

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Magnetostricke a její dopady na elektrická zařízení

Anotace

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na řešení problematiky magnetostricke. Magnetostricke je zde vysvětlena z fyzikálního hlediska, jaké dopady magnetostricke můžeme očekávat na elektrickém zařízení a jakými způsoby lze zmenšit působení magnetostricke a tedy současně i zmenšit její dopady na elektrické zařízení.

Klíčová slova

Magnetostricke, magnetické pole, magnetická indukce, magnetická intenzita, magnetický tok, frekvence, transformátor, jádro transformátoru, hluk transformátoru, vibrace

Abstract

The bachelor thesis is focused on solving problems of magnetostriction. Magnetostriction is explained in terms of physics, what impact can we expect from magnetostriction on the electrical system and how we can reduce the effect of magnetostriction and thus simultaneously reduce its impact on electrical equipment.

Key words

Magnetostriction, magnetic field, magnetic induction, magnetic intensity, magnetic flux, frequency transformer, transformer core, transformer noise, vibration

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 31.5.2016

Michal Svoboda

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří se na této práci podíleli. Ať už se jedná o psychickou podporu či akademickou výpomocí. Předně bych samozřejmě chtěl poděkovat své rodině, která tu pro mě vždy byla. Dále bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, který měl se mnou trpělivost a snažil se mi vždy vypomoci. Závěrem bych chtěl poděkovat také svým přátelům, kteří mi také byli oporou.

Obsah

OBSAH.....	7
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	8
ÚVOD.....	9
1 MAGNETISMUS V MATERIÁLECH	10
1.1 PODSTATA MAGNETISMU	10
1.2 FEROMAGNETICKÉ MATERIÁLY	10
1.3 DIAMAGNETICKÉ MATERIÁLY.....	11
1.4 PARAMAGNETICKÉ MATERIÁLY	11
2 MAGNETOSTRIKCE	12
2.1 SPONTÁNNÍ MAGNETOSTRIKCE V IZOTROPNÍCH MATERIÁLECH	13
2.1.1 <i>Sycení magnetostrikce.....</i>	<i>15</i>
2.1.2 <i>Technické sycení a nucená magnetostrikce.....</i>	<i>15</i>
2.2 ANIZOTROPNÍ MATERIÁLY	16
2.3 PŘÍČNÁ MAGNETOSTRIKCE	16
2.4 MAGNETOSTRIKČNÍ MATERIÁLY.....	16
2.4.1 <i>Terfenol-D.....</i>	<i>17</i>
2.4.2 <i>Galfenol</i>	<i>17</i>
3 DOPADY MAGNETOSTRIKCE NA ELEKTRICKÁ ZAŘÍZENÍ.....	18
3.1 HLUK V TRANSFORMÁTORECH	18
3.2 ANIZOTROPNÍ MAGNETOSTRIKCE A JEJÍ VLIV NA ASYNCHRONNÍ MOTOR	26
4 MINIMALIZACE NEGATIVNÍCH DOPADŮ MAGNETOSTRIKCE.....	29
4.1 TLOUŠŤKA MATERIÁLU.....	30
4.2 ZÁVISLOST NA TLAKOVÉ CITLIVOSTI	31
4.3 TEPLOTNÍ ZPRACOVÁNÍ MATERIÁLU	32
4.4 SLITINA S NÍZKOU MAGNETOSTRIKČÍ.....	34
ZÁVĚR.....	34
POUŽITÁ LITERATURA.....	36

Seznam použitých zkratk a symbolů

μ_r	Relativní permeabilita
μ_0	Permeabilita vakua
λ	Koeficient magnetostrikce
λ_s	Nasyčená magnetostrikce
ppm	Parts per million
A	Ampér
B	Magnetická indukce
H	Magnetická intenzita
M	Magnetizace
dB	Decibel
Hz	Hertz
ω	Úhlová frekvence
CRGO	Orientované elektrotechnické oceli válcované za studena
VA	Voltampéry
Pa	Pascal

Úvod

Magnetostricke je nežádáný jev vyskytující se v materiálech vystavených magnetizaci, proto se snažíme tomuto jevu co nejvíce zamezit. Tato práce se zabývá právě vysvětlením tohoto jevu z fyzikálního hlediska a jeho dopadů na elektrická zařízení. Nejprve je zde však uvedený lehké nastínění magnetismu a materiálech s ním spojeny pro lepší orientaci čtenáře v textu. Dále se tato práce zabývá dopady magnetostricke na elektrická zařízení (jak magnetostricke ovlivňuje chod zařízení, co způsobuje, apod.). V poslední řadě je zde seznámení s určitými druhy návrhu pro minimalizaci dopadů magnetostricke na elektrické zařízení, které je probráno ve čtyřech bodech, kde každý jednotlivý bod nastiňuje jeden z možných způsobů minimalizace magnetostricke a tudíž i jejích dopadů.

1 Magnetismus v materiálech

Každý materiál se v určitých situacích chová jinak. V našem případě mluvíme o materiálech, které vykazují magnetické vlastnosti, ať už se jedná o velmi příznivé projevy, kdy materiál přijímá magnetismus, či se jedná o materiály, které se nijak neprojeví. Tyto materiály proto lze rozdělit do třech základních skupin – feromagnetické, diamagnetické a paramagnetické s ohledem na jejich chování pro magnetické pole[1]. Dělení těchto materiálů je především díky relativní permeabilitě μ_r , kterou materiál má[2].

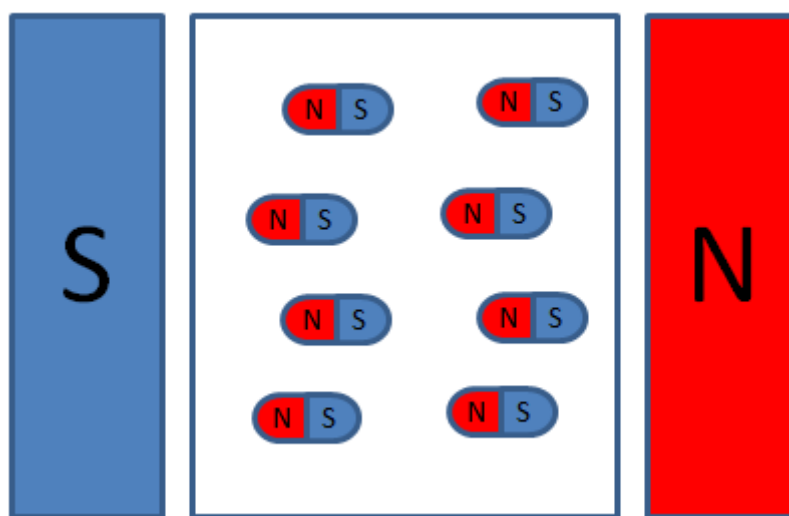
1.1 Podstata magnetismu

Nejprve by bylo vhodné se seznámit s magnetismem a obecně s jeho podmínkou pro vznik v látkách, abychom pak dále snáze porozuměli již zmíněnému rozdělení skupin látek pro jejich odlišné chování v magnetickém poli. Obecně platí, že pro vznik magnetických vlastností v materiálu je nutné, aby atomy v látce měly magnetický moment[1,3]. Tento moment je tvořen součtem orbitálního magnetického momentu elektronu a spinového magnetického momentu elektronu (spinový magnetický moment jádra dosahuje pouze nepatrného vlivu, a proto jeho vliv na magnetizaci lze zanedbat)[3]. Samozřejmě zde existují síly, které působí proti magnetickému momentu. Nejvýznamnější silou působící proti magnetizaci, jinými slovy proti dílčímu součtu magnetických momentů, je magnetické pole elektrického proudu vyvolané vnějším magnetickým polem[3].

1.2 Feromagnetické materiály

Tyto látky mají již v základu nenulový magnetický moment i bez přítomnosti vnějšího magnetického pole[3]. Můžeme tedy tvrdit, že feromagnetické látky mají od přírody určité magnetické vlastnosti. Nenulový moment těchto látek je dán nevykompenzovanými spinovými magnetickými momenty na některých z vnitřních ne zcela obsazených drah atomového obalu[3]. Francouzský fyzik Petr Weiss v roce 1907 přišel s teorií, kde tvrdí, že uvnitř feromagnetických látek existuje molekulární pole, což můžeme chápat jako síly kvantové povahy či jako interakce působící mezi jednotlivými atomy, které srovnává magnetické momenty atomů do jednoho směru, čímž dostáváme sycení magnetizace v materiálu[1,3]. Toto uspořádání magnetického momentu atomů dochází v tzv. doménách, což jsou malé části feromagnetika, do kterého se tato látka rozpadá při teplotách nižších, než je hodnota Curieovy teploty[3]. Po vložení do magnetického pole se zvětšuje doména, která je

zmagnetována ve stejném směru a ostatní domény se pak navíc natáčejí tak, aby jejich magnetické pole souhlasilo s vnějším magnetickým polem. Doménová struktura nakonec zmizí - látka je magneticky nasycena. Když pak látku z magnetického pole vyndáme, látka zůstává částečně zmagnetovaná. [2] Feromagnetismus se vyskytuje pouze u látek pevného skupenství, díky jejich velké meziatomové vzdálenosti[3]. Feromagnetické látky mají svoji relativní permeabilitu μ_r přibližně okolo hodnoty 10^5 [4]. Takto velká hodnota relativní permeability u materiálu znamená, že vlastnosti materiálu dovolují značně zesílit magnetické pole, do kterého je materiál vložen[2].



Obr. 1: Uspořádání ve směru vnějšího magnetického pole u feromagnetických látek[2]

1.3 Diamagnetické materiály

Pro diamagnetické látky platí, že jejich součet všech dílčích magnetických momentů je záporný[3]. To tedy znamená, že výsledný moment je nulový. Je to díky dovolenému stavu na orbitách, které jsou obsazeny dvojicemi elektronů s opačnými spiny[3]. Ve výsledku diamagnetické látky získávají magnetický moment teprve až po jejich vložení do magnetického pole[3]. Jejich relativní permitivita je menší než 1 ($\mu_r < 1$)[2]. Z toho vyplývá, že i když diamagnetické materiály mají své určité magnetické vlastnosti, které mají až teprve, když je vložíme do magnetického pole, tyto jejich vlastnosti však působí proti magnetickému poli, které na materiál působí. Můžeme tedy brát, že tyto materiály mírně oslabují magnetické pole[2].

1.4 Paramagnetické materiály

Naopak pokud při součtu všech dílčích magnetických momentů vychází kladné číslo, jedná se o paramagnetika[3]. Paramagnetika nemají orbity plně obsazeny, což znamená, že každý atom má výsledný magnetický moment (není možná úplná kompenzace orbitálních a spinových momentů)[3]. Tyto výsledné magnetické momenty jsou orientovány všemi směry a

teprve po působení vnějšího magnetického pole se začnou natáčet do jeho směru[3]. Toto natočení lze pak považovat jako zmagnetování materiálu, ovšem slabé. Působí zde vliv tepelného pohybu proti usměrňujícímu vlivu magnetického pole[3]. Paramagnetika mají relativní permitivitu, která je větší než 1 ($\mu_r > 1$)[2]. Z tohoto důvodu, a také díky slabému zmagnetování materiálu, tyto materiály sice zesilují magnetické pole, ale pouze slabě.

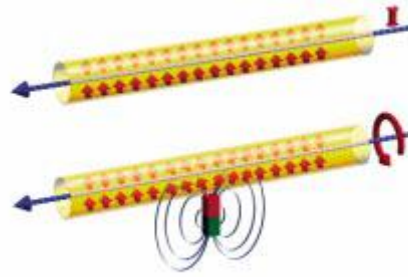
2 Magnetostrikce

Deformace, čímž rozumíme změnu rozměru a tvaru tělesa, magnetizovaného materiálu o magnetickém původu, obecně označovány pojmem magnetostrikce, vzniká v důsledku interakce elektronových spinů atomů feromagnetika s vnějším magnetickým polem, což znamená, že se rovnovážně mění vzdálenost atomů v mřížce. V polykrystalických látkách je magnetostrikce izotropní, zatímco v monokrystalech závisí na krystalografickém směru.[3]

Feromagnetické materiály umístěné v magnetickém poli podstupují pouze mikroskopické deformaci na molekulární struktury, která způsobuje změnu jejich rozměrů. Tento fyzikální jev je právě způsoben díky existenci vysokého počtu drobných elementárních magnetů (magnetických momentů), které tvoří feromagnetický materiál. Proto se magnetostrikce nejvíce projevuje u tohoto typu materiálů, jelikož mají velmi výrazné magnetické vlastnosti.[5]

Tento jev se tedy dostavuje při magnetování vzorku, případně změnou jeho magnetizace. Podle této úvahy lze magnetostriktu a tedy deformaci dělit podle směru působení jako je délka, šířky či objem. Projev magnetostrikce lze brát jak kladný vliv na tvar tělesa pro prodlužování, tak i záporný vliv pro zkracování. Naopak objemová magnetostrikce je výhradně pouze pro velmi vysoké intenzity magnetického pole.[1,3]

Je také zaznamenán tzv. Wiedemannův jev, který je považován za určitý druh magnetostrikce, kde feromagnetickým materiálem prochází elektrický proud a materiál se v důsledku průtoku proudu kroutí.[6] Tento feromagnetický materiál musí však být umístěn v podélném magnetickém poli, aby mohlo dojít ke krutu a tedy k Wiedemannovu jevu.[7] Právě díky protékajícímu proudu v materiálu se vytváří magnetické pole okolo materiálu. Pokud je tento materiál spolu se svým vlastním magnetickým polem vložen do oblasti působení vnějšího magnetického pole s jiným zdrojem, dojde k mechanickému narušení feromagnetického materiálu v podobě krutu.[5]



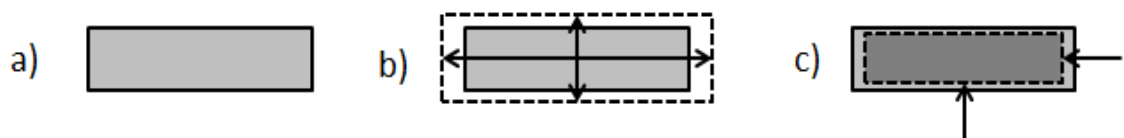
Obr. 2: Vzhledem k interakci obou magnetických polí dochází k Wiedemannovu efektu, převzato z [5]

Magnetostrikční materiály mohou také převést mechanickou práci na elektrickou energii. Za působení mechanického zatížení se při otáčení magnetických domén způsobí změnu v objemu magnetizace, což vede k indukování proudu v cívce. Toto chování je běžně nazývané jako Villariho jev.[8] Jedná se o magnetoelastický jev, při kterém materiál změní své vlastnosti a to vlivem deformace, které byla tyč vystavena v podélném směru.[9]

Jak již bylo řečeno, magnetostrikce ovlivňuje buď prodloužení či zkrácení tělesa. Podle těchto okolností lze zavést koeficient magnetostrikce λ , někdy značený též jako koeficient prodloužení ϵ [10], který je právě daný vztahem (1).[6]

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \quad (1)$$

Kde v tomto vztahu l značí původní délku materiálu před projevem magnetostrikce a Δl značí změnu této délky při působení magnetostrikce. Hodnota tohoto koeficientu je u většiny feromagnetických materiálů přibližně okolo 10^{-6} až 10^{-5} . Tato hodnota se zvyšuje s velikostí magnetizace, druhu materiálu a samozřejmě zpracování tohoto materiálu[10]. Koeficient magnetostrikce je mimo změny délky vzorku také závislý na intenzitě magnetického pole, kde při určité hodnotě dochází k syčení magnetostrikce, která se u tohoto koeficientu značí jako λ_s . Tato hodnota je pak stálá a nemění se.[6]



Obr. 3: Projevy magnetostrikce na materiálu: a) materiál bez vnějšího působení magnetického pole; b) materiál s kladnou magnetostrikcí; c) materiál se zápornou magnetostrikcí[11]

2.1 Spontánní magnetostrikce v izotropních materiálech

Magnetostrikci nelze přesně definovat jedním druhem působení síly tedy deformace. Na jedné straně zde máme magnetické síly, které působí na kus materiálu zmagnetizovaným zdrojem jiných magnetických sil (proudy či zmagnetizovaný materiál). Tyto zdroje pak

mohou velice snadno působit na kus materiálu na velice dlouhou vzdálenost. Na druhé straně, během magnetického procesu se meziatomové interakce a vnitřní struktura mění, což přispívá k deformaci materiálu a tyto změny se pak lokálně projevují. V užším slova smyslu se termín magnetostrikce vztahuje pouze na chování materiálu vystaveném deformační síle po delší dobu a může proto být považován za jednu z charakteristik materiálu. Oba tyto jevy se vždy vyskytují společně, což je možno pozorovat z vlivu magnetostrikce na materiálu. Magnetostrikce je následně také ovlivňována tvarem vzorku, na který působí magnetické pole.[12]

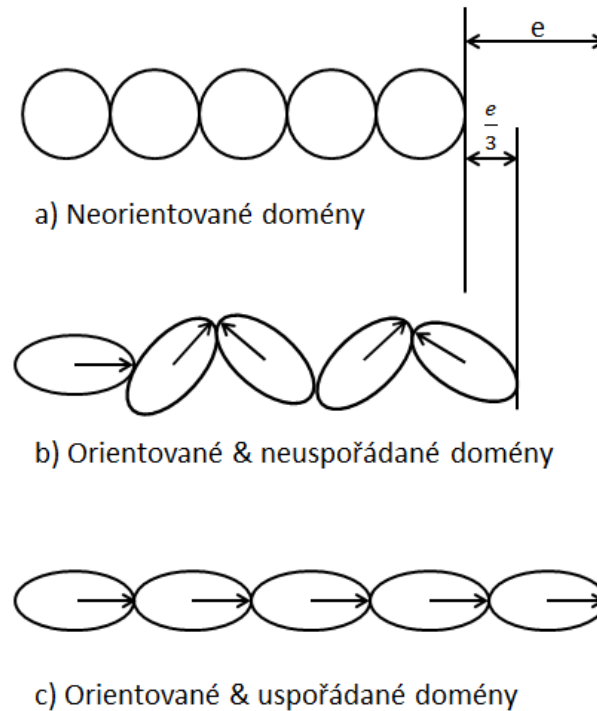
Z fenologického hlediska se tedy opravdu vyskytují hlavní dva typy magnetostrikce: spontánní magnetostrikce vyplývající z uspořádání magnetických momentů do domény při Curieově teplotě (či při jiné požadované teplotě) a magnetostrikce indukovaná vnějším působením magnetického pole. Indukovaná magnetostrikce je hlavně v případech, kdy je potřeba přeorientovat domény, které mají spontánní magnetostrikci, ve směru působení pole. Směr spontánní magnetostrikce M_S se liší od domény k doméně v celém materiálu, aby bylo zajištěno, že převážná část magnetizace je nulová. Pojďme tedy zvážit změny nenapnuté pevné látky pod bodem Curieovy teploty, kde domény materiálu nejsou orientované, tedy nepůsobí na materiál žádné vnější pole, jak můžeme vidět v na obrázku 4(a). Teprve tehdy, když se teplota materiálu přiblíží k hodnotě Curieovy teploty, spontánní magnetostrikce se začne vyskytovat v doménách materiálu a spolu s ní se začne projevovat spontánní natažení ve směru e , jak je zobrazeno na obrázku 4(b). Pro současné izotropní případy je amplituda těchto spontánních magnetostrikcí závislá na krystalografickém směru. V každé izotropní doméně se natažení mění pod úhlem θ od směru spontánní magnetizace podle vztahu (2).[13]

$$e(\theta) = e \cdot \cos^2 \theta \quad (2)$$

Průměrná deformace v celém vzorku o pevné struktuře nemůže vzhledem k nástupu spontánní magnetostrikce být dosažena integrací za předpokladu, že domény jsou náhodně orientované tak, že jakýkoli konkrétní směr je stejný se směrem domén (3).[13]

$$\lambda_0 = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} e \cos^2 \theta \sin \theta d\theta = e/3 \quad (3)$$

Toto je tedy spontánní magnetostrikce způsobena konkrétně nařizenými magnetickými momenty ve feromagnetiku. Je třeba si povšimnout, že zprvu jsme předpokládali, že izotropní materiálové domény jsou uspořádány se stejnou pravděpodobností v každém směru, a proto je směr natažení stejný ve všech směrech. Proto v tomto případě, i když vzorek prochází změnami v rozměrech, je jeho tvar stejný.[13]



Obr. 4: Schématický diagram ilustrující magnetostrikci v: a) neorientovaném (paramagnetickém) režimu; b) demagnetizovaném feromagnetickém režimu; c) feromagnetickém režimu pro magnetizovanou a saturevanou látku [13]

2.1.1 Sycení magnetostrikce

Dalším bodem úvahy je sycení magnetostrikce, což je dílčí změna délky mezi demagnetizovaným feromagnetickým vzorkem a stejným feromagnetickým vzorkem již ale vsazeným v okolí působení magnetického pole, dostatečně silného k sycení magnetizace ve směru daného pole. V tomto případě dojde ke změně tvaru vzorku, jelikož jsme aplikovali pole vytvářející preferovaný směr. Za použití již uvedeného jednoduchého modelu zobrazeného v obrázku číslo 4, jsme způsobili přechod z orientovaného stavu saturace aplikací magnetického pole. V nasyceném stavu jsou samozřejmě všechny magnetické momenty v doménách materiálu vyrovnány rovnoběžně s polem a tím pádem je natažení rovnoběžné, jak můžeme vidět na obrázku 4(c). Z toho důvodu lze následně dopočítat hodnotu sycení magnetostrikce, značené jako λ_s , z následující rovnice (4).[13]

$$\lambda_s = e - \lambda_0 = \frac{2}{3}e \quad (4)$$

2.1.2 Technické sycení a vynucená magnetostrikce

K technickému sycení magnetizace dochází, když všechny magnetické domény v materiálu byly vyrovnány ve stejném směru, aby tvořily vzorek o jedné doméně. Nicméně, i

přestože se magnetické pole dále zvětšuje, tak zde nastává stále velmi pomalý nárůst sycení magnetizace M . Tento proces se nazývá vynucená magnetizace.[13]

Podobné chování můžeme pozorovat i v magnetostrikci. Technické sycení magnetostrikce je dosaženo, když byl vzorek převeden do báze na jedné doméně. Nicméně zde také stejným způsobem dochází k velmi malému nárůstu nucené magnetostrikce, i když se magnetické pole zvětšuje. Nucená magnetostrikce dosahuje velmi malé hodnoty, proto má malý efekt na materiál. Vyskytuje se pouze v oblasti řádově 800 kA/m.[13]

Tento fenomén je způsoben zvýšením uspořádání jednotlivých atomových magnetických momentů v rámci jedné domény. Statistické uspořádání magnetických momentů v doméně je velmi závislé na teplotě a v důsledku toho je i závislá nucená magnetostrikce.[13]

2.2 Anizotropní materiály

I když monokrystalický nikl má poměrně podobné vlastnosti jako izotropní materiály co se týče magnetostrikce, ve skutečnosti všechny pevné látky jsou do určité míry anizotropní, a proto je potřeba magnetické sycení, které má být definováno ve vztahu k ose, podél které krystaly při magnetizaci leží. Rozsáhlý přehled magnetostrikce v anizotropních látkách byl vydán autorem E. W. Leem.[13]

Magnetostrikce či spontánní natažení je definovaná podél každé z hlavních os krystalu. U kubických materiálů existují dvě nezávislé magnetostrikční konstanty λ_{100} a λ_{111} . Saturace magnetostrikce v jedné doméně, monokrystalové kubické hmoty jsou pak dány zobecněnou verzí rovnice pro izotropní materiály.[13]

2.3 Příčná magnetostrikce

Mezi stavem demagnetizace a stavem nasycení objem feromagnetik zůstává poměrně konstantní (máme v tomto směru pro většinu materiálů velmi malou hodnotu magnetostrikce co se objemu materiálu týče). Proto je příčná magnetostrikce jedné poloviny podélné magnetostrikce s opačným znaménkem. Tento poměr můžeme vidět vyjádřený ve vztahu (5).[13]

$$\lambda_t = -\frac{\lambda}{2} \quad (5)$$

2.4 Magnetostrikční materiály

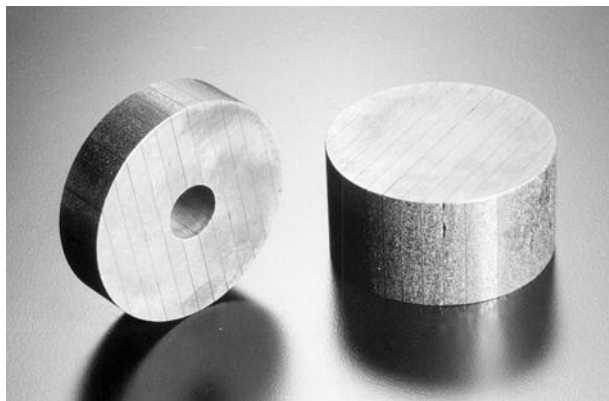
Jak již bylo řečeno, magnetostrikce se projevuje hlavně ve feromagnetických materiálech, jako jsou například železo, kobalt, nikl a jejich slitiny. Avšak mezi přední materiály

využívané pro tento jev jsou tzv. Terfenol-D and Galfenol, které mají právě neoptimálnější vlastnosti pro vytvoření tohoto jevu.[8]

2.4.1 Terfenol-D

Terfenol-D je slitina složená z terbia, dysprosia a železa. Terfenol-D má největší magnetostrikci pro pokojové teploty ze všech známých materiálů. Terfenol-D je polovodičový materiál, schopný změnit energii z jedné formy na jinou. V případě změny formy z elektrické do mechanické generuje Terfenol-D téměř o 100 krát větší magnetostrikci než všechny tradiční magnetostrikční materiály a 2-5 krát větší změnu v oblasti piezokeramik. Tento materiál má vysokou Curieovu teplotu ($380\text{ }^{\circ}\text{C}$), což umožňuje dosáhnout většího magnetostrikčního výkonu než 1000 ppm při teplotách v rozmezí od pokojové teploty do teploty $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Úpravy slitinových komponentů mohou ještě navíc rozšířit tento rozsah až do kryogenních teplot.[14]

Název Terfenol pochází z kovových prvků, ze kterých je materiál sloučen a spolu se zkratkou společnosti, která tento materiál vytvořila. Terbium (TER), železo (Fe) a zkratka organizace Naval Ordnance Laboratory (NOL) nám dohromady dá právě název Terfenol. Dysprosium (D) se později přidá jako přídavek legování ke snížení požadavků ze strany magnetického pole potřebné k vyvolání reakce jakou je magnetostrikce.[14]

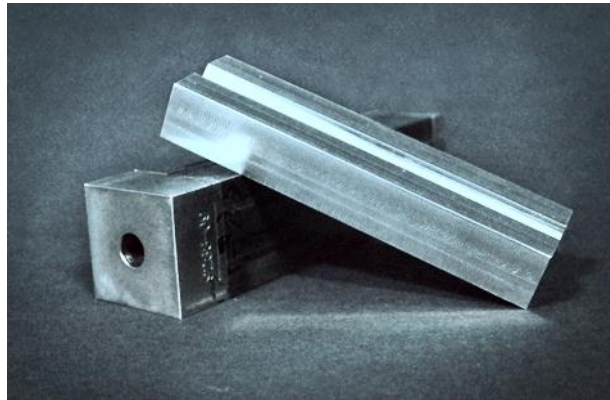


Obr. 5: Dva laminátové kusy Terfenol-D, kde jeden obsahuje vyvrtaný otvor, převzato z [14]

2.4.2 Galfenol

Galfenol je magnetostrikční slitina složená převážně z prvků železa (Fe) a galia (Ga). Tato slitina byla objevena v roce 1999 pomocí společných výzkumných snah dvou firem. Motivace k jeho objevu byla vedena díky přítomnosti již dvou dalších magnetostrikčních materiálů, niklu (Ni) a Terfenol-D. Předpokladem pro vznik tohoto materiálu byl spojení mechanické odolnosti niklu a obrovské magnetostrikční reakce u Terfenol-D, což se ve výsledku dostavilo, jelikož Galfenol vykazuje pozitivní jak mechanické, tak i magnetostrikční (magnetické) vlastnosti, které předešlé magnetostrikční materiály nemají.[15]

Je třeba poznamenat, že výzkum stále pokračuje ve vývoji nových metod zpracování pro výrobu komponentů pro Galfenol.[15]



Obr. 6: Silně laminované čtvercové tyče Galfenolu s vyvrtaným otvorem skrz, převzato z [15]

3 Dopady magnetostrikce na elektrická zařízení

V celkovém shrnutí dosavad uvedených informací je jasná jedna věc. Pro magnetostriktu je svým způsobem charakteristické, že svým působením mění vlastnosti materiálů, které jsou vystavené magnetizaci a tudíž magnetostriktu a to tím, že se materiál právě mění, co se délky tyče. Logicky tedy můžeme dojít k závěrům, že těmito změnami je dosažen v mnohých případech spíše negativní dopad na materiál právě díky změnám velikosti hodnoty vlastností materiálu, jako jsou například velikosti magnetické indukce, magnetické intenzity či dokonce i velikost odporu materiálu. Samozřejmě při změně délky materiálu zde dojde kromě změn velikostí vlastností materiálu také k nechtěným změnám energie, například k vytváření tepla.

Nejznámějším druhem negativního účinku magnetostrikce je projevení hluku v transformátorech tzv. hučení.

3.1 Hluk v transformátorech

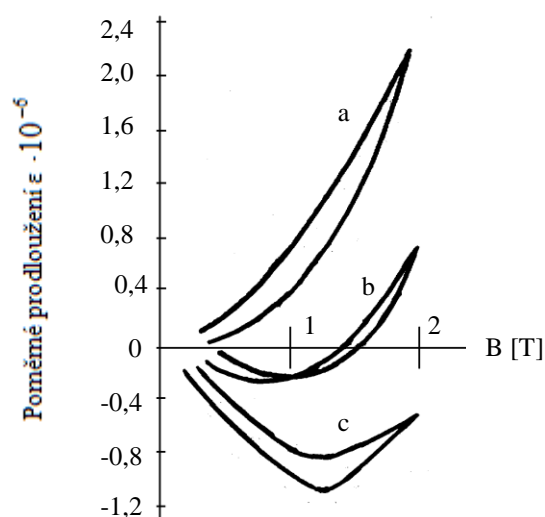
Jedna z definic hluku je "nepříjemný nebo nechtěný zvuk. Každá část strojního zařízení, která vibruje, vyzařuje akustickou energii, kterou člověk pak vnímá právě jako hluk. Konstrukce a výroba transformátoru s nízkou hladinou zvuku vyžaduje důkladné pochopení zdroje hluku. Protože transformátor nemá žádné pohyblivé části, zvuk musí být produkován vibracemi jeho částí. Díly podléhající magnetickým silám, které mohou způsobit vibrace, jsou jádro, vinutí a chladicí zařízení (magnetické stínění). Tyto tři části zařízení jsou tedy vzhledem k vytvoření vibrací zdroje hluku v transformátoru. Jádro je nejdůležitějším a nejvýznamnějším zdrojem hluku transformátoru. [10, 16, 17]

Hladiny akustického tlaku, které jsou generovány vinutím a magnetickým stíněním v rozmezí od 5 do 15dB jsou nižší než generované jádrem transformátoru. To vše v závislosti

na magnetické indukci jádra. Z tohoto důvodu je jádro hlavním zdrojem zvukové energie z transformátoru, a proto je produkce magnetostrikce v jádře faktorem, který je třeba vyhodnotit. [10]

Transformátorové jádro tedy vibruje ale ovšem komplexněji, než bychom si mohli myslet, a proto je velmi obtížné určit, které vibrace jsou zaviněny právě k podélné magnetostrikci. V důsledku nehomogenit v oceli, ze které je jádro sestaveno, dochází k vibracím jádra nejen v rovině laminací, ale i v kolmém směru k nim, což jsou ve výsledku vibrace, které produkují nejvíce hluku směřující z jádra.[18]

Většina transformátorů je vyrobena z orientované oceli, tzv. elektrotechnické oceli, která je vyrobena ve formě plátů o tloušťce okolo 0,15 mm až 0,5 mm s izolačním povlakem, který poskytuje nejen elektrickou izolaci mezi desky jádra, ale také příznivě působí na tahové napětí v oceli[19]. Tato ocel se po opracování žihá pro odbourání mechanického napětí. To ovšem má za následek ohřátí materiálu. Příklad vlivu teploty žihání na magnetostrikční křivku M 5 x železného plechu je znázorněn na obrázku 7. Křivkami je znázorněno, jak se magnetostrikce v rozsahu hustoty magnetického toku začíná jako pozitivní. Zvýšením teploty žihání však může orientace magnetostrikce být přenesena do negativních hodnot. Ocelový plech byl v každém případě žihán po dobu 5 minut při uvedených teplotách a po dokončení se pomalu ochlazuje. To vše má vliv na prodloužení ϵ materiálu, tedy magnetostrikci.[10]. Je ovšem důležité, aby teplota nebyla příliš vysoká, a že doba žihání by neměla být příliš dlouhá, jinak optimálním snížení magnetostrikce nikdy nebude dosaženo.[20]



Obr. 7: Poměrné prodloužení ϵ pro stejnosměrnou magnetizaci M 5 x oceli, žihaná při a) 7800°C ; b) 8200°C; c) 8500°C. Žihání bylo provedeno po dobu 5 minut a následně byl materiál pomalu ochlazován, převzato z [10]

Chlazení pomalou rychlostí (100°C/h) z hodnoty teploty žíhání je lepší než rychlé chlazení pro materiál, ale zlepšení, kterého bychom chtěli tímto pomalým způsobem chlazení dosáhnout, je pouze okrajové pokud není proces žíhání delší.[20]

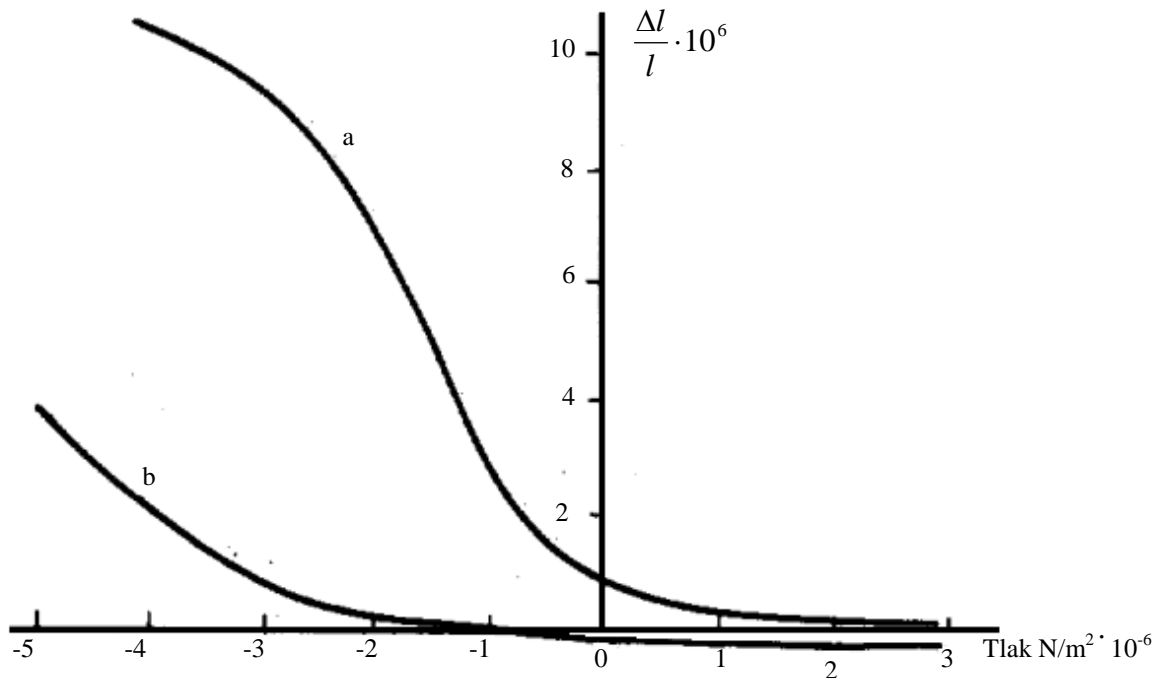
Když je zbytkové mechanické napětí nakonec pomocí žíhání odstraněno, tak je důležité, aby se toto napětí, které, jak již bylo řečeno, výrazně ovlivňuje magnetostrikci, během výroby transformátoru nevrátilo. Zde ovšem nastává problém. Měření prokázala, že mechanické napětí způsobené tlakem podélně v rovině plátu materiálu a ve směru magnetického toku jsou velmi škodlivá. Manipulace plátů v průběhu výroby transformátoru nevykazuje permanentní změny ve vlastnostech spojených s magnetostrikcí a to za předpokladu, že použitý plát nebyl vystaven mechanickému napětí po překročení meze pružnosti. A že mechanická napětí způsobená tlakem, která vznikají v transformátorech díky šroubovým spojům, jsou ve směru pravého úhlu ke směru magnetického toku a samy o sobě nejsou škodlivá.[20]

Díky panu Normanu P. Gossovi, který v roce 1935 publikoval a patentoval metodu, jsme schopni použít materiál s orientací, který má vysoké anizotropní magnetické vlastnosti.[22] Tento materiál je zpracován způsobem, že se optimální vlastnosti vyvíjejí ve směru válcování díky přísné kontrole orientace krystalu vzhledem k plátu materiálu. Pak je hustota magnetického toku zvýšena až o 30% ve směru válcování cívky, i přestože magnetické nasycení materiálu je celkově sníženo o 5%. [21]

Vzhledem k silné metalurgii má tento materiál vysokou hodnotu permeability, malé magnetické ztráty a také velmi malou magnetostrikci ve směru válcování. Magnetostrikční prodloužení je menší než 10^{-6} i přes vysokou magnetickou indukci materiálu. To vede ke změnám rozměru pouze v řádech mikrometrů u největších velikostí jader transformátoru.[19]

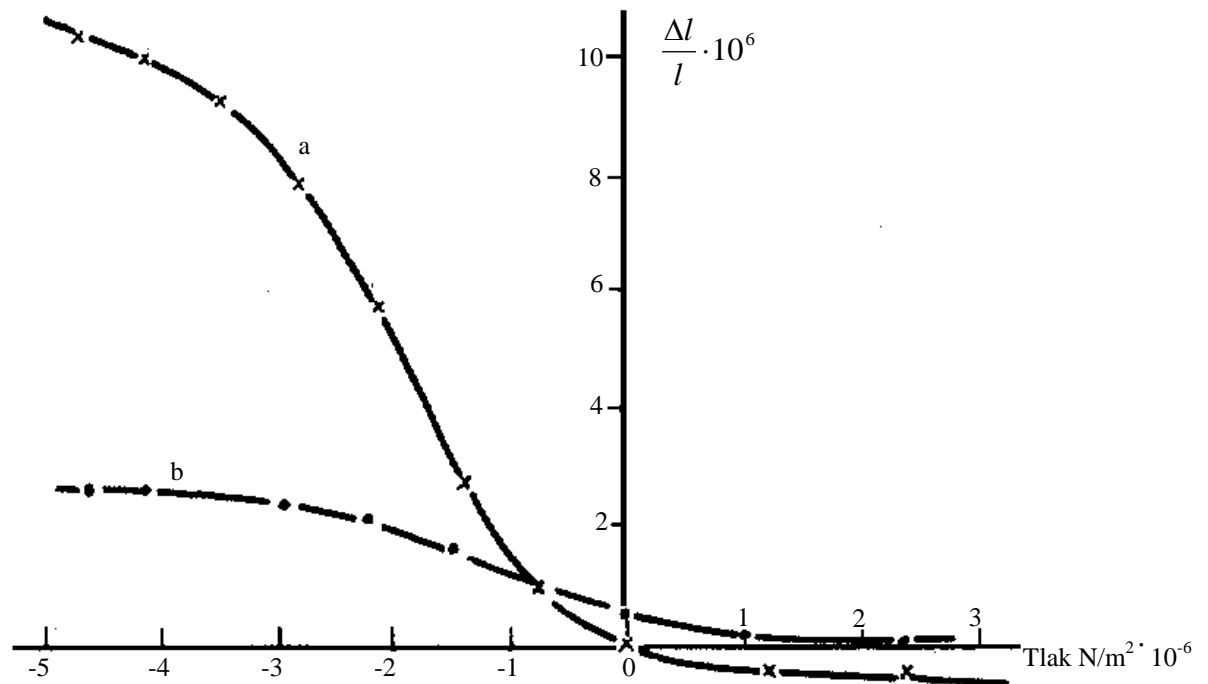
Tento materiál se právě používá pro jádra transformátorů (materiál, který je válcován za studena, je označován jako CRGO) a tato skupina materiálů je obecně označována jako elektrotechnická ocel, někdy též jako transformátorová ocel. Elektrotechnická ocel je obecně železná slitina, která může obsahovat až 6,5% křemíku a manganu s hliníkem až 0,5%. [21] Všechny tyto orientované struktury byly poté pojmenovány po svém objeviteli jako Goss struktury.[22]

Je dobře známo, že slitina křemíku a železa s touto Goss strukturou (jinými slovy elektrotechnická ocel) je obecně nejcitlivější na namáhání tlakem působícím rovnoběžně s jeho směrem válcování, i když je samozřejmě jasné, že působení tlaku v jiných směrech má také svůj vliv a nemůžeme si dovolit, aby byl přehlížen. V obrázku číslo 8 je znázorněna citlivost na podélné působení tlaku pro 100 Hz u komponentu moderní oceli a oceli vyrobené před pouhými 10 lety při magnetostrikci.[18]



Obr. 8: Citlivost na podélné působení tlaku pro 100 Hz u komponentu a) typické oceli vyrobené před pouhými 10 lety a b) typické moderní oceli při magnetostrikci, převzato z [18]

U obou typů oceli má mechanické napětí při tlaku malý efekt na materiál a magnetostrikce při tlaku v záporných mezích jsou podobné, co se rozsahů týče. Zdá se tedy, že je zde určité spojení mezi vibracemi jádra a citlivostí na tlak působící na materiál z hlediska magnetostrikce. Je tedy vhodné se zabírat spojením částí jádra transformátoru z tohoto materiálu. V obrázku číslo 9 je pak zobrazena charakteristika u citlivosti tlaku pro 100 Hz při magnetostrikci u vzorků, kde jeden vzorek je před spojením a druhý je slepený pomocí pružného lepidla.[18]



Obr. 9: Citlivost na působení tlaku pro 100 Hz při magnetostrickci u křemíko-železných vzorků: a) před slepením laminátů; b) po slepení, převzato z [18]

Citlivost namáhání slepených laminací je mnohem menší (i když magnetostrikce v době, kdy na materiál není vyvíjen tlak je vyšší). Shodné účinky se projeví u harmonických složek magnetostrickce. Jádra jsou sestaveny ve stejném směru jako ocel, která byla použita k sešroubování či slepení lamel s pružným lepidlem.[18]

V tabulce 1 jsou k dispozici průměrné hodnoty vibrací pro tyto dvě řešené problematiky spojení jedné části jádra (sešroubované a slepené s pružným druhem lepidlem). Vibrace se drasticky sníží u spojení jádra napevno sešroubováním, což je logické, jelikož je zde vyvinuta síla, která se právě snaží zamezit vibracím, zatímco u použití pružného lepidla jsou k vytvoření vibrací optimálnější podmínky. Podobná pozorování byla provedena na ostatní plochy a hrany jádra. Ve všech případech vyšší harmonické poklesnout o mnohem víc než nižší harmonické.[18]

Tabulka 1: Vibrace šroubovaných a slepených transformátorových jader, převzato z [18]

Frekvence	100 Hz	200 Hz	300 Hz	400 Hz	500 Hz	600 Hz
Sešroubovaná jádra	600	200	95	34	36	10
Slepená jádra	460	34	4	8	2	4

Typická analýza hluku transformátoru je uvedena na obrázku číslo 10, který může být považován jako kompozitní graf velkého počtu měření. V tomto schématu lze vidět vliv frekvence na velikost hluku transformátoru v decibelech. Nejvýraznější bodem je síla složky při 100 Hz nebo dvakrát tak větší hodnotě, než je normální provozní hodnota frekvence

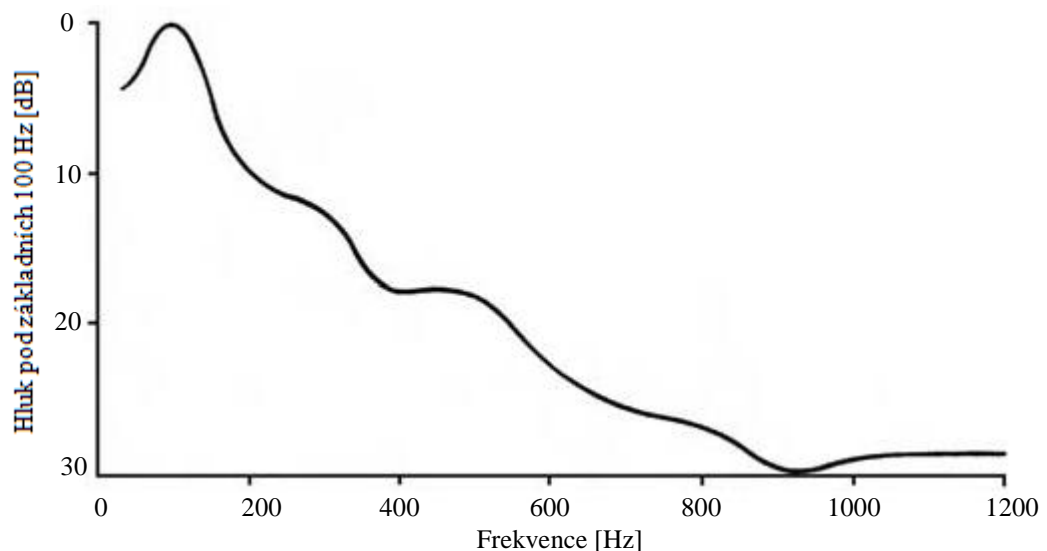
transformátoru. Magnetostrikce v transformátorech se projevuje hlavně na jádře tohoto zařízení. Zvážíme-li vliv magnetostrikčního jevu na transformátor, zjistíme, že při tomto působení lze očekávat vytvoření podélné vibrace lamel právě při této hodnotě frekvence, což vede k vytvoření hluku v transformátoru.[16]

Jádro vibruje v důsledku magnetických a magnetostrikční sil. Magnetické síly se objeví v důsledku nemagnetických mezer rohových spojů. Síla na jednotku plochy průřezu lze být počítána dle vzorce (6)

$$\sigma = \frac{B_m^2}{2\mu_0} = \frac{B_{mp}^2}{4\mu_0}(1 + \cos 2\omega t) \quad (6)$$

kde B_{mp} je maximální hodnota hustoty toku v mezeře mezi odpovídajícími plechy, μ_0 je permeabilita vakua a ω je základní úhlová frekvence.[17]

Tyto magnetické síly závisí na druhu provázání na mezi rohových spojů, které jsou nejvyšší, když nedojde k žádnému překrývání (kontinuální vzduchová mezera). Magnetické síly jsou menší při 90 ° překrývání a při úhlu překrývání 45 ° jsou ještě menší. Jedná se o nejmenší krok přeplátování spoje v důsledku snížení hodnoty hustoty magnetického toku v překrývající se oblasti na rozích překrytí.[17]



Obr. 10: Typická analýza zvuku vyzařovaného z transformátoru, převzato z [16]

Síly produkované magnetostrikčním jevem jsou mnohem větší, než je velikost magnetických sil v transformátorech. Magnetostrikce, jak již je v předešlých kapitolách zmíněno, je změna konfigurace magnetizovatelného materiálu v magnetickém poli, což vede k periodickým změnám v délce materiálu. Pro střídavé pole se materiál použitý jako pro jádro transformátoru neustále mění a dochází k vibracím. Tato vibrace se přenáší, pokud dojde k

určitému útlumu, prostřednictvím struktury olejové nádrže do okolního prostoru. To nakonec vede k charakteristickému hučení.[17]

Podélná magnetostrikce je charakterizovaná vztahem (1), kde pro tento případ l a Δl značí délky laminovací fólie a její změny, respektive koeficient magnetostrikce zde závisí na okamžité hodnotě magnetické indukce.[17]

$$\varepsilon_{(t)} = \sum_{\nu=1}^n K_{\nu} B^{2\nu} \quad (7)$$

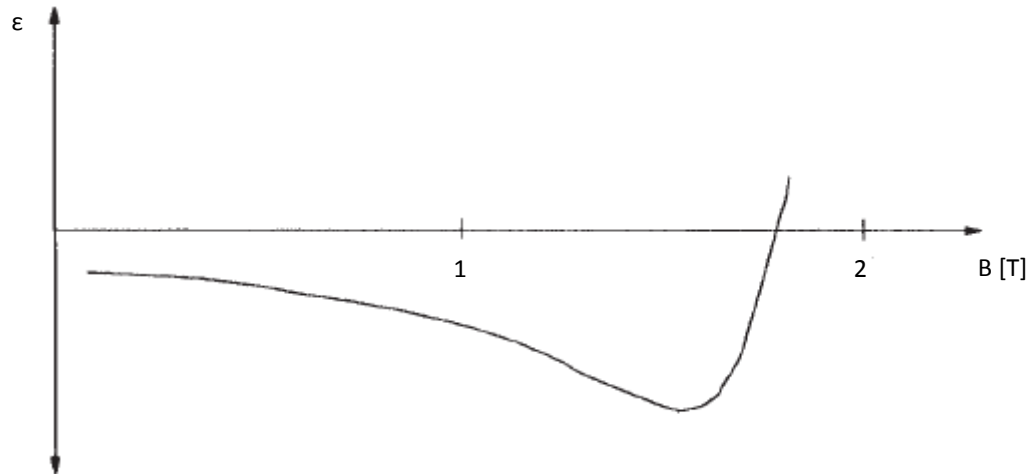
V tomto vztahu (7) lze vidět, že hodnota koeficientu magnetostrikce je právě závislá na okamžité hodnotě magnetické indukce, kde K_{ν} je koeficient, který závisí na úrovni magnetizace, typu laminace materiálu a jeho zacházení a B je okamžitá hodnota magnetické indukce.[17]

S rostoucím exponentem ν nám ovšem koeficient K_{ν} obvykle klesá. Magnetostrikční síla je pak dána dle rovnice (8).

$$F = \varepsilon_{(t)} EA \quad (8)$$

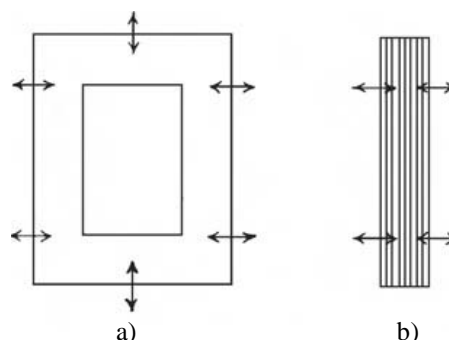
V této rovnici E je modelem pružnosti ve směru síly a A je plocha příčného průřezu laminovací fólií. Předchozí dvě rovnice ukazují, že magnetostrikční síla se mění s časem a obsahuje i harmonické napájecí frekvence (120 Hz, 240 Hz, 360 Hz, ... pro 60 Hz síťové frekvence. Z tohoto důvodu hluk také obsahuje všechny harmonické ze 120 Hz. Amplituda vibrační jádra a šumu se zvětší, pokud jsou základní vlastní mechanické frekvence jádra v okolo hodnoty 120 Hz. Vlastní frekvence jádra může být přibližně vypočítaná analyticky či empiricky nebo přesnějšími metody jako je například metoda konečných prvků.[17]

Typická magnetostrikční křivka je znázorněna na obrázku číslo 11. Změna rozměru není přímo úměrná magnetické indukci. Hodnota magnetostrikce může být pozitivní nebo negativní, v závislosti na typu magnetického materiálu, které je vysvětleno v kapitole o magnetostrikci, a na mechanickém a tepelném zacházení materiálu. Magnetostrikce je obecně pozitivní (zvýšení délky od několika mikrometrů se zvýšením magnetické indukce) pro CRGO materiál při teplotách žhání pod 800 ° C, a když se teplota žhání zvýší (≥ 800 ° C), se může magnetostrikce v tomto případě projevat negativně. Mechanické namáhání však může magnetostrikci změnit zpátky do kladných hodnot. Magnetostrikce je minimálně podél směru válcování a maximální ve směru 90 °.[17]



Obr. 11: Magnetostrikční křivka, převzato z [16]

Podélná vibrace je přirozeným důsledkem magnetostrikčního jevu, jak již bylo poukázáno v předešlých kapitolách, kde byla zmíněna právě změna délky materiálu. Bohužel potřeba omezit sevření lamel, kterou jsme se zabývali v souvislosti citlivosti na tlak a magnetostrikce, vede k dalšímu výskytu magnetostrikce, avšak v tomto případě se jedná o příčnou vibraci. Tyto účinky jsou znázorněny na obrázku číslo 12. Celkově tedy máme dva směry vibrace vyskytující se v transformátoru. Provedená měření prokázala, že příčná vibrace přispívá k vytváření hluku zhruba stejně velkou hodnotou zvukové energie, jakou produkuje i podélná vibrace. Ve výsledku když jsou dva podobné či stejné zdroje zvuku je celkový zvuk o 25 procent silnější, než kdyby zde působil pouze jeden zdroj. Ze stejného důvodu úplné odstranění příčné vibrace sníží hlasitost hluku transformátoru pouze asi o pětinu. I když je toto snížení výhodné, redukce, i za technologické a ekonomické možnosti provedení, je zanedbatelná v porovnání s půlením hlasitosti, dosažené snížením o 10 dB hladiny hluku obou vibrací.[16]



Obr. 12: Vibrace způsobené magnetostrikcí: a) podélné; b) příčné, převzato z [16]

Samozřejmě existují další zdroje způsobující hluk v transformátoru, jak již bylo řečeno, ty ovšem již nesouvisí s magnetostrikčním jevem a tudíž vibrací jádra transformátoru.[16,17]

3.2 Anizotropní magnetostrikce a její vliv na asynchronní motor

Magnetostrikce v neorientované elektrotechnické oceli je zdrojem zdraví škodlivých vibrací a hluku v elektrických strojích. Je to projevem daleko více anizotropním, než jsou konkrétní ztráty energie, což vede k horší predikci vibrací a hluku.[23]

Vibrace a akustický hluk asynchronních motorů jsou proto stále předmětem obav. Hlavními zdroji vibrací a hluku jsou Maxwelllovi a magnetostrikční síly. Zatímco Maxwelllovi síly se projevují především ve vzduchové mezeře, kde je diskontinuita v relativní permeabilitě materiálů, magnetostrikční síly právě způsobují změnu v rozměrech magnetického materiálu při magnetizaci materiálu. Tyto magnetostrikční síly jsou zodpovědné až za 50% z celkových elektromagnetických sil v zařízení. Z tohoto důvodu je právě magnetostrikce důležitým zdrojem vibrací a akustického hluku v jádru motoru.[23]

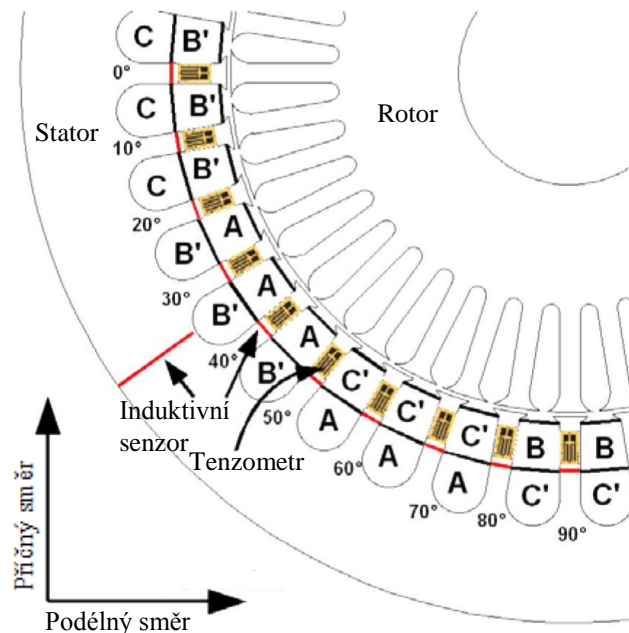
Neorientované elektrotechnické ocele se běžně používají v oblasti elektrických strojů a jsou také často označovány jako magneticky a mechanicky izotropní. Nicméně stále existuje vlastní anizotropie v B-H charakteristice a konkrétní ztráty energie měřené při různých směrech plátu materiálu, což ve výsledku zapříčiní výrazné zvýšení magnetické indukce B a také zvýšení celkových ztrát v jádře. V důsledku měření se přišlo na to, že spojené vlastnosti mezi okruhem magnetických a mechanických vlastností (jako je právě magnetostrikce) v neorientované elektrotechnické oceli mohou být mnohem více anizotropní, než její konkrétní energetické ztráty. Z toho vyplývá, že tedy při různých směrech magnetizace materiálu může magnetostrikce při stejné velikosti magnetické indukce dosáhnout až 400% své hodnoty.[23]

Při vyhotovení této studie byly provedeny výzkumy magnetostrikční anizotropie v neorientované elektrotechnické oceli. Účinek anizotropní magnetostrikce na hlavní deformace v zařízení byla zkoumána s použitím měření lokalizované deformace v zubech statoru asynchronního motoru modelu jádra, kde se neorientovaná ocel podrobila vlivu magnetické indukci se střídavým průběhem v různých úhlech θ vzhledem ke směru válcování. Dále byla deformace lokalizována ve vzduchové mezeře, které způsobily Maxwelllovi síly.[23]

Abychom byli schopni určit anizotropní magnetostrikci ve stroji, musíme nejprve nařezány v 10 intervalech Epsteinův pás M400-50A neorientované elektrotechnické oceli (305 mm dlouhé, 30 mm široké) v rozmezí od shodných směrů válcování až do příčných směrů vůči válcování. Následně se testují tři řezy pásu pro každý úhel. Tyto vzorky jsou nejprve magnetizovány s pomocí magnetické indukce sinusového průběhu indukce v

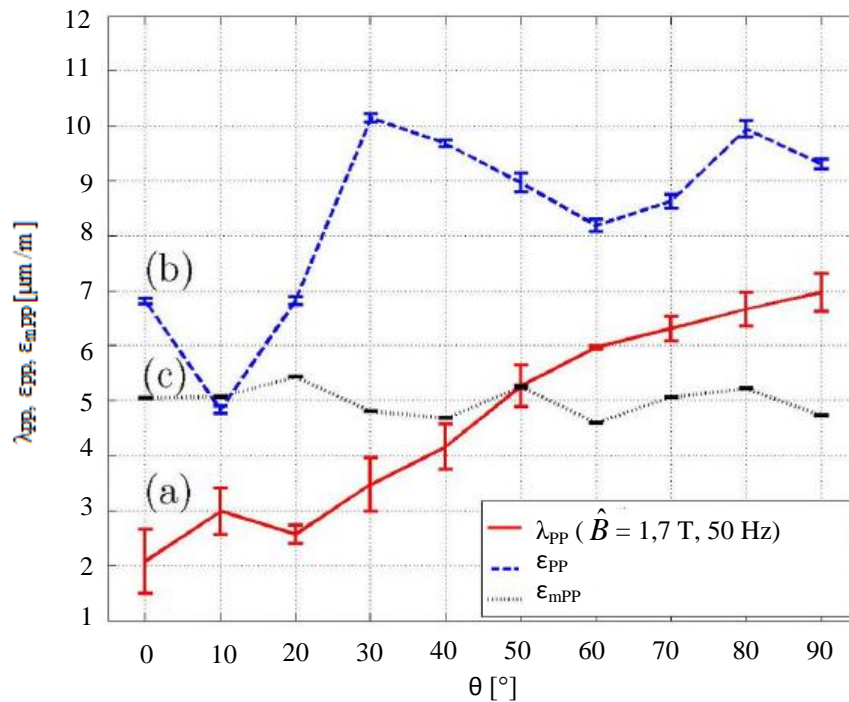
okamžiku maximálního účinku indukce \hat{B} od 1,00 do $1,7 \pm 0,005$ T při 50 Hz. Získaná magnetostrikce je nakonec obdržena dvojitým integrováním výstupního signálu akcelerometru na volném konci pásu.[23]

Pro znázornění deformace v zubech statoru je použita metoda měření pro lokalizaci změn rozměru pomocí dvaceti statorových a rotorových plechů ze stejného druhu materiálu (M400-50A neorientované elektrotechnické oceli), které byly také použity k sestrojení modelu jádra asynchronního motoru. Dále se musí vybrat dvouvrstvé čtyřpólové statorové vinutí s rozmezím 120° , zatímco při měření není použité žádné rotorové vinutí. Mezi deseti statorovými zuby je rozmezí rozestupu 10° . Po té je připojen tenzometr k měření lokálního prodloužení (ϵ) zubů statoru pro rozestupy od 0° do 90° . Tento postup je rozložení a příprav k měření je pro lepší představu znázorněn v obrázku číslo 13.[23]



Obr. 13: Konfigurace vinutí modelu jádra asynchronního motoru a umístění tenzometrů a induktivních senzorů, převzato z [23]

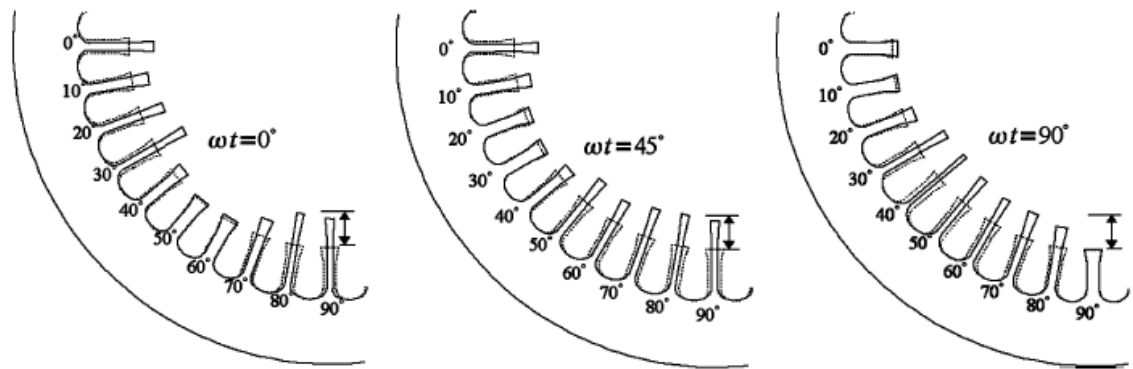
Magnetostrikční průběh špička-špička λ_{PP} pro sinusovou magnetizaci při $\hat{B} = 1,70$ T a 50 Hz od 0° do 90° je znázorněn na obrázku číslo 14 (a). Křivka zde představuje průměrnou hodnotu ze tří vzorků. Maximální odchylka od jednoho vzorku k druhému je $1,2 \mu\text{m/m}$. λ_{PP} má tendenci se zvyšovat se změnou úhlu θ . λ_{PP} při $\theta = 90^\circ$ je přibližně 3,5 krát větší, než je podélný směr válcování a je až o 5,5 krát větší při $\hat{B} = 1,00$ T. Textura zde také hraje významnou roli pro tento jev. V tomto grafu λ_{PP} tedy značí magnetostrikci špička-špička (peak-to-peak), ϵ_{PP} značí prodloužení díky magnetostrikčním silám a ϵ_{mPP} je prodloužení díky Maxwellovým silám ve vzduchových mezerách.[23]



Obr. 14: Změna λ_{PP} při a) $\hat{B} = 1,7 \text{ T}$, 50 Hz, b) ϵ_{PP} a c) ϵ_{mPP} při různých úhlech ϑ , převzato z [23]

V ideálním případě by magnetostrikce materiálu, ze kterého by jádro bylo sestaveno, byla izotropní. Potom by dvojice sil (magnetostrikční a Maxwellovi) způsobily symetrickou deformaci statorových zubů a jejich tvar bude odpovídat počtu pólů. Nicméně protože je magnetostrikce vysoce anizotropní, dojde k nesymetrické deformaci v jádru asynchronního motoru, jak je znázorněno na obrázku číslo 15.[23]

Jak se dalo očekávat při $\omega t = 0^\circ$, nejnižší deformace dochází v zubu statoru při úhlu 50° a fázový posuv mezi prodloužením v závislosti na magnetostrikčních silách $\epsilon(\omega t)$ a prodloužení v důsledku Maxwellových sil $\epsilon_m(\omega t)$ způsobí menší deformaci na zubu statoru při úhlu 60° než na zubu pod úhlem 40° . Vysoké deformace dochází u zubů statoru při úhlech 0° , 20° , 30° , 80° a 90° . Nicméně nízká deformace v zubu statoru pod úhlem 10° způsobí deformační vlnu složitější. I přestože je zde jen jedna deformační vlna při $\omega t = 45^\circ$ a $\omega t = 90^\circ$, deformace v zubech v blízkosti příčného směru válcování je větší, než v těch, které jsou v blízkosti podélného směru válcování v důsledku anizotropie magnetostrikce, což vede k asymetrickým deformacím.[23]

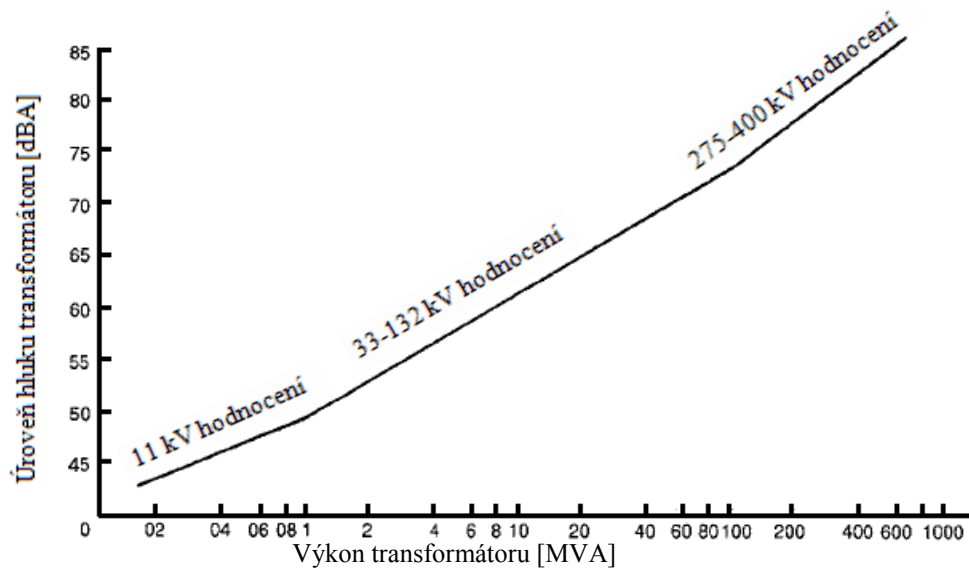


Obr. 15: Znáornění deformace v zubech při $\omega t=0^\circ, 45^\circ$ a 90° , kde zvýrazněná délka je vždy $10 \mu\text{m/m}$, převzato z [23]

Magnetostrikce tedy v neorientované elektrotechnické oceli může být mnohem více anizotropní než její mechanické pružné vlastnosti a specifické ztráty energie. Maxwellova síla ve vzduchové mezeře jádra motoru vytváří deformaci ve statorových zubech s tvarem, který je ovlivňován počtu pólů statorového vinutí. Tento deformovaný tvar se pohybuje dokola po zubech statoru na dvojnásobném kmitočtu zdroje energie. Samozřejmě na tento deformovaný tvar působí i ostatní vlivy (například natavení vinutí), ale největší podíl zde má anizotropie magnetostrikce. To způsobuje nesymetrické deformace zubů statoru. Přesnost deformace, vibrace a predikce akustického hluku v asynchronních motorech by bylo možné zlepšit, pokud by se vzala v úvahu, že je magnetostrikce anizotropní.[23]

4 Minimalizace negativních dopadů magnetostrikce

Emise hluku v důsledku magnetostrikce například právě u transformátoru, který je v provozu, je nevyhnutelná. To může vést ke stížnostem, které z různých důvodů, je obtížné řešit. Jsou zde dva hlavní problémy. Za prvé distribuční transformátory jsou obvykle umístěny v obyvatelné oblasti blízko domů či blízko pracovním prostorám jako jsou kanceláře a za druhé, jelikož transformátory fungují celý den v průběhu 24 hodin, hluk setrvává i přes noc, kdy je to nejvíce postřehnutelné. V přístupu k problému hluku je proto nezbytné vzít v úvahu nejen technické aspekty, ale také mít na paměti, že hluk je subjektivní jev zahrnující rozmary lidské přirozenosti, což můžeme vnímat jako subjektivní vjem lidského sluchu na hluk (každý má rozmezí slyšitelnosti nastavenou trochu jinak). Typické průměrné hladiny hluku z řady transformátorů jsou uvedeny na obrázku číslo 16.[16]



Obr. 16: Průměrná hodnota hluku typického transformátoru, převzato z [16]

Snížení hluku transformátoru samozřejmě lze dosáhnout tím, že zvětšíme vzdálenost mezi transformátorem a například domem, kde transformátor pracuje. V praxi se snižuje hladina hluku transformátoru tím, že za využití rozptylu hluku v kombinaci s absorpcí hluku vzduchem se zajistí mnohem větší snížení hluku zejména při vyšších frekvencích [16]. To však řeší pouze snížení hluku pro tento konkrétní dům.

Zdá se, že řešení tohoto vzniklého problému je v použití opatření, které negativně působí na magnetostrikční jev, tedy na jeho projevy. Pokud dojde k nějakému výraznému zhoršení projevení tohoto jevu na materiálu díky těmto opatřením, měli by výrobci oceli, která je použita při konstrukci jádra transformátoru, pokračovat ve vývoji oceli s těmito vlivy na snížení magnetostrikce. [19]

Nicméně hluk je také závislý na mechanické konstrukci jádra transformátoru a snaze předejít mechanické rezonanci jeho komponentů. [18]

4.1 Tloušťka materiálu

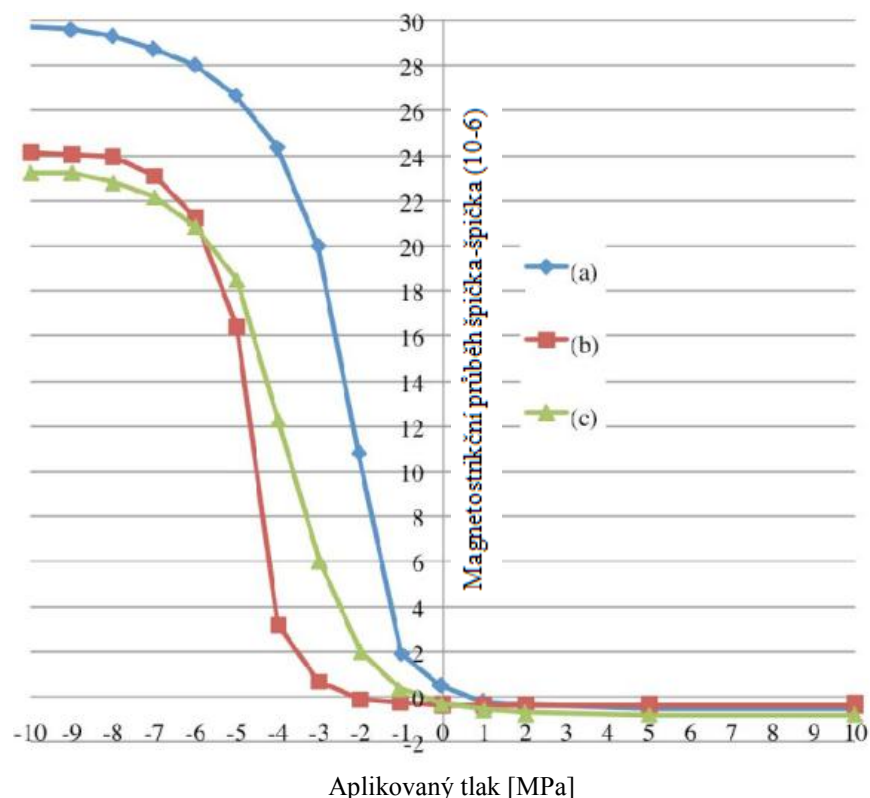
Teprve nedávno bylo zjištěno, že velikost magnetostrikce se zvyšuje s tloušťkou plátu materiálu. [19]

Díky jedné nepřímé studii bylo poukázáno na fakt, že hluk z transformátorového jádra s výkonem 15 MVA byl změřen s hodnotou 72 dB, kde transformátorové jádro bylo sestaveno z vlnitých plechů. Po změření této hodnoty hluku byly použity pro další měření dvě podobná jádra transformátoru, ale nyní však sestaveny z dokonale rovných plechů, kde tlak byl nastaven na co nejnižší hodnotu, byl změřen hluk s hodnotami 78 dB a 83 dB pro obě tyto podobná jádra transformátoru. [19]

4.2 Závislost na tlakové citlivosti

Je zde tedy, jak již bylo řečeno v kapitole o dopadu magnetostrikce na transformátor a tedy k vytvoření onoho hluku, patrná závislost mezi magnetostrikcí a citlivostí na mechanické napětí, respektive na citlivost tlaku, proto je vhodné se zabývat faktorem, který ovlivní právě tuto citlivost.

Pro co nejvíce možnou manipulaci s křivkou citlivosti tlaku existuje vrstva, která se aplikuje na ocel během výrobního procesu. Tato vrstva má příznivé účinky na pevnost v tahu podél směru válcování. Toto napnutí vyvolané nátěrem, tedy přidanou povrchovou vrstvou, právě zlepšením pevnosti v tahu efektivně způsobí, že křivka citlivosti se v charakteristice, zobrazené v obrázku číslo 17, posune více směrem doleva. Oceli s největším posunem v tomto smyslu jsou považovány za oceli s malým prospěchem pro magnetostrikční jev, což by mělo za následek menší produkce hluku transformátoru. Tato ocel je považována za materiál s dobrou křivkou citlivosti na tlak, avšak i tyto moderní oceli nejsou považovány jako přílišně dobré pro snížení hluku transformátoru, které je vyžadováno. [19]



Obr. 17: Vliv povrchové úpravy na citlivost magnetostrikční křivky na tlak orientované elektrotechnické oceli a) bez použité vrstvy; b) s vrstvou s vysokým vlivem na tlak; c) se standardní vrstvou, převzato z [19]

Ačkoliv některých korelací mezi citlivostí na tlak a hlukem je i přesto dosaženo. Není však jisté, zda je na tento faktor možné se spolehnout v důsledku predikce hluku. Moderní

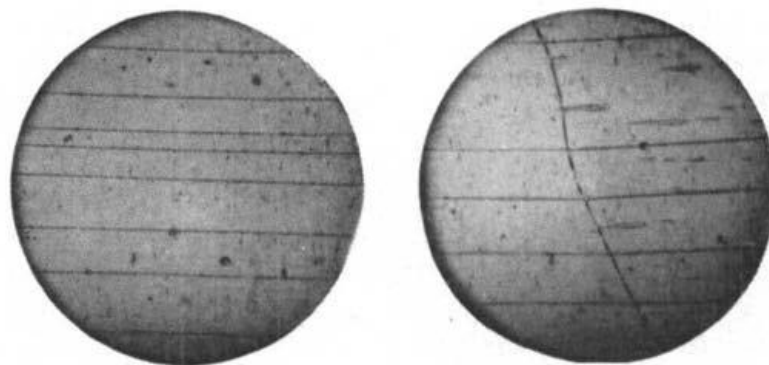
elektrotechnické ocele jsou ploché a rovnoměrně jednotné v tloušťce, takže by desky jádra neměly být ovlivněny tlakem, pokud je jádro transformátoru pečlivě sestaveno.[19]

Samozřejmě jsou zde i měření, která se zabývala dvouosým projevem tlaku na magnetostrikci. Kupodivu má tento dvouosý směr menší negativní účinky na magnetostrikci, než jednoosé stlačení.[19]

4.3 Teplotní zpracování materiálu

Minimalizaci magnetostrikce může být také dosaženo v plátu materiálu pomocí tepelného zpracování v závislosti na mnoho okolních faktorů, kde mezi nejdůležitější je úhel preferované orientace v plátu materiálu.[20]

V ideálním případě, kdy krystaly v materiálu jsou vyrovnané v souběžném směru s aplikovaným magnetickým polem. Magnetické domény tohoto ideálního případu jsou seřazeny buď souběžně či nesouběžně s magnetickým polem. Změnou v rozsahu magnetického pole zapříčiní změnu relativní množství svazku domén seřazených jak souběžně, tak i nesouběžně se směrem působení magnetického pole. Důvodem těchto změn je tzv. pohyb doménových stěn. V oblasti magnetismu je tento pohyb doménových stěn rozhraním oddělující magnetické domény, což v zásadě vede k přechodu mezi různými magnetickými momenty a zpravidla způsobí úhlové změny od 90° do 180° [24]. Nicméně protože tyto magnetické domény či tyto oblasti jsou všechny stejně dlouhé ve směru, ve kterém byly magnetizovány, takový proces zahrnuje úhlovou změnu až o 180° pohybu doménových stěn. Tento pohyb neprodukuje žádné magnetostrikční změny v prodloužení zrn, podle kterých je materiál orientovaný. Pokud jsou tato zrna v materiálu pouze nepatrně nesrovnaná, doménové stěny budou pokračovat přes hranici určenou právě vyrovnáním těchto zrn a ve výsledku zapříčiní zmenšení magnetostrikce. Na obrázku číslo 18 je znázorněno toto souběžné a nesouběžné seřazení magnetických domén v zrně uvnitř materiálu a jak se tyto domény pokoušejí přejít přes hranici zrn, pokud je nesouhlasný úhel mezi zrny malý.[20]

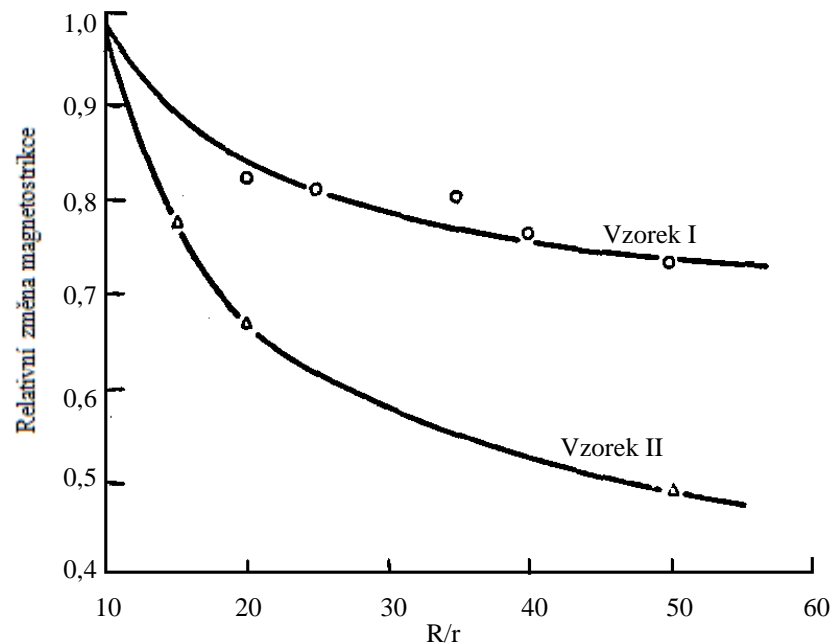


Obr. 18: Vzorek magnetických domén v křemíku železa a) úhlu 180° doménových stěn v zrně; b) doménové stěny překračují skrz hranici zrn v dobře vyrovnaném materiálu, převzato z [20]

Avšak přítomnost nesouhlasného směru zrn v materiálu nebo výskyt zbytkového mechanického napětí komplikuje situaci a to tak, že dochází k úhlové změně pouze o 90° nebo může dojít i k mnohem složitějším procesům doménové struktury s výsledným zvýšením magnetostrikce.[20]

Kromě tohoto účinku nevyrovnaná zrna zvětšují magnetostrikci u zrn, která jsou správně orientovaná pomocí pružných interakcí při přechodu hranic zrn. Tento jev byl demonstrován přímým použitím velmi malých tenzometrů, které byly dostatečně malé na to, aby se vešly dovnitř jednotlivého zrna v polykrystalické matici.[20]

Hodnota magnetostrikce pro jednotlivé zrno v polykrystalické matici se zdá být závislá na míře nesrovnalosti zrna a množství nesrovnaného materiálu kolem tohoto zrna. To můžeme vidět v obrázku číslo 19, který potvrzuje vliv přítomnosti elastické interakce při překročení hranice zrna.[20]



Obr. 19: Křivky ilustrující jeden způsob zobrazení, že vliv elastické interakce se vyskytuje napříč hranici zrna, kde R je poloměr kruhového vzorku a r je poloměr konkrétního zrna, převzato z [20]

Změny v magnetostrikci se nacházejí napříč a podél délky žíhání plátu orientované oceli (křemík železa). Změny se nacházejí v oblastech o stejném rozměru jako je šířka plechu, kde se magnetostrikce může lišit o faktor 2 (krátká vzdálenost změn), ale mimo toto rozmezí se magnetostrikce může lišit rozsahem či dokonce změnou znaménka. Důvod těchto změn není úplně jasná, ale mohou být spojeny s vlivem žíhání, koncentrací nečistot, stupně orientace krystalů, velikostí zrn či zbytkem mechanického napětí ponecháno v materiálu po procesu žíhání.[20]

4.4 Slitina s nízkou magnetostrikcí

Mezi další způsoby omezení magnetostrikce patří použití slitiny kovu s malou hodnotou magnetostrikce. O určitých slitinách s malou magnetostrikcí bylo již zmiňováno v předešlých kapitolách, ale pouze okrajově.

Je dobře známo, že 6 % křemík železa má prakticky nulovou magnetostrikci, ovšem tato slitina je velmi křehká a je velmi obtížné tvarovat tuto slitinu do požadované tloušťky. Kromě toho je také nutné válcovat tuto slitinu za studena za účelem vytvoření materiálu s orientovanou strukturou. Nicméně má tato slitina mnohem menší magnetickou anizotropii než slitina s pouhými 3 % křemík železa, což znamená, že ona 6 % slitina nemusí nutně být produkována jako vysoce orientovaný materiál. Pokud by tomu tak bylo, pak za využití určité techniky by mohl do materiálu být při válcování přidán křemík a železo ve formě prášku pod tlakem. Při správných podmínkách by pak vznikl určitý „plát“ 6 % křemík železa zhotoven právě pomocí tlakového spojení prašné formy křemíku a železa, kde tento „plát“ by již dosahoval dostačující pevnosti pro lepší zpracovatelnost a následně pomocí teplotního působení bychom obdrželi již hotový pevný plát materiálu.[20]

Orientovaný 6% křemík železo může být vyrobený s použitím orientace vyvinuté ve slitině s nižším obsahem křemíku, řekněme 3%. Křemík je nanášen na povrch plátu materiálu pomocí páry a po té je křemík pomocí vysoké teploty vnesen do struktury materiálu. Avšak je velmi nepravděpodobné, aby takovýto konkrétní postup se stal možnou variantou výroby v průmyslu. Pro žíhané materiály je nutné mít velkou orientaci pro získání nízké magnetostrikce.[20]

Závěr

Jak již bylo řečeno, magnetostrikci se snažíme zamezit z ohledu na její negativní dopady na elektrická zařízení, jelikož tyto změny v délce a celkově tvaru materiálu mohou způsobit určité změny ve vlastnostech látky, na níž se magnetostrikce projevuje. Zejména se tento jev projevuje vibrací materiálu v zařízení v důsledku změn rozměrů a to způsobí vznik hluku, vycházející ze zařízení. Celkem zde byly probrány čtyři návrhy na minimalizaci magnetostrikce a tudíž jejích dopadů na elektrická zařízení. Avšak jelikož je magnetostrikce ještě doposud jev, který nebyl ještě úplně pochopen, je velmi obtížné stanovit nejlepší vliv na minimalizaci magnetostrikce. Každý z nastíněných návrhů na zmenšení vlivu magnetostrikce má svoje výhody i negativa jako jsou například, že pokud bychom se zabývali pouhým snížením úrovně magnetostrikce v materiálu, pak bychom mohli i neúmyslně zhoršit vlastnosti materiálu, který je zrovna chtěný, aby materiál poskytoval. U vlivu tloušťky

materiálu na magnetostricku je zmíněno, že magnetostricke se zvětšuje s tloušťkou materiálu. Tudíž z toho lze vyvodit, že bychom potřebovali co nejtenčí materiál, pro co největší zamezení magnetostricke. To nám ovšem právě ovlivňuje dané zařízení (v tomto případě mluvíme o transformátoru) a jeho vlastnosti. Stejně tak ovlivnění teplotního zpracování materiálu. Dosud není vytvořen materiál, který by dokázal zastat snížení magnetostricke a současně si zachoval svojí původní strukturu či orientaci. U použití slitiny s nízkou magnetostrickou zase máme velmi obtížnou manipulaci a výrobu. Pro danou slitinu, kde výsledný plát je vyroben z tlakového a teplotního působení na práškovou formu křemíku a železa je velice křehký. Současně s tímto výrobkem je velice těžké tvarovat jeho tvar a rovnoměrnost tloušťky. U závislosti magnetostricke na citlivost materiálu vůči tlaku sice oceli, u kterých jsme schopni manipulovat s jejich křivkou právě této citlivosti tak, abychom snížili magnetostricku, dokážou snížit výsledný vliv magnetostricke a tudíž ovlivnit její negativní dopad na zařízení, ovšem i zde není jisté, zda je na faktor omezení magnetostricke možné se spolehnout v důsledku predikce hluku, jelikož i zde jsou různé vlivy, které ovlivní jak materiál, tak i samotné zařízení a ve výsledku je právě velmi obtížné takový stav zařízení dopředu znát a pracovat s touto myšlenkou při výrobě této oceli. Ovšem moderní elektrotechnické ocele jsou ploché a rovnoměrně jednotné v tloušťce, takže by desky jádra neměly být ovlivněny tlakem, pokud je jádro transformátoru pečlivě sestaveno.

Z toho lze vyvodit, že i když nejsme doposud schopni nějak výrazně omezit magnetostricku aniž bychom změnili i ostatní vlastnosti materiálu, jsme stále blíž k objevu téměř dokonalé izolace magnetostricke, jak můžeme vidět na vývoji v průběhu let.

Použitá literatura

- [1] DUBSKÝ, Jan. Elektrotechnické materiály: vodiče a magnetické materiály [skripta]. 1. vyd. Plzeň: VŠSE, 1965. skripta 100 s.
- [2] Encyklopedie fyziky. Fyzika :: MEF [online]. [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main/article/view/295-magneticke-vlastnosti-latek>
- [3] Kučerová, Eva. Elektrotechnické materiály. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. 174 s. ISBN 80-7082-940-0.
- [4] Kučerová, Eva. Přednáška z Magnetických materiálů z předmětu EMAP na ZČU FEL v Plzni, 2012
- [5] Magnetostriction: Basic Physical Elements. MTS Sensors - Magnetostrictive Position Sensors .. [online]. [cit. 2016-05-30]. Dostupné z: <http://www.mtssensors.com/fileadmin/media/pdfs/551019.pdf>
- [6] DUBSKÝ, Jan. Elektrotechnické materiály: pro obor technická kybernetika. 2. dopl. vyd. Plzeň: VŠSE, 1972. skripta 134 s.
- [7] Magnostrikční snímače vzdálenosti. Časopis Automa - váš průvodce světem automatizace [online]. [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: http://automa.cz/index.php?id_document=34229
- [8] Magnetostriction. ETREMA Products, Inc. Home - ETREMA Products, Inc. [online]. [cit. 2016-05-30]. Dostupné z: <http://www.etrema.com/magnetostriction/>
- [9] Slovník pojmů: Villariho jev. Magnostrikční snímače polohy, senzory polohy - ALPHA international [online]. [cit. 2016-05-30]. Dostupné z: <http://www.alphaint.cz/slovník/villariho-jev/>
- [10] Foster, S.L. and Reiplinger, E. Characteristics and control of transformer sound, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 3, March 1981, pp. 1072–1075
- [11] Ultrasonics – Transducers – Magnetostrictive Effect. Parts Washers: Industrial and Medical | Cleaning Technologies Group [online]. [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.ctgclean.com/tech-blog/2011/12/ultrasonics-transducers-magnetostrictive-effect/>
- [12] Vandeveld, L.;Melkebeek, J. A. A. "Modeling of Magnetoelastic Material", Magnetics, IEEE Transactions on, On page(s): 993 - 996 Volume: 38, Issue: 2, Mar. 2002
- [13] Jiles, David. Introduction to magnetism and magnetic materials. 1st ed. London: Chapman & Hall, 1996. xiii, 440 s. ISBN 0-412-38640-2.
- [14] Terfenol-D. ETREMA Products, Inc. Home - ETREMA Products, Inc. [online]. [cit. 2016-05-30]. Dostupné z: <http://www.etrema.com/terfenol-d/>
- [15] Galfenol. ETREMA Products, Inc. Home - ETREMA Products, Inc. [online]. [cit. 2016-05-30]. Dostupné z: <http://www.etrema.com/galfenol/>
- [16] HEATHCOTE, Martin J. a D. P. FRANKLIN. The J & P transformer book: a practical technology of the power transformer. 13th ed. Burlington, MA: Newnes, c2007. ISBN 9780750681643.
- [17] KULKARNI, S. V. a S. A. KHAPARDE. Transformer engineering: design and practice. New York: Marcel Dekker, Inc., c2004. ISBN 0824756533.
- [18] A. Moses, "Measurement of magnetostriction and vibration with regard to transformer noise," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 10, no. 2, pp. 154-156, Jun 1974.
- [19] A. J. Moses, P. I. Anderson, T. Phophongviwat and S. Tabrizi, "Contribution of magnetostriction to transformer noise," Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International, Cardiff, Wales, 2010, pp. 1-5.
- [20] J. E. Thompson, "Magnetostriction and transformer noise," in Electrical Engineers,

- Journal of the Institution of, vol. 9, no. 98, pp. 72-74, February 1963.
- [22] Norman P. Goss. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-30]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Norman_P._Goss
- [21] Electrical steel. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-30]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_steel
- [23] S. Somkun, A. J. Moses and P. I. Anderson, "Effect of Magnetostriction Anisotropy in Nonoriented Electrical Steels on Deformation of Induction Motor Stator Cores," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 10, pp. 4744-4747, Oct. 2009.
- [24] Domain wall (magnetism): Magnetism. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-31]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Domain_wall_\(magnetism\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Domain_wall_(magnetism))