

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera

Návrh přípravku pro magnetování permanentních magnetů a posilování magnetů  
alternátorů

Ondřej Kohoutek

Bakalářská práce  
2018

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej Kohoutek**  
Osobní číslo: **D15323**  
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**  
Studijní obor: **Elektrotechnické a elektronické systémy v dopravě**  
Název tématu: **Návrh přípravku pro magnetování permanentních magnetů a posilování magnetů alternátorů**  
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

- 1/ Teoretický rozbor magnetických vlastností materiálů
- 2/ Princip magnetizace
- 5/ Výpočet magnetického obvodu a návrh napájecího zdroje
- 4/ Konstrukční návrh a jeho realizace
- 5/ Oživení přípravku
- 6/ Odzkoušení funkce na konkrétním alternátoru

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

**PATOČKA, Miroslav. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. V Brně: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.**

**CIGÁNEK, Ladislav. Magnetické pole nasyceného indukčního motoru. Bratislava: Slovenská akadémia vied, 1965.**

**PAVLICA, Lubomír a Jiří KRÚŠEK. Magnetické zesilovače a transformátorky. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. Knížnice automatizace**

Vedoucí bakalářské práce:

**doc. Ing. Stanislav Gregora, Ph.D.**

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací  
techniky v dopravě

Datum zadání bakalářské práce: **2. března 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **18. května 2018**



loc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.  
děkan

L.S.



Ing. Dušan Čermák, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 12. března 2018

## **Prohlášení autora**

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 18. 5. 2018

Ondřej Kohoutek

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat mé rodině za trpělivost při studiu a řešení této bakalářské práce. Dále pak svému vedoucímu v zaměstnání Viktoru Eftimovi za podporu po celou dobu studia. V neposlední řadě také vedoucímu práce panu doc. Ing. Stanislavu Gregorovi Ph.D. za přínosné konzultace a vstřícný přístup a všem dalším vyučujícím za konzultace a cenné informace, které mi poskytli.

**Anotace**

Bakalářská práce se zabývá rozbořem magnetických vlastností materiálů, způsoby magnetizace a návrhem přípravku pro magnetování magneto setrvačnicku. Práce dále obsahuje měření na konkrétním magnetu.

**Klíčová slova**

Magnetizace, magnetizér, magnetování, posilování magnetů

**Title**

Design of equipment for magnetizing of permanent magnets and amplifying the magnets of electric alternators.

**Annotation**

This bachelor thesis deals with magnet materials properties analysis, means of material magnetization and it further contains a magnetization fixture design for magnetization of permanent magnets in alternator rotors. The last chapter shows the results measured on one sample of rotor used in a motorbike after magnet boosting process.

**Keywords**

Magnetization, magnetizer, magnetizing, magnet booster

## Obsah

Úvod.....	10
Historie.....	11
1 Cíl práce.....	12
2 Magnetické pole ve hmotném prostředí.....	13
2.1 Magnetické vlastnosti atomů.....	13
2.2 Veličiny magnetického pole.....	14
2.3 Vliv prostředí na magnetické pole.....	15
2.4 Druhy magnetických látek.....	16
2.4.1 Diamagnetické látky.....	16
2.4.2 Paramagnetické látky.....	16
2.4.3 Feromagnetické látky.....	17
2.5 Magnetizační křivka.....	18
2.5.1 Panenská magnetizační křivka.....	18
2.5.2 Hysterezní smyčka.....	19
2.6 Druhy feromagnetik.....	20
2.6.1 Magneticky měkké materiály.....	20
2.6.2 Magneticky tvrdé materiály.....	20
3 Rozdělení magnetů a jejich vlastnosti.....	21
3.1 Feritové permanentní magnety.....	21
3.2 AlNiCo permanentní magnety.....	22
3.3 Permanentní magnety ze vzácných zemin.....	23
3.3.1 Samarium-kobaltové magnety.....	24
3.3.2 Neodymové magnety.....	25
3.4 Přednostní osa orientace.....	26
3.5 Curieova teplota.....	27
4 Magnetické obvody.....	28
4.1 Rozbor jednoduchého magnetického obvodu.....	29
5 Rozbor problematiky magnetizace.....	30

5.1	Analýza návrhu magnetizačních přípravků.....	30
5.2	Analýza návrhu magnetizéru.....	31
5.2.1	Spínače.....	31
5.2.2	Kondenzátory.....	32
5.3	Obvodová řešení magnetizérů.....	33
5.3.1	Půlperiodový magnetizér.....	34
5.3.2	Pulzní magnetizér s ignitronem.....	35
5.3.3	Pulzní magnetizér s tyristorem.....	36
6	Konstrukční návrh a jeho realizace.....	37
6.1	Přehled magneto setrvačníků.....	37
6.2	Materiálová analýza magneto setrvačnicku.....	39
6.3	Simulace magnetického obvodu.....	41
6.4	Návrh magnetizačního přípravku.....	43
6.4.1	Mechanické parametry rotoru.....	43
6.4.2	Návrh pólových nástavců.....	44
6.4.3	Návrh vinutí.....	44
6.4.4	Návrh podstavy.....	46
6.5	Návrh zdroje pro impulzní magnetování.....	47
6.5.1	Simulace v programu LTspice.....	48
6.5.2	Tyristor a spínání.....	50
6.5.3	Spínací obvod.....	51
6.5.4	Dimenzování usměrňovače.....	52
6.5.5	Nabíjení kondenzátorů.....	53
6.5.6	Polovodičové relé.....	54
6.5.7	Vybíjecí obvod.....	55
6.5.8	Elektromechanická konstrukce.....	56
6.5.9	Návrh a výroba DPS.....	56
7	Oživení a naměřené hodnoty.....	57
7.1	Měření remanence rotoru před posílením.....	58
7.2	Průběh magnetizačního proudu.....	59
7.3	Měření remanence rotoru po zmagnetování.....	61



8	Závěr .....	62
	Seznam použité literatury .....	63
	Seznam značek a zkratk .....	64
	Seznam obrázků .....	66
	Seznam tabulek .....	67
	Seznam příloh .....	68
	Příloha A Seznam použitých součástí .....	69
	Příloha B Celkové obvodové schéma .....	70
	Příloha C Výkres podstavy .....	71
	Příloha D Výkres pólového nástavce .....	72

## Úvod

Permanentní magnety jsou již mnoho let součástí elektrických strojů a elektrotechnických zařízení. V elektrotechnice například jako součásti relé, ve strojírenství v různých brzdných zařízeních, v oblasti telekomunikací například v reproduktorech, mikrofonech nebo v energetice jako zdroj magnetického pole v dynamech, generátorech či motorech. Již pro první druhy magnetů bylo nutno vyrobit zařízení umožňující zmagnetování materiálu, a tedy dokončení poslední fáze výroby magnetu. Tato zařízení se vyvíjela spolu s novými druhy elektronických součástek. Většinou se jedná o přístroje složené ze dvou částí, a to je zdroj a magnetizační přípravek. V poslední době jsou u moderních zařízení integrované různé ovládací prvky umožňující nastavení velikosti magnetizačního proudu a napětí, fluxmetr sloužící ke změření magnetických vlastností zmagnetovaných komponent a v neposlední řadě prvky bezpečné obsluhy. U starších typů magnetů je také nutné v případě ztráty magnetických vlastností tyto obnovit, k tomu se využívá zpravidla stejných zařízení. Liší se hlavně v tom, jaké materiály jsou schopny zmagnetovat, což se odvíjí od velikosti magnetického pole, které jsou schopny tyto přístroje vyvinout.

Využití permanentních magnetů nabývá v posledních letech na významu zejména s objevy velmi silných magnetů na bázi materiálů ze vzácných zemin (Sm, Nd) a přechodového kovu (Co, Fe). Technologický pokrok ve vývoji materiálů také zlepšil značnou náchylnost ke korozi magnetů NdFeB, takže je možno tyto materiály použít za normálních podmínek i bez dodatečné povrchové úpravy. Příznivých vlastností permanentních magnetů je využíváno například v synchronních motorech s permanentními magnety. Díky menším rozměrům a vysoké remanenci přibližně 1 T až 1,25 T je možno dosáhnout vyššího točivého momentu motoru. U trakčních pohonů lze tedy dosáhnout menších rozměrů a hmotnosti stroje, avšak za cenu horšího chlazení, proto se používá u motorů větších výkonů vodní chlazení.

V současnosti je vybavena trakčními motory s permanentními magnety tramvaj Škoda 15T ForCity [4]. Další oblastí, kde se prosadily stroje s permanentními magnety, je automobilový průmysl, kde můžeme zmínit například integrovaný startér-generátor (ISG). Jedná se o zařízení zastávající tři základní funkce v hybridních elektrických vozidlech. Jedná se o startování, a to jak za studena, tak v provozu za použití tzv. start-stop systému, nabíjení akumulátoru vozidla jak pohonem vlastního spalovacího motoru, tak rekuperací brzděním či jízdou z kopce. Poslední funkcí je zvýšení krátkodobého kroutícího momentu například při jízdě do kopce, kdy se ISG připojí jako dodatečný pohon vozidla.

## Historie

Samotné slovo magnet pochází z řečtiny, původní označení bylo „Magnésijský kámen“. Magnesia byla oblast v Antickém Řecku, kde se nacházely ložiska magnetitu. Jedná se o přírodní magnet, železitý ferit  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Tento materiál byl využíván pro výrobu železa a byl zmagnetován magnetickým polem Země. Pomocí tohoto přírodního magnetu byly také magnetovány střelky prvních kompasů vyráběné z oceli. V roce 1600 William Gilbert vydal práci, ve které uvádí tři způsoby, jak zmagnetizovat ocelovou jehlu. Jako první uvedl kontakt s magnetitem, jako druhý tažení za studena s orientací sever-jih a jako třetí vystavení magnetickému poli Země s orientací sever-jih. Zároveň ve své práci zmiňuje, že magnet ztrácí své vlastnosti, pokud je rozpálený do ruda. V roce 1820 Oersted objevil magnetické pole obklopující vodič protékaný proudem a krátce na to Ampère odvodil obecný vztah mezi elektrickým proudem ve vodiči a magnetickým polem. První solenoid byl vyroben Williamem Sturgeonem v roce 1824 a po několika vylepšeních bylo možné magnetizovat za pomoci elektrického proudu.

Permanentní magnety vyrobené z oceli mají velmi malou koercitivní sílu v porovnání s novějšími materiály používanými dnes a mohou se snadno odmagnetovat. V roce 1932 byl objeven nový materiál Alnico, který je stabilnější a obtížněji se magnetuje. S dalšími objevy a vyroběním magnetů ze vzácných zemin (RE) na bázi samarium-kobaltu a neodymu stoupl význam magnetů díky vyšší vnitřní energii a vysoké koercivitě obzvláště v elektromechanických aplikacích. Pro tyto materiály bylo nutno vyvinout zařízení pro jejich magnetování kvůli potřebě mnohem většího magnetizačního pole. To bylo efektivně možné až s rozvojem polovodičů, které nahradily igratrony používané jako spínače do té doby. Nároky na tato zařízení rostou s tím, jak jsou objevovány nové materiály pro silnější magnety s větší energií.

# 1 Cíl práce

V této práci se zabývám jak návrhem obvodu, který používá jako zdroj energie banku kondenzátorů a tyristor jako výkonový spínací prvek, tak samotným elektromechanickým návrhem magnetizačního přípravku.

V první části mé práce uvádím čtenáře do problematiky magnetů, a to od atomárních vlastností látek, tedy od vlastní fyzikální podstaty magnetizmu. Plynule navazuje kapitola pojednávající o vlastnostech magnetik, za níž následuje rozbor magnetů a jejich vlastností, který je klíčový pro návrh magnetizéru i magnetizačního přípravku. Další kapitoly se pak věnují samotné problematice návrhu magnetizéru a přípravků. Důležitou částí je také simulace magnetického obvodu a na závěr samotný mechanický a elektrický návrh.

Pro vývoj byly použity magneto setrvačnický z motocyklu, nicméně po úpravě magnetického obvodu buď přidáním adaptérů prodlužujících magnetické nástavce, které umožňují zmagnetovat rotory o stejném počtu pólů, jako má přípravek, nebo výměnou přípravku za více pólový i další typy magneto setrvačnicků či rotorů. Má to však svá omezení, kterými se budu zabývat v části o mechanické konstrukci. Jedná se koncepčně o relativně nízkonákladové zařízení v porovnání s komerčně prodávanými výrobky, které jsou navrženy pro řádově vyšší proudy a napětí.

Celkově bylo nutno práci přizpůsobit danému tématu, které je velmi komplexní a bez pochopení celé problematiky a teorie se nelze do stavby zařízení pustit. Proto je část rozboru před samotnou konstrukcí poměrně obsáhlá.

## 2 Magnetické pole ve hmotném prostředí

### 2.1 Magnetické vlastnosti atomů

Magnetické vlastnosti látek jsou dané magnetickými vlastnostmi elektronů, jader atomů a molekul. Atom je složený z kladně nabitého jádra, které obklopují záporné elektrony. Z tohoto pohledu představuje elektron a kladný náboj elektrický dipól s nulovou střední hodnotou. Elektron vykonává pohyb a tomu odpovídá mechanický moment – spin a spinový magnetický moment elektronu (rotace kolem vlastní osy), takže se chová jako magnetický dipól.

Pohyb elektronu, který vykoná  $\frac{v}{2\pi r}$  oběhů za sekundu představuje proud

$$I = \frac{ev}{2\pi r} \quad (2.1.1)$$

Magnetický moment takové proudové smyčky je

$$m = \pi r^2 I = \frac{1}{2} evr \quad (2.1.2)$$

Na základě vztahu mezi magnetickým momentem  $\mathbf{m}$  a dráhovým momentem hybnosti  $\mathbf{b}$  potom vyplývá vztah níže, kde  $m_e$  je hmotnost elektronu

$$m = \frac{e}{2m_e} b \quad (2.1.3)$$

V látce je obsaženo velké množství atomů, ty představují tedy prostorově rozložené magnetické dipóly. Při neexistenci magnetického pole jsou orientovány náhodně, proto je celkový dipólový moment vždy nulový. Celkový magnetický moment atomu je dán vektorovým součtem magnetických momentů všech elektronů a protonů. Ten pak určuje, jaké má látka magnetické vlastnosti a jak se bude chovat při vložení do magnetického pole.

## 2.2 Veličiny magnetického pole

Silové působení magnetického pole je reprezentováno vektorem magnetické indukce  $\mathbf{B}$ . Silové čáry vektoru  $\mathbf{B}$  jsou definovány podobně jako siločáry intenzity elektrického pole  $\mathbf{E}$  a jsou tečné k siločáře [1]. Magnetické pole můžeme označit jako pole vírové, tedy neexistují náboje, ze kterých by magnetické indukční čáry začínaly a končily, jsou spojitě. Všechna magnetická pole jsou výsledkem pohybu elektrických nábojů, a proto jsou silové čáry indukce  $\mathbf{B}$  pro každý element proudu kružnice. Odtud vyplývá, že čistý tok  $\mathbf{B}$  libovolnou uzavřenou plochou je nulový [1]:

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (2.2.1)$$

Ampérův zákon vysvětluje vztah mezi celkovým proudem  $I_{\text{celk}}$  a magnetickou indukcí  $\mathbf{B}$ . Ten platí jak pro vakuum, tak pro látkové prostředí:

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \cdot I_{\text{celk}} \quad (2.2.2)$$

kde  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [\text{Hm}^{-1}]$  je permeabilita vakua a  $d\mathbf{l}$  element délky.

Celkový proud se skládá z volných proudů a vázaných proudů. Pokud uvažujeme látkové prostředí, potom je třeba brát v úvahu vázané proudy, kam patří i uzavřený proud magnetizační  $I_{\text{mag}}$ , způsobující magnetický dipólový moment částic v látce. Mimo vektoru magnetické indukce  $\mathbf{B}$  je další důležitou veličinou vektor magnetické intenzity  $\mathbf{H}$ . Vycházíme-li opět z Ampérova zákona, potom platí pro magnetizační proudy odpovídající magnetizaci  $\mathbf{M}$  vztah:

$$I_{\text{mag}} = \oint_C \mathbf{M} \cdot d\mathbf{l} \quad (2.2.3)$$

Magnetizace  $\mathbf{M}$  představuje v podstatě objemovou hustotu magnetického dipólového momentu v prostředí. Dosazením do Ampérova zákona dostaneme vztah:

$$\oint_C \left( \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M} \right) \cdot d\mathbf{l} = I_{\text{vol}} \quad (2.2.4)$$

Následně pro zjednodušení vyjádříme vztah v závorce jako vektor intenzity magnetického pole  $\mathbf{H}$  a tím získáme Ampérův zákon pro magnetické pole vyvolané pouze volnými (vodivostními) proudy volných nosičů náboje  $I_{\text{vol}}$ :

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{\text{vol}} \quad (2.2.5)$$

### 2.3 Vliv prostředí na magnetické pole

Při zkoumání vlivu magnetického pole v látkách je vhodné použít modelový případ toroidní cívky. Magnetické pole je omezeno prostorem uvnitř toroidu, rozptylové pole je zanedbatelné. Pokud je cívka bez jádra s  $N$  závitů protékána proudem  $I$ , můžeme vyjádřit intenzitu magnetického pole jako

$$H = \frac{NI}{l} \quad (2.3.1)$$

kde  $l = 2\pi R$  je střední délka siločáry. Magnetická indukce ve vakuu je potom

$$B_0 = \mu_0 \frac{NI}{l} \quad (2.3.2)$$

Pokud vložíme nějakou látku do prstence, dojde ke změně indukce, v případě například hliníku zvýšení. Jak bylo zmíněno v 2.1, elektrony obíhající jádro atomu představují elementární kruhové proudy, ale dipólové momenty nejsou uspořádané. Po vložení do magnetického pole dojde ke změně otáčení elektronových proudů tak, že jejich roviny jsou kolmé ke směru indukce, takže indukce každého elektronového proudu má stejný směr jako indukce magnetizujícího proudu. Ve vnitřní části jádra se vliv elektronových proudů vyruší, ale na povrchu jádra vzniknou vlivem stejného směru ekvivalentní povrchové proudy po celém obvodu. Výsledná magnetická indukce v látce je rovna součtu indukce  $B_0$  a indukce  $B_i$ . Platí tedy

$$B = B_0 + B_i = \mu_0 \frac{NI}{l} + \mu_0 \left( \frac{NI}{l} \right)_i \quad (2.3.3)$$

Zavedením magnetické susceptibility  $\chi_m$  definujeme magnetické vlastnosti látek podobně, jako elektrické vlastnosti dielektrik

$$\chi_m = \frac{B_i}{B_0} \quad (2.3.4)$$

Rovnici (2.3.3) můžeme poté přepsat do tvaru

$$B = \mu_0 H + \mu_0 \chi_m H = \mu_0 (1 + \chi_m) H \quad (2.3.5)$$

A z toho vektorové vyjádření

$$\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H} = \mu \mathbf{H} \quad (2.3.6)$$

Kde  $\mu$  je permeabilita dané látky a  $\mu_r$  je relativní permeabilita látky. Číslo  $\mu_r$  charakterizuje magnetické vlastnosti materiálu.

## 2.4 Druhy magnetických látek

Z hlediska magnetických vlastností můžeme rozlišit tři hlavní typy materiálů podle hodnoty  $\mu_r$  a podle magnetických momentů atomu. V tabulce níže je uvedena relativní permeabilita vybraných diamagnetických a paramagnetických prvků a sloučenin.

Paramagnetika		Diamagnetika	
Látka	$\mu_r$	Látka	$\mu_r$
Hliník	1,000002	Měď	0,999990
Platina	1,000264	Voda	0,999991
Kyslík plynný	1,00000186	Kuchyňská sůl	0,9999861
Kyslík kapalný	1,003620	Bizmut	0,999848

Tabulka 2.4.1: Relativní permeabilita některých látek

### 2.4.1 Diamagnetické látky

Pokud se nenachází diamagnetický materiál ve vnějším magnetickém poli, je magnetický moment molekul diamagnetika roven nule, všechny magnetické momenty jsou vzájemně vykompenzované. Při vložení látky do magnetického pole o velikosti magnetické indukce  $B_0$  dojde k indukci elektromotorického napětí, které působí proti směru působení magnetického pole a tím jej zeslabuje. Proto je susceptibilita diamagnetických látek záporná a relativní permeabilita  $\mu_r < 1$ . Diamagnetický jev vzniká ve všech látkách, v případě paramagnetik a feromagnetik je ale potlačen silnějším paramagnetickým, resp. feromagnetickým jevem.

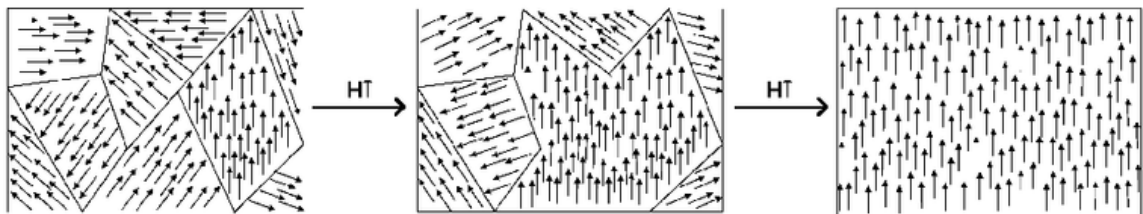
### 2.4.2 Paramagnetické látky

Paramagnetické látky nemají vykompenzovaný spinový i dráhový moment kvůli neobsazenosti některých vnitřních elektronových slupek. Vlivem nevykompenzovaného momentu se potom atom, resp. molekula v magnetickém poli chová jako magnetický dipól. Při vložení do magnetického pole se natočí dipóly ve směru tohoto pole a tím jej zvětší. Relativní permeabilita  $\mu_r > 1$ . Natočení není však úplně dokonalé, ruší ho tepelný pohyb mřížky. U paramagnetických látek je možné dosáhnout rovnoběžného uspořádání magnetických momentů pouze při teplotách blízkých absolutní nule a ve velmi silných magnetických polích. Permeabilita paramagnetik je nezávislá na indukci  $\mathbf{B}$  a je konstantní.



### 2.4.3 Feromagnetické látky

Z technického hlediska se jedná o velmi významné látky. Nemají lineární závislost magnetizace pro všechny velikosti vnějšího pole. Permeabilita je závislá na indukci a v určitém rozmezí nabývá značných hodnot. Atomy mají celkový magnetický moment nenulový díky nevykompenzovaným dílčím momentům. Dle teorie P. Weisse vytváří skupiny atomů ve feromagnetikách malé oblasti, takzvané Weissovy domény. Jedná se o makroskopické útvary o délce a šířce řádově jednotky milimetrů a tloušťce 0,001 až 0,1 mm. Sousední domény jsou odděleny vrstvou nazývanou Blochovy stěny. V těchto doménách se všechny spiny uspořádají do jednoho směru, a to i bez přítomnosti magnetického pole. V nemagnetickém stavu mají jednotlivé domény různě uspořádané magnetické momenty a výsledné magnetické pole je pak nulové. Při vložení materiálu do magnetického pole se momenty začnou skokem orientovat ve směru tohoto pole a také se již orientované domény začnou zvětšovat na úkor těch ostatních. Jev nejprve nastává u oblastí, které mají momenty směřované podobně jako intenzita vnějšího magnetického pole. Doménová struktura má mimo jiné vliv na tvar křivky prvotní magnetizace. Pokud jsou všechny domény natočené v jednom směru, hovoříme o stavu nasycení. Feromagnetické látky výrazně zesilují vnější magnetické pole, relativní permeabilita  $\mu_r \gg 1$ .



Obr. 2.4.3.1: Orientace Weissových domén ve směru vnějšího pole. Převzato z [2]

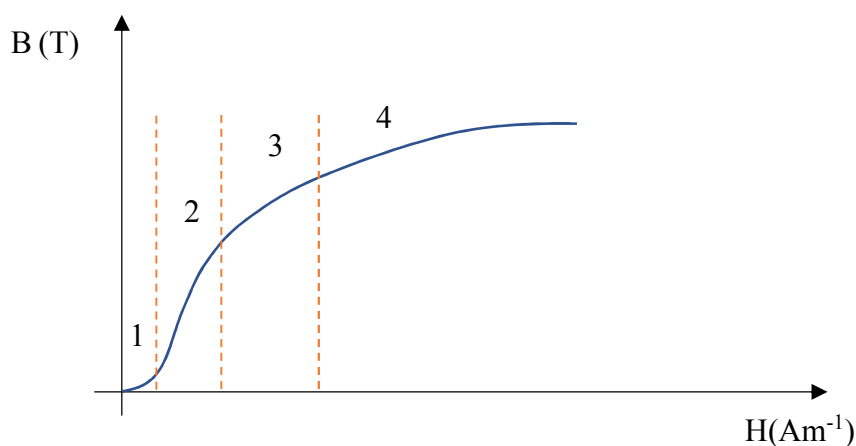
## 2.5 Magnetizační křivka

Feromagnetické materiály se vyznačují složitou nelineární závislostí na velikosti intenzity vnějšího magnetického pole  $H$ . Permeabilita  $\mu$  feromagnetika není tedy konstantní. Pro tuto komplexnost jsou magnetické vlastnosti feromagnetických materiálů zobrazovány graficky zpravidla funkční závislostí  $B = f(H)$ .

### 2.5.1 Panenská magnetizační křivka

Tato křivka zobrazuje průběh funkční závislosti  $B = f(H)$  pro materiál, který je magnetován poprvé nebo po úplném odmagnetování. Průběh má několik fází:

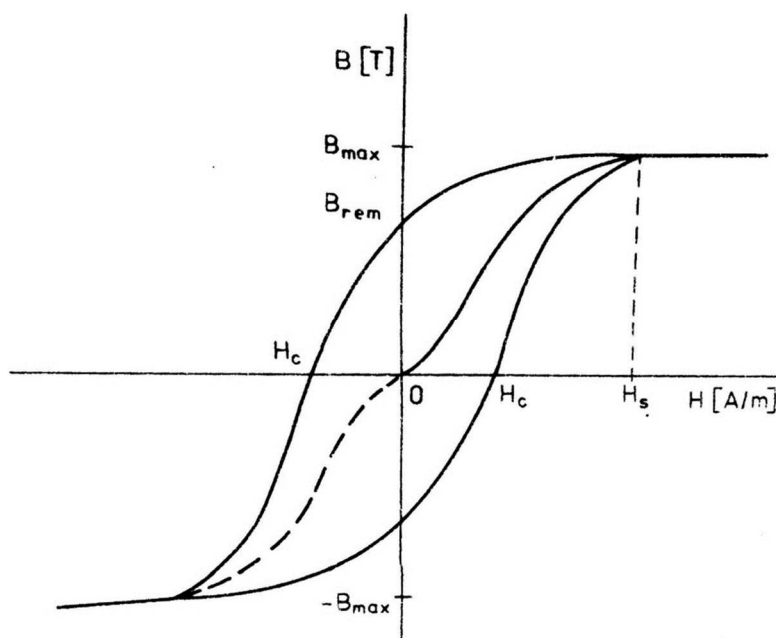
- V první fázi se zvětšuje počet domén, které mají směr momentu nejbližší směru intenzity vnějšího magnetického pole. Jedná se o vratný proces.
- Počet domén s příznivou orientací narůstá na úkor domén s nepříznivou orientací. Tyto změny se uskutečňují nevratnými skokovými posuny doménových stěn.
- Již nedochází k posunu doménových stěn. Pokud se jedná o monokrystal, potom je celý jedinou doménou. Další zvětšováním magnetické indukce je možno pouze orientováním magnetických momentů do směru intenzity vnějšího pole. Toho lze dosáhnout jen ve velmi silných magnetických polích, protože tento děj vyžaduje větší množství energie. Dochází k magnetickému nasycení, magnetická indukce se téměř nemění.
- Poslední čtvrtá fáze je stav nasycení. Magnetická indukce se zvětšuje jen nepatrně, intenzita  $H$  je maximální. Důvodem je obrácení směru magnetických momentů atomů, které měly vlivem tepelných pohybů antiparalelní orientaci.



Obr. 2.5.1.1: Křivka prvotní magnetizace

## 2.5.2 Hysterezní smyčka

Pokud bychom v bodě nasycení v části 4 na Obr. 2.5.1.1 začali snižovat intenzitu  $H$  vnějšího magnetického pole, magnetická indukce  $B$  bude také nelineárně klesat. Nestane se tak po stejné křivce a pro  $H = 0$  nebude indukce nulová, ale nabude hodnoty  $B_r$ , kterou nazýváme remanentní indukce. Tato hodnota je důležitý parametr permanentních magnetů, tato hodnota zůstane v materiálu zachována i přes pokles intenzity magnetického pole na nulu. Čím je tato hodnota větší, tím silnější magnet je. Pokud bychom pokračovali dále a obrátili směr proudu v magnetizační cívce, klesne indukce až na hodnotu  $B = 0$  při intenzitě  $H_c$  což je koercitivní intenzita. Velikost této intenzity je daná materiálem podle toho, zda se jedná o materiál magneticky tvrdý nebo měkký. Při dalším zvyšování  $H$  dojde opět k nasycení materiálu snižováním zůstane remanence, tentokrát však s opačnou orientací magnetických pólů. Při dalším cyklu dostaneme uzavřenou hysterezní smyčku, která ukazuje, že záleží nejen na aktuální intenzitě pole ale i na předchozím stavu látky. Plocha této křivky odpovídá práci potřebné na přemagnetizování objemové jednotky látky. Ztráty energie spojené s tímto procesem nazýváme hysterezní ztráty. Z hlediska magnetování nás zajímá nejvíce první kvadrant, kde je nutno vycházet z křivky pro daný magnet a nastavit magnetizační zařízení dle potřebné intenzity magnetického pole.



Obr. 2.5.2.1: Hysterezní křivka a křivka prvotní magnetizace, převzato z [3]

## 2.6 Druhy feromagnetik

Pro elektrotechnické účely posuzujeme feromagnetika podle hysterezní křivky, přičemž různé látky mají tyto křivky rozdílné. Dle velikosti koercivity  $H_c$  je dělíme na magneticky měkké a magneticky tvrdé.

### 2.6.1 Magneticky měkké materiály

Mají koercivitu nízkou, zpravidla pod  $800 \text{ Am}^{-1}$ . Jsou to buď čisté látky, nebo slitiny s vhodně uspořádanou mikrostrukturou. Křivka prvotní magnetizace má strmý průběh, hysterezní křivka je úzká a měla by být co nejvyšší s velkou  $B_{\max}$ . Využíváme je tam, kde je potřebné mít co nejmenší hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy, na cyklicky magnetizované části točivých strojů, transformátorů atp. Snadno je můžeme magnetovat a odmagnetovat i slabým magnetickým polem. Patří sem například čisté železo, nízkouhlíkové oceli, křemíková ocel.

### 2.6.2 Magneticky tvrdé materiály

Vyznačují se vysokou hodnotou koercivity  $H_c$ , řádově nad  $1\,000 \text{ Am}^{-1}$ . Obtížně se magnetují a odmagnetují, je třeba silné vnější magnetické pole. To klade zvýšené nároky na magnetizační zařízení, je nutno vytvořit poměrně silné magnetické pole. Mají vysokou remanentní indukci  $B_r$ , kvůli těmto parametrům se používají k výrobě permanentních magnetů. Křivka prvotní magnetizace má pozvolný průběh, hysterezní smyčka je široká. Kvalitu materiálu posuzujeme podle součinu  $(BH)_{\max}$  což je maximální energie magnetického pole, kterou permanentní magnet vyvolává. Magneticky tvrdé materiály jsou obvykle velmi tvrdé a mechanicky se nesnadno opracovávají. Aby se potřebné tvrdosti dosáhlo, mají tyto materiály strukturu s velkým vnitřním pnutím, zabraňujícím změnám domén. Do této skupiny patří například uhlíková ocel, AlNiCo a AlNi což jsou slitiny uvedených prvků se železem, slitiny prvků vzácných zemin NdFeB, SmCo<sub>5</sub> nebo tvrdé barnaté ferity.

### 3 Rozdělení magnetů a jejich vlastnosti

Magnety můžeme dělit dle několika kategorií. Jednou je základní členění na magneticky tvrdé ferity a magnety ze vzácných zemin. Z toho se odvíjí, jak snadno je lze zmagnetovat či odmagnetovat, chemická odolnost či pracovní teplota. Dále je možné rozlišit magnety podle přednostní osy magnetizace, což je směr magnetování, ve kterém má daný magnet nejlepší magnetické vlastnosti. Podle toho, zda mají přednostní osu orientace, rozlišujeme permanentní magnety izotropní a anizotropní.

#### 3.1 Feritové permanentní magnety

Jsou stále ještě velmi rozšířenou a používanou skupinou permanentních magnetů (PM). To je dáno nejnižší cenou za jednotku hmotnosti oproti jiným typům magnetů a také velkému sortimentu, kde je na výběr mnoho různých tvarů a rozměrů. Feritové PM se používají při výrobě malých elektromotorů, reproduktorů, magnetických separátorů nebo obyčejných magnetů na lednici.

Z pohledu chemického složení se jedná o směs oxidů železa s uhličitánem barnatým či stronťatým. Tato směs se lisuje a konečná podoba je dána sintrováním při vysoké teplotě okolo 1250 °C. Poté probíhá magnetizace, v případě anizotropních magnetů probíhá magnetizace při lisování v magnetickém poli. Ferity mají povahu keramického materiálu, mezi nevýhody tedy patří křehkost a citlivost na náraz a ohyb, obtížné opracování. Kvůli tvrdosti materiálu je nutné používat diamantové či korundové nástroje. Mezi výhody pak řadíme ještě chemickou odolnost vůči mnoha chemikáliím a relativně vysokou pracovní teplotu přibližně v rozmezí -40 °C až +250 °C a uspokojivou odolnost proti odsmagnetování ( $H_c$ ).

Třída	Koercivita		Remanence	Max. Součin	Curieova teplota
	$H_{cB}$	$H_{cJ}$	$B_r$ [mT]	$(BH)_{max}$	°C
	[kA/m]			[kJ/m <sup>3</sup> ]	
Y28	175~210	180~220	370~400	26,0~30,0	≤250
Y28H-1	240~260	250~280	380~400	27,0~30,0	≤250
Y30(C5)	191~210	199~220	380~385	26,0~28,0	≤250
Y30BH	223~235	231~245	380~390	27,0~30,0	≤250
Y40	300~354	340~360	450~460	37,6~41,8	≤250

Tabulka 3.1.1: Magnetické vlastnosti některých druhů feritů, převzato z [5]

### 3.2 AlNiCo permanentní magnety

Tyto permanentní magnety jsou vyráběny sléváním železa, hliníku, niklu a kobaltu. Existuje několik druhů slitin, podle obsahu jednotlivých prvků, kromě výše zmíněných to může být měď nebo titan. Alnico je velmi tvrdý materiál, lze ho obrábět jen broušením. Na rozdíl od feritových PM jsou také Alnico magnety elektricky vodivé. Díky vývoji anizotropních magnetů mají stále Alnico magnety co nabídnout, mají vysokou remanenci srovnatelnou s magnety ze vzácných zemin, dosahuje 0,7 až 1 T a je větší než u feritových PM. Toho je dosaženo chladnutím materiálu v magnetickém poli. Velkou předností je vysoká tepelná odolnost, Curieova teplota je 860 °C, pracovní teplota -100 °C až 550 °C a chemická odolnost. Mechanicky jsou ale křehké a výraznou nevýhodou všech Alnico slitin je nejmenší koercivita  $H_c$  ze všech magneticky tvrdých materiálů. Ta je příčinou snadné demagnetizace. Z tohoto důvodu nesmí být zmagnetovaný magnet, instalovaný do feromagnetického obvodu nikdy z tohoto prostoru vyjmut do volného prostoru. Při vyjmutí totiž dojde k nevratné demagnetizaci, neboť úbytek magnetického napětí na vnějších vzdušných cestách mezi oběma póly magnetu způsobí vznik vnějšího demagnetizačního pole, jehož intenzita  $H$  je srovnatelná s intenzitou  $H_c$ . Proto se pracovní bod očitne pod kolenem magnetizační charakteristiky, odkud se již nelze vrátit po téže cestě, ale vždy po cestě ležící níže [6]. Použití těchto magnetů je například ve středně velkých elektromotorech, akustických měničích a v měřicích přístrojích.

Třída	Koercivita		Remanence	Max. Součin	Curieova teplota
	$H_{cB}$	$H_{cj}$	Br [T]	$(BH)_{max}$	°C
	[kA/m]			[kJ/m <sup>3</sup> ]	
LNG34	50	52	1,10	34	860
LNG40	50	52	1,20	40	860
LNGT38	110	112	0,80	38	860
LNGT72	115	117	1,10	72	860
LNG60	110	112	1,40	60	860

Tabulka 3.2.1: Magnetické vlastnosti vybraných druhů litých anizotropních Alnico magnetů, převzato z [7]

### 3.3 Permanentní magnety ze vzácných zemin

V současnosti nejsilnější vyráběné permanentní magnety. Můžeme je rozdělit do dvou základních skupin podle toho, zda se jedná o materiál na bázi samaria či neodymu. Základem jsou intermetalické fáze  $\text{Sm}_1\text{Co}_5$ ,  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  a  $\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}$ . Díky velké remanenci a koercivitě na jednotku objemu je možné použít menší rozměry než u ostatních magnetů, zejména se jedná o lineární motory, rotory a statory motorů. Magnety jsou poměrně křehké a tvrdé, lze je upravovat broušením. Jsou však citlivé na zvýšení teploty, proto je třeba sledovat jejich teplotu při opracování. Vyrábí se sintrováním rozemletých substancí, jejich přímé slévání není technologicky možné. Pro magnetizaci je nutná přibližně trojnásobná velikost magnetického pole oproti feritovým PM. Lze je magnetovat pouze ve velmi výkonných pulzních magnetizérech s magnetizačním proudem řádově desítek kA.

Schopnost vytváření silného magnetického pole vychází z elektronové struktury kovů vzácných zemin. Dvanáct prvků ze skupiny lanthanoidů má nezaplňenou podslupku elektronového obalu 4f, která se nachází hluboko uvnitř atomu a je odstíněná vnějšími zaplněnými slupkami 5s a 5p. Proto při vytváření tuhého krystalického stavu nejvíce ztrácejí elektrony vnějších podslupek, přičemž elektrony z vnitřních nezaplňených podslupek se podrobují tomuto procesu méně. Magnetické vlastnosti přechodových kovů a jejich slitin jsou dány vnitřními f-elektrony, atomy vzácných zemin si v podstatné míře zachovávají své magnetické vlastnosti, které jim příslušeli v izolovaném stavu. U magnetik skupiny železa je magnetický moment jejich atomů určený spinovým magnetickým momentem, vliv orbitálního magnetického momentu je zanedbatelný vlivem vnitřního krystalového pole okolních iontů. Oproti tomu u kovů vzácných zemin se v důsledku stínícího účinku vnějších elektronových podslupek orbitální moment projevuje výrazně.

Problematika intermetalických sloučenin je značně komplexní jak z fyzikálního, tak z chemického pohledu a přesahuje značně rozsah této práce, proto se jí dále nebudu zabývat.

### 3.3.1 Samarium-kobaltové magnety

Tyto magnety byly prvním typem komerčně dostupných magnetů ze vzácných zemin (RE). Jejich objev v sedmdesátých letech byl svým způsobem revoluční, nabízely trojnásobné množství energie než v té době dostupné magnety. Samarium-kobaltové (SmCo) magnety nejsou tak silné jako neodymové, mají však své nesporné výhody, a to zejména vyšší rozsah pracovních teplot. Maximální pracovní teplota se pohybuje do 350 °C. Nevynikají ale pouze ve vysokých teplotách, jsou totiž schopny pracovat i v nízkých teplotách až absolutní nuly, což je -273 °C. Tato vlastnost je využívána v kryogenních aplikacích. Díky malému nebo žádnému obsahu železa mají také SmCo magnety výbornou korozivzdornost v porovnání s neodymovými magnety, nemusí se pokrývat ochrannou vrstvou. Jejich nevýhodou může být oproti neodymovými magnetům jejich vyšší cena způsobená cenou kobaltu na trhu. Tak jako neodymové magnety mají i SmCo magnety velkou remanenci a koercivitu.

Slitina je v hmotnostním poměru buď Sm<sub>1</sub>Co<sub>5</sub> (1:5), nebo Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> (2:17). U první třídy se energetický součín pohybuje mezi 128 až 200 kJ/m<sup>3</sup>, u druhé pak 160 až 260 kJ/m<sup>3</sup>. Existuje několik podtříd v obou hlavních třídách, ty se potom liší magnetickými vlastnostmi.

SmCo magnety se používají v leteckém a kosmickém průmyslu, všude kde je potřeba extrémně výkonných aplikací.

Třída	Koercivita		Remanence	Max. Součín	Pracovní teplota
	H <sub>cB</sub>	H <sub>cj</sub>	Br [T]	(BH) <sub>max</sub>	°C
	[kA/m]			[kJ/m <sup>3</sup> ]	
SmCo16	620-660	1 194-1 830	0,81-0,85	110-127	250
SmCo20	680-725	1 194-1 830	0,90-0,94	150-167	250
SmCo32M	716-845	955-1 273	1,10-1,13	230-255	350
SmCo30H	788-835	>1 990	1,08-1,10	220-240	350
SmCo24L	557-716	636-955	0,95-1,02	175-191	350

Tabulka 3.3.1.1: Magnetické vlastnosti vybraných typů Sm-Co magnetů, převzato z [7]



### 3.3.2 Neodymové magnety

Tento typ magnetů je v současné době nejsilnějším. Neodymové magnety mají největší odolnost proti odmagnetování a remanenci v porovnání s předchozími druhy magnetů. V podstatě se jednalo zpočátku o odezvu na vysokou cenu samarium-kobaltových magnetů. Slitina obsahuje železo, neodym a bór v hmotnostním poměru  $\text{Fe}_{14}\text{Nd}_2\text{B}_1$ . Remanence dosahuje 1 až 1,3 T, koercivita 800 až 880 kA/m. Curieova teplota je 320 °C, pracovní teplota cca od 110 °C do 220 °C. Oproti SmCo magnetům jsou neodymové magnety náchylnější na korozi, tuto vlastnost lze odstranit nahrazením reaktivního neodymu mezi zrnky stabilními intermetalickými sloučeninami (přísadami), které ale snižují magnetický tok. Povrch těchto magnetů se tedy pokrývá vrstvou plastu nebo se pokovuje, pokovení ale snižuje magnetickou indukci až do 5 %. Výhodou je ale vyšší mechanická odolnost, než mají SmCo magnety.

Výroba je realizována sintrováním, materiál se nejprve rozemele na prach, poté je slisován. V průběhu lisovacího procesu je používáno silné magnetické pole, které určuje směr magnetizace tedy orientaci Weissových domén. Následuje spékání v inertní atmosféře, kde je materiál odmagnetován. Po rychlém ochlazení následuje úprava do finální podoby, povlakování a konečně opětovné zmagnetování. Magnetizační zařízení musí být schopno vytvořit třikrát tak velkou intenzitu elektrického pole, než je požadovaná síla magnetu. To vyžaduje obrovské množství energie, které je schopno z magnetizačního přípravku magnet vystřelit vysokou rychlostí, proto musí být magnet fixován. Různé výrobní procesy mají vliv na magnetické vlastnosti permanentních magnetů, při izostatickém lisování, což je lisování v prášku v elastické formě za všestranného tlaku v kapalině při několika tisících barů, mají materiály vyšší remanenci. Obrábět lze tyto magnety pouze před magnetizací, nebo po magnetizaci diamantovými nástroji za stálého chlazení kvůli velké citlivosti na zvýšenou teplotu.

Tento druh magnetů je používán například ve výpočetní technice, v elektromotorech a generátorech nebo v audio technice.

Třída	Koercivita		Remanence	Max. Součin	Pracovní teplota
	$H_{cB}$	$H_{cJ}$	$B_r$ [T]	$(BH)_{max}$	°C
	[kA/m]			[kJ/m <sup>3</sup> ]	
N27	796	955	1,03	199	80
N33H	836	1353	1,13	247	120
N38UH	875	1989	1,21	287	180
N50H	995	1353	1,40	382	120
N35VH	875	2785	1,17	263	200

Tabulka 3.3.2.1: Vybrané vlastnosti vybraných neodymových magnetů, převzato z [7]

### 3.4 Přednostní osa orientace

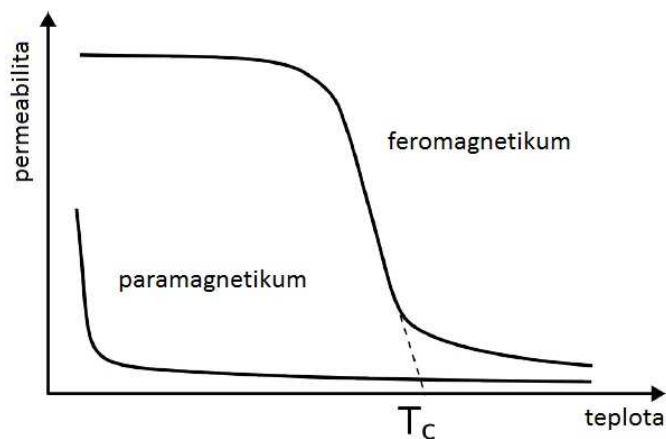
Pod tímto pojmem se rozumí uspořádání magnetických krystalů do určitého směru. V této přednostní ose orientace dosahuje trvalý magnet svých nejlepších magnetických parametrů, musí být magnetován v této ose. Přednostní osy orientace se dosáhne tím, že během lisování je materiál (prach) vystaven silnému vnějšímu magnetickému poli. Magnety kruhové a válcové mají osu orientace většinou axiální, u hranolů prochází výškou, u segmentů je diametrální nebo radiální. Následující rozdělení na pět typů magnetů dle přednostní osy bylo převzato z [8].

- a) **Izotropní magnety** – nemají žádnou přednostní osu orientace, směr magnetování je libovolný.
- b) **Anizotropní magnety** – jsou lisovány v magnetickém poli a dostávají tak přednostní osu orientace. Dobré magnetické vlastnosti mají pouze v této ose a mohou být magnetovány pouze v této ose. Při stejném objemu magnetu se dosáhne vyššího magnetického toku nežli u magnetů izotropních. Remanence je přibližně dvojnásobná.
- c) **Permanentní magnety s axiální přednostní osou orientace** – takto, tzn. axiálně, jsou orientovány kruhové a válcové magnety a hranoly přes výšku.
- d) **Permanentní magnety s diametrální přednostní osou orientace** – pro zvláštní aplikace, kupříkladu u kruhových či válcových permanentních magnetů motorů nebo čerpadel, je přednostní osa orientace diametrální (kolmo k ose rotace).
- e) **Permanentní magnety pólově orientované** – zde jsou póly uspořádány tak, jak bude provedeno pozdější více pólové magnetování. Tyto trvalé magnety se používají převážně ve spojení se senzory, v pohonech motorů nebo v generátorech. Remanence je přibližně 1,5 ÷ 2násobná v porovnání se stejným izotropním materiálem.

### 3.5 Curieova teplota

Feromagnetismus závisí nejen na struktuře látky ale i na teplotě, protože při určité teplotě ztrácí materiál své vlastnosti a chová se jako paramagnetická látka. Tuto teplotu nazýváme **Curieovou teplotou**  $T_C$ . Pro železo je to  $770\text{ }^\circ\text{C}$ , pro nikl  $356\text{ }^\circ\text{C}$  a pro kobalt  $1\ 075\text{ }^\circ\text{C}$ . Curieova teplota je také vždy menší než teplota tání dané látky, proto nemohou existovat feromagnetické kapaliny nebo plyny. Pracovní teplota permanentního magnetu nikdy nedosahuje hodnot  $T_C$ , vždy se vychází z katalogových hodnot. Bývá to v rozmezí  $0,3-0,4T_C$ . Pokud permanentní magnet zahřejeme nad Curieovu teplotu, dojde ke zvýšení chaotického pohybu molekul materiálu a rozpadne se doménová struktura vytvořená magnetizací materiálu. Pokud bychom chtěli materiál znovu zmagnetovat, musíme ho zahřát na  $T_C$ , abychom odstranili zbytek domén z předchozí magnetizace. Jinak je nutno použít silnější magnetizační pole.

V závislosti na teplotě klesá také permeabilita, v blízkosti  $T_C$  se potom bude velmi strmě blížit asymptoticky k nule. Toho můžeme využít při měření vlastností feromagnetika, kdy na vzorek ve tvaru tyče navineme primární cívku protékanou střídavým proudem a sekundární cívku kterou měříme indukované napětí. Vzorek postupně zahříváme a při překročení  $T_C$  detekujeme pokles permeability jádra, respektive velikost naindukovaného napětí kvůli poklesu magnetické indukce.



Obr. 3.5.1: Znárodnění závislosti permeability na teplotě, převzato z [9]

Překročení Curieovy teploty je nebezpečné nejen u magnetů, ale například také u impulsních feritových transformátorů v propustných a blokujících měničích. Strmý pokles permeability způsobí prudký pokles primární indukčnosti transformátoru, kvůli tomu vzroste magnetizační proud, který způsobí tepelné ztráty ve vinutí, které rostou s kvadrátem magnetizačního proudu. To se ohřívá a dále přispívá k dalšímu zvyšování teploty feritu. Výsledkem je destrukce jak transformátoru, tak spínacích polovodičů vlivem přehřátí [6].

## 4 Magnetické obvody

Magnetické obvody můžeme rozdělit na lineární a nelineární v závislosti na tom, jaký je tvar funkční závislosti spráženého toku na proudu. Magnetický obvod můžeme chápat jako soustavu uzavřených oblastí, kterými prochází stejný magnetický tok  $\Phi$ . Může obsahovat i více druhů prostředí, jako je například feromagnetikum, vzduch, vakuum. Také vinutí, kterým protéká proud považujeme za část magnetického obvodu jako zdroj magnetomotorického napětí. V případě homogenních magnetických polí potom můžeme zavést analogické veličiny k veličinám elektrického proudu:

$$U_m = NI = Hl \quad (4.1)$$

Kde  $U_m$  je magnetomotorické napětí,  $N$  počet závitů a  $l$  střední délka siločáry,

$$I_m \equiv \Phi = BS \quad (4.2)$$

Kde  $I_m$  je magnetický tok (magnetický proud),  $B$  magnetická indukce a  $S$  průřez obvodu. Ze vztahu (2.2.5) Vyplývá potom **Hopkinsonův zákon**, který je analogický k Ohmovu zákonu:

$$\Phi R_m = \oint_C \mathbf{H} d\mathbf{l} = I_{vol} \quad (4.3)$$

$I_{vol}$  odpovídá zdroji (elektromotorickému napětí) a  $R_m$  je reluktance neboli magnetický odpor. Tuto rovnici můžeme přepsat do tvaru obdobnému druhému Kirchhoffovu zákonu [1]:

$$\sum U_m = \Phi \sum R_m = I_{vol} \quad (4.4)$$

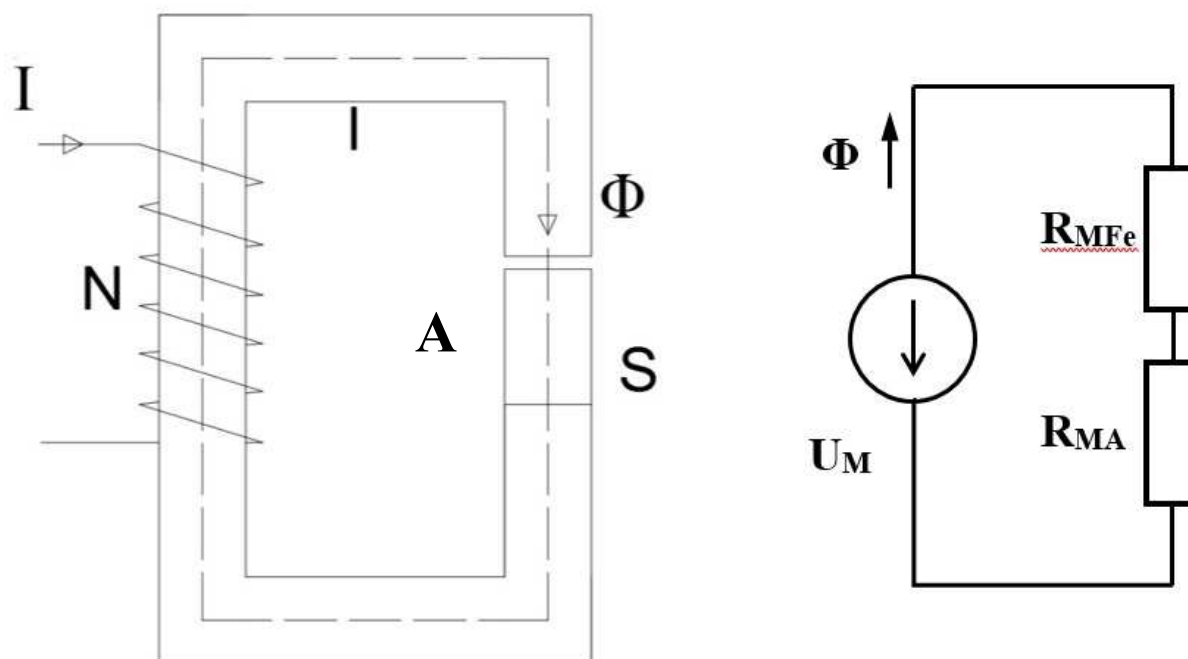
Ze vztahu (2.2.1) potom vyplývá obdobný vztah pro první Kirchhoffův zákon:

$$\sum \Phi_k = 0 \quad (4.5)$$

Kde suma  $\Phi_k$  je součet všech magnetických toků v obvodu. To znamená, že existuje analogie mezi odpory a vodivostmi v elektrickém a magnetickém poli. Magnetické odpory a vodivosti můžeme sčítat stejně jako v odpory a vodivosti elektrické. Musíme si však uvědomit, že v případě elektrického proudu mohou vznikat pouze nepatrné ztráty způsobené svodovými proudy, ale v obvodech magnetických v podstatě neexistují magnetické izolanty s nulovou nebo téměř nulovou permeabilitou. Proto magnetický tok neprotéká obvodem stejně jako elektrický proud. Část magnetického toku prochází obvodem a část se uzavírá přes vzduch a vytváří **rozptylový tok**. Proto výpočty pomocí jednoduchých vztahů musíme v některých případech považovat za pouze přibližné a pro přesnější výsledky je nutné použít některou z numerických metod, například **FEM** – metodu konečných prvků.

## 4.1 Rozbor jednoduchého magnetického obvodu

Nejvíce podobný obvod tématu této práce je magnetický obvod se vzduchovou mezerou. Není totiž možné vyrobit magnetizační přípravek úplně bez tolerancí, musíme tedy počítat s určitými ztrátami ve vzduchových mezerách.



Obr. 4.1.1: Magnetický obvod a jeho náhradní schéma

Magnetický odpor  $R_M$  při užití elektrického ekvivalentu spočítáme jako:

$$R_M = R_{MFe} + R_{MA} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r S} + \frac{l_a}{\mu_0 S} \quad (4.1.1)$$

Kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua,  $\mu_r$  relativní permeabilita materiálu jádra,  $l_a$  šířka vzduchové mezery,  $S$  je průřez jádra,  $l$  délka střední siločáry. Většinou je  $R_{MFe} \ll R_{MA}$ . Magnetický tok obvodem vypočítáme potom podle vztahu:

$$\Phi = B \cdot S = \frac{U_m}{R_M} = \frac{NI}{R_M} \quad (4.1.2)$$

## 5 Rozbor problematiky magnetizace

V zásadě existují dvě možnosti, jak zmagnetizovat magnet, statická magnetizace stejnosměrným proudem a pulzní magnetizace. První způsob se používá spíše na slabší druhy permanentních magnetů, druhý na silnější. V této práci se budu zabývat primárně pulzním způsobem magnetování vzhledem vyšší převaze permanentních magnetů ze vzácných zemin a magneticky tvrdých feritů.

Všechny magnetizéry pracující na bázi vybíjení kondenzátoru si můžeme představit jako RLC obvody, kde je nutno uvažovat celkový odpor skládající se z odporu zdroje, magnetizačního přípravku – fixtury, ekvivalentní sériový odpor ESR kondenzátorů a také odpor způsobený vířivými proudy ve všech komponentech. Dále je potřebné uvažovat i oteplení v jehož důsledku stoupá odpor Cu vinutí. Indukčnost je silně ovlivněna kvůli železnému jádru, pokud je materiál přesycen, indukčnost klesá. Obvod jako takový obsahuje mnoho nelinearit, většinou se při návrhu využívá aproximací. Pro přesné výpočty se používá počítačových simulací, kde lze zohlednit tyto nelinearity.

### 5.1 Analýza návrhu magnetizačních přípravků

Při návrhu magnetizačních přípravků musíme uvažovat, jakých parametrů potřebujeme dosáhnout. Jedná se zejména o dostatečnou velikost magnetizačního pole a jeho směr. U anizotropních materiálů nebývá požadavek na směr kritický, většinou jsou tyto magnety magnetovány ve směru například zleva doprava nebo naopak. Pokud se jedná ale o magnety izotropní, které je možno zmagnetovat v jakémkoliv směru, je potom orientace magnetizačního pole a magnetu důležitá.

Magnetické domény se natáčí do směru vnějšího magnetického pole velmi rychle řádově  $10^{-8}$  až  $10^{-9}$  sekundy. Tato doba je ale většinou příliš krátká na zmagnetování, protože je nutné překonat vířivé proudy, které se mohou indukovat v magnetizačním obvodu nebo v samotném magnetu.

Z pohledu mechanického je nutné zajistit správné upnutí materiálu s ohledem na požadovaný směr magnetizace bez možnosti namáhání nebo poškození při vkládání či vyndávání z magnetizačního přípravku. Vinutí magnetizační cívky musí být dostatečně pevné, aby vydrželo mechanické síly, které na něj působí v průběhu magnetizačního impulzu. Pokud by vinutí nebylo dostatečně mechanicky odolné, může se stát, že se za provozu roztrhne. Nejen vinutí ale celková konstrukce magnetizačního přípravku musí odolat těmto silám, které mohou bez problémů ohnout nebo zlomit plastové komponenty držící magnetizační vinutí v požadovaném tvaru.

Dalším důležitým bodem je tepelná odolnost v cyklickém používání, kdy se vinutí magnetizační cívky prakticky neustále ohřívá, a i přes tenkou vrstvu izolace vodičů nemusí dojít k bezpečnému vyzáření tepla do prostředí. Následkem přehřátí je potom ztráta izolačních schopností a může dojít ke zkratu. Z důvodu rozdílných tepelných časových konstant je toto potřeba brát v úvahu. Jako příklad můžeme uvést velké magnetizéry ve tvaru „C“, které mají hmotnost několik set kilogramů a jejich tepelná setrvačnost je značná. Jsou tedy nutné technologické přestávky.

Nezbytnou vlastností magnetizačního zařízení je také bezpečný provoz. Je nutno zajistit, aby nedošlo k úrazu nebo škodě na majetku vlivem vnitřních defektů magnetů, které při magnetování mohou prasknout a tyto části by vylétly vysokou rychlostí do okolí. Zároveň je potřebné zabránit dotyku živých částí všude tam, kde hrozí riziko úrazu elektrickým proudem. Dále je důležité zařízení chladit, aby nedošlo k popálení nebo nepříznivému ovlivnění magnetovaného materiálu.

## 5.2 Analýza návrhu magnetizéru

Pokud budeme uvažovat zařízení schopné vytvořit silná magnetická pole, musíme si uvědomit, že je není možné konstruovat z běžných elektronických součástek. Velikosti napětí a proudu jednotek kilovolt a jednotek až desítek kiloampér vyžadují vhodně dimenzované vodiče, spínače a všechny další výkonově namáhané prvky.

### 5.2.1 Spínače

V závislosti na velikosti magnetizačního proudu se nabízí využití několika druhů spínačů. První z nich jsou MOSFETy – tranzistory ovládané polem. Ty mohou spínat i rozepínat a vyrábějí se pro poměrně velké proudy. Problémem ale může být adiabatický ohřev a přehřátí v případě neúplného otevření. Pro výkonné magnetizéry se ale nedají použít. Proto se využívá v zásadě dvou typů spínačů.

Prvním je Ignitron, což je trubice se třemi vývody – uhlíková anoda, rtuťová katoda a řídicí elektroda. K sepnutí dojde přivedením proudového impulsu na řídicí elektrodu, který zapálí elektrický oblouk. To vede k rapidnímu zvýšení vodivosti prostředí mezi katodou a anodou, ze rtuti jsou emitovány elektrony směrem k anodě. Jakmile se tento proces nastane, velmi rychle dojde dalším odpařováním rtuti k sepnutému stavu. Tyto součástky mají ale několik nevýhod. Za provozu dochází k oteplování, proto je nutné často chladit kapalinou, dále mají značný úbytek napětí, který se mění s teplotou a stářím, jsou nebezpečné pro životní prostředí kvůli obsahu rtuti, a jsou relativně drahé. Na druhou stranu jsou ignitrony schopné pracovat s velkými proudy a napětími. I když nedokáží vést proud v opačném směru, nemusí

okamžitě vypnout a mohou na krátký okamžik vést proud i opačně, pokud se objeví opačná polarita napětí. To by mělo za následek zmenšení magnetizačního proudu, který by mohl vést k částečné demagnetizaci magnetovaného materiálu. Tyto prvky se již v moderních konstrukcích magnetizérů nepoužívají.

Dalším typem spínače je tyristor, polovodičová součástka se čtyřmi vrstvami zpravidla uspořádanými jako PNPN. Na rozdíl od ignitronu má velmi malý úbytek napětí v propustném směru, který není zdatelně závislý na teplotě. Má také anodu, katodu a řídicí elektrodu. Spíná se poměrně malým proudem a chlazení kapalinou zpravidla také pro běžné použití není třeba. Je mechanicky poměrně odolný a má malé rozměry. Může být pouze ve dvou stavech, zapnutý nebo vypnutý, nemá žádný přechodný stav. Vypnutí je možné pouze poklesem anodového proudu pod hodnotu přídržného proudu nebo komutací anodového napětí<sup>1</sup>. Například u středně výkonných tyristorů můžeme najít katalogové hodnoty závěrného a blokovacího napětí 1 600 až 3 200 V, střední propustný proud 500 A a nárazový neopakovatelný propustný proud až 9 kA. Vždy je nutno vybrat podle aplikace nejvhodnější typ dle požadovaných mechanických a elektrických vlastností. Tento typ spínače je v současné době nejrozšířenější v magnetizačních zařízeních.

### 5.2.2 Kondenzátory

Skladují energii pro pulzní magnetování. Uložená energie je vyjádřena vztahem:

$$E = \frac{1}{2}CU^2 \quad (5.2.2.1)$$

Kde C je kapacita kondenzátoru a U napětí kondenzátoru. Existují dva hlavní typy používané v magnetizérech, bipolární a unipolární. Bipolární můžeme nabíjet oběma směry, unipolární pouze jedním, mají danou polaritu. Většina komerčních zařízení obsahuje elektrolytické kondenzátory, které mají větší kapacitu a jsou levnější než bipolární. Elektrolytické kondenzátory jsou náchylné na přepólování, které vede prakticky vždy k jejich zničení. Největší kondenzátory mohou být dimenzované na napětí až 5 kV a mohou mít kapacitu 1 000  $\mu$ F. Podle požadavků na celkovou kapacitu a napětí je můžeme řadit sériově nebo paralelně. Sériové řazení více jak dvou kondenzátorů není příliš vhodné z důvodu výsledného menšího špičkového proudu. Z důležitých parametrů kondenzátorů je třeba ještě zmínit ESR – ekvivalentní sériový odpor a parazitní indukčnost. Všechny tyto vlastnosti potom ovlivňují výsledné chování elektrického obvodu magnetizéru. Pracovní bod kondenzátorů

---

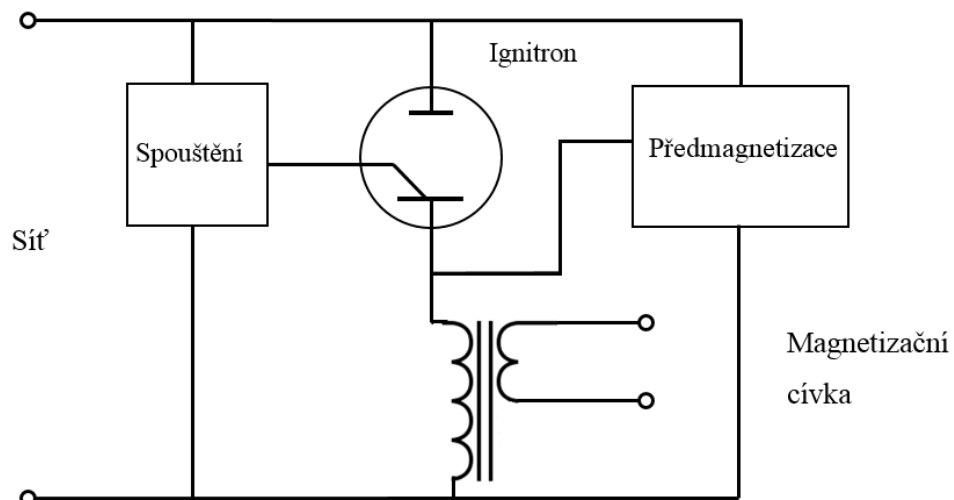
<sup>1</sup> U GTO (z angličtiny gate turn off – vypínatelný hradlem) tyristorů můžeme záporným pulzem na řídicí elektrodu tyristor i vypnout.





### 5.3.1 Půlperiodový magnetizér

Tento typ se používal již před druhou světovou válkou. Skládal se z ignitronu, výstupního transformátoru, spouštěcího obvodu a předmagnetizačního obvodu. Byl přímo připojen na elektrickou síť, jeho název pochází z principu funkce. Při frekvenci sítě 50 Hz došlo k sepnutí ignitronu v kladné části půlperiody a proud jím teče až po průchodu nulou je v záporné půlperiodě dostatečná úroveň napětí na vypnutí ignitronu. Pro síť je to obrovský proudový impulz blížící se zkratu. Jak je uvedeno v odstavci 5.2.1, ignitronem může projít i krátký pulz opačné polarity, tím se částečně materiál odmagnetuje. To by vyřešila dioda, která ovšem ještě nebyla k dispozici, a tak bylo použito zvyšujícího výstupního transformátoru, který je před sepnutím ignitronu stejnosměrně předmagnetován téměř až do saturace jádra. Následně je impulz v propustném (kladném) směru transformován na sekundární vinutí. Následující opačný proud ale nasytí jádro transformátoru a tento demagnetizační impulz potom není transformován na výstup v takové velikosti. Tyto přístroje se stále prodávají kvůli poměrně nízké ceně oproti jiným řešením.

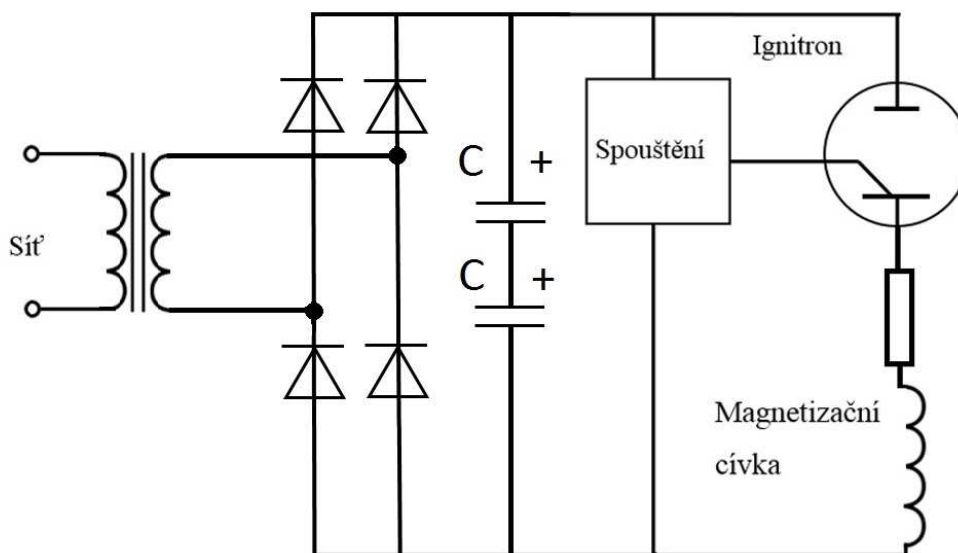


Obr. 5.3.1.1: Blokové schéma půlperiodového magnetizéru, upraveno z [10]

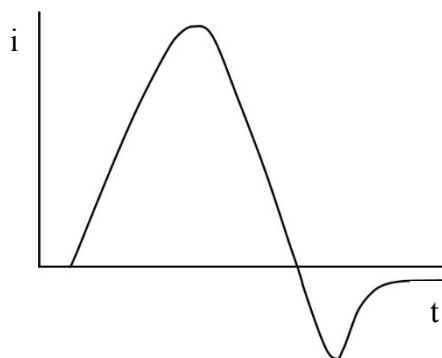
### 5.3.2 Pulzní magnetizér s ignitronem

Oproti předchozímu typu tento magnetizér neodebírá energii ze sítě přímo, nýbrž přes usměrňovač dochází k nabíjení banky kondenzátorů a tato energie je transferována pulzem sepnutím spínacího výkonového prvku do magnetizační cívky. Podle energie je můžeme rozdělit na tři kategorie a to do 500 V, do 1 kV a do 3 kV nebo více. Z ekonomických důvodu bývá délka pulzu poměrně krátká, v řádu milisekund. To má za následek možný vznik vířivých proudů, které znesnadňují úplnou magnetizaci materiálu kvůli nedostatečnému průniku do hloubky, a to vede také k nutnému zvýšení intenzity magnetického pole, než by bylo obvykle potřebné o delších impulzů. Magnetizační přípravek musí mít takový odpor, aby byl obvod zatlumený a nevznikaly v něm zákmity způsobující odmagnetování materiálu.

Nevýhodou tohoto zapojení je doba nutná pro vypnutí ignitronu, pokud by bezprostředně následoval další pokus o impulz, proud bude pouze protékat magnetizační cívkou, energie se bude mařit na teplo a k nedojde k nabití kondenzátorů.



Obr. 5.3.2.1: Obecné schéma pulzního magnetizéru s ignitronem, upraveno z [10]



Obr. 5.3.2.2: Průběh proudového impulzu v magnetizační cívce

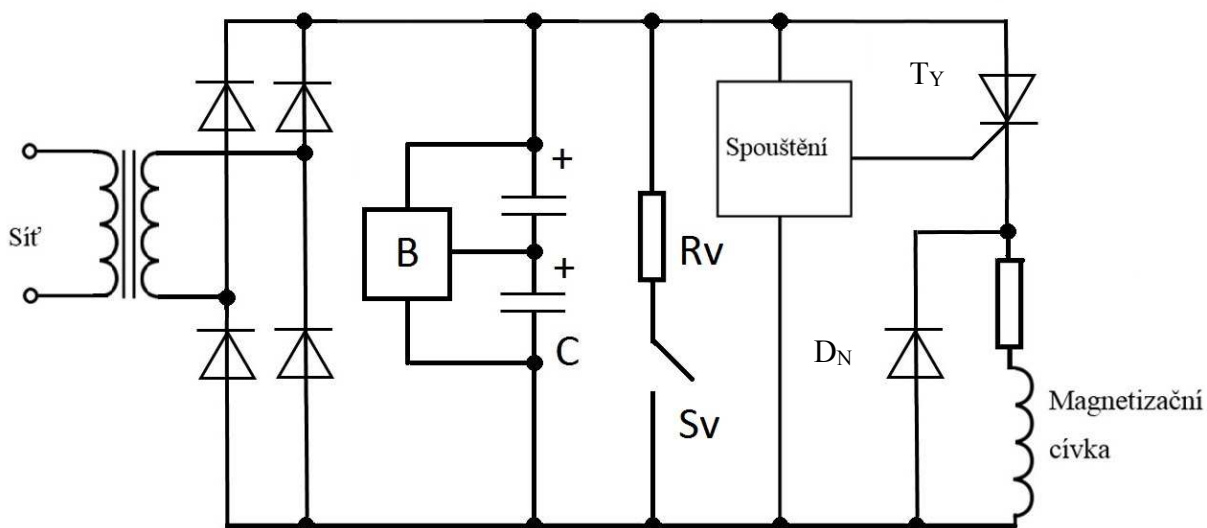
### 5.3.3 Pulzní magnetizér s tyristorem

S vývojem polovodičů došlo k výměně Ignitronu v předešlých zapojeních za výkonový tyristor a doplnění o balancér, vybíjecí obvod a nulovou diodu. Ta sice trochu ztrácí na významu, protože tyristor vypíná mnohem rychleji než ignitron při změně toku proudu, nicméně jakmile dojde k vypnutí tyristoru, akumulovaná energie v cívce se přemění na elektrickou energii, na cívce se objeví opačná polarita napětí a proud se může uzavřít přes diodu, která je pro tento proud v propustném směru. To jednak chrání kondenzátory před záporným napětím na kladném terminálu a jednak umožňuje použití magnetizačních obvodů které mají dostatečné malé tlumení obvodu, tedy v nich vznikají tlumené kmity. Ty jsou energeticky efektivnější při přeměně elektrické energie na magnetickou než použití obvodů, ve kterých probíhá aperiodický přechodný děj (výrazně zatlučený RLC obvod).

Balancér souží k rozdělení napětí mezi kondenzátory v sérii v případě rozdílných kapacit. Jinak by hrozilo, že největší napětí bude na kondenzátoru s nejmenší kapacitou.

Zejména z bezpečnostních důvodů je vřazen odpor  $R_V$  se spínačem  $S_V$ . Spínač je za normálních okolností rozepnut. Pokud nastane za provozu nebezpečný stav pro obsluhu, například přístup k živým částem detekovaný čidlem, nebo se zařízení vypne s nabitými kondenzátory, spínač sepne vybíjecí odpor do obvodu a tím se kondenzátorová banka vybijí.

Na výstupním obvodu můžeme vidět u některých výrobců sofistikovanějších zařízení také senzor špičkového magnetizačního proudu, který se potom zobrazí spolu s nastaveným napětím banky kondenzátoru na uživatelském panelu.



Obr. 5.3.3.1: Obecné schéma pulzního magnetizéru s tyristorem a nulovací diodou

## 6 Konstrukční návrh a jeho realizace

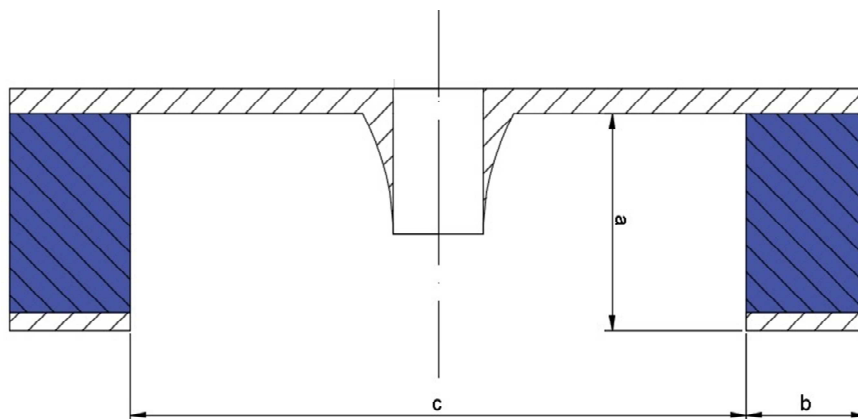
Pro vlastní návrh jak mechanický, tak elektrický je nutno vytvořit přehled stávajících magneto alternátorů, na které bude potom vlastní zařízení zkonstruováno. Využití magnetizérů zasahuje velké množství výrobních aplikací a zejména u magnetizačních přípravků je obrovské množství geometrických tvarů podle provedení elektrického stroje (např. počet pólů), ve kterém jsou permanentní magnety použity. Každý přípravek je tedy unikátní a na míru zhotovený. V závislosti na použitém materiálu permanentního magnetu lze konfigurovat vlastní magnetizér z pohledu elektrických parametrů. Musíme tedy znát materiálové složení konkrétních magnetů.

### 6.1 Přehled magneto setrvačníků

V tabulkách níže vidíme přehled některých typů rotorů pro motocyklové magneto alternátory. Pro návrh magnetizačního přípravku jsou důležité rozměry magnetu **a**, **b** a průměry **c** buď vnitřní nebo vnější.

Vnější magneto rotory			
Počet pólů	Vnitřní průměr c [mm]	Šířka magnetu b [mm]	Typ motocyklu
4	90	35	SACHS 50
4	120	33	ČZ 98 r.v. 1935
4	107	15	ČZ 175 r.v.1937
4	88	45	Stadion S21
6	105	33	ČZ motocross
6	105	30	ČZ motor

Tabulka 6.1.1: Přehled základních rozměrů vnějších rotorů

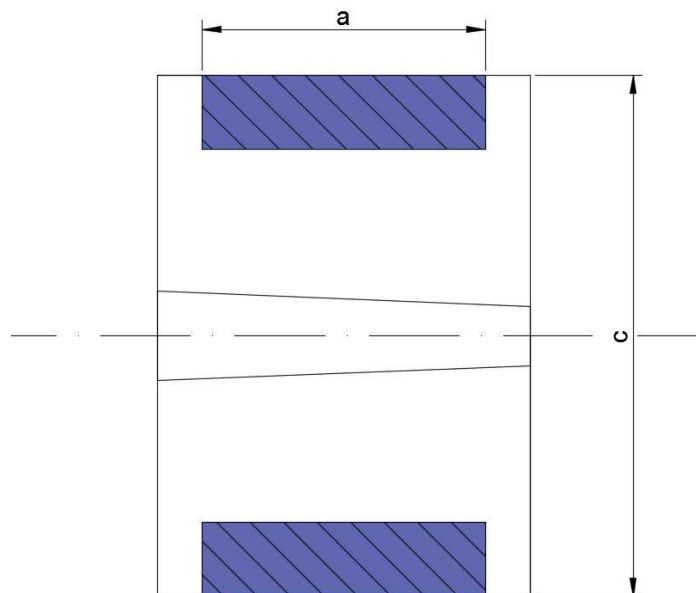


Obr. 6.1.1: Řez vnějším rotorem s hlavními rozměry

Pro vnitřní rotory se nepodařilo shromáždit větší množství údajů, hlavním zástupcem je zde známý motocykl JAWA 50 pionýr. Ten má magnety s rozdílnou šířkou přibližně 35x20 mm, proto by bylo nutné vyrobit speciální nástavce kopírující tyto rozměry.

Vnitřní magneto rotory			
Počet pólů	Vnitřní průměr c [mm]	Šířka magnetu b [mm]	Typ motocyklu
8	78	35	Tatran
8	85	33	Tatran soutěžní
6	68	Viz text	JAWA 50

Tabulka 6.1.2: Přehled základních rozměrů vnějších rotorů

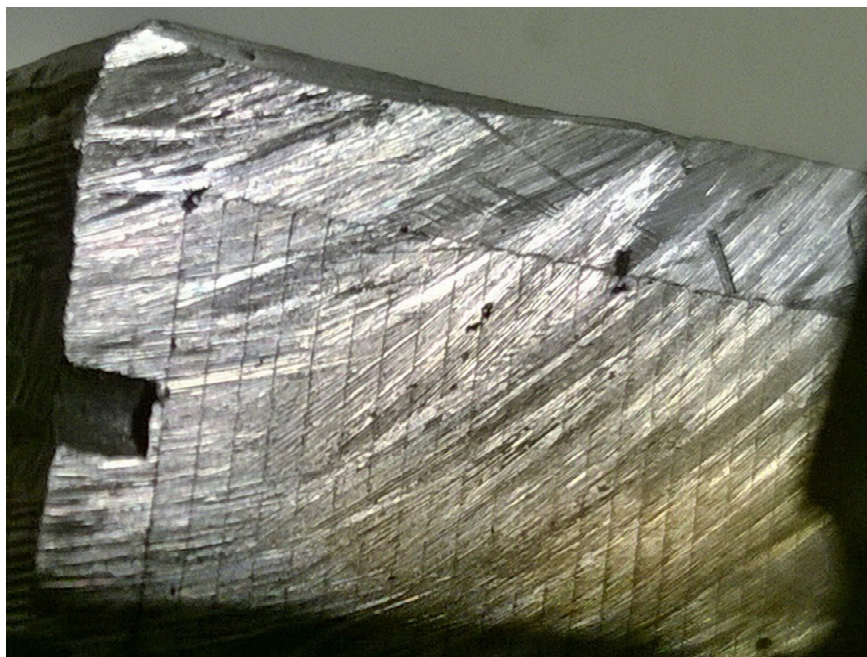


Obr. 6.1.2: Řez vnitřním rotorem s hlavními rozměry

## 6.2 Materiálová analýza magneto setrvačnicku

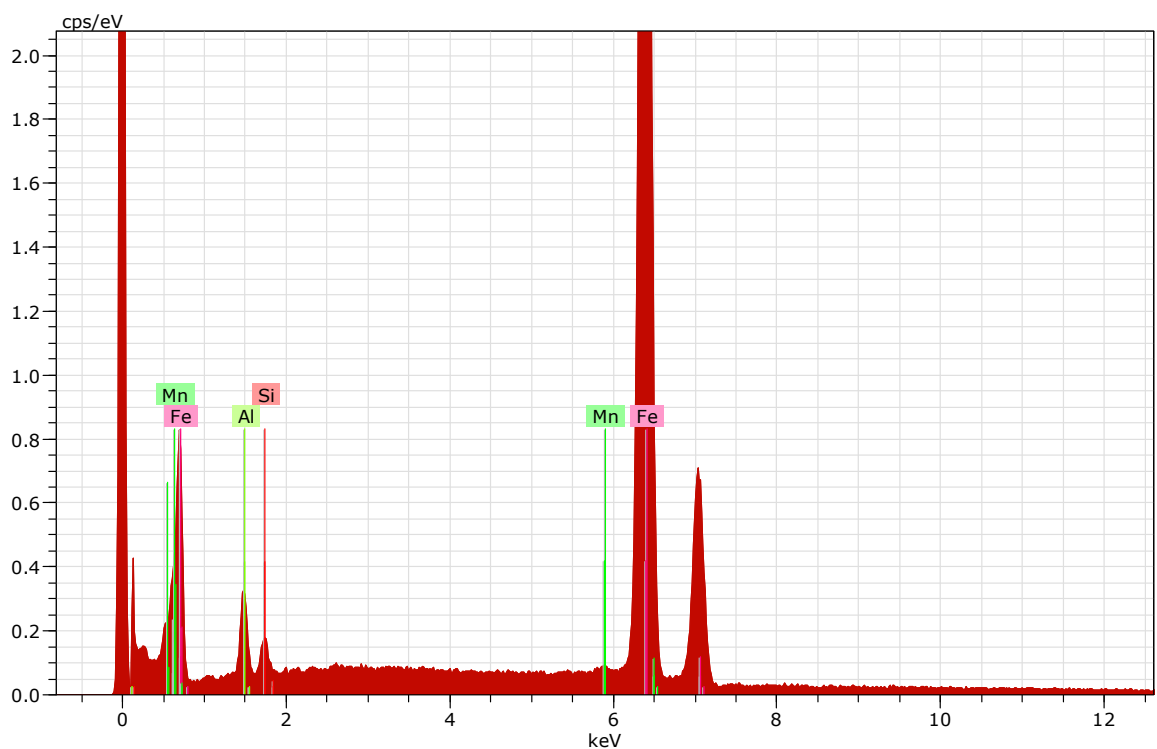
Pro stanovení vhodné metody magnetizace a parametrů zařízení bylo nutné zjistit, z jakého materiálu se magnety skládají. K tomuto bylo využito nedestruktivní prvkové analýzy na pracovišti UPCE v Doubravících. Tato analýza je založena na interakci dopadajícího svazku urychlených elektronů na zkoumaný materiál. Přístroj pak sleduje charakteristické záření v rentgenovém spektru, které vzniká uvolněním elektronů z vnitřní sféry atomu. Pomocí analýzy je pak možno detekovat různé chemické prvky s omezením pro ty lehké, což v našem případě byl například uhlík, který významně ovlivňuje magnetické vlastnosti oceli.

Vyříznutím z mechanicky defektního setrvačnicku byl vyroben vzorek, který byl následně podroben analýze. Zajímavým zjištěním bylo složení magnetů z 0,5mm silných plechů poskládaných na výšku. Nabízí se vysvětlení, že se jedná o opatření proti vířivým proudům nicméně po konzultaci s odborníkem z firmy Oersted Technology jsem dospěl k názoru, že se může jednat o výrobní opatření. Je jednodušší a levnější pouze změnit výšku odebráním několika vrstev plechu pro různé výrobní typy setrvačnicků než vyrábět několik druhů geometricky odlišných magnetů. Není to nejlepší metoda, ale pro dosažení potřebné síly magnetu zřejmě dostačovala.



Obr. 6.2.1: Řez vzorkem magneto setrvačnicku s viditelnými plechy tvořícími magnet

Na Obr. 6.2.2 níže vidíme, že většinovým prvkem v magnetu je železo. Dále je obsažen hliník, křemík a mangan. Nejedná se tedy o AlNiCo magnet, jak jsem si zpočátku myslel. Příměsi hliník, mangan a křemík slouží jako legující prvky, kde křemík zvyšuje odolnost vůči korozi, zvyšuje pevnost a tvrdost zhoršuje elektrickou a tepelnou vodivost. Mangan je obsažen ve většině ocelí, má dezoxidační účinky, snižuje tepelnou i elektrickou vodivost. Hliník zvyšuje odolnost proti oxidaci, zvyšuje  $H_c$ . Podle chemické analýzy se tedy nejspíše jedná o uhlíkatou ocel, která se používala u starších permanentních magnetů. Obsah uhlíku nelze použitou metodou zjistit, nicméně odborná literatura hovoří většinou o obsahu uhlíku asi 1 %. Ten zvětší koercivitu, ale zmenší remanenci. U uhlíkaté oceli s 1 % uhlíku je  $H_c \sim 4$  kA/m.



Spectrum: Acquisition 1660

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Fe	26	K-series	84.90	92.18	85.62	2.18
Al	13	K-series	5.02	5.45	10.47	0.30
Si	14	K-series	1.70	1.85	3.41	0.11
Mn	25	K-series	0.49	0.53	0.50	0.05
Total:			92.10	100.00	100.00	

Obr. 6.2.2: Výsledek prvkové analýzy vzorku magnetu



### 6.3 Simulace magnetického obvodu

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4, složitá elektrická a magnetická pole často nelze řešit analytickými metodami. V těchto případech lze použít různé přibližné metody jako je například metoda konečných prvků FEM<sup>2</sup>. Tato metoda spočívá v rozdělení definované oblasti na konečný počet podoblastí trojúhelníkového tvaru tak, že každé z nich mají právě jednu ze tří vzájemných poloh:

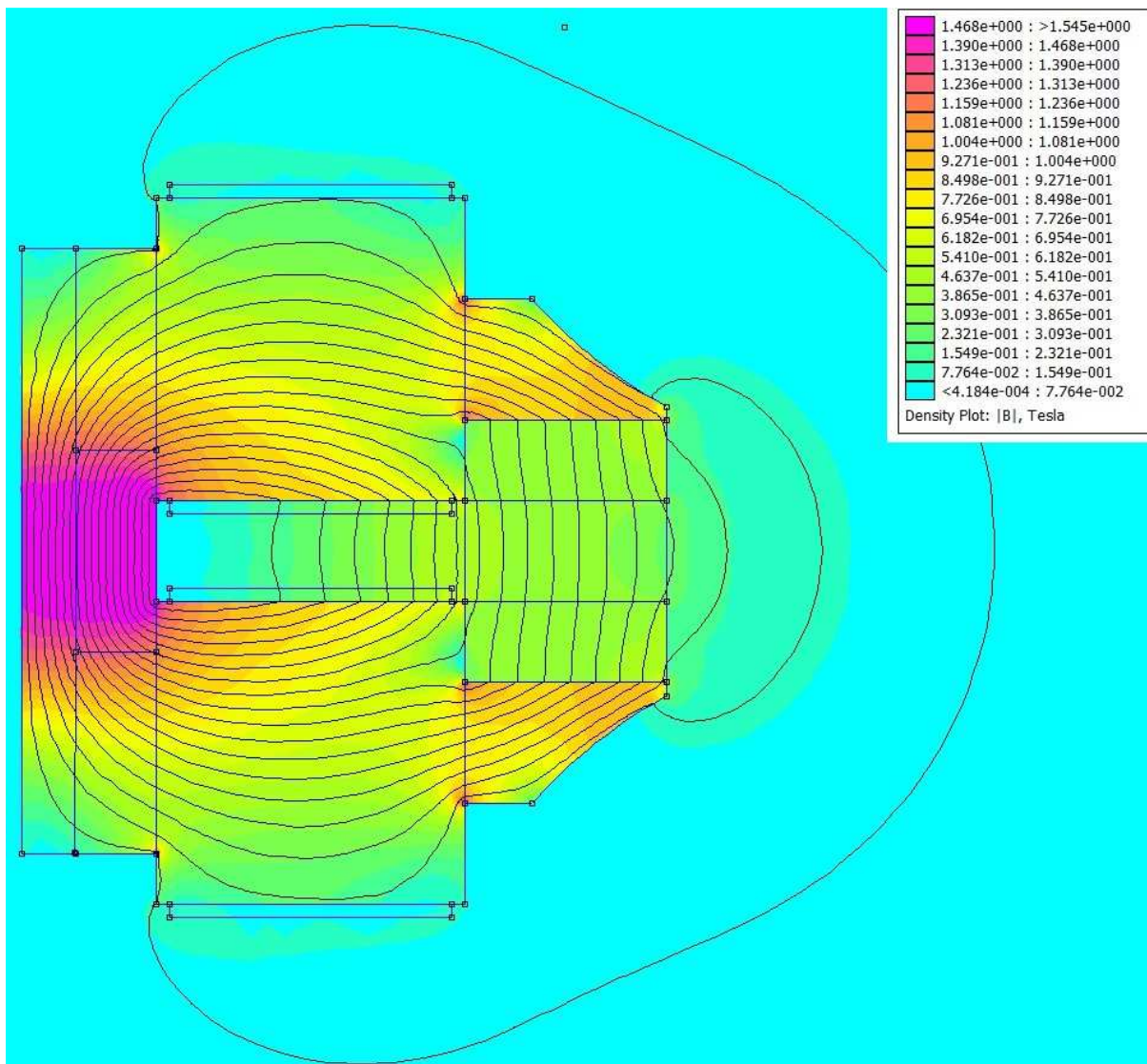
- Nemají žádný společný bod
- Mají pouze jeden vrchol společný
- Mají společnou celou stranu

Dále žádný z trojúhelníků nesmí být protnut rozhraním. Po definování stupně polynomu pro aproximaci, uzlových bodů a uzlových parametrů se jednotlivé podoblasti nazývají konečné prvky [11].

Dnes se používá pro tyto simulace jak ve 2D, tak ve 3D počítačových programů, které umožňují zobrazit jak magnetickou indukci, tak intenzitu magnetického pole na základě specifikování prostředí (okrajových podmínek), různých druhů materiálu jako jsou permanentní magnety, magneticky měkké i tvrdé materiály, paramagnetika a diamagnetika. Lze také definovat vinutí, a to zadáním počtu závitů a protékaného proudu. Já jsem pro simulaci ve dvojrozměrném prostoru použil program **FEMM**, který je volně distribuován a lze v něm analyzovat jak magnetické, tak elektrostatické, tepelné a elektrické problémy.

---

<sup>2</sup> FEM je zkratka převzatá z angličtiny pro Finite Element Method



Obr. 6.3.1: Simulace magnetického toku ve dvojpólu v programu FEMM

Na Obr. 6.3.1 je zobrazený výstup z programu FEMM pro konkrétní rozměry a elektrické parametry použité na magnetizační přípravek. Pro jednoduchost je použito pouze dvou pólů, ve skutečnosti bude magnetický tok rozdělen v případě čtyř pólového magneto setrvačnicku poněkud jinak. Jedná se o přiblížení problému a o ověření, zda navržené geometrické rozměry limitované rozměry magneto setrvačnicku a maximální možnou velikostí vinutí a proudu v něm řádově dosáhne uvažované intenzity magnetického pole. Nevidíme zde prostorové rozložení, které by nám poskytl například program Maxwell od firmy Ansys. Pokusil jsem se použít trojrozměrné simulace za použití modelu vytvořeném v programu Inventor, ale obvod je velmi komplexní a dobrá analýza vyžaduje velký výpočetní výkon spolu s velkou operační pamětí, kterou bohužel v domácích podmínkách jen obtížně dosáhneme. Samotný program je také náročnější na nastavení všech parametrů simulace.

## 6.4 Návrh magnetizačního přípravku

Pro bakalářskou práci jsem si obstaral dva typy magneto setrvačnicku. Liší se rozměry a počtem pólů. Principiálně a materiálovým složením jsou ale stejné. Z důvodu velké náročnosti výroby pólových nástavců jsem zvolil jako primární pro tuto práci magneto setrvačnick (rotor) se čtyřmi póly běžně používaných v motocyklech Stadion v sedmdesátých letech.

### 6.4.1 Mechanické parametry rotoru

Vzhledem k tomu, že se jedná o vnější rotor, bylo nutno navrhnout přípravek tak, aby se na něj dal rotor nasadit. Oproti opačné konstrukci například pro magnetizaci rotorů motorů s permanentními magnety, kdy se naopak rotor vkládá do magnetizačního přípravku, jsou zde mechanické parametry více omezující pro maximální průměr pólových nástavců a z toho také vyplývá konstrukce vinutí – počet závitů a průřez vodiče.

Vnitřní průměr rotoru na Obr. 6.4.1.1 je 88 mm, vnější pak 115,8 mm. Hloubka od hrany po vrchní základnu je 30 mm. Magnety jsou rozmístěny po 90° po obvodu rotoru.



Obr. 6.4.1.1: Čtyř pólový rotor

### 6.4.2 Návrh pólových nástavců

Z mechanických vlastností rotoru byly odvozeny rozměry pólových nástavců. Ty jsou konstrukčně nejsložitější v celém návrhu. Simulace v programu FEMM ukázala, že dochází k určitému zhuštění magnetických siločar při geometrickém vykrojení vrchní části nástavce, a tedy i intenzita magnetického pole by měla být větší v oblasti, kde jsou umístěné magnety. Vnější větší rádius kopíruje vnitřní průměr rotoru. Vnitřní rádius byl pak zvolen tak, aby bylo možné vložit čela pro cívky vinutí a ty mohly být zde potom zakončeny, propojeny navzájem a propojeny z výstupními svorkami. Středová část byla původně uvažována se čtvercovým průřezem nicméně po konzultaci s odborníky v univerzitní dílně v Doubravících a po vlastní úvaze, že bude jednodušší vinout na kruhový průřez, jsem návrh upravil. Dodatečně jsem také nechal průměr jádra zmenšit, kvůli příliš těsné blízkosti jednotlivých sousedních vinutí. Spodní část je navržena a obrobena tak, aby zapadala do „T“ drážky v podstavě a pomocí závitů M8 se dal celý pól zajistit v podstavě.

Pólové nástavce byly zhotoveny pracovníky univerzity v dílně v Doubravících z jednoho kusu ocelové tyče z materiálu S355J2. Jedná se o magneticky měkkou ocel s nízkým obsahem uhlíku maximálně 0,2 %. Primárně je důležité, aby nedošlo k přesycení jádra a snížení permeability. Přípravky na magnetování vyráběné pro průmyslové použití na nové druhy magnetů jsou vyrobeny z transformátorových plechů z důvodů snížení ztrát vířivými proudy.

### 6.4.3 Návrh vinutí

Vzhledem k tomu, že se mi nepodařilo přesně zjistit, z čeho je magnet v rotoru vyroben, byl jsem nucen zvolit některé hodnoty experimentálně. V první řadě jde o to, aby cívka neměla příliš velkou indukčnost, a tedy nebránila nárůstu magnetizačního proudu. Při návštěvě specializovaného pracoviště ve firmě VÚES Brno jsem měl možnost několik přípravků pro magnetování rotorů vidět a všechny měly jen několik závitů silným pásovým vodičem.

Dle rozměrů pólových nástavců a průměru měděného vodiče 1,6 mm jsem zvolil 20 závitů. Vinutí bude zatíženo impulzem 160 A, který má celkovou dobu trvání dle simulace v programu LTspice přibližně 200 ms při užití vzduchové cívky. Reálný stav je však nutno změřit, protože indukčnost bude závislá na velikosti protékajícího proudu, resp. na klesající permeabilitě ocelového jádra. Bylo tedy nutné alespoň rámcově ověřit, zda nedojde k přílišnému tepelnému namáhání vinutí.

Bylo nutno zjistit odpor cívky pro výpočet Joulova tepla  $Q_J$ :

$$R = \rho \frac{l}{s} = 0,0178 \cdot \frac{2,58}{2,01} = 0,0228 \Omega \quad (6.4.3.1)$$

Hmotnost měděného drátu potom jako:

$$m = s \cdot l \cdot \rho^* \quad [\text{kg}] \quad (6.4.3.2)$$

Kde  $l$  je délka drátu,  $s$  je jeho průřez,  $\rho$  rezistivita mědi,  $\rho^*$  je hustota mědi.

Předpokládejme dále, že bude docházet k ideální tepelné výměně. Při průchodu proudem  $I$  vodičem o odporu  $R$  se vyvine Joulovo  $Q_J$  teplo za dobu  $t$ :

$$Q_J = RI^2t \quad [\text{J}] \quad (6.4.3.3)$$

Energii potřebnou na ohřátí vodiče lze vyjádřit:

$$Q_P = m \cdot c \cdot (t - t_0) \quad [\text{J}] \quad (6.4.3.4)$$

Kde  $t$  je teplota konečná,  $t_0$  počáteční teplota,  $c$  měrná tepelná kapacita mědi,  $m$  hmotnost vodiče. Tedy můžeme napsat rovnici:

$$Q_P = Q_J \quad (6.4.3.5)$$

$$m \cdot c \cdot (t - t_0) = RI^2t \quad (6.4.3.6)$$

Po dosazení pokojové teploty  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$5 \cdot 10^{-6} \cdot 8960 \cdot 383 \cdot (t - 25) = 0,0228 \cdot 160^2 \cdot 0,2 \quad (6.4.3.7)$$

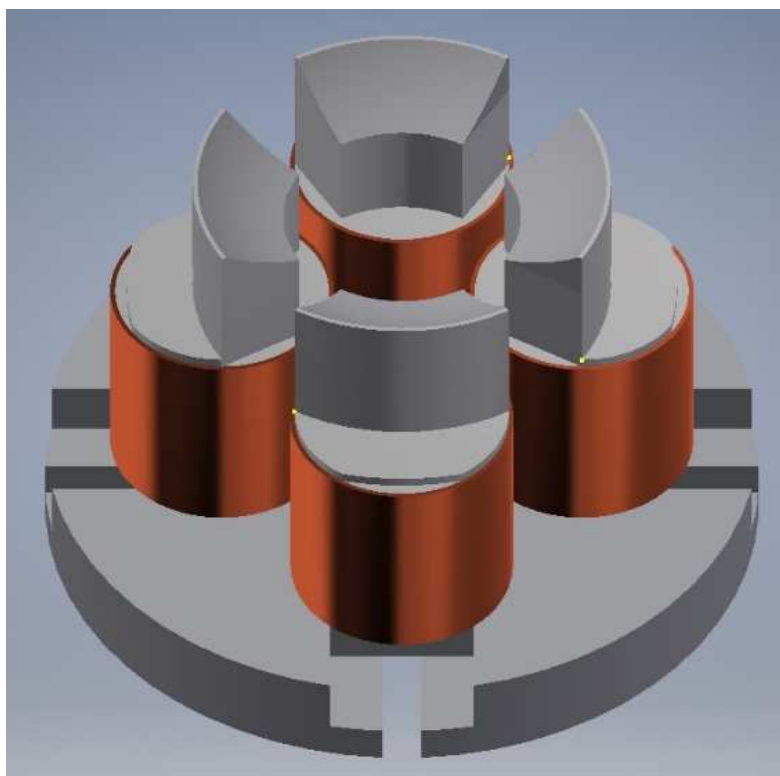
$$t = 31,57 \text{ }^\circ\text{C}$$

Vodič se tedy ohřeje při průchodu proudem 160 A po dobu 200 ms v prostředí o teplotě  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  o  $6,57 \text{ }^\circ\text{C}$ . To se může zdát jako poměrně malá hodnota, musíme si však uvědomit, že při dlouhodobém provozu se jedná o nárůst více jak  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  za sekundu, a to již není málo jak z pohledu izolace, tak zvyšování odporu vinutí a také v extrémním případě může dojít k destrukci vinutí. Jak bylo uvedeno, výpočet je orientační pro ideální výměnu tepla, neuvažujeme vlivy izolace ani ohřevu okolí. V tomto případě ale není nutné se dále teplotní zátěží zabývat, pro testování by nemělo k žádnému poškození vlivem tepla dojít.

Vinutí je odizolováno od jádra kaptonovou (polyimidovou) páskou která má vynikající izolační vlastnosti, tepelnou odolnost a odolává jak UV záření, tak rozpouštědlům a kyselinám. Jednotlivé póly jsou pak spojeny vodičem o průřezu  $4 \text{ mm}^2$  takovým způsobem, aby vytvořené pole sousedních magnetů nemělo stejnou orientaci podle Lenzova pravidla pravé ruky.

#### 6.4.4 Návrh podstavky

Podstavka musí zajistit více funkcí. Je to hlavně zajištění stejné vzdálenosti pólových nástavců a požadovaném úhlu mezi nástavci podle parametrů rotoru. V případě čtyřpólového rotoru jsou tedy v podstavě 4 „T“ drážky ve kterých se podstavce pohybují. Je tedy možné variabilně nastavovat průměr pro rotor v rámci limitů drážky o délce 40 mm. Uprostřed ocelové podstavky je otvor o průměru 50 mm, ve kterém je vlepěna deska z pertinaxu, kvůli izolaci šroubů sloužících jako vstupní svorky. Podstavka je také součástí magnetického obvodu, je tedy potřebné, aby mezera mezi pólovými nástavci a podstavou v „T“ drážce byla pokud možno co nejmenší a nevznikaly v ní ztráty. Pro zajištění stejných magnetických parametrů je i podstavka z oceli S355J2 stejně jako pólové nástavce. Celkový průměr podstavky je 150 mm, výška pak 20 mm.



Obr. 6.4.4.1: Třírozměrný model celé sestavy pólových nástavců a podstavky

## 6.5 Návrh zdroje pro impulzní magnetování

Koncepčně jsem si vybral řešení uvedené v kapitole 5.3.3, to znamená zdroj s bankou kondenzátorů a spínacím tyristorem. Toto řešení by mělo postačovat pro feritové a AlNiCo magnety. Použité kondenzátory ani zdaleka nedosahují kapacit a napětí, jaké jsou v průmyslově vyráběných zařízeních. Jednak kvůli složitosti a velikosti celého zařízení a jednak kvůli ceně jsem si stanovil za cíl dosáhnout poloviny energie nejslabšího zařízení prodávaného na českém trhu od firmy VÚES Brno což je model S 054-30-15 disponující energií 1 kJ. K tomuto účelu jsem tedy vybral 6 kondenzátorů na nominální napětí 75 V a celková kapacita je 0,192 F. Energie uložená v kondenzátorech podle vztahu (5.2.2. je tedy 540 J.

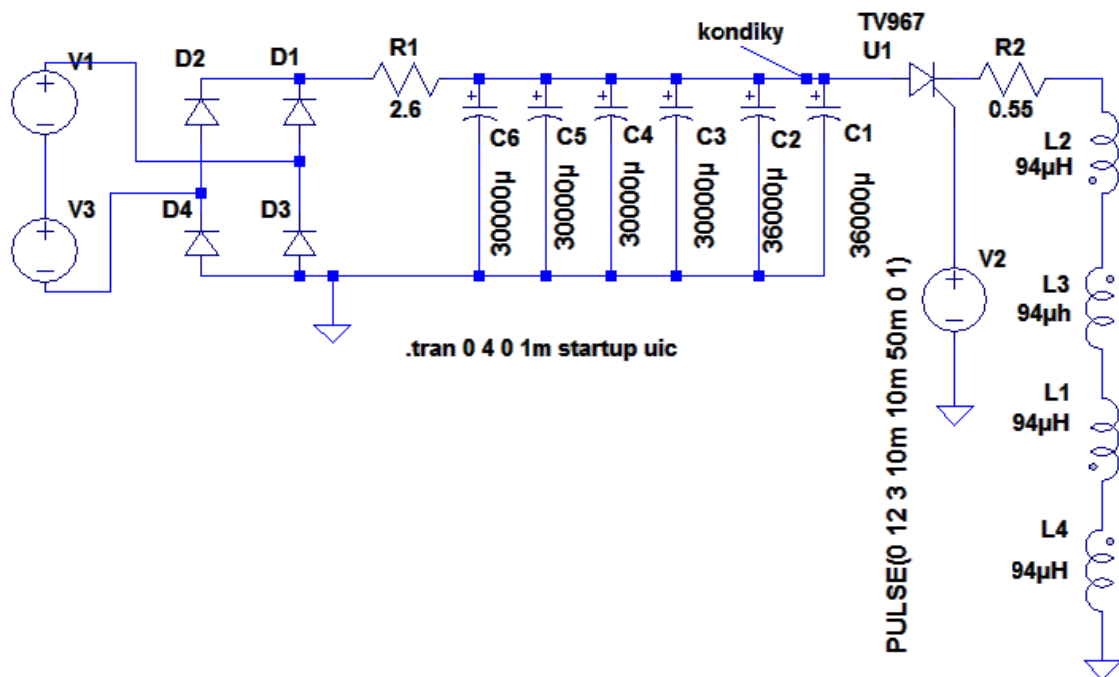
Protože samotné magnetizační cívky i tyristor mají velmi malý odpor, je potřeba omezovat proud dalším rezistorem. Ten samozřejmě musí být takového provedení, aby vydržel výkonovou ztrátu, která na něm vlivem proudového impulsu vzniká. Zvolil jsem rezistor na keramické trubce vinutý drátem ze slitiny FeCrAl, která je velmi odolná vůči vysokým teplotám až přibližně 1 400 °C a má velký měrný elektrický odpor v závislosti na přesném chemickém složení. Využívá se v aplikacích, kde je potřebné mařit energii a nestačí slitina Nichrome například v trakci pro odporovou regulaci výkonu jako odporník. Výhodou je, že rezistor má tři posuvné svorky, lze tedy dodatečně v závislosti na skutečných naměřených hodnotách nastavit velikost tak, aby byl dosažen požadovaný proud magnetizační cívkou.

Celé zařízení je napájeno toroidním transformátorem o výstupním napětí 53 V, které je usměrněno diodovým můstkem KBPC5010. Použil jsem transformátor 200 VA se dvěma oddělenými vinutími ze šuplíkových zásob a upravil vinutí tak, aby odpovídalo mým potřebám v zapojení. To znamená, že potřebné výstupní napětí po usměrnění nesmí přesáhnout na kondenzátorech hodnotu 75 V.

### 6.5.1 Simulace v programu LTspice

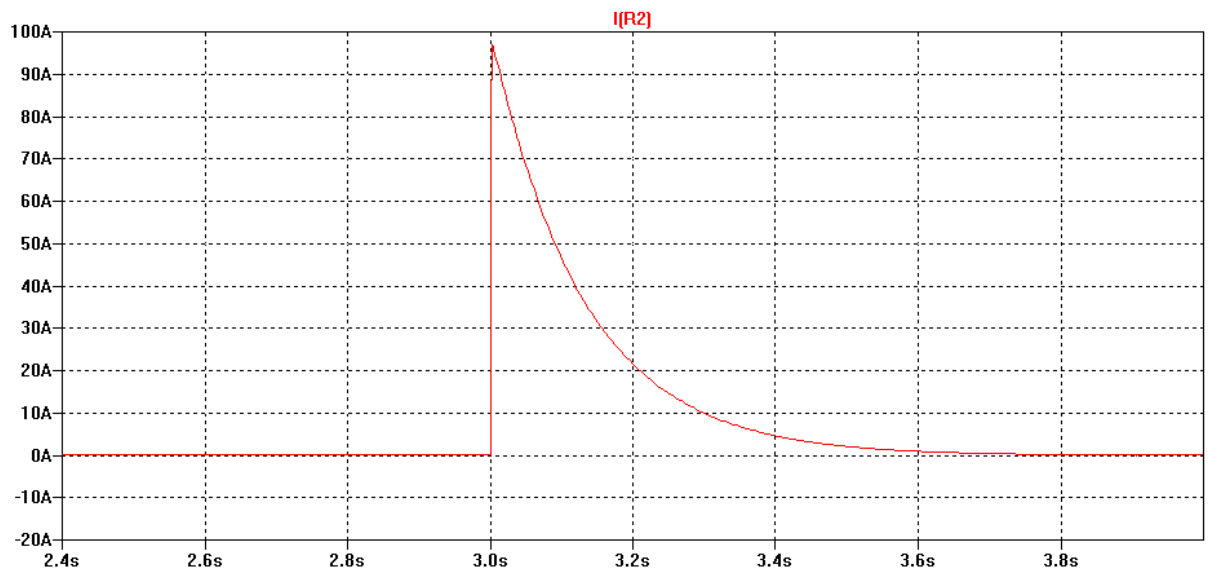
Pro představu, jak se asi hlavní výkonový obvod bude chovat, jsem se rozhodl nasimulovat spuštění pulzu a tedy vybíjení kondenzátoru do cívek v programu LTspice. Simulace je jen tak přesná, jak přesné jsou modely součástek a bude se zajisté odchylovat od reálného chování obvodu, nelze podchytit všechny jevy které mohou nastat. Standardně není tyristor v knihovně součástek programu, bylo nutné tedy vytvořit model tyristoru na základě jeho katalogových hodnot.

Pomocné zapojení pro spínání tyristoru bylo pro jednoduchost nahrazeno pulzním zdrojem s definovanou šířkou pulzu a zpožděním, aby se stihly kondenzátory nabít. Indukčnost byla také změřena pouze v nezapojeném stavu a bude se měnit v závislosti na změně permeability jádra tak, jak bude narůstat magnetizační proud vinutím. Vstupní zdroje střídavého napětí byly nastaveny tak, aby to odpovídalo naměřené hodnotě na kondenzátorech. Odpor R2 o hodnotě  $0,55 \Omega$  odpovídá celkovému odporu magnetizačního obvodu.



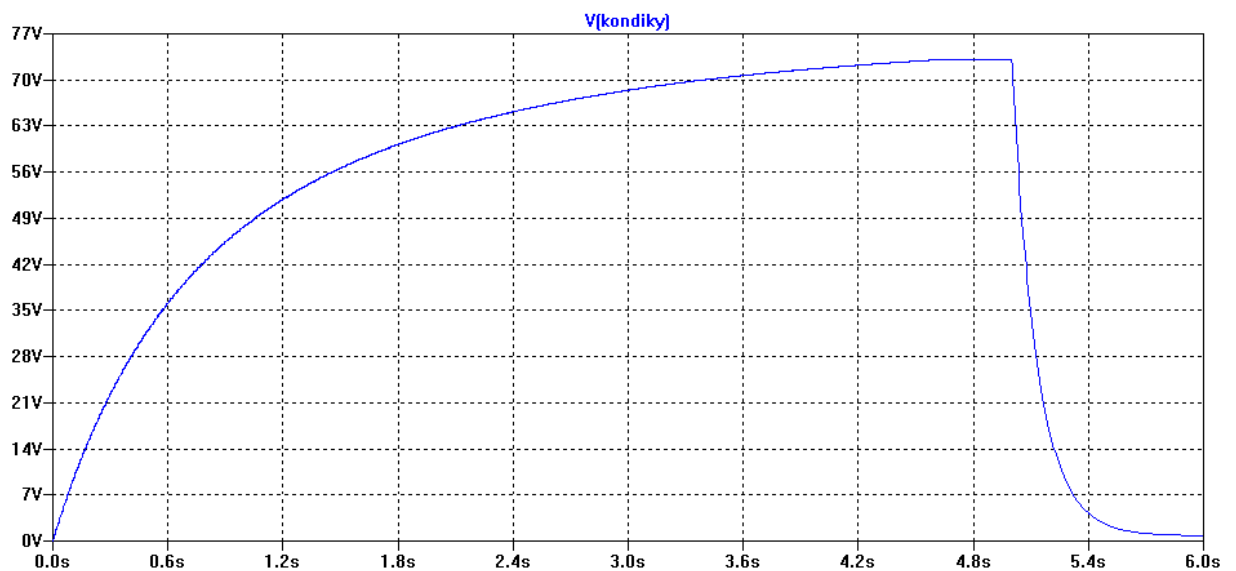
Obr. 6.5.1.1: Schéma pro simulaci výkonového obvodu v programu LTspice





Obr. 6.5.1.2: Průběh vybíjecího impulsu z programu LTSpice

Jak je vidno z grafu, proud dosahuje ve špičce téměř 100 A. To je méně než jsem očekával, kvůli dalším odporům vedení a přechodových odporů. Nicméně stále by to mělo být podle dostupných informací dostatečné pro zmagetování materiálu, ze kterého je magnet v rotoru vyroben. Na Obr. 6.5.1.3 níže vidíme průběh nabíjení a vybíjení banky kondenzátorů.



Obr. 6.5.1.3 Průběh nabíjecího a vybíjecího cyklu kondenzátorů z programu LTSpice

## 6.5.2 Tyristor a spínání

Jednou z klíčových částí je tyristor. Bylo nutné vybrat takový typ, který výkonově zvládne spínat proudy řádově až 250 A. Z důvodu dostupnosti a ceny jsem použil výkonový tyristor v pastilkovém pouzdře TV 967-500-26 s parametry uvedenými v tabulce Tabulka 6.5.2.1. Originální chladič jsem nesehnal, měl by i příliš velké rozměry musel jsem tedy vyrobit ekvivalent ze standardního hliníkového profilu. Je však třeba zajistit izolaci mezi anodou a katodou, šroubový spoj je protažen umělohmotnou trubičkou a matky jsou na plastových sloupcích. I mezi držákem a tělem chladiče je plastová deska zajišťující elektrickou izolaci od okolních konstrukcí. Jako vývody jsou použity dva měděné pásy na každou stranu tyristoru. Většinou se to takto řeší kvůli symetrii obvodu, v tomto konstrukčním řešení to však nemá příliš velký význam.

$U_{RRM}$	Opakovatelné špičkové závěrné a blokovací napětí	2,6 kV
$I_{RRM}$	Opakovatelný závěrný a blokovací proud při $T_J = 125\text{ °C}$	70 mA
$I_{TAVm}$	Střední propustní proud při $T_C = 86\text{ °C}$ , $f = 50\text{ Hz}$	500 A
$I_{TSM}$	Nárazový neopakovatelný propustný proud při $T_C = 25\text{ °C}$	9 kA
$U_T$	Prahové napětí při $T_J = 125\text{ °C}$	1,07 V
$r_T$	Diferenciální odpor aproximovaný	0,78 m $\Omega$
$U_{TM}$	Špičkové napětí v propustném stavu při $T_J = 25\text{ °C}$ , $I_{TM} = 1570\text{ A}$	2,04 V
$I_L$	Přídržný proud při $T_J = 25\text{ °C}$ , $U_D = 12\text{ V}$	300 mA
$I_H$	Vratný proud při $T_J = 25\text{ °C}$ , $U_D = 12\text{ V}$	150 mA
$U_{GT}$	Zapínací napětí řídicí elektrody při $T_J = 25\text{ °C}$	2,5 V
$I_{GT}$	Zapínací proud řídicí elektrody při $T_J = 25\text{ °C}$	250 mA

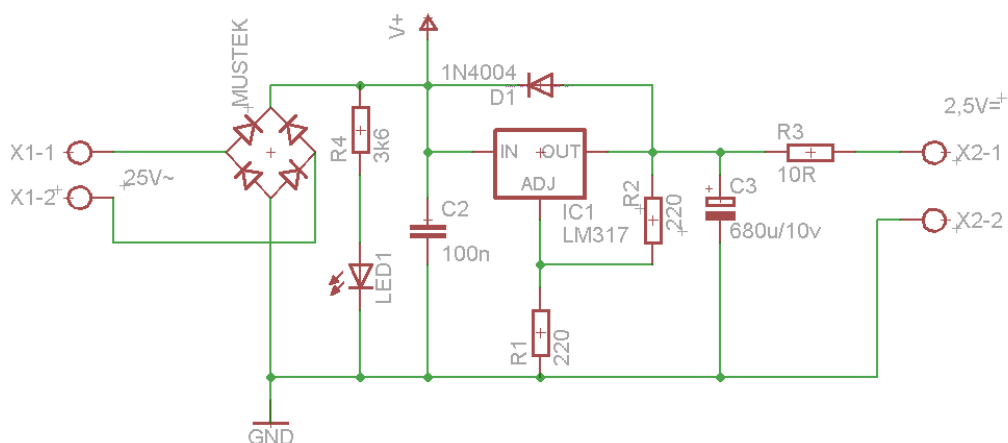
Tabulka 6.5.2.1: Vybrané katalogové hodnoty tyristoru TV 967

### 6.5.3 Spínací obvod

Jak je patrné z katalogového listu tyristoru, není možné spínací napětí odebrat přímo z hlavního usměrňovače. Je potřebné tedy vytvořit zdroj napětí, kterým budeme tyristor spouštět. Pro tento účel by navržen jednoduchý obvod s obvodem LM317T což je lineární regulovatelný třísvorkový stabilizátor v pouzdře TO-220 s maximálním vstupním napětím 37 V a maximálním výstupním proudem 1,5 A. Dle katalogu jsem zvolil výstupní napětí pro řídicí elektrodu 2,5 V a proud 250 mA. Výrobce uvádí vztah pro výstupní napětí následovně:

$$V_{out} = 1,25 \cdot \left( 1 + \left( \frac{R1}{R2} \right) \right) + I_{ADJ} \cdot R1 \quad (6.5.3.1)$$

Kde R1 a R2 tvoří výstupní dělič pro nastavení výstupního napětí, velikost proudu  $I_{ADJ}$  se pohybuje okolo 0,1 mA a R2 má mít doporučenou hodnotu okolo 240  $\Omega$ . Pro jednoduchost jsem vybral z řady rezistor R2 = 220  $\Omega$  a k němu vypočítaná hodnota R1 nejbližší z řady je též 220  $\Omega$ . Zapojení je doplněno o indikační LED a omezující odpor R3 a jinak následuje doporučení výrobce pro daný obvod. Na stejné desce plošných spojů je i další stabilizátor, jehož funkce bude objasněna dále. Tyto pomocné obvody jsou napájeny vinutí o nižším napětí přibližně 25 V, mají vlastní usměrňovač a jsou v provozu prakticky ihned po zapnutí



Obr. 6.5.3.1: Schéma pomocného zdroje pro spínání tyristoru

#### 6.5.4 Dimenzování usměrňovače

Pro dvojcestný usměrňovač se dimenzuje na polovinu  $I_{AV}$ , maximální závěrné napětí  $U_{RRM}$  větší než  $U_m$ . Výstupní špičkové napětí na kondenzátorech je potom dáno vztahem:

$$U_C = U_m \cdot \sqrt{2} - 2U_F \quad (6.5.4.1)$$

$$U_C = 53 \cdot \sqrt{2} - 2,2 = 72,75 \text{ V}$$

Kde  $U_m$  je výstupní napětí transformátoru,  $U_F$  úbytek na diodě v propustném směru. Naměřené hodnoty se ale od vypočtených liší, ve skutečnosti je výstupní napětí na transformátoru 57 V a průměrné napětí na kondenzátorech 72 V. Střední hodnota usměrněného napětí naprázdno je rovna:

$$U_d = 0,9 \cdot U \quad (6.5.4.2)$$

$U_{RRM}$	Největší opakovatelné špičkové závěrné napětí	1000 V
$U_{RMS}$	Největší efektivní hodnota vstupního napětí	700 V
$I_{FAV}$	Maximální střední hodnota proudu v propustném směru	50 A
$I_{FSM}$	Maximální špičkový proud v propustném směru (8.3 ms)	500 A
$U_F$	Úbytek napětí v propustném směru	1,1 V

Tabulka 6.5.4.1: Vybrané katalogové hodnoty usměrňovacího můstku

### 6.5.5 Nabíjení kondenzátorů

Nabíjecí proud kondenzátorů dosahuje při zapnutí vysokých hodnot, pro omezení je vřazen za můstkem rezistor z odporového drátu o průměru 0,7 mm na keramickém tělese a hodnotě 2,6 Ω. Po zapnutí je tak proud dán pouze napětím zdroje U a velikostí předřadného odporu R<sub>p</sub>, kondenzátor se chová jako zkrat.

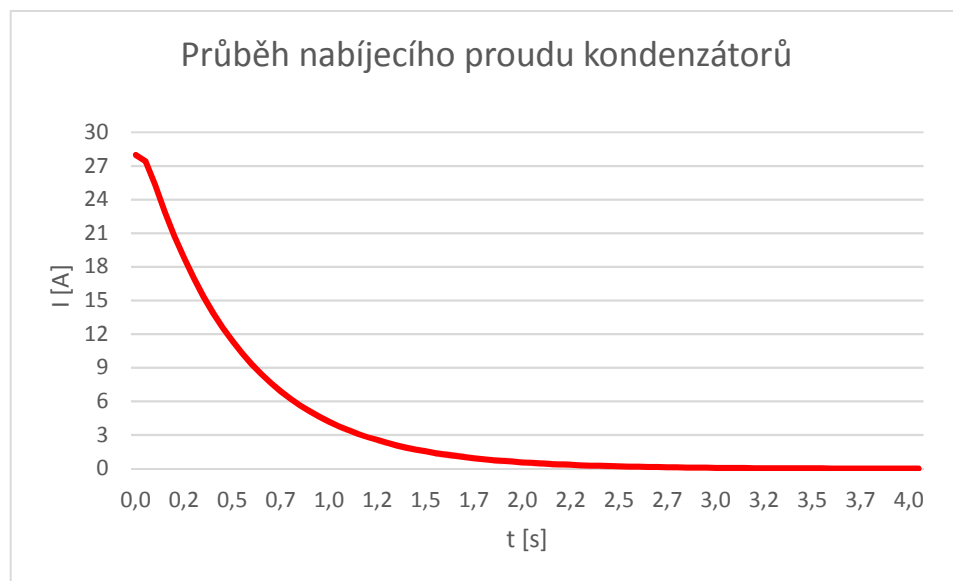
$$I_0 = \frac{U}{R_p} = \frac{72,75}{2,6} = 27,98 \text{ A} \quad (6.5.5.1)$$

Časová konstanta τ v RC obvodu je dána vztahem:

$$\tau = R \cdot C = 2,6 \cdot 0,192 \cong 0,5 \text{ s} \quad (6.5.5.2)$$

Pro průběh proudu i platí při nabíjení z ideálního zdroje:

$$i = \frac{U}{R_p} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = 27,98 \cdot e^{-\frac{t}{0,5}} \quad (6.5.5.3)$$



Obr. 6.5.5.5: Průběh nabíjecího proudu kondenzátorů při zapnutí zdroje

Čas, za který přechodný děj dosáhne z 99 % ustáleného stavu je přibližně 2,3 s. Ve skutečnosti tento čas bude ale jiný, protože transformátor není ideální zdroj a při zapnutí dojde k poklesu výstupního napětí. Elektrolytické kondenzátory mají také poměrně velké tolerance a s časem vysychají, pokud bychom chtěli přesný výsledek, je lepší jej změřit. Vybraný můstek tedy vyhovuje svými parametry navrženému zapojení.

### 6.5.6 Polovodičové relé

Kvůli zmíněnému vysokému nabíjecímu proudu kondenzátorů by nebylo příliš vhodné používat mechanické spínací prvky v obvodu nabíjení ať už relé, nebo vypínač. Docházelo by k nežádoucímu opalování kontaktů a snižování životnosti. Rozhodl jsem se použít polovodičové relé SSR<sup>3</sup> typu Crydom D2450, které má dva páry svorek a to řídicí a výkonové. Je to v podstatě integrovaný blok s tyristory a řídicí elektronikou ovládaný interně opticky fototriakem. Existuje velká variabilita vstupů a výstupů v kombinaci stejnosměrný či střídavý vstup nebo výstup. Mnou použité relé má stejnosměrný vstup a střídavý výstup. Sepnutí relé je realizováno přepnutím přepínače na předním panelu přístroje, SSR je napájeno pomocným zdrojem 12 V stejně jako relé vybíjecího obvodu zmíněné v kapitole 6.5.7.

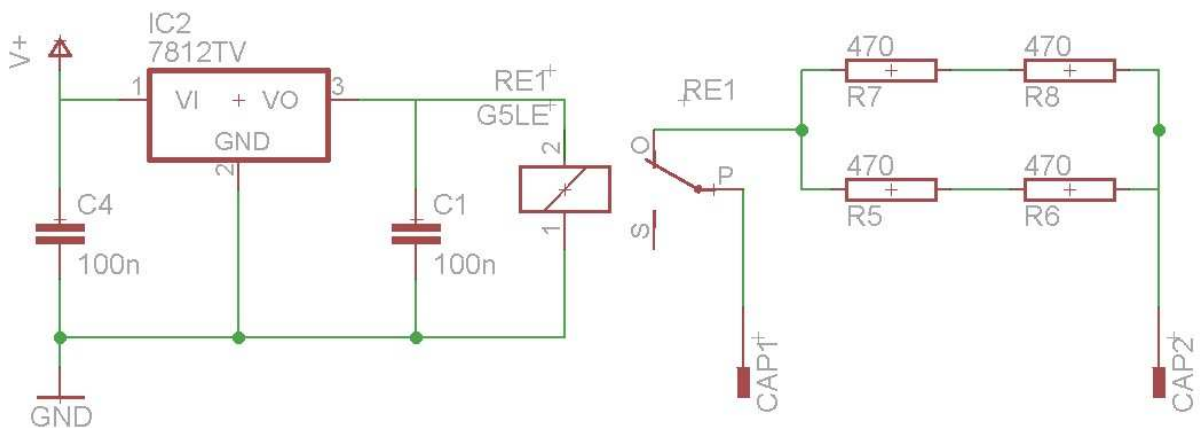
$U_{RMS}$	Pracovní výstupní napětí na při $f = 47-440$ Hz	24-280 V
$U_C$	Rozsah ovládacího napětí	3-32 V
$I_C$	Maximální ovládací proud	12 mA
$U_{off}$	Hranice ovládacího napětí pro zaručené vypnutí	1 V
$I_{LMAX}$	Maximální proud zátěže	50 A
$I_{LMIN}$	Minimální proud zátěže	150 mA
$I_{CSM}$	Maximální špičkový proud při $f = 50$ Hz	597 A

Tabulka 6.5.6.1: Vybrané katalogové hodnoty polovodičového relé Crydom D2450

<sup>3</sup> SSR z anglického Solid State Relay

### 6.5.7 Vybíjecí obvod

Kvůli značné kapacitě udržuje kondenzátorová banka energii po dlouhou dobu. Svodový proud kondenzátorů není úplně zanedbatelný, ale nestačil by pro vybití za nějakou relativně krátkou dobu. Navrhl jsem tedy jednoduchý obvod, který je v činnosti pouze tehdy, když je zařízení odpojené od zdroje energie. Je to samozřejmě pouze základní ochrana, profesionální zařízení disponují mnohem sofistikovanějším systémem ochran stroje i obsluhy. Princip je takový, že na stejné desce spolu se zdrojem pro řízení tyristoru je umístěn ještě jeden tří svorkový stabilizátor 7812 tentokrát na pevné napětí 12 V a maximální výstupní proud 1 A. Jakmile je na vstup přivedeno napětí, přitáhne relé na DPS, které má na v klidu sepnutém kontaktu výkonové rezistory s odporem 470 Ω. V okamžiku vypnutí relé odpadne a tím zapojí rezistory paralelně ke kondenzátorům, které se začnou pomalu vybíjet proudem přibližně 150 mA.



Obr. 6.5.7.1: Schéma pomocného stabilizátoru s vybíjecím obvodem

Pokud bychom chtěli vědět, za jak dlouho se kondenzátory vybijí z plně nabitého stavu, budeme postupovat analogicky jako v kapitole 6.5.5. Časová konstanta podle vztahu (6.5.5.1) je přibližně 90 sekund. Ze vztahu pro vybíjení:

$$u = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (6.5.7.1)$$

Kde  $U_0$  je počáteční napětí kondenzátoru,  $t$  čas a  $\tau$  časová konstanta. Po dosazení hodnot dostaneme čas, za který se vybijí kondenzátor na 1 % původního napětí:

$$0,72 = 72 \cdot e^{-\frac{t}{90,24}} \rightarrow t = 415,5 \text{ s} \quad (6.5.7.2)$$

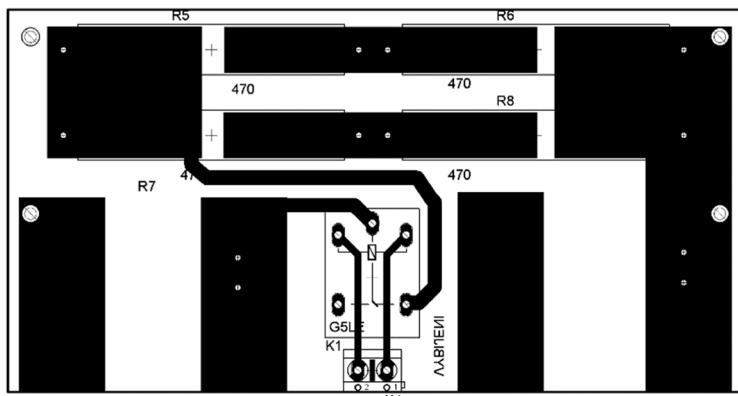
Kondenzátory se tedy vybijí za poměrně dlouhou dobu téměř sedmi minut. Volba menšího vybíjecího proudu tedy byla na úkor času, kdy je možné se zařízením manipulovat.

### 6.5.8 Elektromechanická konstrukce

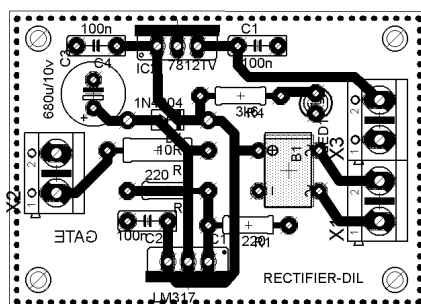
Vzhledem k množství a hmotnosti jednotlivých komponent bylo nutné navrhnout přístrojovou skříň na míru potřebám. Zvolil jsem konstrukci svařovaného ocelového rámu ze čtvercového profilu 15x15 mm. Přední a zadní panel spolu se spodní deskou jsou z polypropylenu tloušťky 8 mm. Horní víko i bočnice jsou z jednoho kusu ocelového plechu ve tvaru „U“ tloušťky 1 mm. Konstrukce byla doplněna i o voltmetr na předním panelu, aby bylo možné monitorovat průběh nabíjení a stav přístroje. Dále je tam umístěno tlačítko spouštění impulsu a výstupní svorky. V zadním panelu je pak napájecí konektor spolu s integrovaným pojistkovým pouzdrem a síťový vypínač.

### 6.5.9 Návrh a výroba DPS

Pro pomocný zdroj i výkonové rezistory byly navrženy dvě desky plošných spojů v programu Eagle. Následně byla vytištěna předloha na pauzovací papír. Po rozměrové úpravě cuprexitové desky s fotocitlivou vrstvou jsem tuto osvětlil zdrojem UV záření, po stanovené době osvětlení proběhlo vyvolání v 1,5 % sodném louhu a následovalo vyleptání v roztoku chloridu železitého. Nebyly použity žádné součástky pro povrchovou montáž, takže následovalo vyvrtání, omytí ochranného laku a osazení mikropájkou.



Obr. 6.5.9.1: Deska plošných spojů pro vybíjecí rezistory



Obr. 6.5.9.2: Deska plošných spojů pomocných zdrojů



## 7 Oživení a naměřené hodnoty

Oživení celého výrobku bylo realizováno s vedoucím práce v laboratoři v Doubravících. Cílem bylo ověřit funkci zdroje impulzů a jak se bude chovat celá sestava se zapojeným magnetizačním přípravkem. Propojení bylo provedeno vodiči o průřezu  $6 \text{ mm}^2$ , což by měl být dostatečně dimenzovaný vodič pro uvažované pulzní zatížení a odpor je při délce přibližně 50 cm přijatelný pro oživování.



Obr. 7.1: Oživování v Doubravické laboratoři

Na Obr. 7.1 výše je vidět testovací sestava. Použil jsem dva laboratorní zdroje, nastavitelný rezistor, voltmetr, ampérmetr, bočník a osciloskop. Při oživení se projevila závada na zdroji pro řídicí elektrodu tyristoru, proto jsem musel jako náhradu použít pro sepnutí laboratorní zdroj. Bočník s parametry  $75 \text{ A}/60 \text{ mV}$  byl vřazen do série s magnetizačními cívkami a na jeho napěťových svorkách byla připojena sonda osciloskopu, která měří úbytek na bočníku. Tento průběh můžeme následně vidět na osciloskopu a ze známých údajů převést na proud, který obvodem prochází.

## 7.1 Měření remanence rotoru před posílením

Před nasazením rotoru na přípravek proběhlo měření teslametrem Metra Blansko dvou různých kusů rotorů, kdy jeden vykazoval nižší hodnoty než druhý. Bohužel přístroj nebyl dlouho kalibrovaný a vzhledem k jeho stáří se nelze zcela spolehnout na přesné výsledky měření. Proto bylo měření pojato jako orientační, čili bylo sledováno, zda se hodnota po magnetizačním cyklu zvětší oproti předchozímu stavu.

Byl vybrán tedy slabší rotor a vložen do přípravku. Proběhlo spuštění pulzu, ten byl poté osciloskopem zaznamenán.



Obr. 7.1.1: Měření remanence rotoru sondou

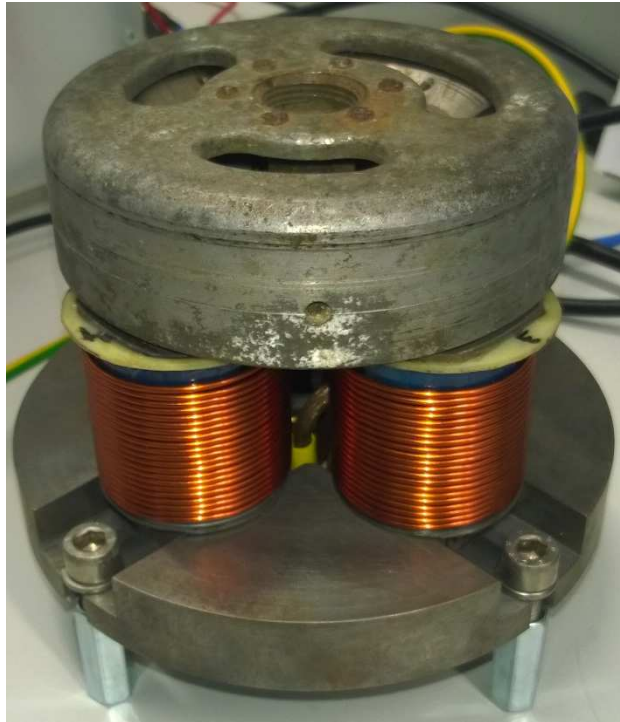
Na Obr. 7.1.2 níže vidíme naměřený výsledek jednoho z pólů na rotoru. Rozsah teslametru byl nastaven na 0,2 T. Hodnota se tedy pohybuje okolo 0,04 T před posílením.



Obr. 7.1.2: Naměřená hodnota před posílením

## 7.2 Průběh magnetizačního proudu

Před nasazením do přípravku bylo nutné zkontrolovat orientaci magnetických pólů na rotoru a na přípravku kompasem, aby nedošlo k přemagnetování. Po vsazení do přípravku proběhlo sepnutí impulzu, kdy bylo slyšet charakteristický zvuk pro magnetizační proces. Ten je způsobený jednak okamžitým silovým působením magnetického pole na všechny

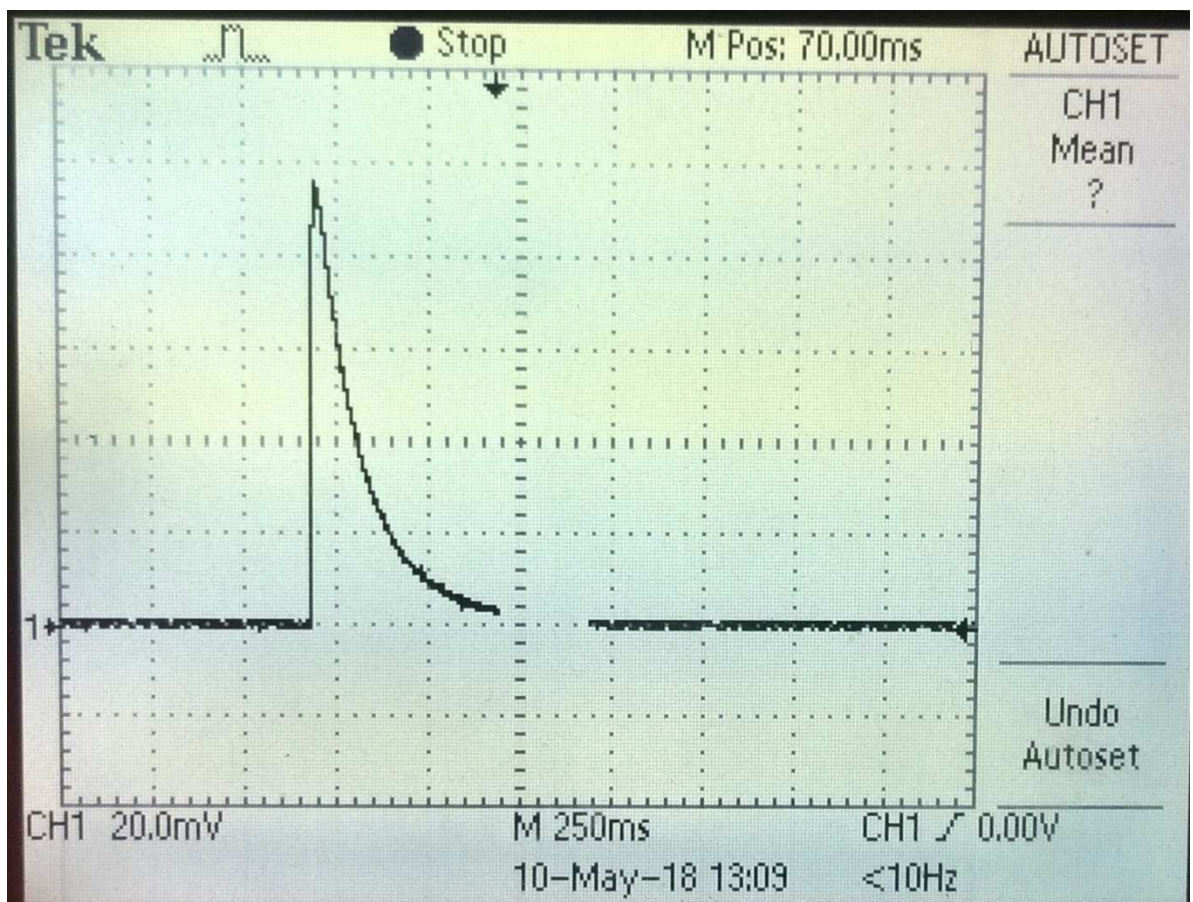


Obr. 7.2.1: Přípravek s nasazeným rotorem

feromagnetika v obvodu a jednak samotné materiálové změny, tedy orientace domén, emitují určitý druh zvuku. Na obrázku Obr. 7.2.2 na další stránce vidíme velmi podobný průběh proudu, jako na Obr. 6.5.1.. Osciloskop Tektronix TDS 1002 byl nastaven na rozlišení 20 mV na dílek, časová základna 250 ms. Pokud odečteme hodnotu napětí, je to 88 mV. Po přepočtu konstanty bočnicku, což je 0,8 mV/A proud tedy vychází 110 A. Intenzitu magnetického pole  $H$  vypočteme podle vztahu:

$$H = \frac{N \cdot I}{l} = \frac{20 \cdot 110}{20 \cdot 0,00016} = 687,5 \text{ kA/m} \quad (7.2.1)$$

Kde  $N$  je počet závitů jedné cívky,  $I$  proud cívkou a  $l$  délka cívky, tj. 20 závitů o průměru 1,6 mm. Dosažená hodnota by měla více než postačovat k posílení magnetu z uhlíkaté oceli, která má při obsahu uhlíku 1 % koercitivitu  $H_c$  asi 4000 A/m a intenzita požadovaná při magnetizaci je zpravidla asi třináásobek koercitivity.



Obr. 7.2.2: Průběh změřeného magnetizačního pulzu

### 7.3 Měření remanence rotoru po zmagnetování

Po skončení pulzu byl alternátor sejmut z přípravku, již byla znatelná větší síla, kterou magnety působí na ocelová jádra magnetizačních cívek. I po přiložení kompasu bylo zřetelné působení magnetického pole na delší vzdálenost. Po změření teslametrem se potvrdil předpoklad, že proběhlo posílení magnetů. Ten ukázal výchylku 0,074 T. Což je o 0,03T více než před posílením.



Obr. 7.3.1: Naměřená remanence rotoru po zmagnetování

## 8 Závěr

Cílem práce bylo navrhnout přípravek pro magnetování a posilování permanentních magnetů alternátorů a vyzkoušet jeho činnost na reálném případě alternátoru. Po získání velkého množství informací musím říci, že téma magnetizace je velmi obsáhlé jak po teoretické stránce, kdy je potřebné si osvojit zákonitosti elektromagnetizmu, tak po stránce konstrukční, která vyžaduje přesnou výrobu a znalosti z tohoto oboru. V neposlední řadě musím zmínit i to, že konstrukce magnetizérů a přípravků na dané rotory je finančně i časově náročná. Ne vždy výpočty či simulace odpovídají praktickým výsledkům, mnohdy zanedbáváme vlivy při návrhu, které se v obvodu potom projeví. Velmi mi pomohla návštěva pracoviště ve firmě VÚES Brno, kde mají velké zkušenosti s výrobou motorů a vyrábí a používají i vlastní magnetizační zařízení. Nebylo samozřejmě možné získat detailní informace kvůli ochraně duševního vlastnictví, ale pro rámcovou představu o požadavcích na zařízení to postačovalo. Důležitým krokem bylo také zjištění, o jaký materiál magnetu se vlastně jedná. Z toho se odvíjí elektrické požadavky na zdroj pulzů. S tímto mi velmi pomohla chemická analýza na pracovišti v Doubravících, po které bylo jasné, že magnetizační proud bude dostatečný pro předpokládaný materiál. Pokud by bylo nutné navrhovat podobné zařízení do průmyslové výroby, bylo by samozřejmě nezbytné mít k dispozici BH křivky materiálu, který plánujeme zařízením magnetovat. Jedině tak je možné optimálně nastavit velikost magnetizačního proudu a délku impulzu tak, abychom neplýtvali energií ale zároveň dosáhli uspokojivé remanence. Návrh pólových nástavců vycházel z experimentů v programu FEMM, v podstatě v této oblasti nelze jinak než simulací či prototypovou výrobou zjistit jak se bude takto složitý magnetický obvod chovat. Většinou je ale výroba nástavců velmi složitá a vyžaduje velkou přesnost, aby vzduchové mezery a tedy i ztráty byly co nejmenší. Bohužel se některé mechanické nepřesnosti objevily, problematické jsou zejména velké tolerance mezi podstavou a spodní hranou pólových nástavců, kde se uzavírá magnetický obvod. Očekával jsem tedy sníženou účinnost. Stavba celého zdroje byla celkem komplikovaná, komponenty jsou rozměrné a problematické bylo zejména uchycení velkých elektrolytických kondenzátorů. Měření na přípravku proběhlo po odhalení drobných závad v zapojení poměrně bez problémů v laboratoři v Doubravících. S napětím jsem očekával, zda bude simulace alespoň přibližně odpovídat realitě. Odchylka magnetizačního proudu je nakonec do 10 %, což považují za úspěch. Pokud požadujeme větší intenzitu magnetického pole je možné zmenšit omezující odpore, nebo navýšením energie kondenzátorů. V průběhu konstrukce přicházely další nápady na vylepšení jak regulace, tak měření s použitím mikroprocesoru. Vzhledem k rozsahu bych se jim rád věnoval v případné diplomové práci.

## Seznam použité literatury

- [1] BEZOUŠEK, Pavel, Vladimír SCHEJBAL a Pavel ŠEDIVÝ. *Elektrotechnika*. Vyd. 2., přeprac. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2008. ISBN 978-80-7395-101-6.
- [2] *Magnetic domain* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org>
- [3] FUKA, Josef. a Bedřich HAVELKA. *Elektrina a magnetismus: [vysokošk. příručka. 3., upravené vyd. Praha: SPN, 1979.*
- [4] ČERNÝ, Ondřej, Radovan DOLEČEK a Jaroslav NOVÁK. *Vědeckotechnický sborník ČD č 29/2010: Synchronní motory s permanentními magnety pro trakční pohony kolejových vozidel* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://vts.cd.cz/>
- [5] ABC MAGNET S.R.O. *Ferity* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://www.abcmagnet.cz>
- [6] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. V Brně: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [7] TKB-KIPONS PLUS, SPOL. S.R.O. *AlNiCo magnety* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://www.vyroba-magnetu.cz>
- [8] SINOMAG, S.R.O. *PERMANENTNÍ MAGNETY* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://www.sinomag.cz>
- [9] ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. *Curieova teplota* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=60096>
- [10] JOSEPH J. STUPAK JR. *Methods of Magnetizing Permanent Magnets* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://oersted.com/magnetizing.PDF>
- [11] MAYER, Daniel a Josef POLÁK. *Metody řešení elektrických a magnetických polí*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1983.
- [12] SINUS MAGNETTECHNIK GMBH. *Magnetizer* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: [http://www.sinus-magnettechnik.de/gb\\_produkte.html#lohnmagnete](http://www.sinus-magnettechnik.de/gb_produkte.html#lohnmagnete)

## Seznam značek a zkratek

Značka	Význam	Jednotka
$B_R$	Remanentní magnetická indukce	T
$B$	Magnetická indukce	T
$B_0$	Magnetická indukce ve vakuu	T
$m$	Magnetický moment	$A \cdot m^2$
$b$	Prahový moment hybnosti	$Kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$
$m_e$	Hmotnost elektronu	kg
$v$	rychlost	m/s
$\mu$	Permeabilita	$Hm^{-1}$
$\mu_0$	Permeabilita vakua	$4\pi \cdot 10^{-7} H \cdot m^{-1}$
$\mu_r$	Relativní permeabilita	-
$I$	Proud	A
$H$	Intenzita magnetického pole	A/m
$H_C$	Koercivita	A/m
$N$	Počet závitů	-
$l$	Délka	m
$BH_{max}$	Energetický součin magnetu	J
$t$	Teplota	$^{\circ}C$
$T_C$	Curieova teplota	$^{\circ}C$
$U_m$	Magnetické napětí	A
$R_m$	Magnetický odpor	$H^{-1}$
$\Phi$	Magnetický indukční tok	Wb
$I_m$	Magnetický proud	
$I_{vol}$	Volný proud	A
$S$	Průřez	$m^2$
$E$	Energie	J
$U$	Napětí	V
$C$	Kapacita	F
$f$	Frekvence	Hz
$R$	Odpor	$\Omega$
$Q_j$	Joulovo teplo	J



$\rho$	rezistivita	$\Omega \cdot m$
$\rho$	hustota	$kg \cdot m^3$
m	Hmotnost	kg
c	Měrná tepelná konstanta	$J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$\tau$	Časová konstanta	s

Zkratka	Význam
ISG	Integrovaný startér – generátor
RE	Vzácná zemina (materiál magnetů)
AlNiCo	Magnet ze slitiny kobaltu, hliníku a niklu
NdFeB	Magnet ze slitiny bóru, neodymu a železa
SmCo	Magnet ze slitiny samaria a kobaltu
PM	Permanentní magnet
FEM	Metoda konečných prvků
RLC	Obvod obsahující rezistor, cívku, kondenzátor
ESR	Ekvivalentní sériový odpor
FeCrAl	Odporový drát ze slitiny železa, hliníku a chromu.
MOSFET	Tranzistor ovládaný polem
LED	Dioda emitující světlo
SSR	Polovodičové relé
DPS	Deska plošných spojů

## Seznam obrázků

Obr. 2.4.3.1: Orientace Weissových domén ve směru vnějšího pole. Převzato z [2].....	17
Obr. 2.5.1.1: Křivka prvotní magnetizace .....	18
Obr. 2.5.2.1: Hysterezní křivka a křivka prvotní magnetizace, převzato z [3].....	19
Obr. 3.5.1: Znázornění závislosti permeability na teplotě, převzato z [9].....	27
Obr. 4.1.1: Magnetický obvod a jeho náhradní schéma .....	29
Obr. 5.3.1: Blokové schéma modulárního magnetizéru, upraveno z [12] .....	33
Obr. 5.3.1.1: Blokové schéma půleperiodového magnetizéru, upraveno z [10] .....	34
Obr. 5.3.2.1: Obecné schéma pulzního magnetizéru s ignitronem, upraveno z [10].....	35
Obr. 5.3.2.2: Průběh proudového impulsu v magnetizační cívce.....	35
Obr. 5.3.3.1: Obecné schéma pulzního magnetizéru s tyristorem a nulovací diodou .....	36
Obr. 6.1.1: Řez vnějším rotorem s hlavními rozměry .....	37
Obr. 6.1.2: Řez vnitřním rotorem s hlavními rozměry .....	38
Obr. 6.2.1: Řez vzorkem magneto setrvačnicku s viditelnými plechy tvořícími magnet.....	39
Obr. 6.2.2: Výsledek prvkové analýzy vzorku magnetu.....	40
Obr. 6.3.1: Simulace magnetického toku ve dvojpólu v programu FEMM .....	42
Obr. 6.4.1.1: Čtyř pólový rotor .....	43
Obr. 6.4.4.1: Třírozměrný model celé sestavy pólových nástavců a podstavy.....	46
Obr. 6.5.1.1: Schéma pro simulaci výkonového obvodu v programu LTspice .....	48
Obr. 6.5.1.2: Průběh vybíjecího impulsu z programu LTspice .....	49
Obr. 6.5.1.3 Průběh nabíjecího a vybíjecího cyklu kondenzátorů z programu LTspice .....	49
Obr. 6.5.3.1: Schéma pomocného zdroje pro spínání tyristoru .....	51
Obr. 6.5.5.5: Průběh nabíjecího proudu kondenzátorů při zapnutí zdroje.....	53
Obr. 6.5.7.1: Schéma pomocného stabilizátoru s vybíjecím obvodem.....	55
Obr. 6.5.9.1: Deska plošných spojů pro vybíjecí rezistory.....	56
Obr. 6.5.9.2: Deska plošných spojů pomocných zdrojů .....	56
Obr. 7.1: Oživování v Doubravické laboratoři .....	57
Obr. 7.1.1: Měření remanence rotoru sondou .....	58
Obr. 7.1.2: Naměřená hodnota před posílením.....	58
Obr. 7.2.1: Přípravek s nasazeným rotorem.....	59
Obr. 7.2.2: Průběh změřeného magnetizačního pulzu .....	60
Obr. 7.3.1: Naměřená remanence rotoru po zmagnetování .....	61

## Seznam tabulek

Tabulka 2.4.1: Relativní permeabilita některých látek .....	16
Tabulka 3.1.1: Magnetické vlastnosti některých druhů feritů, převzato z [5] .....	21
Tabulka 3.2.1: Magnetické vlastnosti vybraných druhů litých anizotropních Alnico magnetů, převzato z [7] .....	22
Tabulka 3.3.1.1: Magnetické vlastnosti vybraných typů Sm-Co magnetů, převzato z [7] .....	24
Tabulka 3.3.2.1: Vybrané vlastnosti vybraných neodymových magnetů, převzato z [7] .....	25
Tabulka 6.1.1: Přehled základních rozměrů vnějších rotorů .....	37
Tabulka 6.1.2: Přehled základních rozměrů vnějších rotorů .....	38
Tabulka 6.5.2.1: Vybrané katalogové hodnoty tyristoru TV 967 .....	50
Tabulka 6.5.4.1: Vybrané katalogové hodnoty usměřovacího můstku .....	52
Tabulka 6.5.6.1: Vybrané katalogové hodnoty polovodičového relé Crydom D2450 .....	54

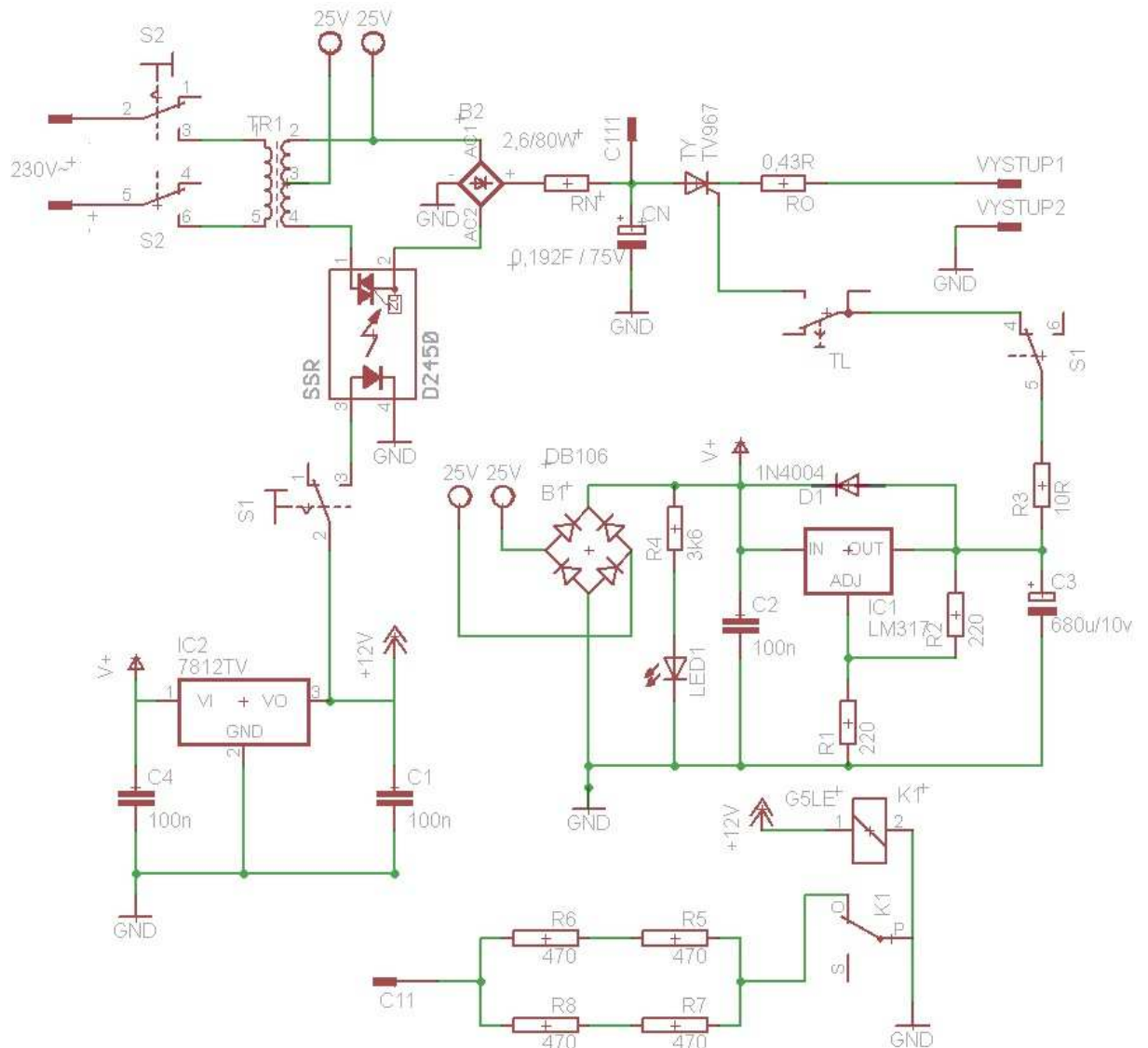
## **Seznam příloh**

Příloha A Seznam použitých součástek .....	69
Příloha B Celkové obvodové schéma .....	70
Příloha C Výkres podstavy .....	71
Příloha D Výkres pólového nástavce .....	72

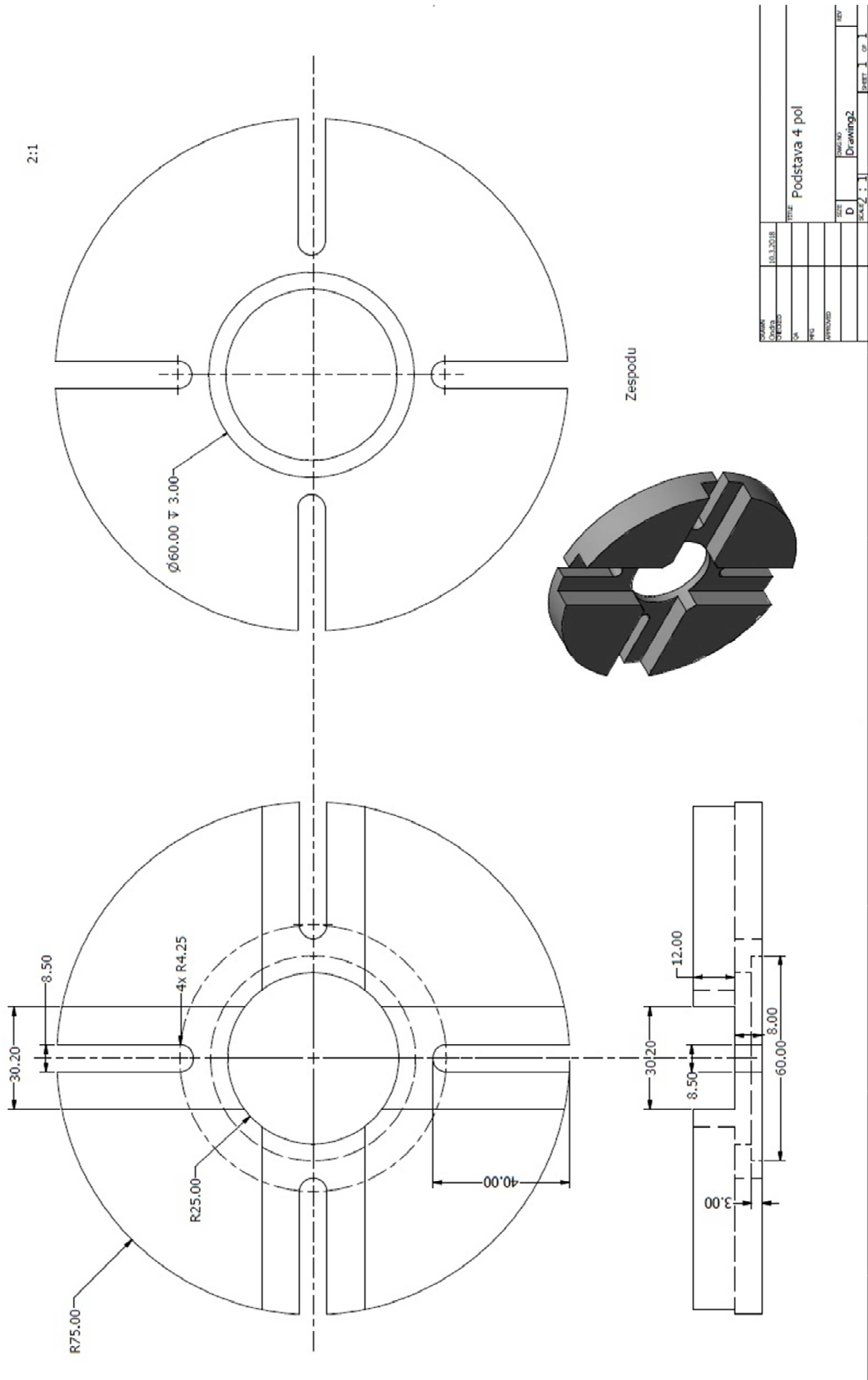
## Příloha A Seznam použitých součástek

Označení	Typ
B1	DB106, můstek usměrňovací
B2	KBPC5010, můstek usměrňovací
D1	1N4001, dioda univerzální
LED1	Dioda zelená 3 mm
IC1	LM317T, stabilizátor lineární
IC2	7812 stabilizátor lineární
R1, R2	220 $\Omega$ /0,6W
R3	10 $\Omega$ / 1 W
R4	3k6/0,6 W
R5-R8	470 $\Omega$ /10 W drátový
K1	G5LE relé
C1, C2, C4	100 n keramický
C3	680 $\mu$ F/10 V
TY	TV967-500-26, tyristor
TR	Transformátor toroidní, 25 V + 30 V, 200 VA
V1	Voltmetr, rozsah 100 V=
R <sub>O</sub>	Kanthalový odpor 0,43 $\Omega$ /80 W
R <sub>N</sub>	Kanthalový odpor 2,6 $\Omega$ /80 W
C <sub>N</sub>	Elektrolytický kondenzátor 30 mF 4ks + 36 mF 2ks
TL	Tlačítko spínací
S1, S2	Přepínač dvoupolohový dvoupólový, P-H8660VB01
SSR	Crydom D2450, polovodičové relé

## Příloha B Celkové obvodové schéma



# Příloha C Výkres podstavy



## Příloha D Výkres pólového nástavce

