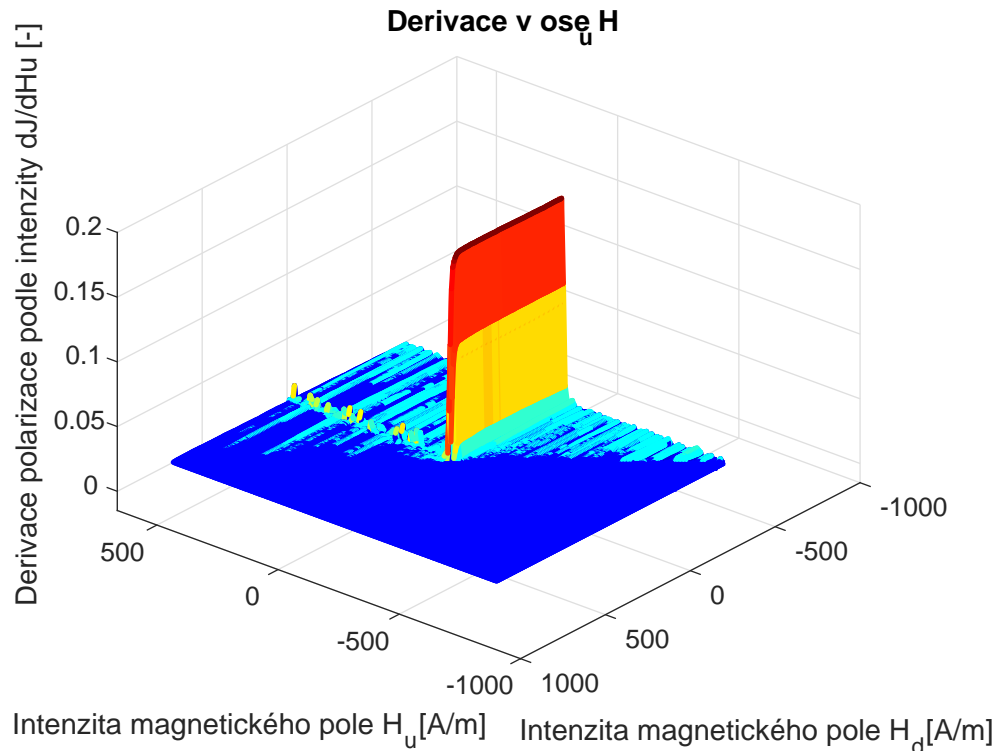
Obrázek 4.7: Oblouk ve vrcholu smyčky

Druhou hypotézou byla magnetická viskozita (*magnetic viscosity, magnetic aftereffect*)[26, 8]. Jde o časovou závislost magnetické polarizace. Nejzřetelněji se projevuje, pokud provedeme skokovou změnu intenzity nebo ukončíme déletrvající postupnou změnu intenzity. Lze očekávat, že polarizace materiálu bude za intenzitou zpožděná. Důvodem je rychlost posunu Blochových stěn krystalem.

4.3 Derivace Everettovy funkce

Váhovou funkci získáme dvojí derivací Everettovy funkce, tyto derivace jsou podle obou os. Nejjednodušším způsobem provedení derivací je pomocí diference měřených dat. Provedeme tedy diferenci v jedné i druhé ose². Zde pro ilustraci chování měřených dat uvedeme na obrázku 4.8.

²Tato diference bude v textu dále používána jako derivace



Obrázek 4.8: Derivace Everettovy plochy podle osy H_u

Jako první je prezentována derivace podle osy H_u , viz obrázek 4.8. Ve výsledné ploše vznikne vysoké žebro v ose H_d přesně podle očekávání z tvaru Everettovy funkce.

Patrný je i menší pruh, který je kolmý na toto žebro. Obsahuje izolované špičky vycházející na obě strany (kladně i záporně) od hodnoty, která by zde byla v případě proložení přímkou v ose H_d . Tento parazitní pruh je způsoben chybami v důsledku neuspořádání maximálních hodnot indukce u navazujících FORC měření.

Protože výsledky dosažené přímou derivací měřených dat nejsou podle očekávání, použijeme k dosažení lepších výsledků filtrovanou derivaci. Na zašuměná data lze aplikovat např. Savitzky-Golay filter [11].

4.4 Využití symetrie magnetizačních smyček

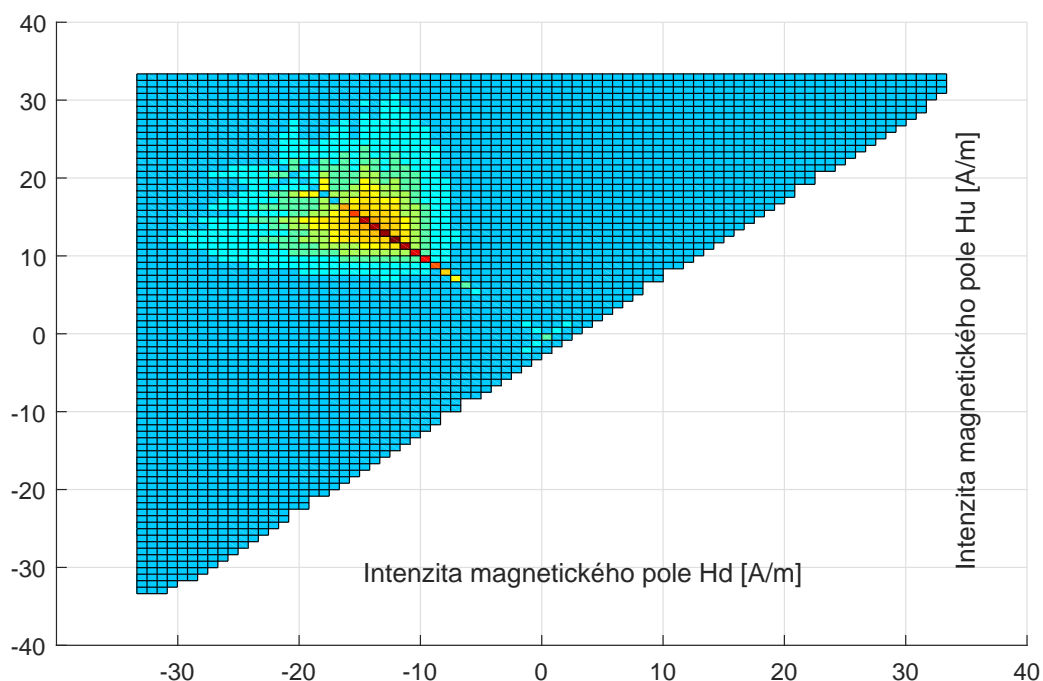
V Transaction of magnetics vyšel článek [12], ve kterém je popisována metoda určení váhové funkce z měření MORCs (Multiple Order Reversal Curve). Autoři zde popisují identifikační měření, ve kterém měří smyčky kolem demagnetizovaného stavu. Tyto symetrické hysterezní smyčky používají pro stanovení Everettovy plochy. Jejich použití je však jen pro polovinu Preisachova trojúhelníku. Do druhé poloviny použili na základě symetrie smyček hodnoty symetrické podle výšky Prei-

sachova trojúhelníku.

Základem myšlenky je vlastnost váhové funkce Preisachova modelu. Pokud víme, že magnetizační smyčky pro budící harmonický signál bez offsetu jsou symetrické, musí být symetrická i váhová funkce.

Myšlenku využití symetrie Everettovy plochy jsem chtěl použít i v našem případě. Aplikování symetrie na Everettovu plochu je prakticky aplikovatelný, ale není zde použit. Pro lepší vizualizaci efektu je použito aplikování symetrie až na výslednou váhovou funkci.

Symetrizovat plochu trojúhelníku podle osy vytyčené jeho výškou můžeme provést podle těchto tří možností:



Obrázek 4.9: Výřez váhové funkce kolem maxima — váhová funkce bez šumového žebra

- použití poloviny dat bez šumového žebra,
- použití poloviny dat se šumovým žebrem,
- použití průměru ze symetrických hysteronů.

Zde bude uveden pouze přístup jenž je založen na myšlence úplného odstranění šumového žebra. Dojde zde k přenesení (osově symetricky) dat z oblasti, kde $H_u < |H_d|$, do oblasti $H_u > |H_d|$. Výsledek je na obrázku 4.9.

5 Výpočetní náročnost modelu

Preisachův model implementovaný zdrojovým kódem 1, je maticový algoritmus s výpočetní náročností řádu On^2 . Pro určení doby výpočtu byla použita váhová funkce s maticí o 1800 řádcích a 1800 sloupcích. Data matice byla naplněna váhovou funkcí, kterou jsme získali v předchozí kapitole a jejíž okolí maxima je zobrazeno na obrázku 4.9.

Redukce počtu prvků matice je možná, ale jedná se o kompromis mezi rychlostí a přesností.

Redukce nadbytečných výpočtů pro změny buzení pod rozlišovací schopností modelu jsou založeny na myšlence, že je počítáno mnoho vstupů s malou nebo vůbec žádnou změnou výstupu.

5.1 Model s neekvidistantním dělením H

Třetí možností, jak snížit výpočetní náročnost modelu, je použití neekvidistantního rastru.

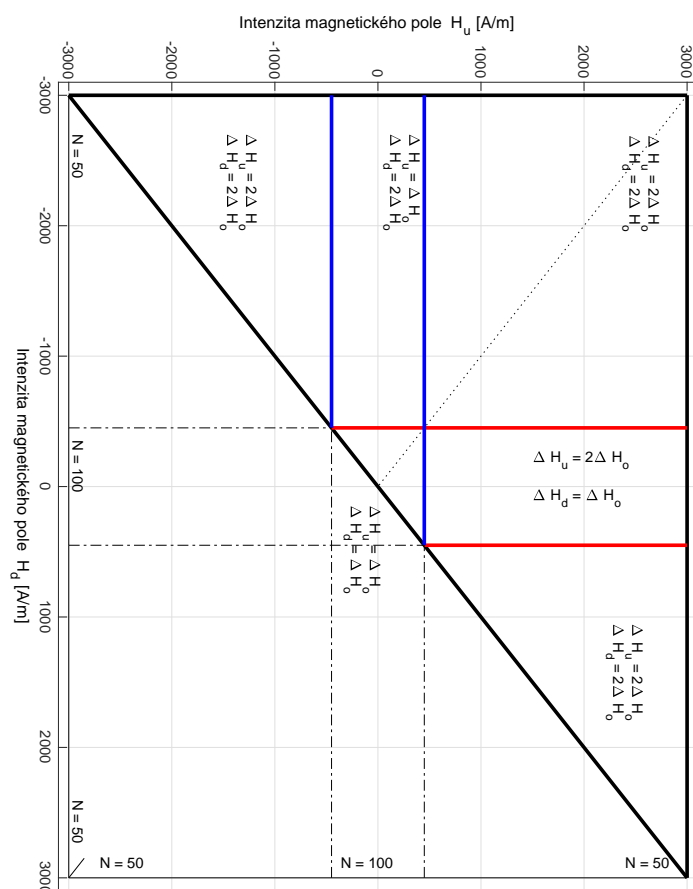
Pro demonstraci je použit model na matici 200×200 hysteronů. Osa definující překlápěcí úrovně je rozdělena na tři části. V první části od -3 kA/m do -450 A/m , je hrubé dělení. Symetricky také pro kladné úrovně. Ve druhé oblasti, kde je velká změna indukce pro malou změnu intenzity na majoritní hysterezní smyčce, máme od -450 A/m do 450 A/m celkem 100 úrovní.

Pro hysterezní smyčku materiálu použitého na jádro měřeného transformátoru by hranice mohla být až 70 A/m . Je možné volit i jiné počty elementů pro dané oblasti. Pro simulaci byla použita váhová funkce dle analytického předpisu pro Gaussovo 2D rozdělení podle rovnice

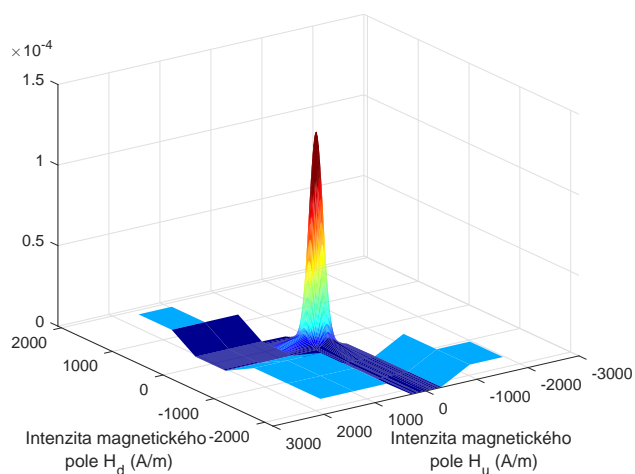
$$W(H_u, H_d) = A e^{-\left(\frac{(H-H_u)^2}{2\sigma_{H_u}^2} + \frac{(H-H_d)^2}{2\sigma_{H_d}^2}\right)}. \quad (5.1)$$

Parametry A a σ váhové funkce byly zvoleny tak, aby výsledná hysterezní smyčka měla nižší strmost, proto také byla zvolena hranice mezi jemným a hrubým dělením na 450 A/m .

Výsledek této váhové funkce je na obrázku 5.2. Zrychlení modelu je dáno úbytkem počtu prvků matic.



Obrázek 5.1: Princip dělení Preisachova trojúhelníku neekvidistantní mříží



Obrázek 5.2: Váhová funkce pro neekvidistantní model

6 Preisachův model bez váhové funkce

Základní úskalí aplikace každého počítačového modelu je identifikace parametrů a jeho verifikace podle reálného systému. Poměrně malá část prací popisuje způsoby měření a určení váhové funkce modelu. Pro ferity či piezomateriály je identifikace v literatuře popsána, např. [13]. Pro feromagnetické materiály na bázi železase v literatuře prakticky neobjevuje záznam o úspěšné aplikaci Preisachova modelu s užitím váhové funkce získané měřením.

6.1 Redukce reciprokých operací

Z povrchního pohledu na použití Preisachova modelu je vidět, že postup je následující: měření \rightarrow zpracování měření \rightarrow derivace Everettovy funkce \rightarrow rozdělení plochy Preisachova trojúhelníku na kladné a záporné oblasti podle budící veličiny \rightarrow integrace váhové funkce \rightarrow získání výsledné polarizace.

V postupu se opakuje inverzní operace dvojí derivace přes Everettovu plochu a následná integrace plochy trojúhelníku.

V kapitole 3 je popsána tvorba schodovitého rozhraní kladné a záporné oblasti modelu. Toto rozhraní v sobě uchovává paměť se všemi extrémy, které mají vliv na tvar hysterezní křivky. Využijeme tyto body (jejich posloupnosti) pro extrém H_u označené M_k a pro H_d označené m_k . Celkem je tedy nutné určit hodnoty ve všech zlomových bodech schodového rozhraní. Pro konkrétní demonstrační příklad jsou to body $[M_1, m_1]$, $[M_2, m_1]$ a $[M_2, m_2]$. Hodnoty souřadnic M_k a m_k jsou ukládány do vektorů o délkách N respektive n . Obecně platí, že n je menší nebo rovno N . Pokud poslední linie v Preisachově trojúhelníku je svisle (pokles vstupu), je délka obou vektorů stejná. V případě, kdy je poslední linie vodorovně (růst vstupu), je $N = n + 1$.

Pokud celý model zahrneme pod jednu rovnici, dostaneme

$$J(t) = \sum_{j=1}^{n-1} [EW(M_j, m_j) - EW(M_{j+1}, m_j)] + EW(M_n, m_n) + J_l, \quad (6.1)$$

kde členy sumy jsou polarizací v Everettově ploše. Poslední člen součtu J_l můžeme vyjádřit dvěma rovnicemi podle toho, zda poslední trend vstupní intenzity je rostoucí či klesající.

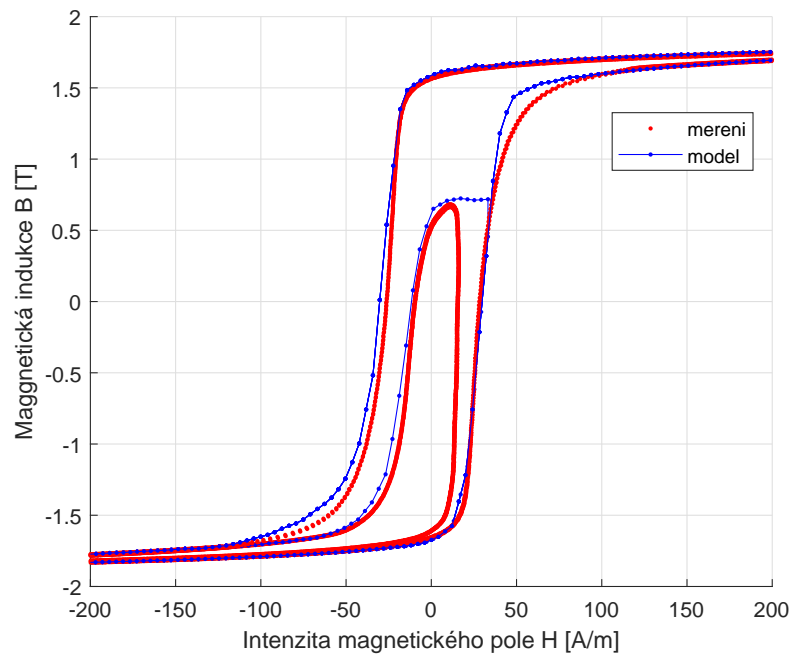
$$J_l = -EW(M_N, m_n) + EW(M_N, M_N), \quad (6.2)$$

pokud v posledním kroku došlo k růstu vstupní intenzity a $N > n$ nebo

$$J_l = 0, \quad (6.3)$$

pokud poslední linie v modelu je svisle, tzn. poslední byl pokles vstupní veličiny.

Na obrázku 6.1 je srovnání experimentu provedeném na transformátoru. Shoda na majoritní smyčce je velice dobrá. Vnitřní smyčka na obrázku byla zvolena zhruba z poloviny měřené sekvence FORC. Bylo u ní dosaženo indukce 0,7 T. Dobře patrné je odstranění oblé části algoritmem identifikace, viz obrázek 4.7. Značný je také odklon rostoucí větve od majoritní smyčky. Tyto jevy jsou způsobené magnetickou viskozitou.



Obrázek 6.1: Srovnání modelu a experimentu - model bez váhové funkce

7 Aplikace Preisachova modelu na simulaci ferorezonance

Rezonance obecně je jev, při kterém se periodicky přelévá energie mezi různými akumulacími prvky. V elektrotechnice je známým příkladem LC (RLC) obvod. Pokud využijeme čistě lineární prvky, může obvod rezonovat na jedné jediné vlastní frekvenci. Tato frekvence je určena rovností impedance akumulací prvků, poněkud jiná je situace použije-li se nelineární induktor podle vztahu

$$L = f(I). \quad (7.1)$$

7.1 Simulace ferorezonance

Pro simulaci ferorezonance jsem zvolil prostředí Matlab Simulink. Samotný model feromagnetického materiálu, tvořený Preisachovým modelem je kompletně tvořen právě ve skriptech Matlabu. Ve standardních blocích toolboxu Simscape jsou potřebné bloky rezistorů, kondenzátorů a zdrojů pro sestavení modelu rezonančního obvodu.

Pro stabilitu řešení bylo simulační schéma implementováno do Simulink Simscape Electrical a Simulink Simscape Magnetic modulů, které obsahují prvky k simulaci elektrických a magnetických prvků. Tento modul umožňuje zasahovat do veličin v magnetickém obvodu. Jeho schéma je na obrázku 7.1.

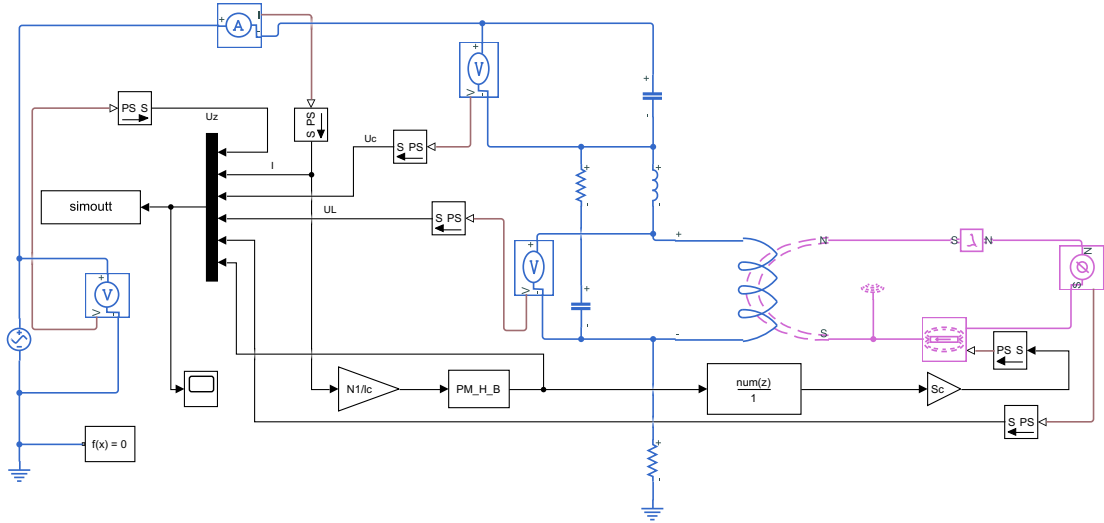
Výhodou použití tohoto přístupu je, že umožňuje snadné zavedení vířivých proudů pomocí bloku *eddy currents*¹. Jak bylo výše uvedeno, zavedení vířivých proudů by mělo mít stabilizační účinek, neboť vířivé proudy vyvolané rotujícím elektrickým polem podle

$$\text{rot} \vec{E} = \frac{d\vec{B}}{dt}, \quad (7.2)$$

působí na magnetický obvod intenzitou magnetického pole proti změně, která je vyvolává. Dle dokumentace programu Matlab je blok *eddy currents* popsán vztahem

$$\vec{H}_{eddy} = G \frac{d\vec{\phi}}{dt}, \quad (7.3)$$

¹Bohužel na rozdíl od běžného standardu ostatních bloků Simulinku není možné zobrazit si jeho zdrojový kód. To platí ve verzi Matlab 2019a.



Obrázek 7.1: Schema ferorezonančního obvodu v novém modulu

kde G je ekvivalentní vodivost. Do ekvivalentní vodivosti je nutné započítat i vliv laminace plechů, která se provádí právě za účelem potlačení vířivých proudů. Vodivost běžných ocelí se udává v jednotkách MSm^{-1} . V simulaci je ekvivalentní vodivost nastavena na $2/3 \text{ Sm}^{-1}$. Celková intenzita magnetického pole v jádře je dána vztahem

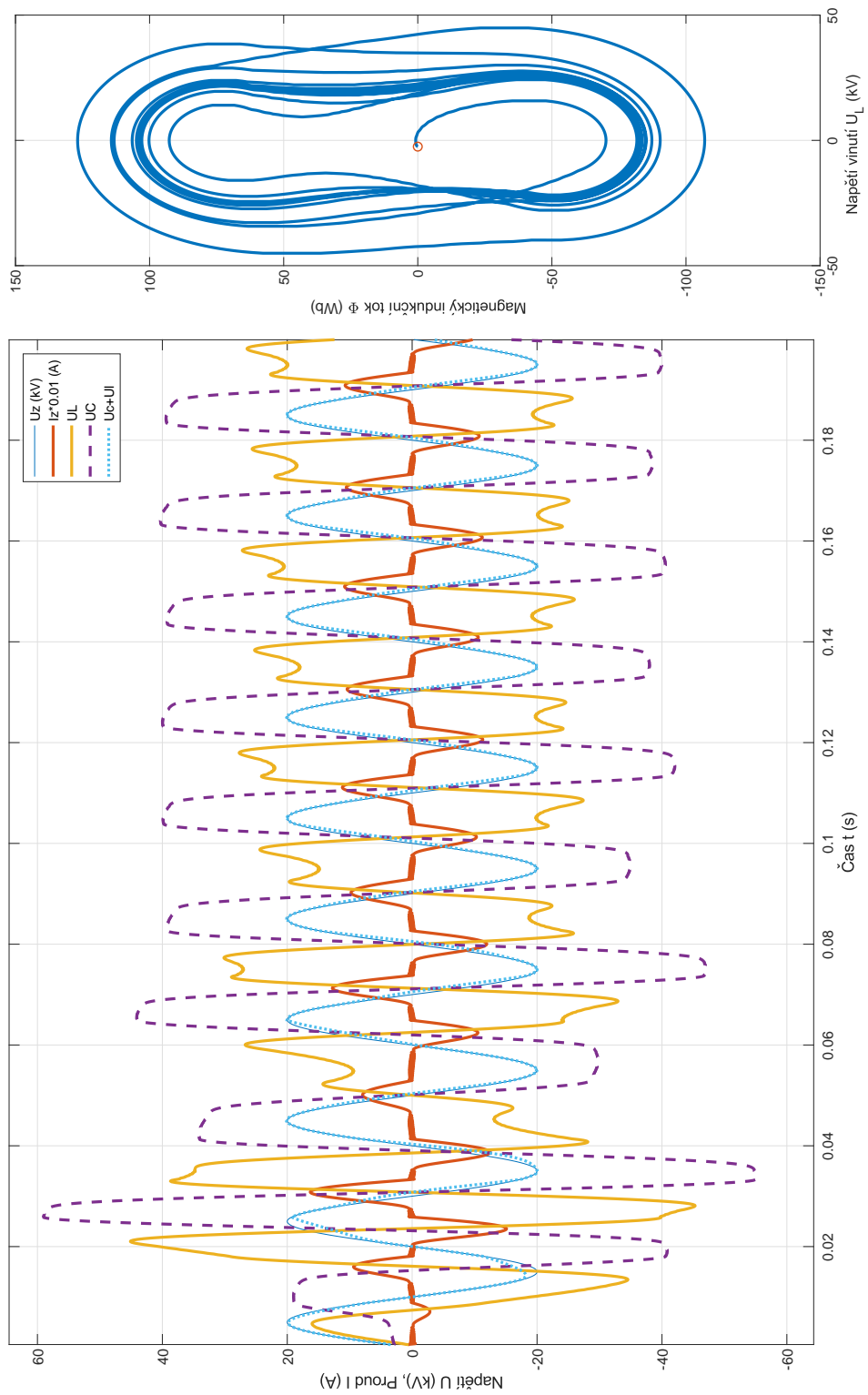
$$\vec{H}_{ef} = \vec{H}_{ext} - \vec{H}_{eddy} = \frac{N_1 \cdot I}{l_c} - G \frac{d\vec{\phi}}{dt}. \quad (7.4)$$

Zařazení modelu vířivých proudů do simulace, výrazně vylepší podmínky a řešení je stabilnější. K simulaci ferorezonance to stále nestačí. Jak je vidět na obrázku 7.1, je do série s vinutím transformátoru zapojena ještě indukčnost. Ta představuje rozptylový tok a měla sloužit pro omezování rychlých změn proudu vnucovaných přes Preisachův model do magnetického obvodu a tím i do vinutí transformátoru.

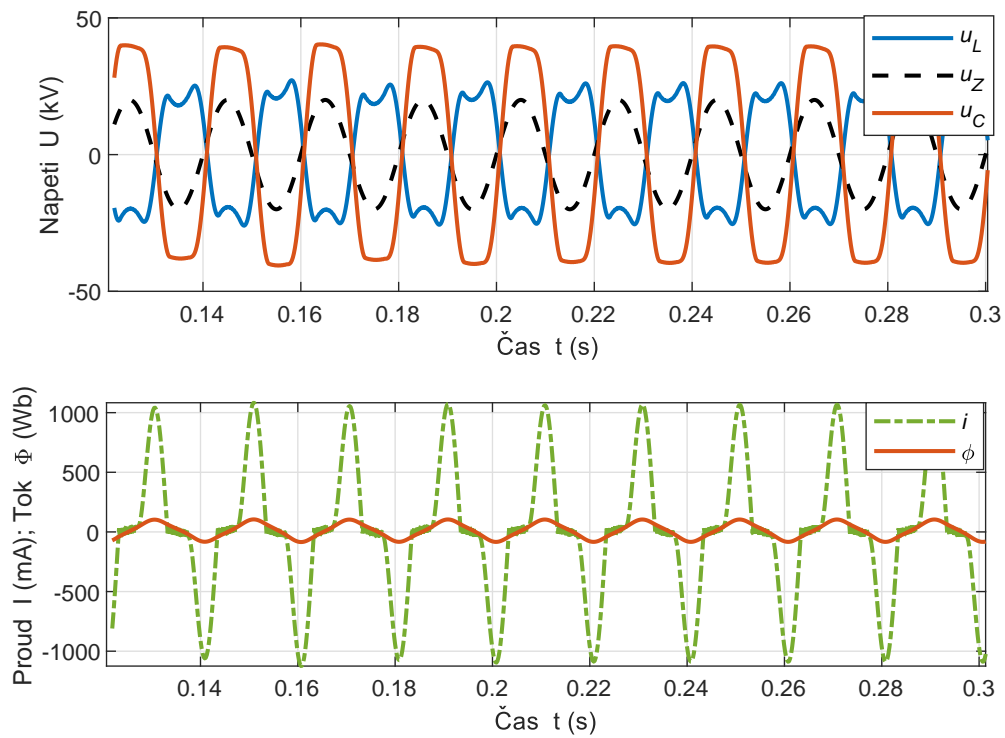
Pro zlepšení stability numerického řešení byl do obvodu přidán sériový RC členek paralelně k vinutí transformátoru. Původně měl být zařazen pouze kondenzátor symbolizující parazitní mezizávitovou kapacitu a kapacity na přívodním vedení k transformátoru. Samotný kondenzátor zde nelze použít vede na singularitu obvodových rovnic.

Z obrázku 7.2 je vidět, že obvod přechází do ustáleného ferorezonančního stavu již po cca 5 periodách. Obvod je v rezonanci, napětí cívky i kondenzátoru překračují napětí zdroje. Na rozdíl od lineárního rezonančního obvodu, zde dochází prudkým výměnám energie mezi kondenzátorem a cívkou. Tato výměna je provázána proudovým impulzem. Mimo tuto výměnu je proud obvodem minimální, proto je zachováno napětí kondenzátoru, které má téměř trapézový průběh.

Na obrázku 7.3 je uveden detail vybraných průběhů. V horní části je srovnání



Obrázek 7.2: Výstupy ze simulace ferorezonance vlevo časový graf vpravo závislost toku jádrem na napětí ve vinutí



Obrázek 7.3: Detail výstupních veličin — horní graf: napětí klíčových prvků, spodní graf: proud a magnetický indukční tok

napětí na primárním vinutí transformátoru, kondenzátoru a napětí zdroje. Ve spodním grafu na obrázku 7.3 je vidět, že v maximu a minimu u indukčního toku dochází vlivem přesycení magnetického obvodu k velké proudové špičce. Synchronně s těmito proudovými špičkami dochází k přelévání energií mezi cívkou a kondenzátorem, což odpovídá teoretickým předpokladům, jež nalezneme např. v [23].

8 Preisachův model stavu nabití Li-Ion článku

V současné době, kdy je velký tlak na nahrazování fosilních zdrojů v dopravě elektřinou, je dalším praktickým příkladem hystereze nabíjení a vybíjení akumulátorů.

Pro testování byly použity články LGHG2 od firmy LG. Jejich hlavní předností je vysoký vybíjecí proud, který může být kontinuálně až 20 A na článek. Maximální nabíjecí proud je stanoven výrobcem na 4 A při celkové kapacitě článku 3 Ah [14]. Tyto články byly zvoleny pro docílení krátké doby měření cyklů FORC.

8.1 Modelování elektro-chemických článků

První skupinou jsou modely založené na popisu elektro-chemických dějů článku. Modely jsou založeny na popisu fyzikálních a chemických dějů na rozhraní elektrod soustavami diferenciálních a obyčejných rovnic. Příkladem může být Single Particle model (SPM).

Druhou kategorií jsou modely s náhradním RC obvodem¹.

Třetí skupinou jsou modely založené na datech. V nich nejsou předem explicitně určeny vztahy mezi veličinami, namísto toho se využívají algoritmy učení z experimentálně získaných dat. Hlavními představiteli tohoto typu modelů jsou neuronové sítě, autoregresní modely a vektorové modely. Do této skupiny patří i užití Preisachova obecného modelu hystereze [18, 19, 20, 21].

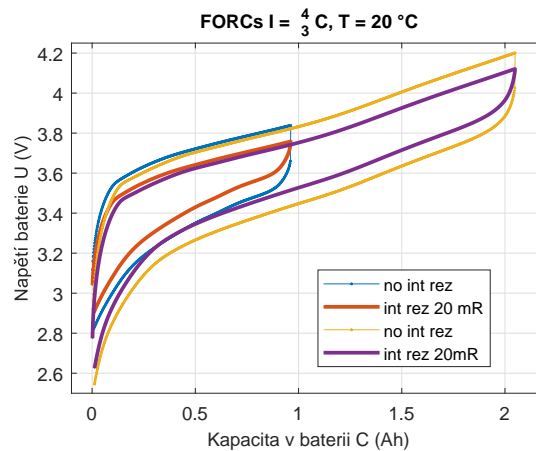
8.2 Hystereze nabíjecího/vybíjecího procesu

Při provozu akumulátorů můžeme projevy hystereze pozorovat na vztahu mezi množstvím energie uložené v akumulátoru a jeho výstupním napětím, viz obrázek 8.1. Matematický popis může být např. takto

$$U_s = f(C), \quad (8.1)$$

¹Mimo základních obvodových RLC prvků a ideálního zdroje napětí se používají i komplexnější předpisy vztahů mezi napětím a proudem, např. Warbugova impedance, Gerischerova impedance, prvek s konstantní fází nebo prvek s lineární difuzí.

kde U_s je napětí na svorkách baterie a C je množství náboje uložené v baterii. V tomto konkrétním případě, je měřena kapacita dodaná do baterie. Její určení je dáno integrací proudu.



Obrázek 8.1: Hysterezní smyčky Li-Ion článku s a bez korekce vnitřního odporu

Obrázek 8.1 ukazuje, že hystereze u lithium-iontových akumulátorů existuje a nedá se pouze o nelinearitu doplněnou o úbytek napětí na vnitřním odporu.

8.3 Měření FORC křivek Li-Ion článků

Výchozí stav je zvolen na plné nabití. Plného nabití je dosaženo nabíjením v režimu CC-CV². Nabíjení je ukončeno na napětí 4,2 V a při poklesu proudu pod 50 mA.

Všechna měření akumulátorů probíhala na bateriovém testeru Chroma 17011, konkrétně měření probíhalo na modulu 17216M-10-6.

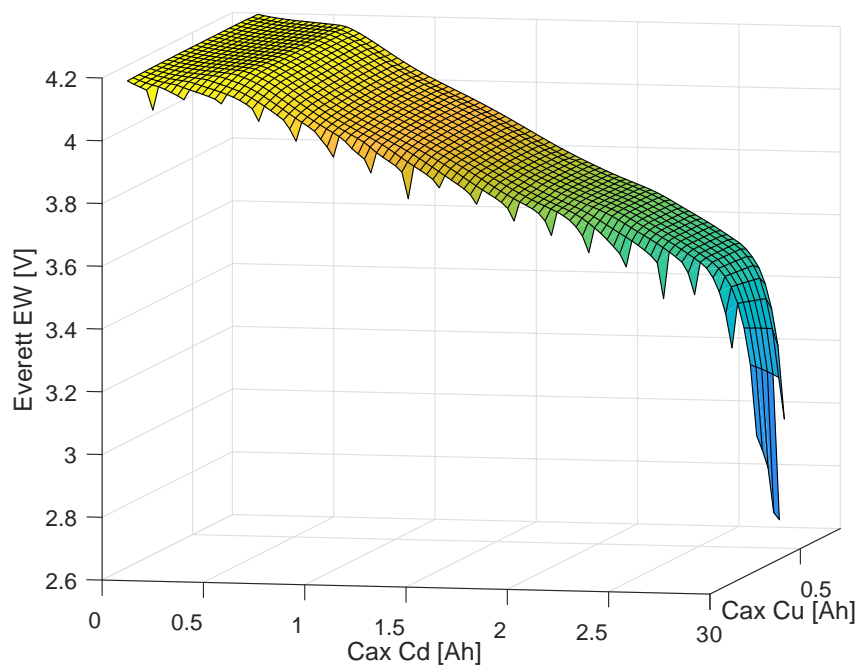
Napětí a proud je zaznamenáván samotným zařízením Chroma. Přesnost pro použitý rozsah je $\pm 0,02\%$ [15, 16].

Kompletní Everetova funkce pro teplotu akumulátoru 20 °C je uvedena na obrázku 8.2.

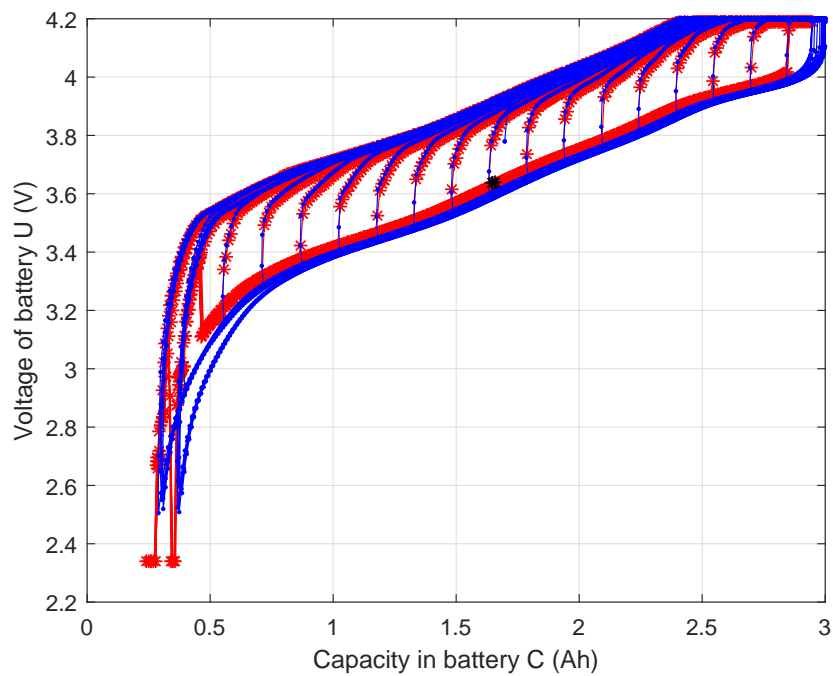
Při měření akumulátorů je použit relativně nízký počet smyček FORC, protože každým měřicím cyklem dochází k opotřebování akumulátoru. Měřený systém se v průběhu identifikace mění a vznikají tak nepřesnosti.

Jak je vidět z obrázků 8.3, shoda modelu s experimentem je dobrá. Odchytky převažují v oblasti, kde se model nenachází v oblasti blízko hranice Preisachova trojúhelníku. Nepřesnost je způsobena většinou nízkým počtem FORC oběhů. Počet oběhů lze zvýšit, ale dojde tím ke značnému nárůstu doby měření. Zároveň se mnohem více projeví opotřebování baterie a deformace charakteristiky z této příčiny.

²Nabíjení konstantním proudem do stanoveného napětí, poté nabíjení konstantním napětím s ukončením při poklesu proudu pod definovanou hranici.



Obrázek 8.2: Everettova plocha článku LGHG2 získaná měřením na testeru Chroma 17011



Obrázek 8.3: Srovnání modelu a měření pro článek LGHG2 – 1D interpolace z majoritní smyčky

Závěr

Jádro práce je zaměřeno na implementaci Preisachova modelu, jež byl zvolen jako nejvhodnější vzhledem k použití pro modelování hystereze na magneticky měkkých materiálech založených na feromagnetických vlastnostech železa. Materiál je dán tím, že se předpokládá nasazení modelu pro studium ferorezonance na přístrojových transformátorech napětí, zejména pak její predikci.

Na začátku třetí kapitoly je popisován mechanismus, jakým model vytváří hysterezi. Je zde představen obecný popis Preisachova modelu integrální rovnicí, ze které je diskretizací vytvořena numerická podoba modelu. Pro funkci modelu je klíčová matice M , která nese informace o stavu jednotlivých hysteronů. Pro výstup z modelu je pak ještě třeba ji pronásobit váhovou funkcí modelu. Protože váhová funkce je jediným parametrem modelu, který ovlivňuje tvar hysterezní smyčky a nese informaci o modelovaném materiálu, je důležité ji přesně identifikovat.

V práci je popisována metoda FORC, protože pokrývá celou plochu Preisachova trojúhelníku. V kapitole 4 je také rozbor problémů, které znemožňují přesné získání váhové funkce modelu pro materiály na bázi železa. Nejzávažnější je magnetická viskozita (afterefekt), která způsobuje změny magnetické indukce i po odeznění změny intenzity magnetického pole. Z toho důvodu pak není identifikovaná Everettova funkce hladká a monotónní, což velice komplikuje její derivaci a tím získání váhové funkce modelu. Podobné projevy má též nedostatečná hodnota výchozí saturace při měření FORC smyček. Limitem je proudová hustota budícího vinutí při kvazistatickém způsobu měření. Popis identifikace váhové funkce je jedním z nejvýznamnějších přínosů této práce. Především o problém magnetické viskozity a nedostatečné saturace, které jsme publikovali v [48].

Získání váhové funkce Preisachova modelu je založeno na parciální derivaci měřených dat podle obou os nárůstu a poklesu intenzity magnetického pole. Při výpočtu modelu dochází k integrování přes oblasti definované rozhraním v ploše Preisachova trojúhelníku odvozeného od historie buzení. Nabízí se tedy zbavit se reciprokových operací derivování a integrace. Tento postup byl převzat z [4] a je uveden v kapitole 6. Preisachův model místo integrálu váhové funkce počítá hodnoty odpovídající vrcholům schodových rozhraní mezi kladnou a zápornou oblastí hysteronů v Preisachově trojúhelníku. Hodnoty z těchto bodů v Everettově ploše, jsou podle jednoduché rovnice (6.1) poscítány do výsledné magnetizace, která je výstupem modelu. Celý proces se ukazuje jako mnohem efektivnější, zejména kvůli použití jednoduché bilineární interpolace pro určení hodnoty v daném bodě z hodnot okolních v měřeném rastru. Tento přístup dává velice kvalitní výsledky a je použitelný pro další studium vlastností magnetických materiálů a jeví s ním spo-

jených.

Stejná metoda výpočtu z Everetovy funkce je volena i v kapitole 8, která popisuje použití Preisachova modelu k modelování hystereze napětí článku v závislosti na stavu nabití během nabíjení a vybíjení Li-ion akumulátorů. Při měření FORC smyček u nabíjení/vybíjení akumulátorů je problém s velkou časovou náročností měření a především s degradací akumulátorů během vlastního měření. Z těchto důvodů byl zvolen nízký počet smyček FORC pro identifikaci (22). I přes nízkou hustotu rastru je vzhledem k plochosti Everetovy funkce a použití bilineární transformace výsledek dobrý.

V kapitole 7 je popsáno řešení komplikovaného nasazení Preisachova modelu k modelování ferorezonance. Základním problémem je fakt, že model je typu $B = f(H)$. Stabilnější by mohlo být řešení opačně, tedy $H = f(B)$ [24]. Tím by eliminoval problém, kdy je do modelu vnucován nespojitý výstup modelu hystereze, který je nutné derivovat. Výstup derivace působí přes obvodové veličiny na vstup modelu hystereze. To způsobuje problémy se stabilitou numerického řešení obvodu.

V případě použití experimentálních dat pro buzení je model navíc zasažen vsudypřítomným šumem. Protože je model hystereze ve zpětných vazbách, vykazuje nestabilitu. Reálný systém podle změřených průběhů také pracuje nedaleko od meze stability. Stabilizační tlumící efekt v reálném obvodu sehrávají parazitní vlastnosti: vířivé proudy a ztráty.

U modelování ferorezonance se podařilo s touto nestabilitou vypořádat především zavedením parazitní kapacity vinutí do modelu. I přes to, že indukované napětí ve vinutí cívky transformátoru má svůj průběh s prudkými změnami, jsou tyto destabilizující podmínky dobře potlačovány parazitní kapacitou vinutí.

Simulační model ferorezonance stabilizují též vířivé proudy. Bez jejich začlenění do modelu se nedařilo model stabilizovat a numerický řešič se rozkmital.

Přes uvedené potíže se podařilo vytvořit simulaci ferorezonančního jevu přístrojového transformátoru napětí napájeného přes sériovou kapacitu. Obvodové veličiny vykazují ve srovnání s reálným měřením menší odchylky, ale celkové chování obvodu je velmi dobré a korektně postihuje i změny parametrů obvodu, např. rezonančního kondenzátoru.

Literatura

- [1] WEN, Y. K., *Method for random vibration of hysteretic systems*. Journal of Engineering Mechanics. American Society of Civil Engineers. 1976.
- [2] FÜZI, J., *Analytical Approximation of Preisach Distribution Functions*. dostupné online z <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1198473>.
- [3] BERTOTTI, Giorgio a I. D. MAYERGOYZ, *The science of hysteresis*. 1st ed. Amsterdam, Boston: Academic. 2006. ISBN 978-0-12-480874-4.
- [4] MAYERGOYZ, I. D., *Mathematical models of hysteresis and their applications*. 1st ed. Amsterdam; Boston: Elsevier. Elsevier series in electromagnetism. 2003. ISBN 978-0-12-480873-7.
- [5] JILES, David, *Introduction to magnetism and magnetic materials*. 1st ed. London; New York: Chapman and Hall. 1991. ISBN 978-0-412-38640-4.
- [6] AL JANAIDEH, Mohammad, Jianqin MAO, Subhash RAKHEJA, Wenfang XIE a Chun-Yi SU, *Generalized Prandtl-Ishlinskii hysteresis model: Hysteresis modeling and its inverse for compensation in smart actuators*. In: 2008 47th IEEE Conf. on Decision and Control [online]. 2008. s. 5182–5187. ISSN 0191-2216. doi:10.1109/CDC.2008.4739202
- [7] FÜZI, J. a Gy. KÁDÁR, *Frequency dependence in the product Preisach model*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials [online]. 254–255, Proc. of the 15th Intern. Conf. on Soft Magnetic Materials (SMM15), 2003. s. 278–280. ISSN 0304-8853. doi:10.1016/S0304-8853(02)00775-8
- [8] HEAPS, C. W., *Measurements of Magnetic Viscosity in Iron*. Physical Review [online]. 54(4), 288–293. 1938. ISSN 0031-899X. doi:10.1103/PhysRev.54.288
- [9] DAUTOVIC, S., N. SAMARDZIC a A. JUHAS, *Takacs Model of Hysteresis in Mathematical Modeling of Memristors*. Radioengineering [online]. 2020. 29(1), 147–158. ISSN 1210-2512. doi:10.13164/re.2020.0147
- [10] TUMAŃSKI, Sławomir., *Handbook of magnetic measurements*. Boca Raton: Taylor and Francis, 2011. ISBN 978-1-4398-2951-6.
- [11] SAVITZKY, A., GOLAY, M.J.E., *Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedure*. Analytical Chemistry. 36 (8): 1627–39. doi:10.1021/ac60214a047

- [12] M. LU, P. J. LEONARD, P. MARKETOS, T. MEYDAN, A. J. MOSES, *Dependence of Dynamic Preisach Distribution Function on Magnetizing Frequencies*. TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 42, No. 4, APRIL 2006. ISSN: 0018-9464.
- [13] XIAO, S., LI, Y., *Modeling and High Dynamic Compensating the Rate-Dependent Hysteresis of Piezoelectric Actuators via a Novel Modified Inverse Preisach Model*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 21, No. 5, SEPTEMBER 2013
- [14] Datový list baterie LGHG2 dostupné online z <https://cdn.shopify.com/s/files/1/0674/3651/files/lg-hg2-spec-sheet.pdf>
- [15] Programable Charge/Discharge Tester 17216M-10-6. 1. vydání , červen 2017. CHROMA ATE INC, Taoyuan 33383 Taiwan
- [16] Battery Charge & Discharge Test System 17011 Software Users Manual, 1.1. vydání , březen 2015. CHROMA ATE INC, Taoyuan 33383 Taiwan.
- [17] GENTILI, G., *A history-differential model for ferromagnetic hysteresis*. Mathematical and Computer Modelling [online]. 2001, 34(12–13), 1459–1482. ISSN 08957177. DOI: doi:10.1016/S0895-7177(01)00140-6 Dostupné z: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.955.6615&rep=rep1&type=pdf>
- [18] BARONTI, F., N. FEMIA, R. SALETTI, C. VISONE a W. ZAMBONI, *Hysteresis Modeling in Li-Ion Batteries*. IEEE Transactions on Magnetics [online]. 2014, 50(11), 1–4. ISSN 0018-9464. doi:10.1109/TMAG.2014.2323426
- [19] CHAYRATSAMI, P. a G. L. PLETT, *Hysteresis Modeling of Lithium–Silicon Half Cells Using Extended Preisach Model*. In: 2018 15th Intern. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV) [online]. s. 1573–1578. doi:10.1109/ICARCV.2018.8581244
- [20] SUN, Wei-Yi, Hai-Tao MIN, Dong-Ni GUO a Yuan-Bin YU, *Modeling of Li-FePO₄ battery open circuit voltage hysteresis based on recursive discrete Preisach model*. Chinese Physics B [online]. 2017, 26(12), 127503. ISSN 1674-1056. doi:10.1088/1674-1056/26/12/127503
- [21] TJANDRA, R., S. THANAGASUNDRAM, K. J. TSENG a A. JOSSEN, *Improved lithium-ion battery model with hysteresis effect*. In: 2014 IEEE Transportation Electrification Conf. and Expo (ITEC) [online]. 2014, s. 1–8. doi:10.1109/ITEC.2014.6861809
- [22] NOVÁK, M., *Difficulties Caused by Magnetic After-effect during Identification of the Preisach Hysteresis Model Weighting Function*. Acta Physica Polonica A [online]. 2019, 136(5), 731–736. ISSN 1898-794X, 0587-4246. doi:10.12693/APhysPolA.136.731
- [23] FERRACCI, Philippe, *Cahier technique no. 190 - Ferroresonance* [online]. březen 1998. B.m.: Schneider Electric. [vid. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.se.com/ww/en/download/document/ECT190/>

- [24] ANDREEV, Mikhail, Alisher ASKAROV a Aleksey SUVOROV, *Design of the magnetic hysteresis mathematical model based on Preisach theory*. Electrical Engineering [online]. 2019, 101(1), 3–9. ISSN 1432-0487. Doi:10.1007/s00202-018-0751-3
- [25] PENG, D., W. SIMA, M. YANG, M. ZOU, Y. ZHOU a Y. LIU, *An Improved Centered Cycle Method for Identifying the Preisach Distribution Function*. IEEE Trans. on Magnetics [online]. 2018, 54(11), 1–5. ISSN 0018-9464. doi:10.1109/TMAG.2018.2828806
- [26] SERLETIS, C. a K.G. EFTHIMIADIS, *On the measurement of magnetic viscosity*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials [online]. 2012, 324(16), 2547–2552. ISSN 03048853. doi:10.1016/j.jmmm.2012.03.042
- [27] ZEINALI, R., D. C. J. KROP a E. A. LOMONOVA, *Comparison of Preisach and Congruency-Based Static Hysteresis Models Applied to Non-Oriented Steels*. IEEE Trans. on Magnetics [online]. 2020, 56(1), 1–4. ISSN 1941-0069. doi:10.1109/TMAG.2019.2950812
- [28] ANDREI, P. a A. STANCU, *Identification method analyses for the scalar generalized moving Preisach model using major hysteresis loops*. IEEE Trans. on Magnetics [online]. 2000, 36(4), 1982–1989. ISSN 0018-9464. doi:10.1109/20.875260
- [29] STANCU, A, *Identification procedures for Preisach-type models based on FORC diagrams*. JOURNAL OF OPTOELECTRONICS AND ADVANCED MATERIALS. 2006. 8(5), 1656–1659.
- [30] NOVÁK, M., *Effects of medium voltage potential transformer load on ferroresonance initiation*. In: Proc. of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering, EPE 2012. Brno: Brno University of Technology, s. 169–174. ISBN 978-80-214-4514-7.
- [31] NOVAK, M., *Elimination of three-phase transformer inrush current through core forced magnetization and simultaneous closing*. In: 2010 Intern. Conf. on Applied Electronics (AE)[online]. Pilsen: Univ. of West Bohemia, 2010, s. 1–4. ISBN 978-80-7043-865-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5599637>
- [32] NOVÁK, M., *Stray field measurement during power transformer energizing*. Journal of Electrical Engineering. 2013, 61(7 SUPPL), 133–136. ISSN 13353632.
- [33] MACPHEE, A.G., S. MCKEE a R.R.S. SIMPSON, *Ferroresonance in electrical systems*. COMPEL – The intern. jour. for computation and mathematics in electrical and electronic engineering [online]. 2002. 21(2), 265–273. ISSN 0332-1649. doi:10.1108/03321640210416359

Publikace autora

- [34] EICHLER, J: *Měření a modelování hysterezní smyčky feromagnetik za různých podmínek buzení*. Diplomová práce Technická univerzita v Liberci, 2015.

- [35] NOVÁK, M., EICHLER, J. a KOŠEK, M.: *Simple and Accurate Methods for Amplifier Characteristic Approximation*. Computational Problems of Electrical Engineering and Advanced Methods of the Theory of Electrical Engineering, CPEE -AMTEE 1. vyd. Žilina: University of Zilina, 2014. s. 40. ISBN 978-80-554-0910-8.
- [36] NOVÁK, M., KOŠEK, M. a EICHLER, J. *Effective Approximation of Transfer Characteristics of Low Frequency Amplifier*. 19th Intern. Conf. on Applied Electronic 1. vyd. Plzeň: University of West Bohemia, 2014. s. 229–232. ISBN 978-80-261-0276-2, ISSN 1803-7232.
- [37] EICHLER, J., KOŠEK, M. a NOVÁK, M. *Two Methods of Scalar Preisach Function Identification for Grain Oriented Steel*. 20th International Conference on Applied Electronics, AE 2015 1. vyd. Pilsen: IEEE Computer Society, 2015. s. 37–40. ISBN 978-80-261-0385-1, ISSN 1803-7232.
- [38] EICHLER, J., KOŠEK, M. a NOVÁK, M. *Simple Analysis and Use of Preisach Model for Ferromagnetic Materials*. Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM), 2015 IEEE Intern. Workshop of 1. vyd. Liberec: Technical University of Liberec, 2015. s. 70–75. ISBN 978-1-4799-6972-2.
- [39] EICHLER, J., NOVÁK, M. a KOŠEK, M. *Practical Model for Ferromagnetic Materials*. AMTEE '15 Advanced Methods of the Theory of Electrical Engineering 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. s. IV–9. ISBN 978-80-261-0527-5.
- [40] EICHLER, J., NOVÁK, M. a KOŠEK, M. *Implementation of Preisach model of Hysteresis in Matlab*. 23rd Annual Conf. Proc., Technical computing Prague 22015 1. vyd. Praha: Univeristy of Chemistry and Technology, 2015. s. 19. ISBN 978-80-7080-936-5, ISSN 2336-1662.
- [41] EICHLER, J., KOŠEK, M. a NOVÁK, M. *Application of Preisach Model to Low Loss Ferromagnetic Materials*. MEASUREMENT 2015, 10th International Conference on Measurement 1. vyd. Bratislava, SK: Institute of Measurement Science, Slovak Academy of Sciences, 2015. s. 217–220. ISBN 978-80-969672-9-2.
- [42] EICHLER, J., NOVÁK, M. a KOŠEK, M. *Implementation of the first order reversal curve method for identification of weight function in Preisach model for ferromagnetics*. ELEKTRO 2016 - 11th International Conference, Proceedings 1. vyd. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016. s. 602–607. ISBN 978-1-4673-8698-2.
- [43] EICHLER, J., NOVÁK, M. a KOŠEK, M. *Experimental-numerical method for identification of weighting function in Preisach model for ferromagnetic materials*. International Conference on Applied Electronics, 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2016. s. 75–80. ISBN 9788026106012, ISSN 1803-7232.
- [44] EICHLER, J., NOVÁK, M. a KOŠEK, M. *Computation Speed of Numeric Preisach Model*. 18th Intern. Conf. Computational Problems of Electrical Engineering CPEE, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017, vyd. 1, 2017.

- [45] EICHLER, J., NOVÁK, M. a KOŠEK, M. *Improvements of Preisach Model for Soft Magnetic Materials, Experiments on Filtering of Input Excitation Signal*. 11th international conference on measurement 1. vyd., 2017. s. 107–110. ISBN 978-80-972629-1-4.
- [46] EICHLER, J., NOVÁK, M. a KOŠEK, M. *Improvements of Preisach Model for Soft Magnetic Materials, Analysis of Input Exciting Signal*. 11th intern. conf. on measurement, 2017. s. 75–78. ISBN 978-80-972629-1-4.
- [47] EICHLER, J., NOVÁK, M. a KOŠEK, M. *Differences between Preisach Model and Experiment for Soft Ferromagnetic Materials, Effect of Instrument Accuracy*. IEEE Intern. Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their application to Mechatronics ECMSM 17, 1. vyd. Mondragon: Mondragon Unibertsitateko Zerbitzu Editoriala Loramendi kalea, 2017. s. 209–214. ISBN 978-84-697-3416-2.
- [48] NOVÁK, M., EICHLER, J., a KOŠEK, M. *Difficulty in identification of Preisach hysteresis model weighting function using first order reversal curves method in soft magnetic materials*. Applied Mathematics and Computation, 1. vyd., 2018, roč. 319, s. 469–485. ISSN 0096-3003, doi:10.1016/j.amc.2017.05.017
- [49] EICHLER, J., NOVAK, M. a KOSEK, M., *Experimental Determination of the Preisach Model for Grain Oriented Steel*. Acta Physica Polonica A [online]. 2019. 136(5), 713–719. ISSN 1898-794X, 0587-4246. doi:10.12693/APhysPolA.136.713
- [50] Kosek, M., Novak, M., Eichler, J. *Magnetic viscosity measurement on grain oriented steel* Proceedings of the 12th International Conference on Measurement, MEASUREMENT 2019 8779872, pp. 327-330, 2019.
- [51] Eichler, J., Novak, M. *Simple seamless multi-range current measurement for applications with a large dynamic range*, Proceedings of the 12th International Conference on Measurement, MEASUREMENT 2019 8779882, pp. 83-86 ,2019.
- [52] Novak, M., Eichler, J.. *Magnetic Barkhausen noise spectral emission of grain oriented steel under ultra low frequency magnetization*, Proceedings of the 12th International Conference on Measurement, MEASUREMENT 2019 8779882, pp. 83-86 ,2019.
- [53] Morava, J., Richter, A., Eichler, J. *Detection of electromagnetic interference on electrodes of cardiac implantable electronic devices*, Proceedings of the 12th International Conference on Measurement, MEASUREMENT 2019 8780035, pp. 182-185, 2019.
- [54] Eichler, J., Novak, M. *Modeling of lithium-ion battery charging and discharging using the preisach hysteresis model*, International Conference on Electrical Drives and Power Electronics 2019-September, 8883931, pp. 221-224, 2019.
- [55] Mach, O., Eichler, J., Krcmar, L. *Electronics and software structure of BMS with circuits of BQ769x0 series*, Proceedings of the 2020 19th International Conference on Mechatronics - Mechatronika, ME 2020 9286669, 2020.

- [56] KRČMÁŘ, L., RYDLO P., RICHTER A., EICHLER J. a JANDURA P., *State of Health and Aging Estimation Using Kalman Filter in Combination with ARX Model for Prediction of Lifetime Period of Li-Ion*, International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE). Dubrovnik: IEEE, 2021.
- [57] Schovanec, P., Jasikova, D., Kotek, M., Havlicek, K., Nechanicka, M., Eichler, J., Cech, J., Subrtova, P., *Sterilization of Biofilm in Foam Using a Single Cavitation Bubble*. MATEC Web Conf. 328 05003 (2020) DOI: 10.1051/matec-conf/202032805003
- [58] Schovanec, P., Jasikova, D., Kotek, M., Havlicek, K., Eichler, J. *of bacterial biofilm disintegration by ultrasonic atomization*, Experimental Fluid Mechanics 2021, Liberec, Czech Republic, November, 2021.