



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ PRO ODMAGNETOVÁNÍ MR
TLUMIČE PRO HYUNDAI**

CONSTRUCTION OF DEMAGNETIZING DEVICE OF MR DAMPERS FOR HYUNDAI

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Batelka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Jiří Batelka**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Zbyněk Strecker, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukce zařízení pro odmagnetování MR tlumiče pro Hyundai

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na VUT v Brně se v roce 2017 vyvinul rychlý magnetoreologický tlumič pro firmu Hyundai. Magnetický obvod tohoto tlumiče je zhotoven z konstrukční oceli 11SMn30. Zbytkový magnetismus pístu tlumiče snižuje dynamický rozsah. Zvýšení dynamického rozsahu lze zajistit účinným odmagnetováním.

Typ práce: výzkumná

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je nalezení vhodného postupu odmagnetování pístu magnetoreologického tlumiče a experimentální ověření.

Díličí cíle bakalářské práce:

- vytvoření programu pro odmagnetování na připraveném obvodu založeném na arduino DUE,
- testování vlivu tvaru průběhu (sinus, trojúhelník),
- testování vlivu frekvence,
- testování vlivu rychlosti snižování amplitudy.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, laboratorní protokol.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske--studium--ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

STRECKER, Z., J. ROUPEC, I. MAZUREK, O. MACHACEK, M. KUBIK a M. KLAPKA. Design of magnetorheological damper with short time response. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2015, 26(14), 1951-1958. DOI: 10.1177/1045389X15591381. ISSN 1045-389x.

TRUSKALO, W. Resonant Degaussing for TV and High Definition Color Monitors. IEEE Transactions on Consumer Electronics. 1986, CE-32(4), 713-722. DOI: 10.1109/TCE.1986.290164. ISSN 0098-3063.

LIVSHITZ, B. a J. S. GOLDBERG. Degaussing of Write Heads in Perpendicular Magnetic Recording. IEEE Transactions on Magnetics. 2011, 47(10), 3403-3406. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2153830. ISSN 0018-9464.

SELECKÝ, M. Arduino: uživatelská příručka. Přeložil M. HERODEK. Brno: Computer Press, 2016. ISBN 9788025148402.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem práce bylo nalezení vhodného způsobu odmagnetování MR tlumiče. K dosažení tohoto cíle bylo sestaveno zařízení založené na Arduinu DUE a zkoumány vlivy nastavitelných parametrů na výslednou remanenci po odmagnetování. Bylo dosaženo poklesu remanence z původních 12 mT před odmgnetováním na výsledných 0,23 mT. Nalezené vlivy nastavovatelných parametrů a sestavené zařízení lze dále využít při hledání vhodných způsobů odmagnetování ostatních zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Magnetoreologický (MR) tlumič, odmagnetování, magnetická hystereze

ABSTRACT

The aim of this thesis in to find a suitable way of demagnetizing MR damper. To achieve this goal, a device based on Arduino DUE was assembled and the effects of adjustable parameters are examined. Decrease of remanence from original 12 mT before demagnetizing to the resulting 0,23mT was reached. It is possible to use the found effects of adjustable parameters and the device to find suitable ways of demagnetizing other devices.

KEYWORDS

Magnetorheological (MR) damper, demagnetization, magnetic hysteresis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BATELKA, Jiří. *Konstrukce zařízení pro odmagnetování MR tlumiče pro Hyundai*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124660>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Zbyněk Strecker.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Zbyňku Streckerovi Ph.D. za jeho trpělivost, odborné vedení a pomoc při experimentálním měření.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Zbyňka Streckera Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1 ÚVOD.....	11
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	12
2.1 Popis magnetického pole a vlastností látek.....	12
2.2 Odmagnetování střídavým proudem.....	13
2.2.1 Vliv počtu reverzací.....	14
2.2.2 Vliv počáteční amplitudy.....	15
2.2.3 Vliv frekvence.....	15
2.2.4 Vliv tvaru modulace.....	16
2.3 Odmagnetování stejnosměrným proudem.....	16
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE.....	17
3.1 Analýza problému a zhodnocení řešerše.....	17
3.2 Cíl práce.....	17
4 MATERIÁL A METODY.....	19
4.1 Měřicí řetězec.....	19
4.2 Zkoumané průběhy.....	21
4.2.1 Odmagnetování střídavým proudem.....	21
4.2.2 Odmagnetování stejnosměrným proudem.....	22
4.3 Analýza dat.....	23
5 VÝSLEDKY.....	24
5.1 Odmagnetování střídavým proudem.....	24
5.1.1 Vliv frekvence.....	24
5.1.2 Vliv počtu reverzací.....	26
5.1.3 Tvar demagnetizační funkce.....	27
5.1 Odmagnetování stejnosměrným proudem.....	28
6 DISKUZE.....	29
6.1 Odmagnetování střídavým proudem.....	29
6.2 Odmagnetování stejnosměrným proudem.....	33

6.3 Vliv MR kapaliny.....	33
7 ZÁVĚR.....	34
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	35
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN.....	37
10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ.....	38
11 SEZNAM PŘÍLOH.....	40

1 ÚVOD

Odpružení osobních automobilů musí zajišťovat dobrou ovladatelnost vozidla a zároveň vysoký komfort pasažérů. Tyto požadavky si však protirečí; pro dobrou ovladatelnost je nutné tvrdší odpružení, které však nezajišťuje jízdní komfort. V minulosti proto bylo nutné dosáhnout kompromisu mezi těmito požadavky. Významný pokrok v této oblasti představují systémy semiaktivního odpružení, které umožňují změnu tuhosti tlumičů během jízdy.

Jedním ze systémů semiaktivního odpružení je MagneRide vyvinutý společností Delphi Automotive, poprvé komerčně použitý u automobilu Cadillac Seville STS roku 2002. Tento systém používá magnetoreologické (MR) tlumiče.

MR tlumiče mají obdobnou konstrukci jako klasické hydraulické tlumiče, ale místo klasických hydraulických kapalin používají MR (magnereologické) kapaliny.

MR kapalinu tvoří malé (0,1 až 10 μm) magnetizovatelné částice (nejčastěji železné) rozptýlené v nosné kapalině. V magnetickém poli tyto částice vytvoří dlouhé řetězce, které způsobí nárůst viskozity MR kapaliny. Viskozita MR kapaliny v aktivovaném stavu závisí na velikosti magnetického pole.

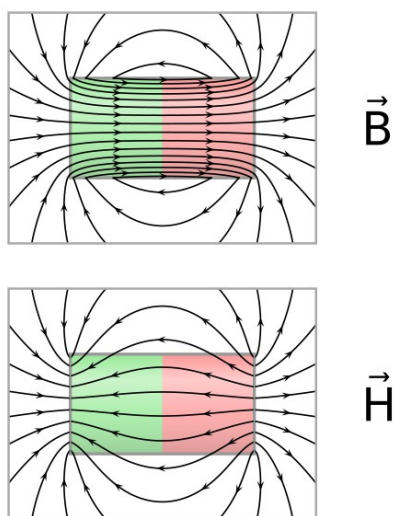
Součástí pístu MR tlumiče je cívka, která v závislosti na velikosti protékajícího proudu vytváří magnetické pole. Toto magnetické pole je dále zesilováno a usměrňováno feromagnetickým jádrem cívky. Feromagnetické materiály však i po odstranění ostatních zdrojů magnetického pole dále působí jako permanentní magnety, což snižuje použitelný rozsah tuhosti tlumiče. Tento negativní jev lze však zmírnit odmagnetováním tlumiče.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Feromagnetické materiály vykazují i po odstranění vnějšího magnetického pole spontánní magnetizaci, kterou odstraňujeme odmagnetováním. Odmagnetování lze provést ohřevem nad Curieovu teplotu (např. 768°C pro čisté železo), což je časově a energeticky náročné a v mnoha aplikacích nemožné či nevhodné realizovat (ohřev může poškodit strukturu materiálu, způsobit oxidaci povrchu, zhoršení mechanických vlastností). Dalším způsobem odmagnetování je použití magnetického pole s proměnlivým směrem a klesající intenzitou. Tento způsob je relativně rychlý, energeticky nenáročný, a v praxi často používaný. V mikroskopickém měřítku lze docílit odmagnetování také pulzy laseru v řádech femtosekund (10^{-15} s), čehož využívá spintronika[1].

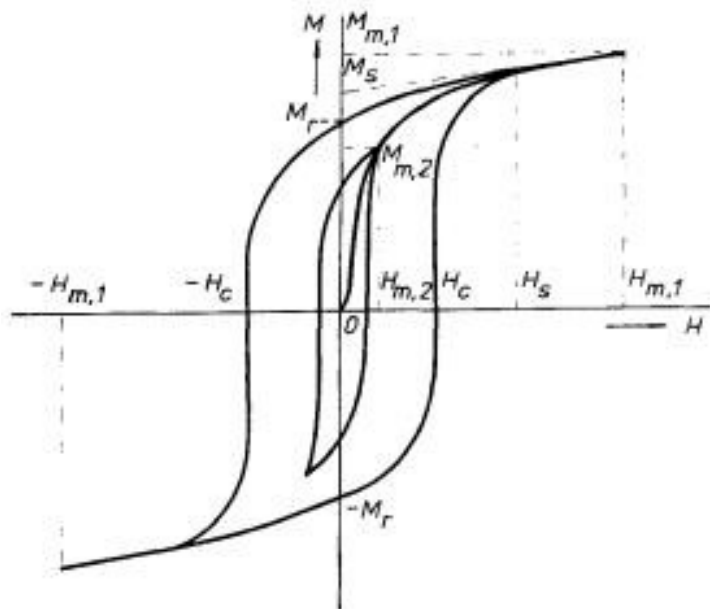
2.1 Popis magnetického pole a vlastností látek

K popisu účinků magnetického pole se používá veličina magnetické indukce \mathbf{B} . Jednotkou magnetické indukce je tesla T. Protože však k těmto účinkům magnetického pole přispívají také zmagnetované látky, je často velmi náročné až nemožné ji vyjádřit. Proto se zavedla veličina intenzity magnetického pole \mathbf{H} s jednotkou A m^{-1} , která nezahrnuje vlivy látkového prostředí. Mezi těmito veličinami platí vztah $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$, kde μ_0 označuje permeabilitu vakua, donedávna považovanou za fyzikální konstantu[2]. Magnetizace dané látky \mathbf{M} závisí právě na intenzitě magnetického pole \mathbf{H} . Pro slabě magnetické látky, diamagnetika a paramagnetika, je tato závislost lineární. Lze u nich zavést veličinu relativní permeability μ_r . Platí poté vztah $\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$.



Obrázek 2-1: Porovnání siločar magnetické indukce \mathbf{B} a intenzity magnetického pole \mathbf{H} [3]

Magnetizace silně magnetických látek, jejichž nejvýznamnějším představitelem jsou látky feromagnetické, závisí také na historii magnetizace vzorku a lze ji popsat hysterezní smyčkou. Magnetizace původně nezmagnetizovaného vzorku zprvu roste podle křivky prvotní magnetizace. Při dosažení intenzity nasycení H_s , dochází k saturaci neboli nasycení materiálu a velikost magnetizace se zvyšuje dále pouze nepatrně.



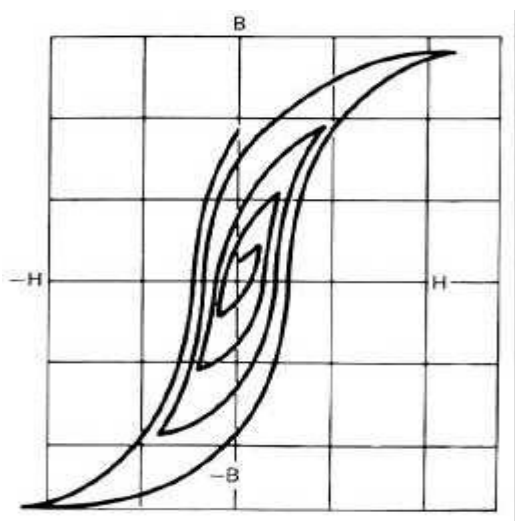
Obrázek 2-2: Hysterezní smyčka a křivka prvotní magnetizace[4]

Pokud budeme opět snižovat intenzitu magnetického pole, bude magnetizace klesat po odlišné křivce. Hodnota magnetizace odpovídající nulovému poli se nazývá remanentní magnetizace M_r , neboli remanence. Změnou směru magnetického pole může být dosaženo dalšího snižování magnetizace. Nulové magnetizace je opět dosaženo při intenzitě magnetického pole $-H_c$. Toto magnetické pole se nazývá koercivním polem. Při dalším zvyšování magnetického pole je opět dosaženo saturace materiálu v opačném směru.

I u feromagnetických látek lze obdobně jako u dia a paramagnetik zavést relativní permeabilitu, je však nutné, aby magnetizace probíhala po křivce prvotní magnetizace. Relativní permeabilita feromagnetik je na rozdíl od slabě magnetických látek mnohem vyšší než jedna a závisí na intenzitě magnetického pole.

2.2 Odmagnetování střídavým proudem

Nezmagnetizovaného stavu lze opět dosáhnout mimo jiné také opakovaným působením magnetického pole s proměnlivým směrem a klesající amplitudou. Remanence po jednotlivých cyklech pak klesá podle křivky prvotní magnetizace.

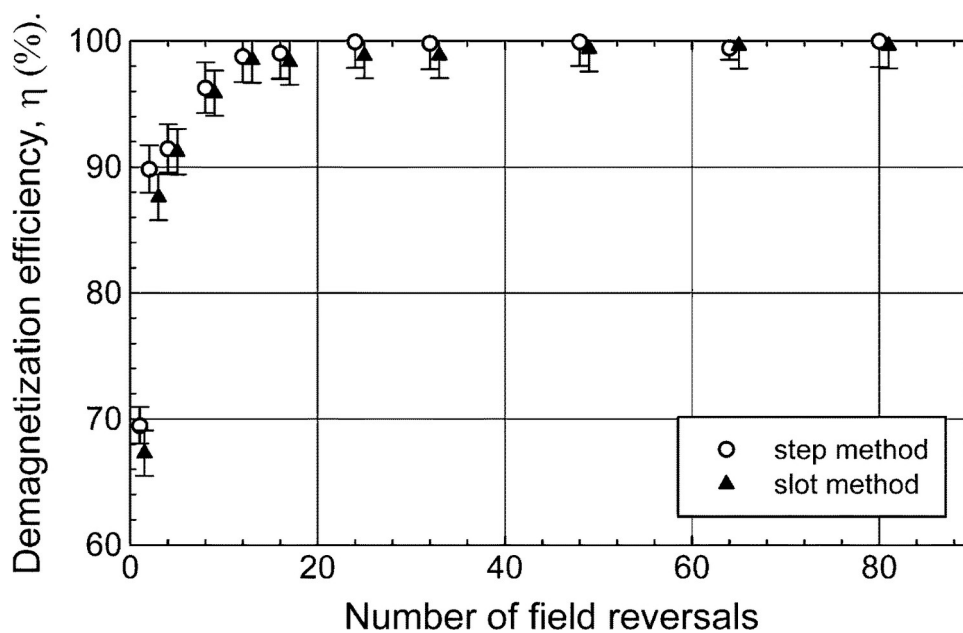


Obrázek 2-3: Hysterezní smyčky při odmagnetování[5]

Před několika lety byla na VUT v Brně vypracována bakalářská práce[6] zabývající se odmagnetováním MR tlumiče a reometru právě tímto způsobem. Mimo tuto práci nebyly nalezeny žádná další díla, která by se zabývala odmagnetováním konkrétně MR tlumičů, nicméně byla nalezena řada prací zkoumající vlivy parametrů demagnetizační funkce na ocelových vzorcích.

2.2.1 Vliv počtu reverzací

Při odmagnetování dochází k poklesu remanence při každé změně směru magnetického pole. Tato změna se nazývá reverzací. Experimentem na vzorku z nerezové oceli bylo zjištěno, že k podstatnému snížení magnetizace až o 90 % stačí pouze 2 reverzace, ale k úplnému odmagnetování dochází až při 25 a více reverzacích[7].

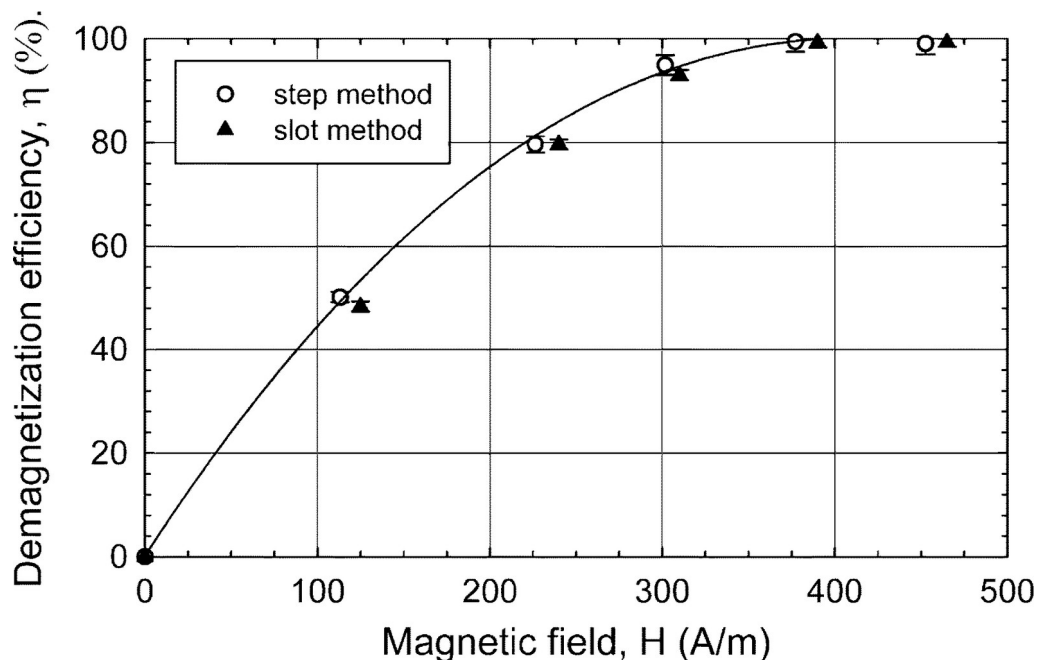


Obrázek 2-4: Závislost kvality odmagnetování na počtu reverzací[7]

Toto chování však nebylo kvůli značně deformovanému průběhu u MR pístu potvrzeno[6].

2.2.2 Vliv počáteční amplitudy

Pro nižší spotřebu el. energie je vhodné použití co nejmenšího proudu. Bylo zjištěno, že potřebná amplituda intenzity magnetického pole je rovná intenzitě magnetického pole, která způsobí úplnou změnu směru magnetické indukce oproti indukci po zmagnetování[7].

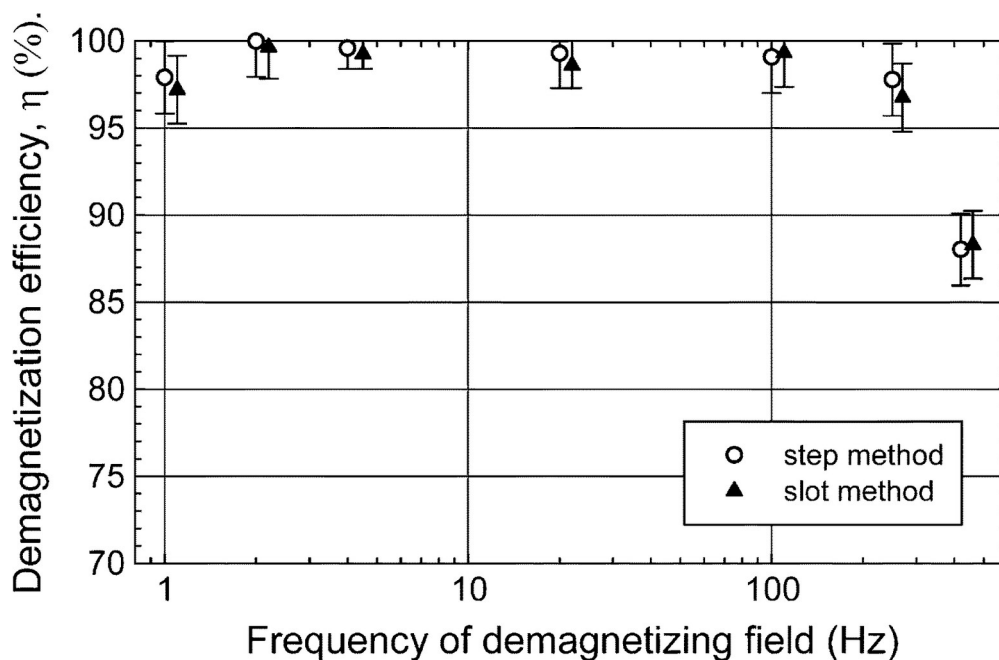


Obrázek 2-5: Závislost kvality odmagnetování na amplitudě intenzity magnetického pole[7]

U magnetických obvodů MR tlumiče a reometru bylo toto chování ověřeno. Bylo zjištěno, že u MR tlumiče má výrazný vliv na výslednou remanenci také poslední amplituda. [6]

2.2.3 Vliv frekvence

Vyšší frekvence umožňují snížení času potřebného k odmagnetování součásti, ale projevuje se u nich vliv vířivých proudů, které se indukují v materiálu a stíní magnetické pole. U vzorku byl zjištěn pokles účinnosti odmagnetování při frekvencích zhruba nad 100 Hz.



Obrázek 2-6: Závislost kvality odmagnetování na frekvenci[7]

U pístu se negativní vliv vířivých proudů projevili již při 20 Hz.[6]

2.2.4 Vliv tvaru modulace

Všechny dosud uvedené experimenty platí pro lineární pokles proudu. Je vhodné, aby také amplituda intenzity magnetického pole klesala lineárně. U magneticky tvrdých materiálů ($H_c > 100 \text{ A m}^{-1}$) tato lineární modulace proudu nesplňuje, používá se proto exponenciální[8] nebo logaritmická[9] modulace.

U MR tlumiče dochází při přímkové modulaci k dostatečně lineárnímu poklesu magnetické indukce a rozdíl mezi hodnotami remanence pro lineární a exponenciální modulaci je zanedbatelný [6].

2.3 Odmagnetování stejnosměrným proudem

U MR tlumičů používaných pro redukci vibrační staveb se používá odmagnetování proudem opačného směru působící po krátkou dobu. Potřebná velikost i doba bývají určeny experimentálně. Velikost proudu by neměla překročit 20% maximálního ovládacího proudu[10]. Doba se pohybuje v řádu zlomků sekundy[11]. Tento způsob lze však použít pouze pokud je známa historie používání pístu.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému a zhodnocení řešerše

S výjimkou práce [6] nebyly nalezeny žádné další práce, které by se zabývaly odmagnetováním MR tlumičů podobných rozměrů. Práce [10, 11] se zabývají tlumiči pro redukci vibrací budov, které jsou svými rozměry podstatně větší než testovaný tlumič, a tématu od-magnetování se dotýkají pouze okrajově.

V práci [6] nebyl zkoumán vliv tvaru průběhu a přímo vliv počtu reverzací, neboť to použité zařízení neumožňovalo. Nelze tedy z této práce vyvozovat závěry v těchto oblastech.

Lze předpokládat, že:

- K nejlepší účinnosti odmagnetování bude docházet, když bude maximální amplituda proudu stejná jako ovládací proud.
- Účinnost odmagnetování se výrazně sníží při vyšších frekvencích (okolo 100 Hz).
- Pro počet reverzací nad 25 již nebude při dalším zvyšování počtu reverzací docházet k podstatnému zlepšení kvality odmagnetování.
- Pokud bude možné generovat trojúhelníkový průběh bez výrazných deformací, pravděpodobně nebude jeho účinnost lepší oproti harmonickému.
- Vzhledem k vlastnostem magnetického obvodu tlumiče nebude mít tvar modulace významný vliv.
- Odmagnetování stejnosměrným proudem opačného směru nebude účinnější, nicméně pro určité aplikace, kdy je tlumič stále v provozu, je vhodnější, protože umožňuje odmagnetování i během provozu.

3.2 Cíl práce

Hlavním cílem práce je nalezení vhodného postupu odmagnetování MR tlumiče. Vhodnost postupu bude posuzována z hledisek účinnosti odmagnetování, energetické a časové náročnosti a výrobních nákladů případného zařízení.

Dílními cíly potřebnými pro realizaci jsou:

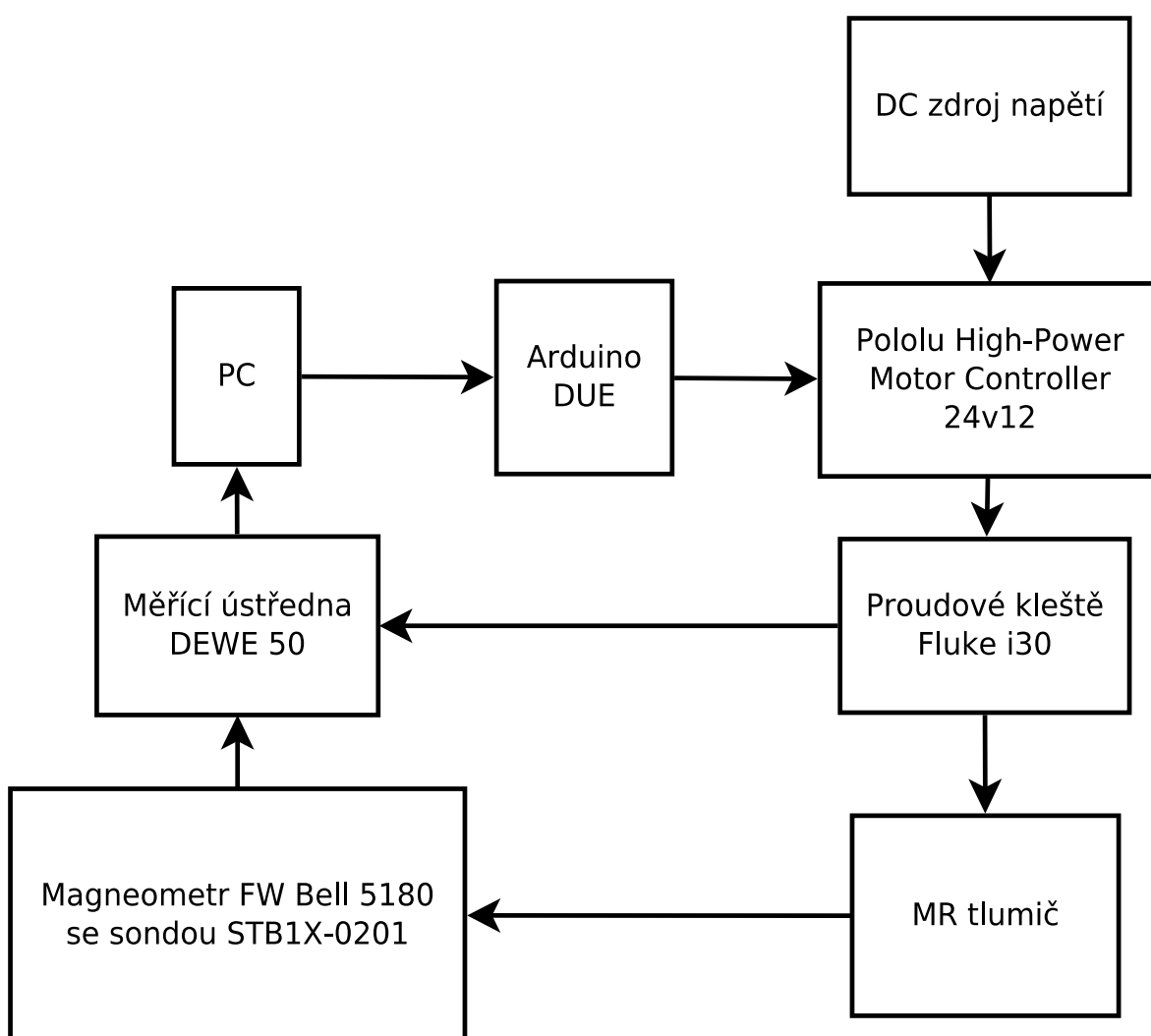
- Vytvoření obvodu pro odmagnetování založeném na Arduino DUE, včetně software umožňující ovládání pomocí příkazů a Arduino IDE.
- Realizace měřicího řetězce a experimentů, kdy budou testovány vlivy následujících parametřů:
 - frekvence
 - počtu reverzací
 - tvar průběhu

K dosažení tohoto cíle bude vytvořen obvod pro odmagnetování založený na Arduinu DUE a měřicí řetězec. Testován bude prioritně vliv frekvence, počtu reverzací a tvaru průběhu při odmagnetování střídavým proudem a vliv velikosti proudu pro odmagnetování stejnosměrným proudem.

4 MATERIÁL A METODY

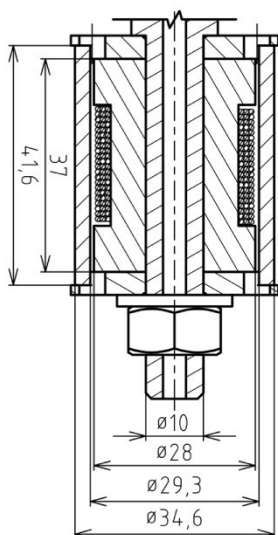
4.1 Měřicí řetězec

Na obr. 4-1 je schéma měřicího řetězce. Pro zaznamenávání dat v průběhu odmagnetování, byla použita měřicí ústředna DEWE-50. Vzorkovací frekvence byla 5000 Hz, což je pro frekvence demagnetizačního proudu do 100 Hz naprosto dostačující. Naměřená data byla dále uložena na disk PC.



Obrázek 4-1: Schéma měřicího řetězce

Píst a vnější plášť zkoumaného tlumiče je vyrobený z oceli S235JRG, jeho magnetický obvod je vyrobený z oceli 11SMn30. Rozměry a konstrukce pístu jsou zobrazeny na obrázku 4-2.



Obrázek 4-2: Geometrie pístu[12]

Magnetická indukce byla měřena pomocí magnetometru FW Bell 5180 a sondy STB1X-0201. Sonda magnetometru byla umístěna do štěrbinu pro průtok MR kapaliny. Proud protékající cívkou byl měřen proudovými kleštěmi Fluke i30.

Arduino DUE je jednodeskový počítač založený na mikrokontroleru AT91SAM3X8E. Jeho součástí je také 2-kanálový 12-bitový DAC převodník schopný poskytnout napětí mezi 0,55V až 2,75V.

Tímto napětím je ovládán zdroj proudu Pololu High-Power Motor Controller 24v12. Toto zařízení je původně určeno pro ovládání motoru a pro tuto aplikaci má některé nevhodné vlastnosti. Jeho výstupní proud závisí také na napájecím napětí a je tak nutné před použitím zařízení zkalibrovat. Aby se zabránilo náhodnému spuštění motoru, má také v okolí nuly pásmo necitlivosti (někdy nazýváno mrtvé pásmo nebo neutrální zóna), kdy nereaguje na nízké výchylky ovládacího napětí. Velikost tohoto pásma necitlivosti lze nastavit.

Arduino je ovládáno pomocí příkazů přes COM port PC a funkci Serial monitor programu Arduino IDE. Takto je možné nastavit parametry frekvence, počtu reverzací, amplitudy, tvaru průběhu a tvaru modulace, případně času pro odmagnetování stejnosměrným proudem a spouštět opětovné zmagnetování a odmagnetování.

Pro napájení zdroje proudu byl použit laboratorní zdroj stejnosměrného napětí GW Instek GPS-4303 a konstantní napětí 7 V.

Pro opětovné zmagnetování pístu tlumiče byl použit stejný zdroj proudu jako pro odmagnetování. Pokud není uvedeno jinak, byl tlumič zmagnetován proudem 4 A. Tomuto proudu odpovídá remanence 12,2 mT. Vliv nastavovaných parametrů byl zkoumán pro harmonický průběh.

4.2 Zkoumané průběhy

4.2.1 Odmagnetování střídavým proudem

Vytvořený software umožňuje generování harmonického a trojúhelníkového průběhu a jejich modulaci lineární nebo exponenciální funkcí. Pro implementaci sinusového průběhu byla použita funkce:

$$y(t) = m(t) \cdot a \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) + off, \text{ kde:}$$

$m(t)$ (1) modulační funkce, $m(t) \in \langle 0; 1 \rangle$

a (1) maximální amplituda

f (Hz) frekvence

t (s) čas

off (1) posunutí vůči nule, aby bylo možné realizovat i proud se záporným směrem

Pro implementaci trojúhelníkového průběhu byla obdobně použita funkce:

$$y(t) = m(t) \cdot 4 \cdot a \cdot f \cdot \left| \left(\left(x - \frac{1}{4 \cdot f} \right) \bmod \frac{1}{f} \right) - \frac{1}{2 \cdot f} \right| - a + off$$

Tato funkce používá operaci modulo (zbytek po dělení) a absolutní hodnotu a lze ji jednoduše realizovat i na počítačích s nízkým výpočetním výkonem[13]

Jako modulační funkci lze použít lineární nebo exponenciální funkci. Obě funkce jsou posunuty v čase a zhora omezeny, aby bylo dosaženo potřebné amplitudy.

Výsledná lineární modulační funkce je poté:

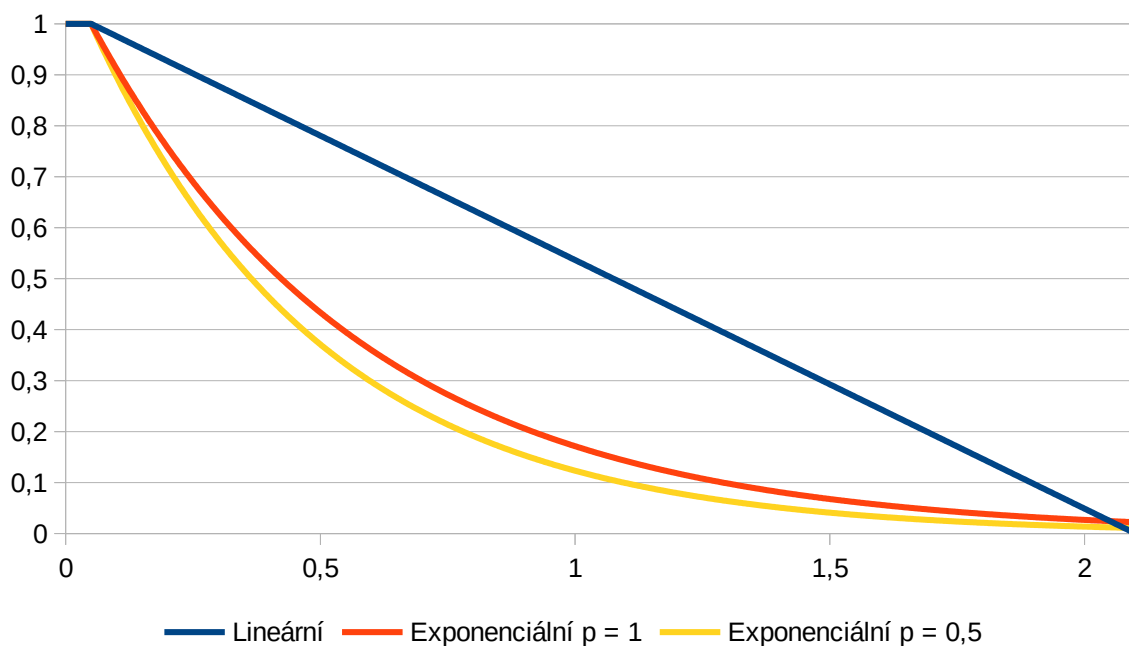
$$m(t) = \frac{-4f \cdot t + 2r + 2}{2r + 1}, \text{ kde:}$$

r (1) počet reverzací

Možných exponenciálních funkcí existuje nekonečně mnoho. Jednou z předností exponenciální funkce je nižší poslední amplituda, což by mělo zajišťovat lepší odmagnetování. Proto byl právě poměr mezi velikostí poslední amplitudy lineární a exponenciální modulační při stejných ostatních parametrech zvolen jako nastavitelný parametr. Použitá funkce má tedy tvar:

$$m(t) = \left(\frac{p}{1+2r} \right)^{\frac{4f \cdot t}{2r}}, \text{ kde:}$$

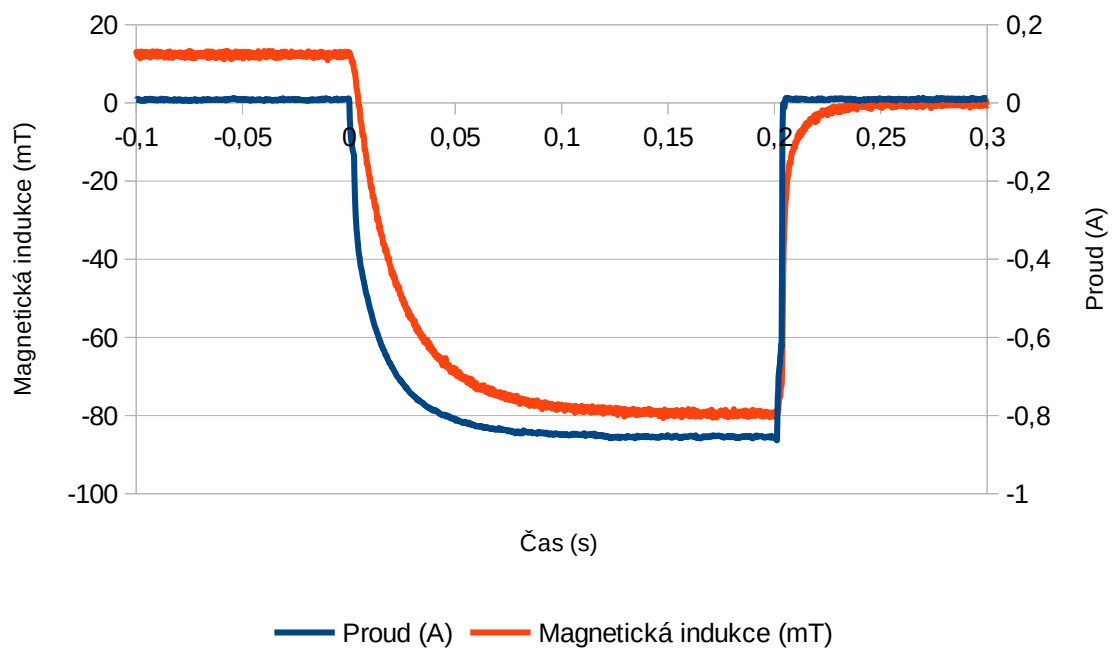
p (1) poměr mezi poslední amplitudou lineární a exponenciální modulační



Obrázek 4-3: Příklad modulačních funkcí pro $f=5\text{Hz}$ a $r=20$

4.2.2 Odmagnetování stejnosměrným proudem

Pro odmagnetování stejnosměrným proudem je nutné nastavit pouze 2 parametry, velikost proudu a dobu, po kterou působí. Kvalita odmagnetování nezávisí na době působení proudu, ta však musí být dostatečně dlouhá, aby bylo dosaženo požadovaného proudu po překonání přechodového jevu. Pro všechna měření byla nastavená doba $t = 0,2 \text{ s}$.



Obrázek 4-4: Příklad průběhu proudu a magnetické indukce při odmagnetování stejnosměrným proudem

4.3 Analýza dat

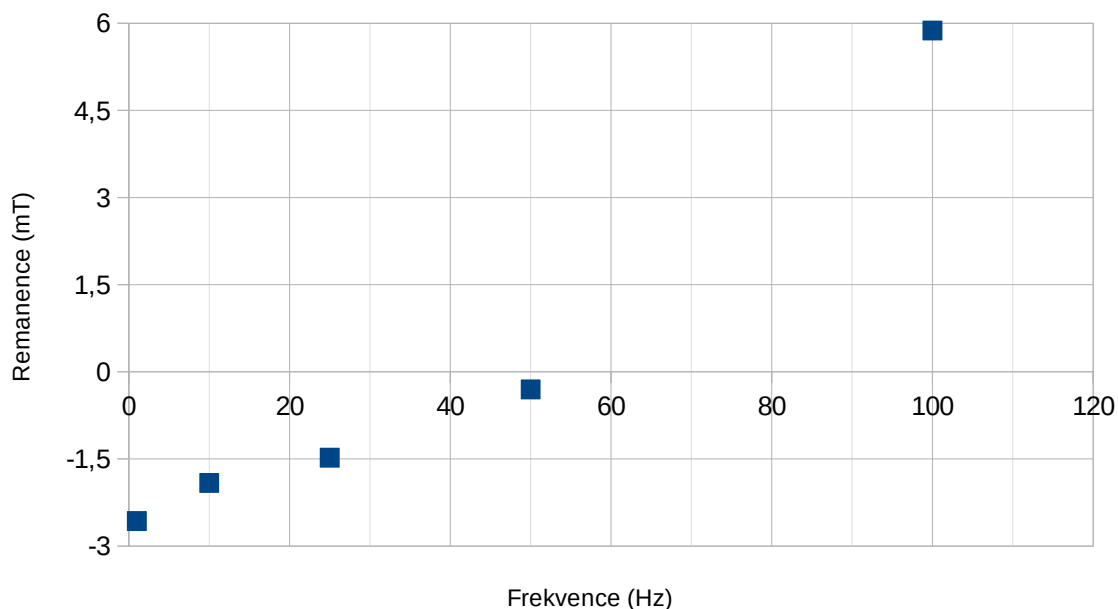
Pro měření, uložení a následnou analýzu dat byl použit software Dewesoft 7. Všechna měření byla opakována nejméně 3krát.

5 VÝSLEDKY

5.1 Odmagnetování střídavým proudem

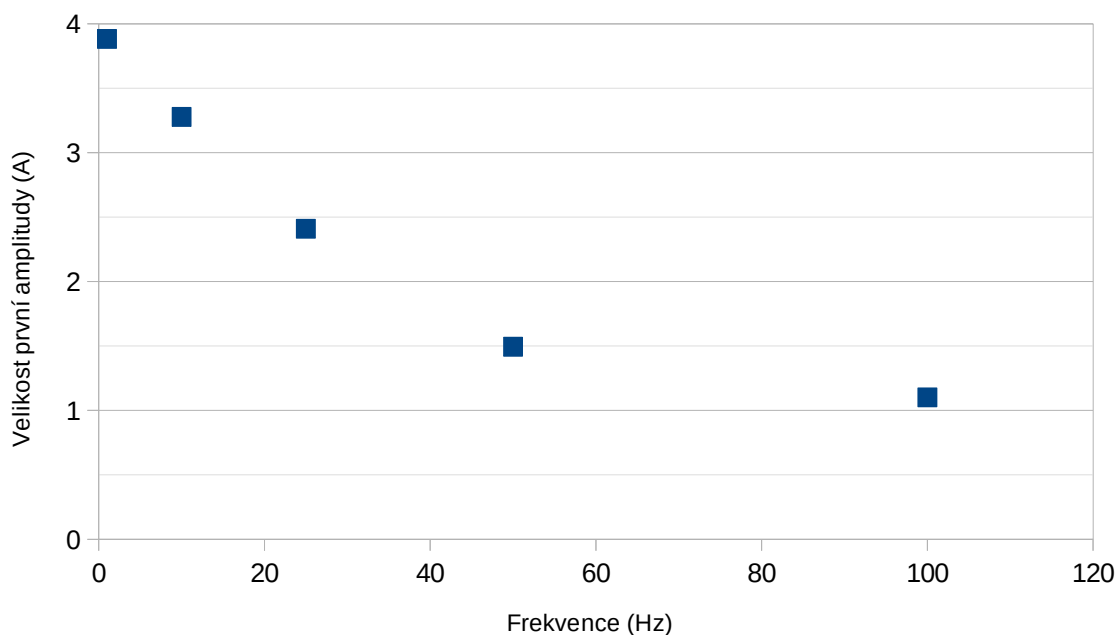
5.1.1 Vliv frekvence

Zprvu byl zkoumán vliv frekvence na výslednou remanenci při stálém počtu reverzací. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při frekvenci 50 Hz, a to $(-0,304 \pm 0,173)$ mT. Jelikož byly očekávány horší výsledky při takto vysokých frekvencích, byly jednotlivé průběhy blíže zkoumány, aby bylo možné vyloučit vliv jiných parametrů.



Obrázek 5-1: Porovnání remanence při různých frekvencích při 25 reverzacích

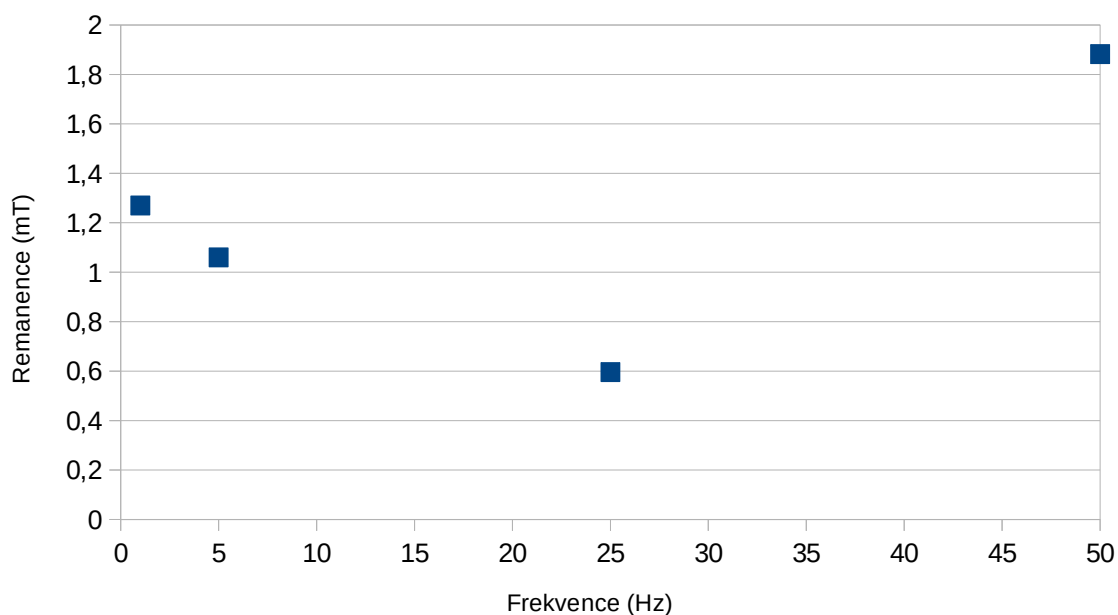
Bylo zjištěno, že i při zachování ostatních parametrů demagnetizační funkce klesá amplituda demagnetizační funkce s rostoucí frekvencí. Toto je způsobeno vyšší impedancí cívky. Změřené velikosti prvních amplitud při různých frekvencích jsou zobrazeny níže



Obrázek 5-2: Porovnání amplitud proudu při různých frekvencích

Výsledná remanence mohla být výrazně ovlivněna změnou velikosti proudu, a proto bylo měření opakováno, tentokrát však byla nastavená velikost amplitudy ručně upravována tak, aby byla skutečná amplituda stejná i při odlišných frekvencích.

Aby se bylo možné dosáhnout stejného proudu i při vyšších frekvencích, byla zvolena nižší amplituda proudu než při prvním měření, a to 2 A. Magnetizační proud byl rovněž 2 A. Všechny ostatní parametry zůstaly stejné.

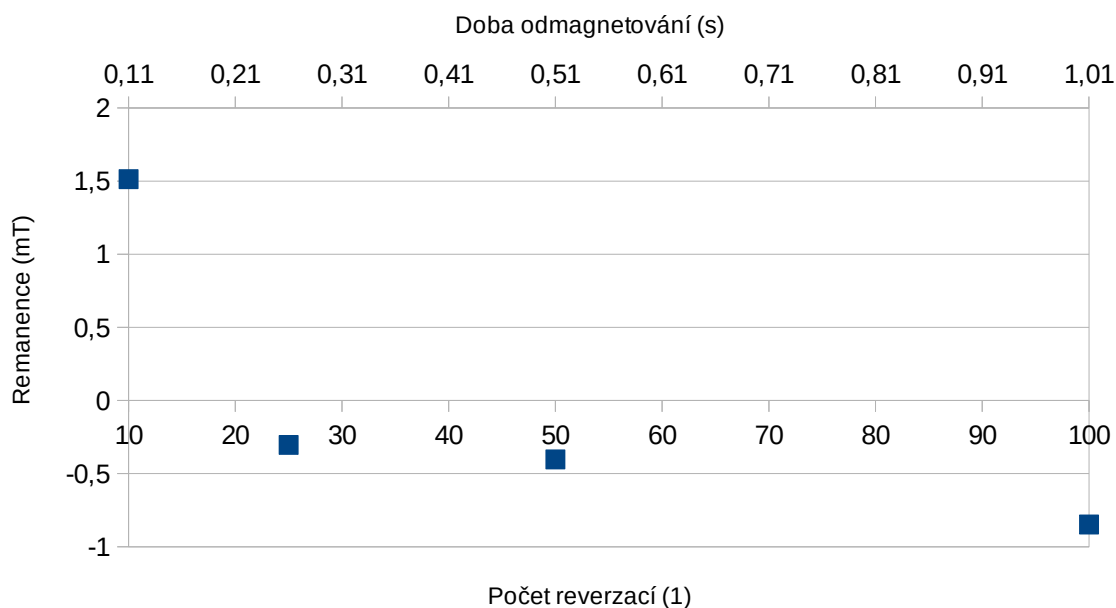


Obrázek 5-3: Porovnání remanence při různých frekvencích a stálém proudu

Do 25 Hz se obdobně jako při původním měření s rostoucí frekvencí remanence přibližovala nule, ale při frekvenci 50 Hz je výrazně vyšší. Protože však nebylo dosaženo saturace materiálu, nebylo možné dodržet stálou remanenci před odmagnetováním, která tak během série experimentů pro frekvenci 50 Hz byla výrazně vyšší (průměrně 11,3 mT pro 50 Hz, 8,3 mT pro ostatní měření).

5.1.2 Vliv počtu reverzací

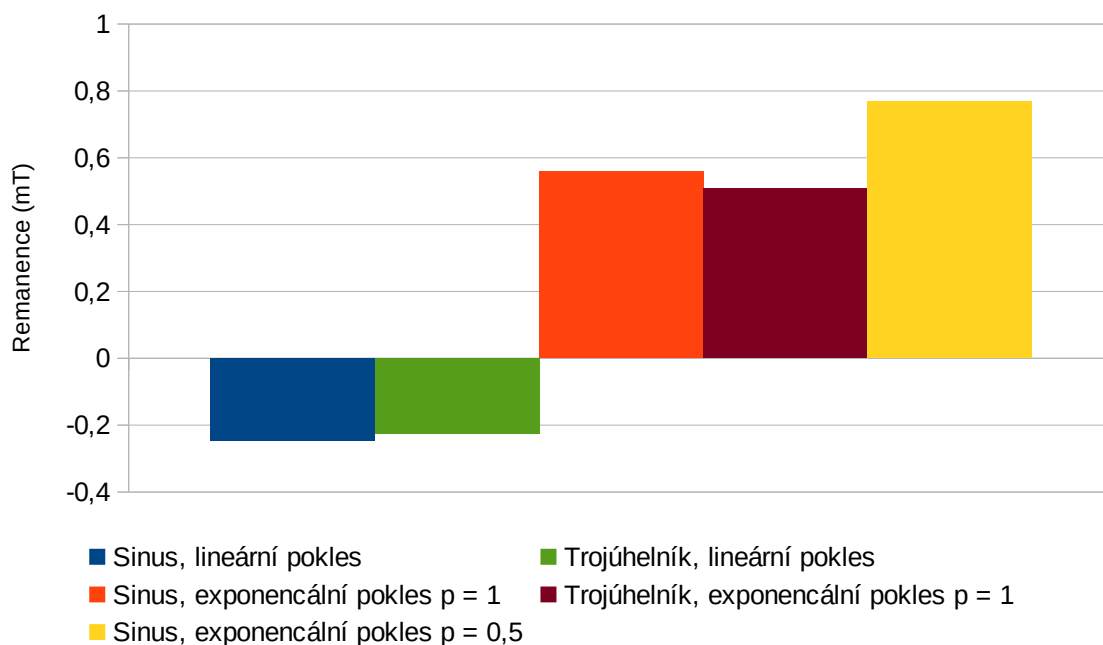
Protože bylo nejlepší remanence dosaženo při frekvenci 50 Hz, byl vliv počtu reverzací zkoumán při této frekvenci.



Obrázek 5-4: Závislost remanence na počtu reverzací při frekvenci 50 Hz

5.1.3 Tvar demagnetizační funkce

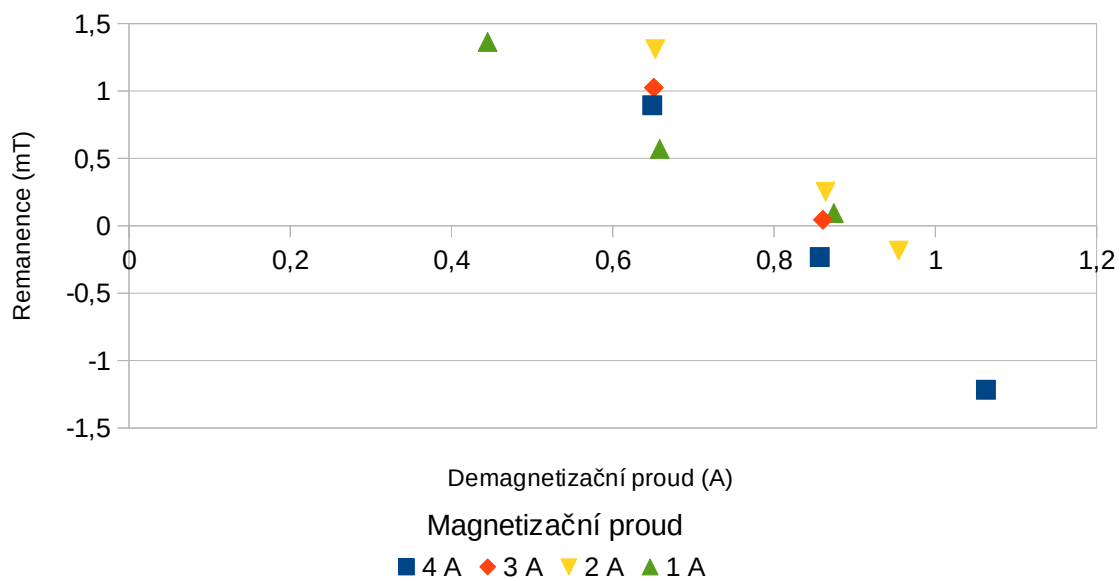
Na závěr bylo zkoumáno jaký vliv má změna tvaru průběhu nebo modulace na remanenci. Tyto experimenty byly provedeny pro frekvenci 5 Hz, 20 reverzací a amplitudu 2 A. Odmagnetování stejnosměrným proudem



Obrázek 5-5: Porovnání remanence při různých tvarech průběhu proudu

5.1 Odmagnetování stejnosměrným proudem

U odmagnetování stejnosměrným proudem byl jediným zkoumaným parametrem velikost proudu. Bylo zkoumáno též, jestli se potřebná velikost proudu mění s odlišným magnetizačním proudem.



Obrázek 5-6: Závislost remanence na velikosti proudu při odmagnetování stejnosměrným proudem

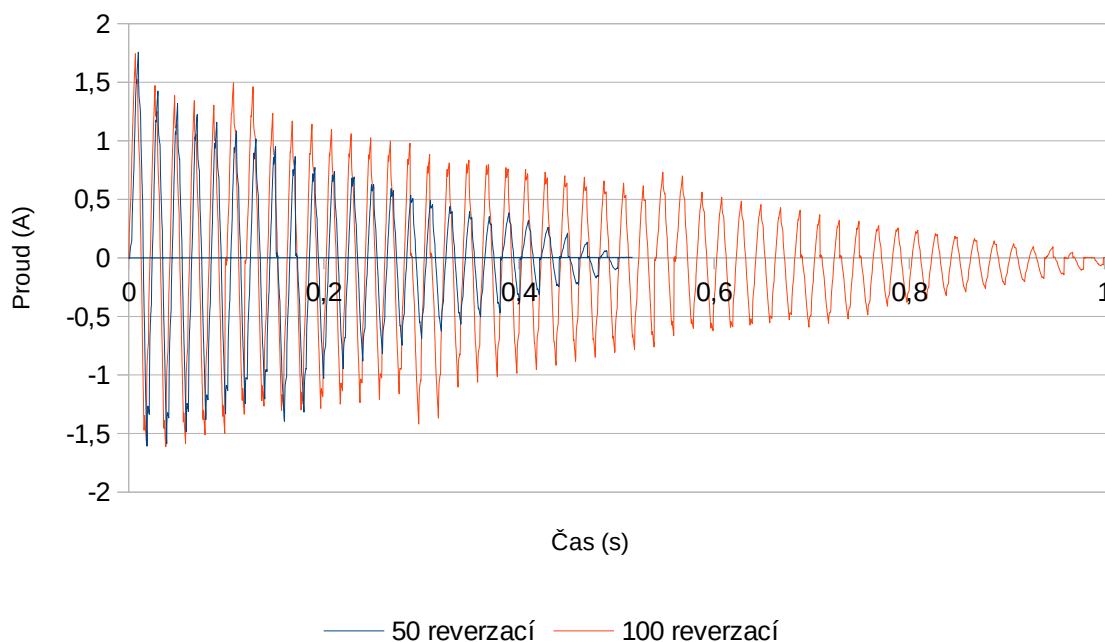
6 DISKUZE

V práci byly zkoumány 2 odlišné metody odmagnetování MR tlumiče, odmagnetování stejnosměrným nebo střídavým proudem. Obě metody mohou při správném nastavení dosahovat podobných výsledků.

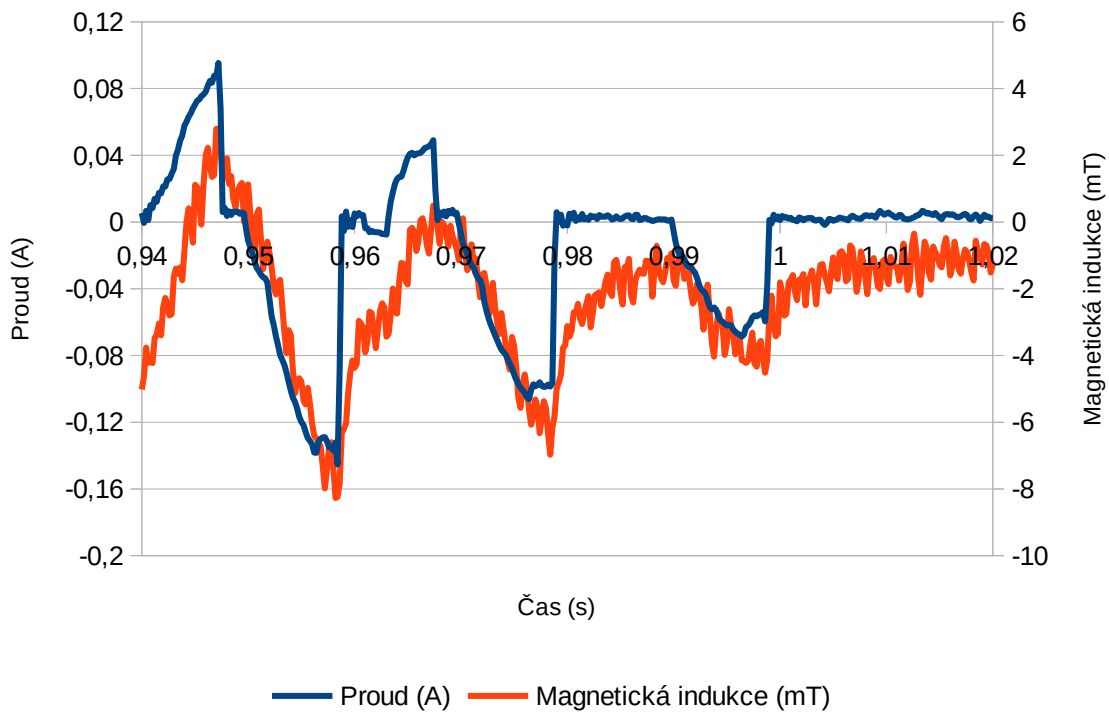
6.1 Odmagnetování střídavým proudem

U odmagnetování střídavým proudem nebyly potvrzeny některé předpoklady vyplývající z předcházejícího studia literatury, zejména vliv vyššího počtu reverzací a tvaru modulace.

Výrazně horší výsledek odmagnetování při 100 reverzacích lze vysvětlit vynecháním kladné půlperiody při nízké amplitudě na konci každého cyklu (viz Obrázek 6-2). Toto je způsobeno špatným nastavením vstupu zdroje proudu a jeho neutrální zóny.

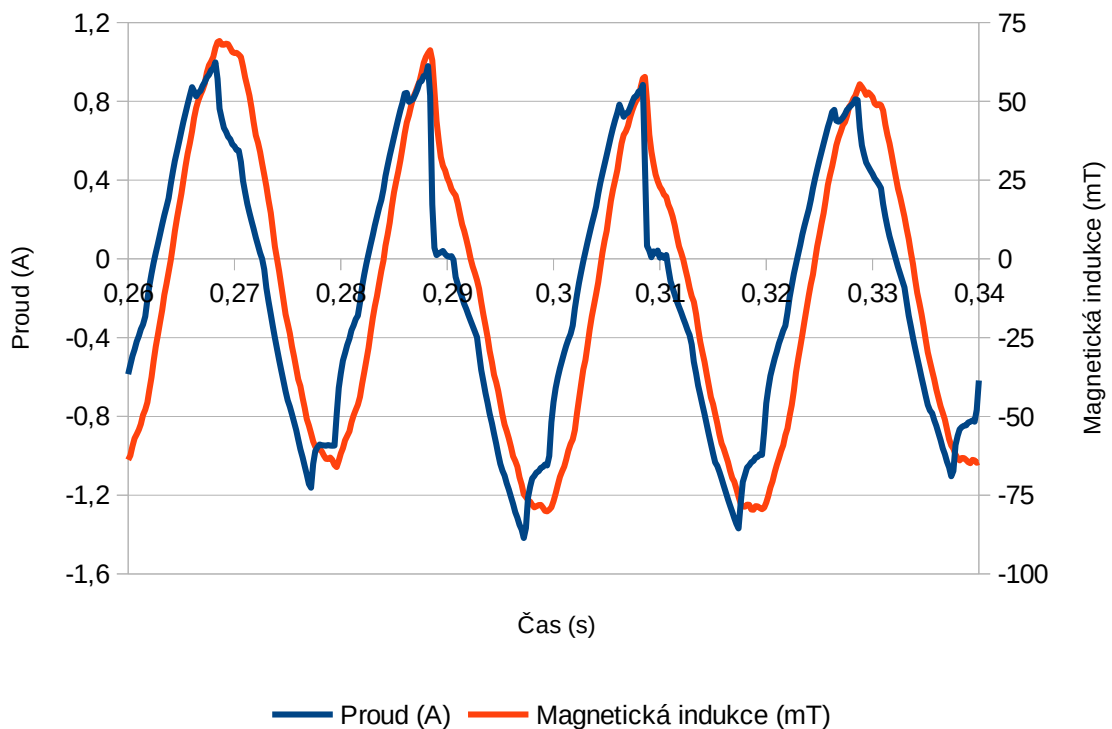


Obrázek 6-1: Porovnání průběhů proudu pro frekvenci 50 Hz a 50 nebo 100 reverzací



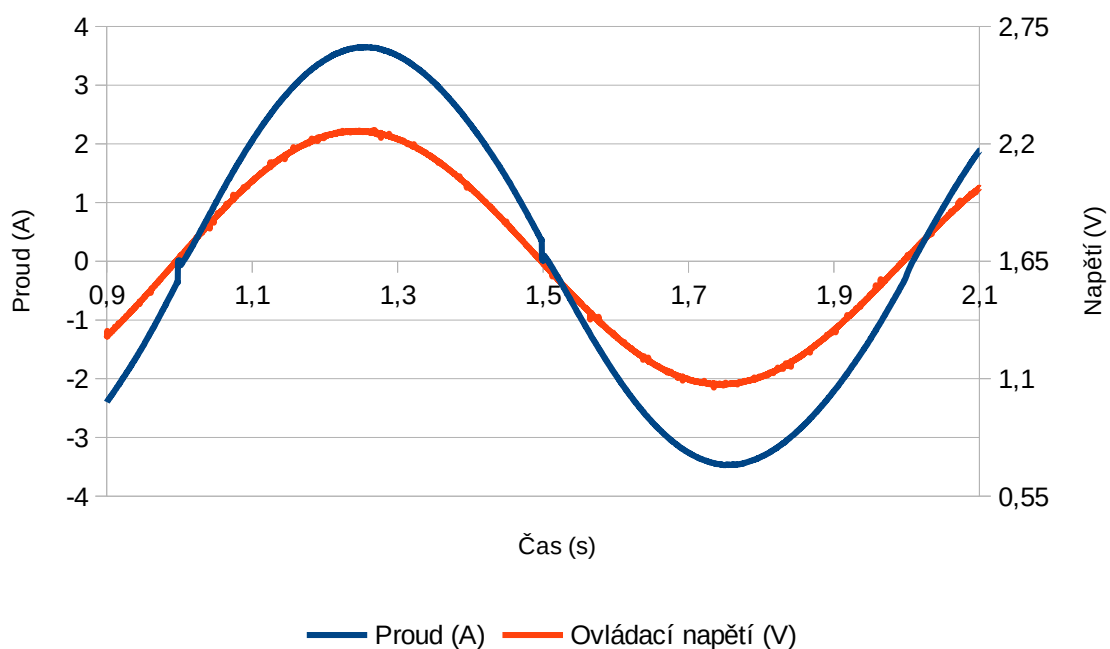
Obrázek 6-2: Detail průběhu proudu a magnetické indukce při frekvenci 50 Hz a 100 reverzací

Při frekvenci nad 25 Hz dochází k občasnému náhlému poklesu napětí i při vysoké amplitudě. Následující amplituda je poté často vyšší než předcházející. Příčina těchto poklesů není známa, zdroj proudu nehlásí žádnou chybu a ovládací napětí nevykazuje žádné deformace. K těmto poklesům může dojít při kladných i záporných půlvlnách. Průběh proudu a magnetické indukce během těchto poklesů je zobrazen na obrázku 6-3.



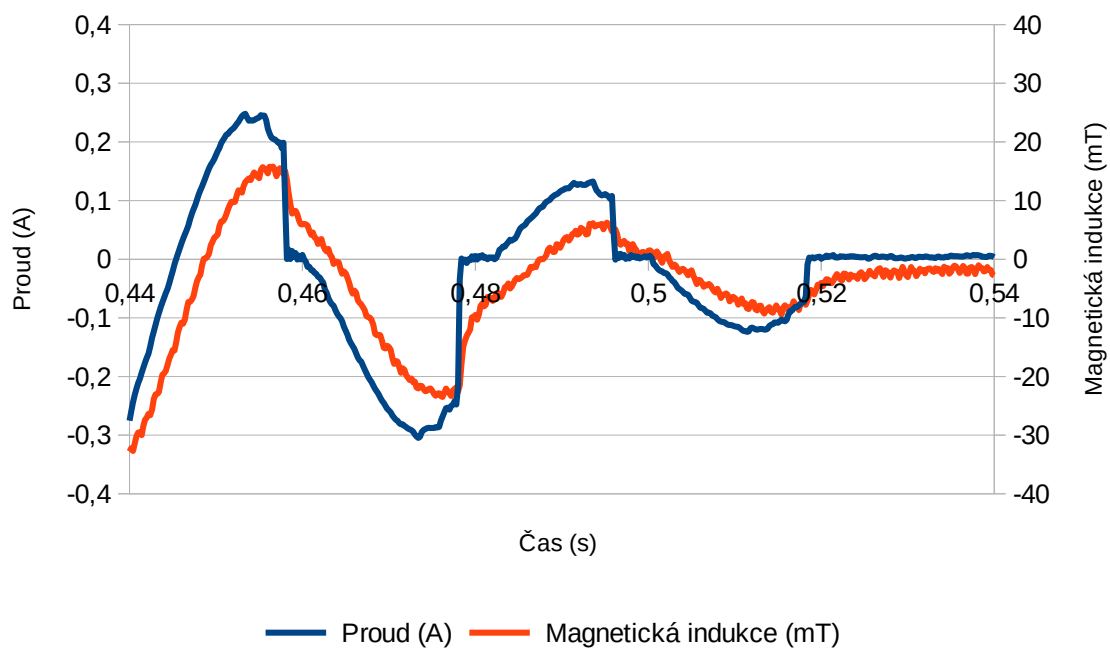
Obrázek 6-3: Detail průběhu proudu a magnetické indukce při frekvenci 50 Hz a 100 reverzací

Při frekvencích nižších než 10 Hz dochází při průchodu napětí neutrální zónou často k poklesu proudu na nulu i při vyšších amplitudách, jak je zobrazeno na obrázku 6-4. Toto je pravděpodobně způsobeno neutrální zónou, ale nepodařilo se změnou nastavení tento jev odstranit ani zmírnit.



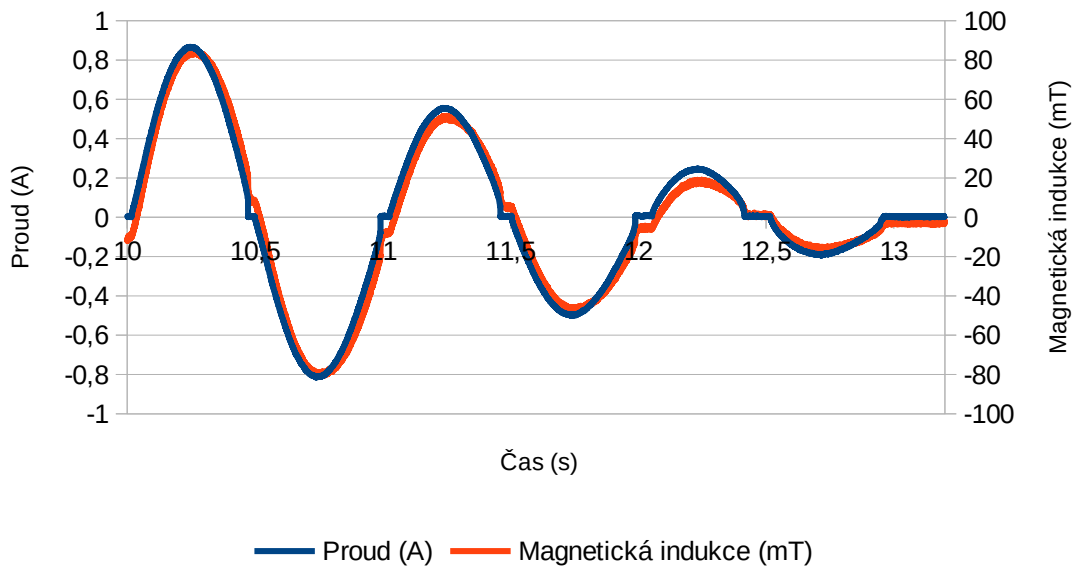
Obrázek 6-4: Detail průběhu proudu a ovládacího napětí při frekvenci 1 Hz a 25 reverzacích

Na konci odmagnetování dochází k dalším výrazným deformacím. Při frekvencích nad 5 Hz dochází k rychlým poklesům proudu na nulu (obrázek 6-5).



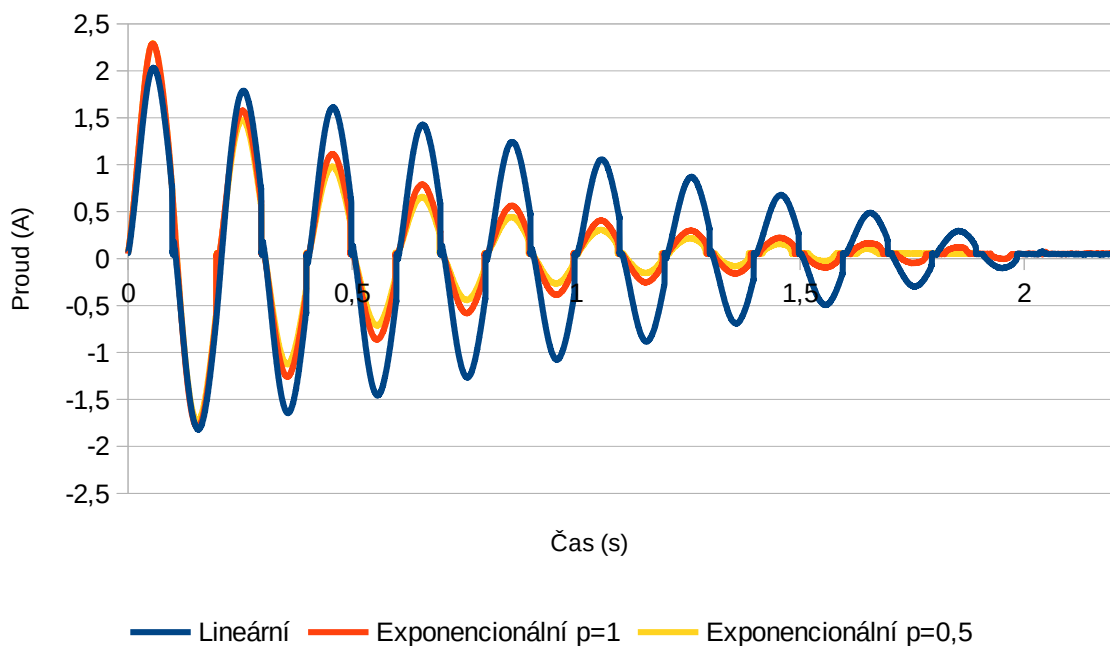
Obrázek 6-5: Detail průběhu proudu a magnetické indukce při frekvenci 25 Hz a 25 reverzacích

Oproti tomu se při nižších frekvencích pravidelně objevují mezi jednotlivými amplitudami pauzy způsobené neutrální zónou (obrázek 6-6). Jejím zmenšením je sice nelze zcela odstranit, ale pouze zkrátit.



Obrázek 6-6: Detail průběhu proudu a magnetické indukce při frekvenci 1 Hz a 25 reverzacích

Bylo zjištěno, že tvar průběhu nemá prokazatelný vliv na kvalitu odsmagnetování. Exponenciální pokles ve všech zkoumaných případech vykazuje výrazně větší remanenci. To může být způsobeno příliš nízkou amplitudou na konci odsmagnetování. Na konci odsmagnetování při poměru $p = 0,5$ je amplituda dokonce nižší než nastavená neutrální zóna a výsledný průběh je tak kratší než ostatní. Nebyl pozorován prokazatelný rozdíl mezi harmonickým a trojúhelníkovým průběhem. Pro praktické využití je však výhodnější použít harmonický průběh kvůli nižším požadavkům na použité zařízení.



Obrázek 6-7: Porovnání průběhů proudu pro lineární a různé exponenciální průběhy odsmagnetování

Pro odmagnetování je nejvhodnější použít co nejvyšší frekvence, při kterých se však ještě výrazně neprojeví vliv vířivých proudů, tj. 25 a 50 Hz.

Nejlepších výsledků bylo dosaženo při frekvenci 50 Hz a 25 reverzacích, a to ($-0,30 \pm 0,173$) mT. Proces odmagnetování při nastavení těchto parametrů trvá 0,26 s.

6.2 Odmagnetování stejnosměrným proudem

Při odmagnetování stejnosměrným proudem se ukazuje jako nejvýhodnější použít (při předchozí magnetizaci proudem 4 A) proud 0,86 A, kdy bylo dosaženo remanence ($-0,23 \pm 0,124$) mT. Použitá doba je 0,2 s, lze ji však mírně zkrátit. Tato metoda odmagnetování tak dosahuje mírně lepších výsledků za kratší dobu oproti odmagnetování střídavým proudem. Je však nutné dbát na polaritu vzhledem k původní magnetizaci.

Remanence před odmagnetováním po magnetizaci proudem 2 až 4 A liší pouze nepatrně a tyto rozdíly nevysvětlují rozdíly ve výsledné remanenci. Remanence před odmagnetováním po magnetizaci proudem 1 A je již zřetelně nižší, avšak i přesto je po odmagnetování proudem 0,86 A dosahováno velmi nízké remanence ($0,10 \pm 0,119$) mT.

6.3 Vliv MR kapaliny

Zjištěné výsledky platí pro tlumič bez MR kapaliny. MR kapalina se řadí mezi superparamagnetické materiály; má vysokou permeabilitu, ale nevykazuje remanenci[14]. Předpokládá se, že remanence po odmagnetování bude vyšší, protože vyšší magnetická indukce během odmagnetování způsobí vyšší remanenci. Je však pravděpodobně možné tuto remanenci dále snížit použitím menší amplitudy nebo změnou tvaru modulační křivky.

7 ZÁVĚR

Cílem práce bylo nalézt vhodný průběh pro odmagnetování MR tlumiče. Tento cíl byl splněn, dokonce byly nalezeny a experimentálně ověřeny průběhy pro 2 různé metody odmagnetování s velmi blízkými výsledky. Pro splnění tohoto cíle bylo sestaveno zařízení pro realizaci odmagnetování a vytvořen program pro jeho ovládání, který lze dále využít k dalším experimentům. Pro možné praktické využití výsledků je dále vhodné zjistit, jak se změni výsledky odmagnetování tlumiče po jeho naplnění MR kapalinou.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] WALOWSKI, Jakob a Markus MÜNZENBERG. Perspective: Ultrafast magnetism and THz spintronics. *Journal of Applied Physics* [online]. 2016, **120**(14) [vid. 2020-01-25]. ISSN 10897550. Dostupné z: doi:10.1063/1.4958846
- [2] *Permeability (electromagnetism) - Wikipedia* [online]. [vid. 2020-06-05]. Dostupné z: [https://en.m.wikipedia.org/wiki/Permeability_\(electromagnetism\)](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Permeability_(electromagnetism))
- [3] *File:VFPt magnets BH.svg - Wikimedia Commons* [online]. [vid. 2020-06-05]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VFPt_magnets_BH.svg
- [4] SEDLÁK, Bedřich. *Elektrina a magnetismus*. 2012. ISBN 978-80-246-2198-2.
- [5] *Figure 3-35. Hysteresis Loops Produced During Demagnetization* [online]. [vid. 2020-06-04]. Dostupné z: http://chemical-biological.tpub.com/TM-1-1500-335-23/css/TM-1-1500-335-23_274.htm
- [6] STRMISKA, Tomáš. *METODIKA ODMAGNETOVÁNÍ PÍSTU SPORTOVNÍHO MAGNETOREOLOGICKÉHO TLUMIČE* [online]. B.m., 2015. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/84093>
- [7] OXLEY, Paul. Apparatus for magnetization and efficient demagnetization of soft magnetic materials. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2009, **45**(9), 3274–3283. ISSN 00189464. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.2009.2020795
- [8] JU, Hye Sun, Hyuk WON, Hyun Ju CHUNG a Gwan Soo PARK. A study on the deperm protocols considering demagnetizing field of a ferromagnetic material. *Journal of Magnetics* [online]. 2014, **19**(1), 43–48. ISSN 12261750. Dostupné z: doi:10.4283/JMAG.2014.19.1.043
- [9] THIEL, F., A. SCHNABEL, S. KNAPPE-GRÜNEBERG, D. STOLLFUSS a M. BURGHOFF. Proposal of a demagnetization function. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2007, **43**(6), 2959–2961. ISSN 00189464. Dostupné z: doi:10.1109/TMAG.2007.893717
- [10] WEBER, Felix. Robust force tracking control scheme for MR dampers. *Structural Control and Health Monitoring* [online]. 2015, **22**(12), 1373–1395 [vid. 2020-02-06]. ISSN 15452263. Dostupné z: doi:10.1002/stc.1750

- [11] ZEMP, Rene, Juan C. DE LA LLERA a Paul ROSCHKE. Tall building vibration control using a TM-MR damper assembly: Experimental results and implementation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* [online]. 2011, **40**(3), 257–271 [vid. 2020-02-19]. ISSN 10969845. Dostupné z: doi:10.1002/eqe.1021
- [12] STRECKER, Zbyněk, Michal KUBÍK, Petr VÍTEK, Jakub ROUPEC, David PALOUŠEK a Vít ŠREIBR. Structured magnetic circuit for magnetorheological damper made by selective laser melting technology. *Smart Materials and Structures* [online]. 2019, **28**(5), 055016. ISSN 0964-1726. Dostupné z: doi:10.1088/1361-665X/ab0b8e
- [13] *Triangle wave* - *Wikipedia* [online]. [vid. 2020-03-06]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Triangle_wave
- [14] CARLSON, J.David a Mark R JOLLY. MR fluid, foam and elastomer devices. *Mechatronics* [online]. 2000, **10**(4–5), 555–569. ISSN 09574158. Dostupné z: doi:10.1016/S0957-4158(99)00064-1

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

MR	magnetoreologický
PC	personal computer(osobní počítač)
DAC	digital-to-analog converter(digitálně analogový převodník)
B	magnetická indukce
H	intenzita magnetického pole
M	magnetizace
μ_0	permeabilita vakua
μ_r	relativní permeabilita
H_s	intenzita nasycení
M_r	remanentní magnetizace
H_c	koercivní pole
$m(t)$	modulační funkce
a	maximální amplituda
f	frekvence
t	čas
off	posunutí vůči nule
r	počet reverzací

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obrázek 2-1: Porovnání siločar magnetické indukce B a intenzity magnetického pole H[3]	12
Obrázek 2-2: Hysterezní smyčka a křivka prvotní magnetizace[4].....	13
Obrázek 2-3: Hysterezní smyčky při odmagnetování[5].....	14
Obrázek 2-4: Závislost kvality odmagnetování na počtu reverzací[7].....	14
Obrázek 2-5: Závislost kvality odmagnetování na amplitudě intenzity magnetického pole[7].....	15
Obrázek 2-6: Závislost kvality odmagnetování na frekvenci[7].....	16
Obrázek 4-1: Schéma měřicího řetězce.....	19
Obrázek 4-2: Geometrie pístu[12].....	20
Obrázek 4-3: Příklad modulačních funkcí pro $f=5\text{Hz}$ a $r=20$	22
Obrázek 4-4: Příklad průběhu proudu a magnetické indukce při odmagnetování stejnosměrným proudem.....	23
Obrázek 5-1: Porovnání remanence při různých frekvencích při 25 reverzacích.....	24
Obrázek 5-2: Porovnání amplitud proudu při různých frekvencích.....	25
Obrázek 5-3: Porovnání remanence při různých frekvencích a stálém proudu.....	25
Obrázek 5-4: Závislost remanence na počtu reverzací při frekvenci 50 Hz.....	26
Obrázek 5-5: Porovnání remanence při různých tvarech průběhu proudu.....	27
Obrázek 5-6: Závislost remanence na velikosti proudu při odmagnetování stejnosměrným proudem.....	28
Obrázek 6-1: Porovnání průběhů proudu pro frekvenci 50 Hz a 50 nebo 100 reverzací.....	29
Obrázek 6-2: Detail průběhu proudu a magnetické indukce při frekvenci 50 Hz a 100 reverzací.....	30

Obrázek 6-3: Detail průběhu proudu a magnetické indukce při frekvenci 50 Hz a 100 reverzací.....	30
Obrázek 6-4: Detail průběhu proudu a ovládacího napětí při frekvenci 1 Hz a 25 reverzacích.....	31
Obrázek 6-5: Detail průběhu proudu a magnetické indukce při frekvenci 25 Hz a 25 reverzacích.....	31
Obrázek 6-6: Detail průběhu proudu a magnetické indukce při frekvenci 1 Hz a 25 reverzacích.....	32
Obrázek 6-7: Porovnání průběhů proudu pro lineární a různé exponenciální průběhy odmagnetování.....	32

11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha I	Laboratorní protokol
Příloha II	Program pro Arduino DUE