



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## NÁVRH STEJNOSMĚRNÉHO ELEKTROMAGNETU

DESIGN OF DC ELECTROMAGNET

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Aleš Mayer

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Šimek

BRNO 2020

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Aleš Mayer

**ID:** 195605

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Návrh stejnosměrného elektromagnetu

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Seznamte se s historickým vývojem konstrukce a využití elektromagnetů, jejich typy a specifickými znaky dle konkrétního určení.
2. Nastudujte postup návrhu stejnosměrného elektromagnetu a dle zadaných parametrů navrhnete stejnosměrný elektromagnet pro rozšíření výuky elektrických přístrojů.
3. Vytvořte 3D model navrženého elektromagnetu a proveďte numerickou simulaci jeho tahové charakteristiky.
4. Výsledky simulace porovnejte s měřeními na původním elektromagnetu v laboratoři elektrických přístrojů.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

- [1] UHLÍŘ, Ivan. Elektrické stroje a pohony. Vyd. 2., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80--1-03730-0.
- [2] MUSIL, Rudolf. Návrh brzdových elektromagnetů na střídavý a stejnosměrný proud: učební pomůcka pro 3. ročník středních průmyslových škol elektrotechnických. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
- [3] DRAXLER, Karel, Petr KAŠPAR a Pavel RIPKA. Magnetické prvky a měření. Vyd. 3. V Praze: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03970-0.

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 29.5.2020

**Vedoucí práce:** Ing. David Šimek

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá elektromagnety a měřeními na nich. Je zde popsána historie objevení elektromagnetů, princip na kterém pracují, jejich konstrukce a rozdělení dle různých kritérií. Jednotlivé základní typy jsou dále podrobněji popsány. Pro stejnosměrné a střídavé elektromagnety je vysvětlen způsob odvození výpočtu tahové síly. Je zde podrobně popsán postup návrhu jádrového stejnosměrného elektromagnetu, který je následně odsimulován v programu FEMM a v programu Inventor je vytvořen 3D model s technickou dokumentací. Část se také věnuje měření na elektromagnetech. Přesněji jde o měření statické a dynamické tahové charakteristiky a měření oteplení elektromagnetu. Dále jsou vysvětleny přechodové jevy a jejich měření, konkrétně špičkový proud při zapínání a špičkové přepětí při vypínání.

## **Klíčová slova**

Elektromagnet, tahová síla, konstrukce elektromagnetů, návrh elektromagnetu, měření na elektromagnetech

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with electromagnets and measurements on them. There is described the history of discovery of electromagnets, the principle of operation, their construction, and classification according to various criteria. More detailed descriptions of individual basic types are presented. The method of deriving the tensile force calculation is explained for DC as well as for AC electromagnets. There is a detailed description of the design process of a core DC electromagnet, which is then simulated in the FEMM program, and a 3D model with technical documentation is created in the Inventor program. The part also deals with measurement on electromagnets. More precisely, it is a measurement of static and dynamic tensile characteristics, measurement of electromagnets temperature rise. In the next part, transient phenomena and their measurements are explained, namely inrush current and switching overvoltage.

## **Keywords**

Electromagnet, pulling force, construction of electromagnets, design of electromagnet, measurement on electromagnets

## **Bibliografická citace:**

*MAYER, Aleš. Návrh stejnosměrného elektromagnetu [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125772>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce David Šimek.*

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou semestrální práci na téma Návrh stejnosměrného elektromagnetu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 28. května 2020

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Davidu Šimkovi, za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Děkuji rovněž i doc. Čestmíru Ondrůškovi za cenné konzultace.

V Brně dne: 28. května 2020

.....  
podpis autora

# Obsah

1.	Úvod .....	14
2.	Elektromagnety .....	15
2.1	Historie .....	15
2.2	Princip.....	15
2.3	Konstrukce .....	16
2.3.1	Budicí cívka .....	16
2.3.2	Jádro a kotva .....	16
2.4	Rozdělení .....	16
2.5	Stejnoseměrný elektromagnet.....	17
2.5.1	Výpočet tahové síly stejnosměrného elektromagnetu.....	18
2.6	Střídavé elektromagnety .....	19
2.6.1	Výpočet tahové síly střídavého elektromagnetu.....	19
2.6.2	Závit nakrátko .....	20
2.7	Polarizované elektromagnety.....	20
2.8	Břemenové elektromagnety .....	21
2.9	Brzdové elektromagnety.....	22
2.9.1	Stejnoseměrné brzdové elektromagnety .....	22
2.9.2	Střídavé brzdové elektromagnety .....	23
3.	Návrh stejnosměrného jednofázového elektromagnetu .....	25
4.	Postup praktického návrhu stejnosměrného jádrového elektromagnetu .....	28
4.1	Měření plášťového elektromagnetu .....	28
4.1.1	Parametry měřeného elektromagnetu.....	28
4.1.2	Naměřené a vypočtené hodnoty.....	29
4.2	Postup výpočtu jádrového elektromagnetu.....	31
4.2.1	Výchozí parametry .....	31
4.2.2	Výpočet parametrů elektromagnetu.....	32
4.3	Numerické ověření navrženého elektromagnetu .....	35
4.3.1	Program FEMM.....	35
4.4	Model navrhovaného elektromagnetu v programu FEMM.....	36
4.5	Simulace navrhovaného elektromagnetu.....	38

4.6	Zhodnocení výsledků simulace navrženého elektromagnetu z programu FEMM.....	43
4.7	Navržený elektromagnet.....	43
5.	Měření na stejnosměrných elektromagnetech.....	49
5.1	Statická tahová charakteristika .....	49
5.1.1	Postup měření .....	50
5.2	Dynamická tahová charakteristika .....	50
5.3	Ověření oteplení vinutí a armatury .....	51
5.3.1	Metoda měření pomocí termočlánků .....	52
5.3.2	Měření oteplení ze změny odporu.....	52
5.4	Špičkový proud při zapínání.....	53
5.4.1	Závislost na fázovém úhlu.....	53
5.5	Špičkové přepětí při vypínání .....	54
6.	Závěr.....	56



# Seznam symbolů a zkratek

## Symbols:

$B$	...	magnetická indukce	[T]
$c$	...	měrná teplo	[J/K, m <sup>3</sup> ]
$d$	...	průměr	[mm]
$D_e$	...	vnější průměr cívky	[mm]
$f$	...	frekvence	[Hz]
$F$	...	tahová síla	[N]
$F_m$	...	magnetomotorická síla	[N]
$H$	...	intenzita magnetického pole	[Am <sup>-1</sup> ]
$I, i$	...	elektrický proud	[A]
$l$	...	délka	[m]
$l_z$	...	střední délka závitů	[m]
$L$	...	indukčnost	[H]
$L_e$	...	efektivní délka železa	[m]
$m$	...	hmotnost	[kg]
$N$	...	počet závitů	[-]
$P$	...	elektrický výkon	[W]
$q$	...	tepelná ztrátav jednotce objemu	[W/m <sup>3</sup> ]
$R$	...	elektrický odpor	[Ω]
$R_m$	...	magnetický odpor	[H <sup>-1</sup> ]
$S$	...	obsah	[m <sup>2</sup> ]
$S_{fe}, S_{\delta}$	...	průřez železa	[m <sup>2</sup> ]
$t, t_k$	...	čas	[s]
$U$	...	elektrické napětí	[V]
$U_e$	...	elektromotorické napětí	[V]
$U_m, U_{\delta}$	...	magnetické napětí	[A]
$V$	...	objem	[m <sup>3</sup> ]
$W$	...	energie magnetického pole	[J]
$W_{mech}$	...	mechanická práce	[J]
$\alpha$	...	měrná chladivost	[W/°C m <sup>2</sup> ]

$\delta$	...	zdvih	[m]
$\varepsilon$	...	činitel rozšíření pólu	[-]
$\vartheta$	...	teplota	[K]
$\Delta \vartheta, \theta$	...	oteplení	[K]
$\mu_0$	...	permeabilita vakua	[Hm <sup>-1</sup> ]
$\rho$	...	rezistivita	[ $\mu\Omega\text{cm}$ ]
$\vec{j}$	...	proudová hustota	[J]
$\tau$	...	časová konstanta	[s]
$\phi$	...	magnetický indukční tok	[Wb]
$\Psi$	...	spřažený magnetický tok	[Wb]
$\omega$	...	úhlová rychlost	[rad s <sup>-1</sup> ]

## Seznam obrázků

Obr. 1: Hlavní části elektromagnetu [14] .....	16
Obr. 2: Základní konstrukční provedení trojfázového elektromagnetu [10] .....	19
Obr. 3: Břemenový elektromagnet [15].....	22
Obr. 4: Schéma zapojení stejnosměrného brzdového elektromagnetu[9] .....	23
Obr. 5: Rozměry původního elektromagnetu[11] .....	28
Obr. 6: Naměřené tahové charakteristiky původního elektromagnetu .....	31
Obr. 7: Model magnetických odporů elektromagnetu v řezu .....	33
Obr. 8: Náhradní schéma magnetických odporů.....	33
Obr. 9: Model navrženého elektromagnetu v programu FEMM .....	36
Obr. 10: Rozložení magnetické indukce pro 2286 závitů a $\delta= 12$ mm .....	37
Obr. 11: Tahová charakteristika navrženého elektromagnetu.....	38
Obr. 12: Srovnání statických tahových charakteristik původního a navrženého elektromagnetu .....	39
Obr. 13: Rozložení magnetické indukce pro 1800 závitů a $\delta= 12$ mm .....	40
Obr. 14: Tahová charakteristika navrženého elektromagnetu (1800 závitů).....	41
Obr. 15: Rozložení magnetického indukčního toku pro $\delta= 12, 10$ a $8$ mm.....	42
Obr. 16: Rozložení magnetického indukčního toku pro $\delta= 6, 4$ a $2$ mm.....	42
Obr. 17: Rozložení magnetického indukčního toku pro $\delta= 1, 0,5$ a $0,1$ mm.....	42
Obr. 18: Detailní srovnání tahových charakteristik původního a navrženého elektromagnetu .....	43
Obr. 19: Model celé měřicí sestavy .....	44
Obr. 20: Model celé měřicí sestavy – pohled zepředu.....	44
Obr. 21: Detail horní části.....	45
Obr. 22: Detail horní části – pohled zepředu .....	45
Obr. 23: Rozměry jádra .....	46
Obr. 24: Rozměry bronzového kroužku .....	46
Obr. 25: Rozměry bubínku budicí cívky .....	47
Obr. 26: Rozměry plošiny pro kotvu.....	47
Obr. 27: Rozměry horní plošiny.....	48
Obr. 28: Rozměry spodní plošiny.....	48

Obr. 30: Schéma zapojení pro měření statické tahové charakteristiky[11] .....	50
Obr. 31: Důležité rozměry elektromagnetu[11] .....	50
Obr. 32: Oteplovací křivka[11] .....	52
Obr. 33: Průběh zapínacího proudu[12] .....	54
Obr. 34: Zapínací a vypínací charakteristiky stejnosměrného elektromagnetu[14]..	55
Obr. 35: Zapínací a vypínací charakteristiky střídavého elektromagnetu[14] .....	55

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Rozměry originálního elektromagnetu.....	28
Tabulka 2: Hmotnosti měřených kotev.....	28
Tabulka 3: Elektrické veličiny při měření originálního elektromagnetu.....	29
Tabulka 4: Naměřené a vypočtené hodnoty tupé kotvy .....	29
Tabulka 5: Naměřené a vypočtené hodnoty komolé kotvy .....	30
Tabulka 6: Použité měřicí přístroje .....	31
Tabulka 7: Závislost počtu závitů na el. proudu .....	35
Tabulka 8: Souhrn navržených parametrů .....	35
Tabulka 9: Vypočítané hodnoty z programu FEMM .....	38
Tabulka 10: Vypočítané hodnoty upraveného elektromagnetu .....	41

# 1. ÚVOD

Elektromagnety jsou důležitá elektronická zařízení, která využívají silových účinků elektrického proudu k vykonání mechanické práce nebo k přidržení feromagnetických materiálů. V současné době se využívají téměř ve všech odvětvích elektroniky. Jsou použity například v jisticích přístrojích, pevných discích, motorech, reproduktorech nebo ve všech druzích průmyslu pro manipulaci s těžkými břemeny. Mezi jejich hlavní výhody patří jednoduché ovládání na dálku elektrickým proudem do budicí cívky a možnost vykonání velkého počtu cyklů za dobu jejich životnosti. Jsou také vhodné pro přístroje s velkou hustotou spínání.

Cílem této bakalářské práce je výpočet jádrového stejnosměrného elektromagnetu a jeho následná simulace v simulačním prostředí FEMM. Magnet bude navrhován podle reálných naměřených hodnot plášťového elektromagnetu. Ke všem částem elektromagnetu bude následně vytvořena technická dokumentace pro možnou budoucí výrobu.

Úvod této práce obsahuje stručné představení elektromagnetů, nejdříve jejich historie a vynalezení. Poté následuje část věnovaná jejich konstrukci se zaměřením na určité části. Další v pořadí je rozdělení elektromagnetů podle určitých kritérií. Jednotlivé základní typy elektromagnetů jsou popsány podrobněji a současně i jejich výhody a nevýhody a charakteristické vlastnosti. Pro stejnosměrné a střídavé elektromagnety je vysvětleno odvození a výpočet tahové síly.

Třetí kapitola je zaměřena na návrh stejnosměrného elektromagnetu. Je zde podrobně popsán postup výpočtu jednotlivých potřebných veličin.

Čtvrtá kapitola obsahuje zpracované hodnoty z měření reálného plášťového elektromagnetu. Získané hodnoty jsou poté použity jako výchozí pro výpočet stejnosměrného jádrového elektromagnetu. Tento elektromagnet je následně navržen v programu Inventor a simulací v programu FEMM je naměřena jeho statická tahová charakteristika. Ke všem jeho částem nutných ke zkonstruování měřicí úlohy je vyrobena technická dokumentace.

Poslední kapitola je zaměřena na metody měření na elektromagnetech pro zjištění a ověření jejich skutečných hodnot. Nejdříve je vysvětlena statická tahová charakteristika elektromagnetu společně s postupem měření, poté část o dynamické tahové charakteristice. Následně je vysvětleno oteplení proudovodné dráhy a způsoby jeho ověření. V závěru této kapitoly jsou popsány přechodové jevy při zapínání a vypínání elektromagnetu. Konkrétně se jedná o špičkový zapínací proud, jeho závislost na fázovém úhlu okamžiku připojení a také o špičkovém přepětí při vypínání elektromagnetů.

Výsledkem této bakalářské práce je plně navržený a odsimulovaný stejnosměrný jádrový elektromagnet s technickou dokumentací nutnou k vytvoření úlohy na změření jeho statické tahové charakteristiky.

## 2. ELEKTROMAGNETY

### 2.1 Historie

Roku 1820 objevil dánský vědec Hans Christian Ørsted, že elektrický proud vytváří při průchodu vodičem magnetické pole. Z těchto poznatků vycházel britský vědec William Sturgeon a v roce 1824 vynalezl elektromagnet. Jeho první elektromagnet byl o rok později vytvořen z 18 závitů hole mědi namotané okolo kusu železa ve tvaru podkovy. Vodiče byly odizolované lakem (v té době ještě izolované vodiče neexistovaly), to omezovalo počet vinutí a tedy i sílu elektromagnetu. Při připojení ke zdroji začal cívkou procházet proud, železo se zmagnetizovalo a začalo přitahovat jiné kusy železa (až 20násobné hmotnosti). Po odpojení od zdroje se železo odmagnetovalo [1, 2].

Americký vědec Joseph Henry navázal na Ørstedovu práci a v roce 1830 za využití vodiče izolovaného hedvábným vláknem byl schopen namotat okolo jádra mnohonásobně více smyček. Takto dokázal vytvořit elektromagnet, který dokázal uzvednout zátěž o hmotnosti téměř 1 tuny [3].

Elektrický proud produkuje elektromagnetismus, ale je tomu i naopak? Anglický fyzik Michael Faraday vedl v roce 1831 pokus, který by přinesl odpověď na tuto otázku použitím vodiče v elektromagnetickém poli druhého vodiče připojeného ke zdroji. Experiment dopadl neúspěšně, ale jen z části. Při zapnutí napájení na druhém vodiči generujícím magnetické pole se na prvním vodiči objevil náznak proudu a pak nic. Při vypnutí napájení se náznak proudu objevil zase. Faraday díky tomuto pokusu zjistil, že nezáleží na velikosti magnetického pole, ale na změnách v tomto magnetickém poli. Faraday a Henry (nezávisle na sobě) vynalezli elektromagnetickou indukci a elektrický generátor. Objev spojení mezi elektrickým proudem a magnetismem vedl brzy k vynalezení telegrafu a v roce 1876 k vynalezení telefonu [2].

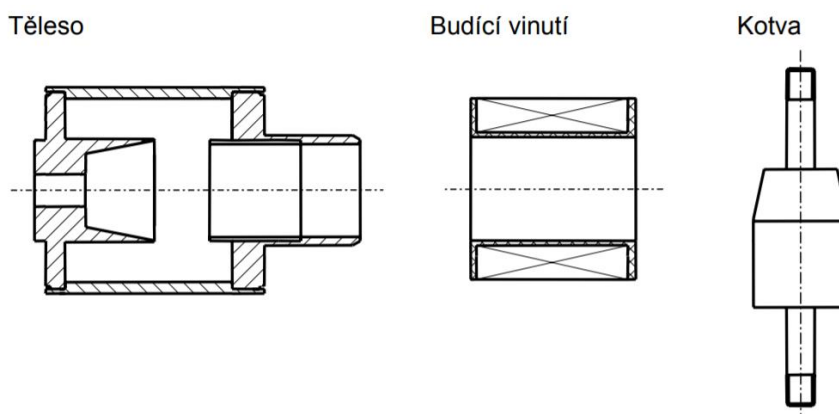
V roce 1865 skotský fyzik James Clerk Maxwell shrnul a zobecnil předchozí objevy do 4 matematických rovnic (Maxwellovy rovnice). Tyto rovnice, které popisují makroskopickou teorii elektromagnetického pole, se staly zákony pro moderní elektrotechniku [1].

### 2.2 Princip

Elektromagnety fungují na principu přeměny elektromagnetické energie na mechanickou energii. V podstatě se tedy jedná o elektromechanický měnič energie podobně jako elektrické točivé stroje. Při průchodu elektrického proudu vinutím cívky namotaném okolo jádra z feromagnetického materiálu (například železa) vytváří magnetické pole o intenzitě  $H$  a magnetický tok  $\Phi$ . Magnetické pole působí na pohyblivou část elektromagnetu – kotvu a přitahuje ji k sobě. Po odpojení zdroje proudu zanikne magnetické pole i přitažlivá síla a kotva odpadne. Velikost magnetického toku je přímo závislá na velikosti proudu, počtu závitů cívky a nepřímo na velikosti vzduchové mezery mezi kotvou a jádrem. Doba zdvihu kotvy je ale poměrně malá, takže pro technické využití je namísto velikosti tahové síly rozhodující její průběh během zdvihu [4].

## 2.3 Konstrukce

Elektromagnet jsou nejčastěji tvořeny ze tří základních částí – z budicí cívky, feromagnetického jádra a pohyblivé kotvy. Mezi feromagnetickým jádrem a kotvou je jedna nebo více vzduchových mezer. Tvar a počet vzduchových mezer může být libovolný podle požadavků na uspořádání magnetického obvodu. Jsou možná dvě provedení vzájemného uložení cívky a kotvy, v prvním provedení vtahována do cívky, v druhém je kotva umístěna přímo v budicí cívce a jen přitahována na dosedací plochu. V druhém řešení může být pohyb kotvy přímočarý nebo otáčivý, to je často využíváno u relé. Při konstrukci jsou využity 3 druhy materiálů, a to feromagnetický materiál pro jádro (kotvu), elektricky vodivý materiál pro vinutí budicí cívky a izolační materiály.



Obr. 1: Hlavní části elektromagnetu [14]

### 2.3.1 Budicí cívka

Vinutí budicí cívky o  $N$  závitů bývá namotáno na nevodivé kostře většinou vyrobené z termoplastických materiálů. Nejčastěji používaným materiálem k výrobě vinutí je meď ve formě vodičů většinou kruhového průřezu. Zalakováním vinutí se dosahuje potřebné vzájemné izolace jednotlivých závitů cívky [5].

### 2.3.2 Jádro a kotva

Jádra i kotva jsou tvořeny z feromagnetických materiálů. Jedinými vhodnými materiály, které stojí za to zmínit, jsou železo a ocel s příměsí křemíku. Ostatní materiály jako například litina nebo ocel se nepoužívají z důvodu zbytkového (remanentního) magnetismu po odpojení. U střídavých elektromagnetů musí být kotva i jádro tvořeny ze vzájemně izolovaných transformátorových plechů, kvůli zmenšení ztrát vířivými proudy při přemagnetování.

## 2.4 Rozdělení

Kritérií, podle kterých se mohou elektromagnety rozdělovat, je hned několik. Mezi nejdůležitější hlediska patří rozdělení podle typu zapojení, podle typu budicího proudu tekoucího budicí cívkou, podle funkce a podle typu využití.[6]



Mohou se samozřejmě dělit i podle tvaru, počtu vzduchových mezer, jejich uspořádání vzhledem k budicímu vinutí apod.

Podle proudu budicí cívkou se dělí:

- Elektromagnety na stejnosměrný proud – kotva nemusí dosedat do koncové polohy, velká hustota spínání, pomalejší přitah a odpad, menší přitažlivá síla, konstantní proud.
- Elektromagnety na střídavý proud – kotva musí dosedat, rychlejší přitah. Velikost přitahového proudu je větší než přídržného (dáno velikostí vzduchové mezery). Při častém spínání se otepluje. Dále se rozdělují na jednofázové a třífázové.

Podle způsobu zapojení budicí cívky na napájení:

- Sériové – používá se jen u brzdových elektromagnetů pro sériový stejnosměrný motor.
- Paralelní – nejběžnější zapojení paralelně k síti.

Podle použití:

- Přídržné – slouží k pevnému upevnění feromagnetického materiálu. Typické jsou pro ně minimální zdvihy a velká přitažlivá síla. (bremenové, upínadla, třídiče apod.).
- Pohybové – pohybem kotvy vykonávají mechanickou práci (stykače, vypínače, ventily, elektromagnetické spojky, brzdy apod.). Pohyb může být přímý nebo otočný.

Podle typu magnetického obvodu:

- polarizované elektromagnety
- elektromagnety bez polarizace

## 2.5 Stejnosměrný elektromagnet

U stejnosměrných elektromagnetů je proud v cívce stálý při každém okamžiku zdvihu kotvy. Z Ohmova zákona je dán podílem napětím zdroje a odporem vinutí cívky. Během zdvihu se mění velikost vzduchové mezery, indukce v ní se zvětšuje a přitažlivá síla magnetu s ní narůstá s druhou mocninou [4].

Mezi jejich hlavní výhody patří vysoká hustota spínání, která je omezena pouze rychlostí přitahu a odpadu kotvy. Kotva nemusí dosedat do koncové polohy. Při nedostatečném dosedu kotvy nedochází k vibracím. Vyznačují se velikou přídržnou silou, delší životností a tichým provozem. Spojením více elektromagnetů lze složit zařízení s velkou silou. Protože proud cívkou je úměrný magnetickému napětí, je po přitažení zapotřebí pouze malá síla a tedy i malý proud. Z hlediska proudových poměrů a jejich vlivu na silové poměry, rozměry a využití magnetických obvodů jsou výhodnější elektromagnety stejnosměrné [7].

Nevýhodou oproti střídavým elektromagnetům je zejména pomalejší přitah a odpad kotvy, a menší záťahová síla.

Využity jsou nejčastěji ve stykačích, relé, manipulátorech, uchopovacích zařízeních, brzdných systémech, blokovacích systémech apod. Stejnosměrnými elektromagnety se většinou realizuje přímý pohon.

## 2.5.1 Výpočet tahové síly stejnosměrného elektromagnetu

Při výpočtu velikosti tahové síly vycházíme ze vztahu (2.1).

$$F = \frac{dW_{mech}}{dl} = -\frac{dW}{dl} \quad (2.1)$$

kde  $dW$  je přírůstek energie dodaný zdrojem proudu do magnetického obvodu. Jelikož je magnetická vodivost vzduchové mezery řádově mnohem menší než vodivost železa, můžeme vliv železa zanedbat a uvažovat, že veškeré síly se nacházejí ve vzduchové mezeře. Při této úvaze se magnetický obvod výrazně linearizuje a energii magnetického pole  $W$  můžeme určit ze vztahu (2.2) [8].

$$W = \frac{1}{2} i^2 L = \frac{1}{2} i^2 N^2 \mu_0 \quad (2.2)$$

kde  $S_{Fe}$  je průřez železa a tedy  $l$  velikost plochy vzduchové mezery. Když rovnici (2.2) dosadíme do rovnice (2.1) vyjde rovnice(2.3) [8]:

$$F = -\frac{dW}{dl} = -\frac{d}{dl} \left( \frac{1}{2} i^2 L \right) = -\frac{1}{2} i^2 \frac{d}{dl} (L) = -\frac{1}{2} i^2 \frac{d}{dl} \left( N^2 \mu_0 \frac{S_{Fe}}{l} \right) \quad (2.3)$$

kterou dále upravuje do tvaru (2.4):

$$F = \frac{1}{2} i^2 \left( N^2 \mu_0 \frac{S_{Fe}}{l^2} \right). \quad (2.4)$$

Rovnice (2.4) se může dále upravit do finálního tvaru (2.5):

$$F = \frac{1}{2} i^2 \frac{L}{l} = \frac{1}{2} \frac{i^2 L^2}{Ll} = \frac{1}{2} \frac{\Psi^2}{Ll} = \frac{1}{2} \frac{(NBS_{Fe})^2}{N^2 \mu_0 S_{Fe}} = \frac{1}{2} \frac{B^2 S_{Fe}}{\mu_0}. \quad (2.5)$$

Pokud se do rovnice (2.5) dosadí za magnetickou indukci magnetické napětí a magnetický odpor vzduchové mezery, získáme závislost velikosti tahové síly na zdvihu neboli tahovou charakteristiku elektromagnetu ve tvaru (2.6). Znovu ideální případ, kdy se celý magnetický tok uzavírá bez rozptylu tzv. geometrickou vzduchovou mezerou [8].

$$F(\delta) = \frac{\Phi^2}{S_{Fe}^2 2\mu_0} = \frac{U^2}{R_m^2 2\mu_0 S_{Fe}} = \frac{1}{2} \frac{U_m^2 \mu_0 S_{Fe}}{\delta^2}. \quad (2.6)$$

Předcházející úvahy předpokládají, že celý magnetický tok daný budícím magnetickým napětím se zúčastní vytváření tahu. Ve skutečném magnetickém obvodu se ale uplatňuje rozptyl, proto je skutečný magnetický tok ve vzduchové mezeře a tah menší. Uplatnění rozptylu se zvětšuje s větší magnetickou indukcí ve vzduchové mezeře a velikost magnetických rozptylových toků přímo závisí i na poloze cívky jádra. Existence rozptylu má za následek, že i malá změna magnetické indukce ve vzduchové mezeře, zejména je-li jádro značně nasycené, způsobí výraznou změnu potřebného budícího magnetického napětí [7].

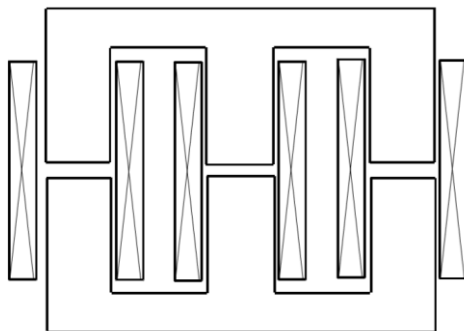
## 2.6 Střídavé elektromagnety

U střídavých elektromagnetů je možné provedení jednofázové a třífázové. Jednofázové střídavé elektromagnety mívají rozmanitou konstrukci, kde základní tvar byl převzat z elektromagnetu stejnosměrného. Třífázové střídavé elektromagnety se používají pro větší výkony. Pólové plochy mívají závit nakrátko pro zrovnoměnění tahu, který slouží zároveň k omezení bzučení a chvění. Jádra musí být složeno ze vzájemně izolovaných transformátorových plechů, aby se zmenšily ztráty vířivými proudy v železe [9].

Pokud je budicí vinutí napájeno z proudového transformátoru, kdy velikost proudu není určena parametry vinutí, odpovídá průběh charakteristiky stejnosměrným elektromagnetům. Nejčastěji ale bývá budicí vinutí připojené ke zdroji střídavého napětí. Proud je v tomto případě určen odporem a indukčností budicí cívky, která závisí na poloze kotvy. V případě, kdy je odpor cívky vzhledem k její reaktanci zanedbatelný, bude magnetický tok konstantní a elektromagnet bude mít konstantní tah při libovolné poloze kotvy. V opačném případě, kdy odpor nelze zanedbat, se změní změnou ideální tahové charakteristiky. Při velké vzduchové mezeře ve výchozí poloze, je impedance cívky malá a cívky odebírá velký proud. Úbytek napětí, který je vyvolán odporem budicí cívky, má za následek, že magnetický tok poskytnutý úbytkem napětí na reaktanci je výrazně menší. Z tohoto důvodu bude počáteční tah poměrně malý. U střídavých elektromagnetů se vždy udává přídržný a záběrový proud, který je mnohonásobně větší [7].

Se zmenšováním velikosti vzduchové mezery bude narůstat velikost napětí na úbytku napětí na reaktanci a tím se zvětší i tah, protože magnetický tok odpovídajícího napětí na reaktanci se také postupně zvětšuje. Tahová charakteristika se bude v takové situaci přibližovat tvaru tahové charakteristiky stejnosměrného elektromagnetu. Silové poměry a tvar jejich průběhu také značně závisí na stupni nasycení jádra. Pokud jádro není nasyceno, bude průběh magnetického toku sinusový. Pokud však bude jádro nasyceno, průběh magnetického toku se změní ze sinusového na přibližně lichoběžníkový [7].

Hustota spínání je omezena rychlostí přitahu a odpadu kotvy a maximálním dovoleným oteplením. Kotva musí dosedat do koncové polohy, jinak dochází k vibracím. Oproti stejnosměrným elektromagnetům jsou hlučnější a jejich spínací časy jsou kratší. Zpravidla není třeba omezovat jiskření či usměrňovat napětí sítě. Jejich životnost je ale výrazně kratší.



Obr. 2: Základní konstrukční provedení trojfázového elektromagnetu [10]

### 2.6.1 Výpočet tahové síly střídavého elektromagnetu

Pro výpočet tahové síly střídavého elektromagnetu může být použit vztah z rovnice (2.5) nebo (2.6) pro výpočet tahové síly stejnosměrného elektromagnetu, ale protože se

při změně velikosti vzduchové mezery změní i velikost proudu budící cívkou, velikost tahové síly by odpovídala pouze aktuální velikosti vzduchové mezery. Proto je lepší použít rovnici (2.7), která počítá se sinusovým průběhem magnetické indukce v případě nenasyčeného magnetického obvodu. Okamžitá hodnota tahové síly bude teda [7]:

$$F(t) = \frac{B_m^2 S}{4\mu_0} (1 - \cos 2\omega t) = \frac{F_m}{2} (1 - \cos 2\omega t) = F_{\text{stř}} (1 - \cos 2\omega t). \quad (2.7)$$

Tahová síla jednofázového elektromagnetu při napájení ze sítě o frekvenci 50 Hz kolísá mezi maximem a nulou frekvencí 100 Hz. Tato vysoká frekvence pohybu kotvy je vhodná pro konstrukci vibrátorů a elektromagnetických kladiv. Její střední hodnota se proto vypočítá z rovnice (2.8).

$$F_{\text{stř}} = \frac{B_{ef}^2 S_{Fe}}{2\mu_0}. \quad (2.8)$$

## 2.6.2 Závít nakrátko

Protože tažná síla střídavého jednofázového elektromagnetu kolísá, dochází ke chvění kotvy a nepříjemnému bzučení. U přístrojových elektromagnetů se to řeší pomocí závitu nakrátko zabudovaném v pólu elektromagnetu, který vytváří posun výsledné síly tak, že neklesá k nule, ale v případě průchodu proudu nulou stále působí tahovou silou na kotvu.

U trojfázových elektromagnetů je tlumící zívít nakrátko zbytečný, protože v každém okamžiku působí na kotvu tahová síla. Vysoké nároky jsou ale vedeny na přesné vedení kotvy ve svislém směru, protože během jednoho kmitu se těžiště výsledného tahu tří budících cívek přesune čtyřikrát mezi krajními polohami [7].

## 2.7 Polarizované elektromagnety

Další typem jsou elektromagnety polarizované, jejichž konstrukce je velmi podobná stejnosměrným elektromagnetům, na rozdíl je ale v jejich magnetickém obvodu přidána další budící cívka nebo ve většině případů permanentní magnet. Objevuje se u nich tedy další magnetický tok polarizační. Tento magnetický tok a magnetický tok řídicí, generovaný hlavní budící cívkou na sebe vzájemně působí, proto působení polarizovaných elektromagnetů závisí na směru budícího proudu. V případě kdy budící cívkou neprochází řídicí proud, vzniká účinkem polarizačního toku stále určitý tah, který udržuje kotvu stále v jedné krajní poloze). Pohyb kotvy vznikne bezprostředně po průchodu proudu řídicím vinutím.

Díky jejich konstrukci s velice lehkou kotvou a nepatrnému zdvihu kotvy je doba jejich reakce a působení podstatně kratší než u elektromagnetů nepolarizovaných. Toho se využívá u velmi rychlých relé, například v převodnicích elektrického signálu na změnu polohy, rychlovypínačích, proudových převodnicích apod. Permanentní tah vzniklý polarizačním tokem může působit buď ve stejném směru jako tah řídicí nebo může ve směru opačném. Polarizační tah může tedy podle svého charakteru tah řídicí buď posilovat, nebo naopak narušovat. Magnetický obvod stejnosměrných polarizovaných elektromagnetů jsou sestavena z lištěných plechů za studena, aby došlo k omezení ztrát vířivými proudy [7].

Podle způsobu uspořádání magnetického obvodu dělíme polarizované magnety na sériové, paralelní a můstkové. Podle možných poloh kotvy lze provést polarizované magnety třípolohové, dvoupolohové nebo s jednostranným nastavením. U třípolohového elektromagnetu se kotva nachází při nulovém řídicím proudu ve střední poloze mezi oběma krajními polohami. Do jedné nebo do druhé krajní polohy se poté přemísťuje závisle na polaritě řídicího proudu. U dvoupolohového magnetu se kotva nachází vždy v jedné krajní poloze, podle směru posledního průchodu řídicího proudu. Do druhé krajní polohy se přemístí pouze v případě, že směr řídicího proudu je opačný než v posledním průchodu a v této krajní poloze i zůstane po vypnutí řídicího proudu. Kotva elektromagnetu s jednostranným nastavením zůstává vždy v jedné výchozí poloze a do druhé polohy se přemístí pouze tehdy, pokud je směr procházejícího řídicího proudu správný [7].

Polarizované elektromagnety se stejnosměrným obvodem jsou oproti ostatním typům polarizovaných elektromagnetů méně citlivější, protože magnetická vodivost materiálů trvalých magnetů je mnohem menší než vodivost běžně používaných ocelí. Řídicí magnetický tok vytváří na délkovém úseku trvalého magnetu úbytek magnetického napětí. Dalším důvodem je, že trvalý magnet vystaven poměrně značné demagnetizaci od toku řídicího. Pro odstranění tohoto problému, je zapotřebí velké zvětšení objemu trvalého magnetu a tedy i celého elektromagnetu [7].

## 2.8 Břemenové elektromagnety

Pro manipulaci a přenášení feromagnetických materiálů, které nelze běžně upevnit, slouží břemenové elektromagnety. Ve velkém jsou využity v téměř všech druzích těžkého průmyslu. Klasicky bývají využity například i na šrotištích železa. Jejich nároky na údržbu jsou velmi malé a ovládání velice jednoduché. Kvůli velkému magnetickému toku a velké zdvihové síle jsou břemenové elektromagnety konstruovány s plnou masivní kostrou. Musejí být proto buzeny stejnosměrným proudem z vlastního dynama, ze střídavé sítě přes usměrňovač nebo v některých případech i z běžné akumulátorové baterie [6].

Břemenové elektromagnety jsou vyráběny v mnoha různých provedeních. Velké elektromagnety jsou tvořeny plnou masivní kostrou kruhového tvaru, hranatého tvaru, a nebo speciální provedení. Vinutí břemenových elektromagnetů bývají zpravidla hliníkové, kvůli nižší hmotnosti. Velký důraz je kladen na zabezpečení proti mechanickému poškození a vniku nečistot a vlhkosti. Největší elektromagnety mívají průměr až v řádech jednotek metrů a maximální hmotnosti zátěže v desítkách tun. Těleso magnetického obvodu bývá z lité oceli [4].

Při provozu břemenových elektromagnetů bývá potíží zbytkový magnetismu po vypnutí napájení, kvůli kterému neopadávají drobnější předměty. Nejúčinnějším řešením bývá rušení zbytkového magnetismu obrácením směru proudu do určité hodnoty. Při vypínání a obrácení proudu musíme, vzhledem k velkým indukčnostem těchto elektromagnetů, zabezpečit vinutí ochranou proti přepětí. To je při obrácení proudu zajištěno vybíjecími odpory [4].



Obr. 3: Břemenový elektromagnet [15]

## 2.9 Brzdové elektromagnety

Brzdové elektromagnety se používají k elektrickému ovládní mechanických brzd motorů u jeřábů, ve výtazích a podobných pohyblivých zařízeních, u kterých je samočinné zabrzdění prioritní podmínkou bezpečného provozu. Tahová síla těchto magnetů překonává odpor pružin nebo váhu závaží, které svým pákovým mechanismem přitlačují brzdící čelisti k brzdnému kotouči. Jsou tedy konstruovány tak, že motor zařízení pouze odbrzdí [9].

Existují v provedení na proud stejnosměrný, tak i střídavý. Nejvýhodnější variantou je třífázové provedení, protože síť zatěžuje rovnoměrně. Stejnosměrné brzdové elektromagnety se využívají pouze v případech, kdy je z různých hledisek stejnosměrný proud výhodnější, například v přístavech nebo lodních provozech. Zabrzdění nebo odbrzdění se děje samočinně, jelikož se k motoru připojují paralelně. Některé varianty stejnosměrných brzd se k motoru připojují i sériově [6].

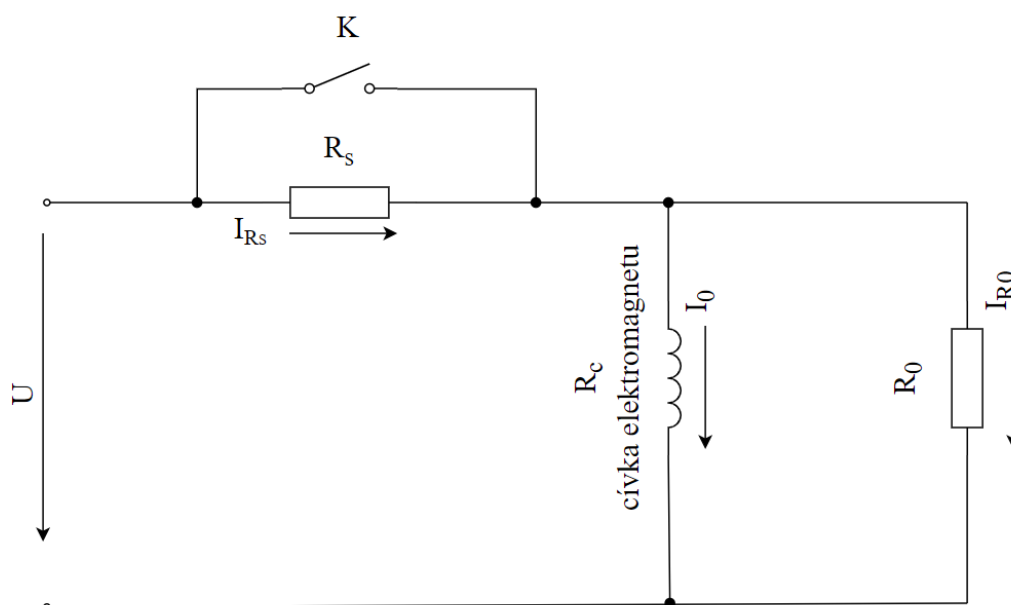
Hlavní rozdíly, kterými se liší od ostatních druhů elektromagnetů, jsou především velké tahy od několika kp až do 100 kp a více. Dalším odlišností jsou i značné zdvihy v řádech až desítek centimetrů, vykonávají tedy i mnohem větší zdvihové práce [9].

### 2.9.1 Stejnosměrné brzdové elektromagnety

Jejich konstrukce bývá nejčastěji solenidového tvaru. Konstruují se v plášťovém provedení úplně uzavřené. Jádro může být vyrobeno z plně a jako materiál použito železo, protože u nich nevznikají ztráty v železe. Magnetický obvod tvoří válcové jádro,

pohyblivá kotva, vnější válcové těleso a vzduchové mezery. Klasickým tvarem pro jádra stejnosměrných brzdových elektromagnetů je zakončení komolým kuželem, který umožňuje rovnoměrněji rozložit tah a zmenšuje sílu na konci tahu. Na čele pohyblivého jádra je mosazná vložka o šířce 2 až 3 mm, která má složit k zeslabení remanentního magnetismu. Kvůli remanentnímu magnetismu by kotva neodpadala [9].

Stejnoseměrné brzdové elektromagnety se na napájení nepřipojují přímo, ale přes předřadný odpor  $R_s$  a paralelně s ochranným odporem  $R_0$  schématu zapojení na obrázku č. 1. Po přitažení kotvy je zkratovací kontakt  $K$  kotvou mechanicky rozpojen. Při začátku zdvihu, kde je potřebné vyvinout velkou zdvihovou sílu, je kontakt  $K$  sepnut a odpor  $R_s$  přemostěn. Na budicí cívku se tedy dostane plné napájecí napětí. Při přitažené kotvě je pro vyvinutí stejné tažné síly pro její udržení potřeba menší proud, proto se napájí přes předřadný odpor  $R_s$ . V opačném případě by velký proud při plném napětí mohl spálit vinutí budicí cívky, zejména tehdy, kdy je magnet v přitažené poloze dlouho. Ochranný odpor  $R_0$  plní bezpečnostní funkci přepět'ové ochrany při vypínání magnetu. Obvykle bývá pětkrát až sedmkrát větší než odpor cívky za tepla. Nově lze podobného účinku dosáhnout i pomocí zapojení kondenzátoru místo odporu  $R_0$  [9].



Obr. 4: Schéma zapojení stejnosměrného brzdového elektromagnetu[9]

## 2.9.2 Střídavé brzdové elektromagnety

Vyrábějí se v provedení jednofázovém i třífázovém. Jádra těchto magnetů musí být složena ze vzájemně izolovaných transformátorových nebo dynamových plechů, aby se zmenšily ztráty vířivými proudy v železe. Pólové plochy jednofázových variant mívají závit nakrátko pro rovnoměrnější tah a také, aby se zabránilo chvění a bzučení magnetu.

Třífázové brzdové elektromagnety jsou vhodné především pro větší výkony. Skládají se z litinové uzavřené skříně s dosedacími patkami po stranách. Skříně je v horní části uzavřena víkem, ke kterému je upevněno kompletní jádro elektromagnetu s cívkami. Jádro je do skříně zapuštěno. Ve spodní části skříně je uložena kotva elektromagnetu. Kotva magnetu je složena ze tří jader uspořádaných do roviny, která jsou vtahována do cívek. Jádra jsou konstruována pouze tupá. Tah se přenáší pomocí táhla, ke kterému je připevněn tlumicí píst. Válec tlumiče je připevněn ve spodní části skříně. Na vnější straně

víka se nachází svorkovnice s 6 svorkami připojené ke koncům vinutí podobně jako u třífázových motorů. Vinutí je tedy možné zapojit do hvězdy nebo trojúhelníku. Jelikož se ke hnacímu motoru připojují paralelně, nepotřebují žádné zvláštní vedení. Jejich zapínání způsobuje velké proudové nárazy na síť, proto se musí vedení i pojistka správně dimenzovat, aby jejich úbytek napětí nebyl příliš velký. Při přitažené kotvě magnet odebírat pouze malý proud při malém účinníku [9].

Tlumič elektromagnetu tlumí nárazy a hluk při dosedání kotvy, tak i při prudkém zabrzdění při jejím odpadnutí. Magnety musejí být správně zatíženy, jinak by zapínání probíhalo rychleji a vznikaly by rázy, které jsou nepříznivé pro celé zařízení. Plochy jader kotvy musejí na plochy jader jha dosedat úplně, jinak by mezi nimi zůstala vzduchová mezera, která by měla za následek větší odebíraný proud. Kdyby vzduchová mezera zůstala dostatečně velká, mohl by proud nabýt takových hodnot, až se spálí vinutí budících cívek [9].



### 3. NÁVRH STEJNOSMĚRNÉHO JEDNOFÁZOVÉHO ELEKTROMAGNETU

Při návrhu stejnosměrného elektromagnetu se vychází ze známých hodnot celkového tahu  $F$ , největšího možného zdvihu  $\delta$  a velikosti napětí  $U$  budicího stejnosměrného proudu. Výsledkem návrhu je určit hlavní rozměry jádra cívky, tak aby elektromagnet měl požadované vlastnosti a přitom se neohříval nad dovolenou mez. Podle stanoviska chlazení se konstruují elektromagnety na trvalé zatížení nebo elektromagnety na krátkodobé zatížení [10].

Pro elektromagnet trvale zatížený s válcovým jádrem a plochou vzduchové mezery se vhodné rozměry pro průměr jádra zvolí podle rovnice (3.1):

$$d = 0,18 \sqrt[5]{F \delta^2}. \quad (3.1)$$

V případě stejného elektromagnetu, který je zatížen jen krátkodobě po čas  $t_k$ , bude pro průměr jádra platit rovnice (3.2):

$$d = 0,04 \sqrt[6]{F \delta^2 t_k}. \quad (3.2)$$

Pro efektivní plochu pólu platí:

$$S_\delta = \frac{\pi}{4} d^2 \varepsilon^2 \quad (3.3)$$

kde  $\varepsilon$  je činitel rozšíření pólu a vypočte se podle rovnice (3.4):

$$\varepsilon = 1 + \frac{\delta}{d} - 0,5 \left(\frac{\delta}{d}\right)^2. \quad (3.4)$$

Pro výpočet potřebné magnetické indukce ve vzduchové mezeře platí:

$$B_\delta = \sqrt{\frac{F}{40\,000 S_\delta}}. \quad (3.5)$$

Magnetické napětí pro vzduchovou mezeru je dáno vztahem:

$$U_\delta = 0,8 \cdot 10^6 B_\delta \delta. \quad (3.6)$$

Magnetomotorické síle obvodu elektromagnetu se přidává 10 až 30 % na cestu železem. Pro větší mezeru se přidává méně.

$$F_m = (1,1 \text{ až } 1,3) U_\delta. \quad (3.7)$$

Z Ohmova zákona se vypočte průřez drátu vinutí budicí cívky:

$$S = \frac{\rho F_m l_z}{U} \quad (3.8)$$

kde střední délka závitů, za předpokladu, že střední průměr cívky se rovná  $2d$ , je zhruba:

$$l_z = 2\pi d. \quad (3.9)$$

Pro elektromagnet trvale zatížený s cívkou ve vzduchové mezeře je budicí proud roven:

$$I = \frac{d^2}{U} \cdot 10^4. \quad (3.10)$$

V případě krátkodobě zatíženého elektromagnetu bude cívka proudově zatížena proudovou hustotou:

$$\sigma = 10^6 \sqrt{\frac{8500}{t_k}}. \quad (3.11)$$

Jeho proud se poté vypočte podle rovnice (3.12):

$$I = S\sigma. \quad (3.12)$$

Když je znám budicí proud, může se vypočítat počet závitů budicí cívky:

$$N = \frac{F_m}{I}. \quad (3.13)$$

Cívka se uspořádá na délku:

$$l = (2 \text{ až } 3)d. \quad (3.14)$$

Indukce v železe na čele pólu je podle rovnice (3.15) rovna:

$$B_{Fe} = \varepsilon^2 B_\delta. \quad (3.15)$$

Vlivem rozptylu je indukce v dalších částech železa o 10 až 30 % větší. Pokud je to zapotřebí, může se rozptyl a indukce v jednotlivých částech železa počítat přesněji. Poté se ale musí provést kontrola, zda je zvolená rezerva magnetického napětí pro železo dostatečná.

Trvalé ztráty, které vznikají v budicí cívce, jsou:

$$P = UI. \quad (3.16)$$

Měrná chladivost vnějšího povrchu je v klidovém režimu  $\alpha=14 \text{ W/}^\circ\text{C m}^2$ . Za chladicí plochu se považuje pouze vnější válcový plášť, takže oteplení povrchu proti okolí se vypočte podle rovnice (3.17):

$$\Delta\vartheta = \frac{P}{\alpha\pi D_e L_e} \quad (3.17)$$

kde  $D_e$  je vnější průměr cívky a  $L_e$  efektivní délka železa [10].

## 4. POSTUP PRAKTICKÉHO NÁVRHU STEJNOSMĚRNÉHO JÁDROVÉHO ELEKTROMAGNETU

V této kapitole je popsán postup návrhu konkrétního stejnosměrného jádrového elektromagnetu, který bude použit v laboratořích VUT pro měření. Výchozí parametry jsou zjištěné měřením plášťového elektromagnetu v laboratoři.

Stejnoseměrný elektromagnet se navrhuje tak, aby při připojení konstantním napájecím napětím vyvinul požadovaný tah při stavu maximální velikosti vduchové mezery. Elektromagnet musí vyhovovat i v nejnepríznivějších stavech.

Návrh je praktický, to umožňuje navrhnout elektromagnet bez příliš složitých a pro praxi zanedbatelných způsobů řešení.

### 4.1 Měření plášťového elektromagnetu

Pro prvotní návrh elektromagnetu potřebují být známy výchozí hodnoty, které by měl mít. V tomto případě jsou výchozí hodnoty pro výpočet zjištěny měřením již existujícího plášťového elektromagnetu v laboratořích VUT.

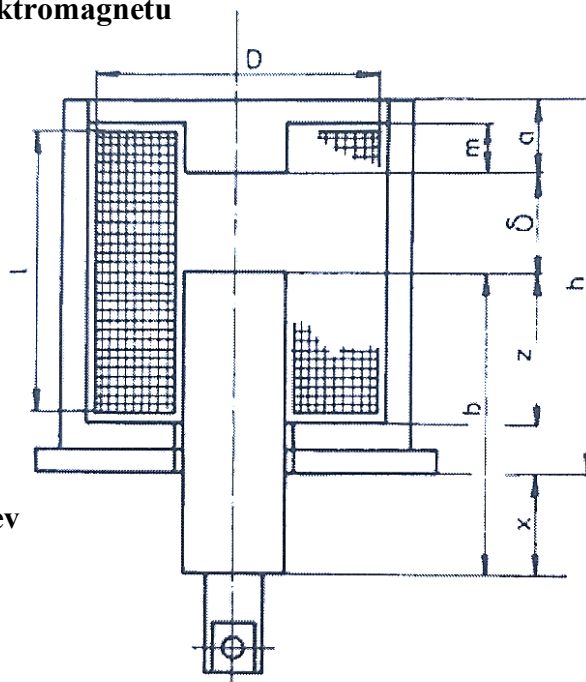
#### 4.1.1 Parametry měřeného elektromagnetu

Tabulka 1: Rozměry originálního elektromagnetu

Rozměry	[mm]
$d$	13,95
$D$	33,69
$b$	46,1
$h$	59,05
$m$	18,01
$l$	39,85
$a_t$	24,65
$a_k$	22,65
plech	2

Tabulka 2: Hmotnosti měřených kotev

Hmotnost	[g]
košík	24,4
kotva t	71,8
kotva k	75,9



Obr. 5: Rozměry původního elektromagnetu[11]

**Tabulka 3: Elektrické veličiny při měření originálního elektromagnetu**

$U$ [V]	40
$I$ [mA]	140

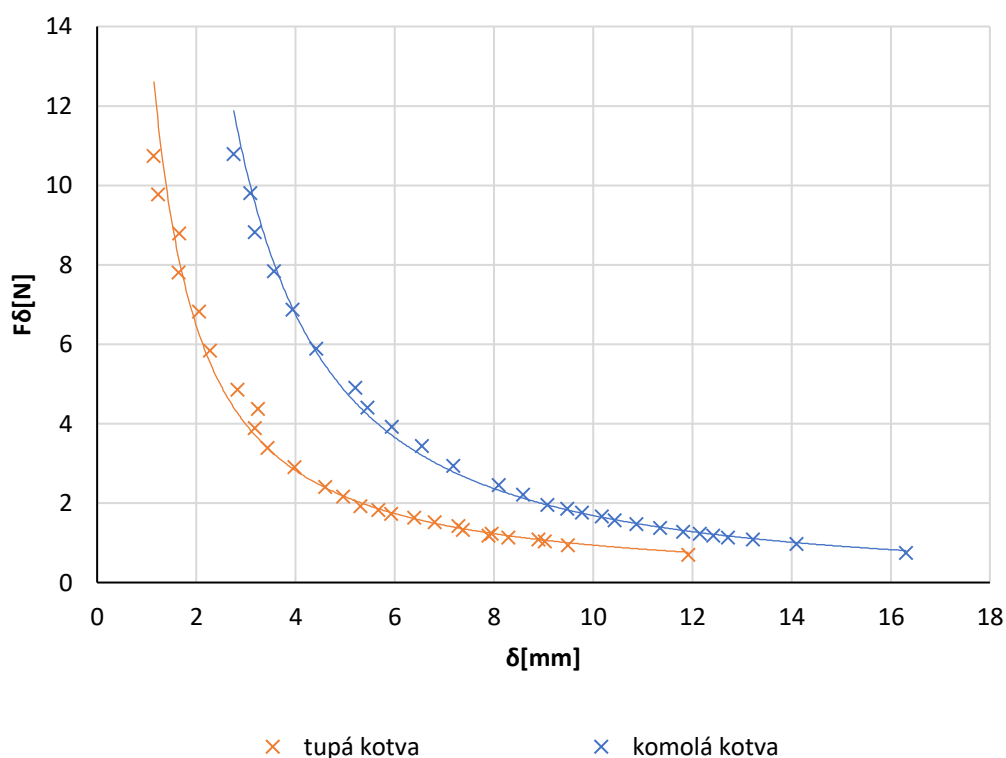
#### 4.1.2 Naměřené a vypočtené hodnoty

**Tabulka 4: Naměřené a vypočtené hodnoty tupé kotvy**

Tupá kotva						
Závaží	$m$ [g]	$x_1$ [mm]	$x_2$ [mm]	$x$ [mm]	$F$ [N]	$\delta$ [mm]
kotva	71,80	23,10	24,13	23,62	0,70	11,9
košík	96,20	21,45	20,93	21,19	0,94	9,49
10	106,2	20,16	21,30	20,73	1,04	9,03
15	111,2	20,21	20,99	20,60	1,09	8,90
20	116,2	19,67	20,32	20,00	1,14	8,30
25	121,2	19,11	20,08	19,60	1,19	7,90
30	126,2	19,28	20,04	19,66	1,24	7,96
40	136,2	19,08	19,08	19,08	1,34	7,38
50	146,2	18,42	19,55	18,99	1,43	7,29
60	156,2	18,04	18,98	18,51	1,53	6,81
70	166,2	17,32	18,88	18,10	1,63	6,40
80	176,2	17,44	17,81	17,63	1,73	5,93
90	186,2	16,98	17,75	17,37	1,83	5,67
100	196,2	16,92	17,11	17,02	1,92	5,32
125	221,2	16,65	16,66	16,66	2,17	4,96
150	246,2	16,50	16,10	16,30	2,42	4,60
200	296,2	15,57	15,80	15,69	2,91	3,99
250	346,2	15,19	15,08	15,14	3,40	3,44
300	396,2	14,29	15,46	14,88	3,89	3,18
350	446,2	14,04	15,86	14,95	4,38	3,25
400	496,2	13,99	15,06	14,53	4,87	2,83
500	596,2	13,69	14,25	13,97	5,85	2,27
600	696,2	13,85	13,65	13,75	6,83	2,05
700	796,2	13,52	13,16	13,34	7,81	1,64
800	896,2	12,97	13,75	13,36	8,79	1,66
900	996,2	13,18	12,67	12,93	9,77	1,23
1000	1096	13,09	12,60	12,85	10,75	1,15

**Tabulka 5: Naměřené a vypočtené hodnoty komolé kotvy**

Komolá kotva						
Závaží	$m$ [g]	$x_1$ [mm]	$x_2$ [mm]	$x$ [mm]	$F$ [N]	$\delta$ [mm]
kotva	75,90	24,94	27,07	26,01	0,74	16,3
košík	100,3	23,58	24,03	23,81	0,98	14,1
10	110,3	22,55	23,31	22,93	1,08	13,2
15	115,3	22,03	22,81	22,42	1,13	12,7
20	120,3	21,50	22,74	22,12	1,18	12,4
25	125,3	21,74	21,96	21,85	1,23	12,2
30	130,3	21,18	21,85	21,52	1,28	11,8
40	140,3	20,51	21,59	21,05	1,38	11,4
50	150,3	20,42	20,73	20,58	1,47	10,9
60	160,3	20,03	20,23	20,13	1,57	10,4
70	170,3	19,87	19,88	19,88	1,67	10,2
80	180,3	19,65	19,31	19,48	1,77	9,78
90	190,3	19,21	19,15	19,18	1,87	9,48
100	200,3	18,84	18,72	18,78	1,96	9,08
125	225,3	18,41	18,18	18,30	2,21	8,60
150	250,3	18,18	17,41	17,80	2,46	8,10
200	300,3	16,88	16,88	16,88	2,95	7,18
250	350,3	16,22	16,27	16,25	3,44	6,54
300	400,3	15,69	15,59	15,64	3,93	5,94
350	450,3	15,44	14,87	15,16	4,42	5,46
400	500,3	15,29	14,51	14,90	4,91	5,20
500	600,3	14,44	13,81	14,13	5,89	4,43
600	700,3	13,43	13,84	13,64	6,87	3,94
700	800,3	13,09	13,45	13,27	7,85	3,57
800	900,3	12,62	13,13	12,88	8,83	3,18
900	1000	12,72	12,87	12,80	9,81	3,10
1000	1100	12,21	12,70	12,46	10,7	2,76



Obr. 6: Naměřené tahové charakteristiky původního elektromagnetu

Tabulka 6: Použité měřicí přístroje

Měřicí přístroj	Typ	I.Č.
Digitální multimetr	OWON B35T+	B35T+17160411 BLE4.0
Váha laboratorní	SI-132	SAP:001000261632-0000
Digitální posuvné měřítko	TIGRE	

## 4.2 Postup výpočtu jádrového elektromagnetu

Jako výchozí hodnoty pro výpočet parametrů nutných k návrh jádrového elektromagnetu jsou použity výsledné hodnoty z měření plášťového elektromagnetu.

### 4.2.1 Výchozí parametry

**Zdvih: 12 [mm]** Požadovaná maximální velikost vzduchové mezery elektromagnetu je dána podle požadovaného rozsahu pohybu kotvy.

**Síla: 0,8 [N]** Požadovaná tahová síla elektromagnetu při maximální navrhované vzduchové mezeře

**Průměr kotvy: 13,95 [mm]**

**Hmotnost kotvy: 78,1 [g]**

Průřez kotvy: 152,84 [mm<sup>2</sup>]

## 4.2.2 Výpočet parametrů elektromagnetu

Za předpokladu, že spřažený magnetický tok  $\varphi$  se při změně vzduchové mezery o  $dx$  nezmění, lze sílu  $F_{im}$  vyjádřit rovnicí (4.1), kde  $dW_m$  vyjadřuje změnu magnetické energie soustavy při změně vzduchové mezery o  $dx$ .

$$F_{im} = - \frac{dW_m}{dx} \quad (4.1)$$

Magnetické energie se vypočte podle rovnice (4.2).

$$W_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} V = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} Sx \quad (4.2)$$

Pod dosazení do rovnice (4.1) lze upravit na tvar rovnice (4.3),

$$F_{im} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} S \quad (4.3)$$

do které se následně zadají známe hodnoty.

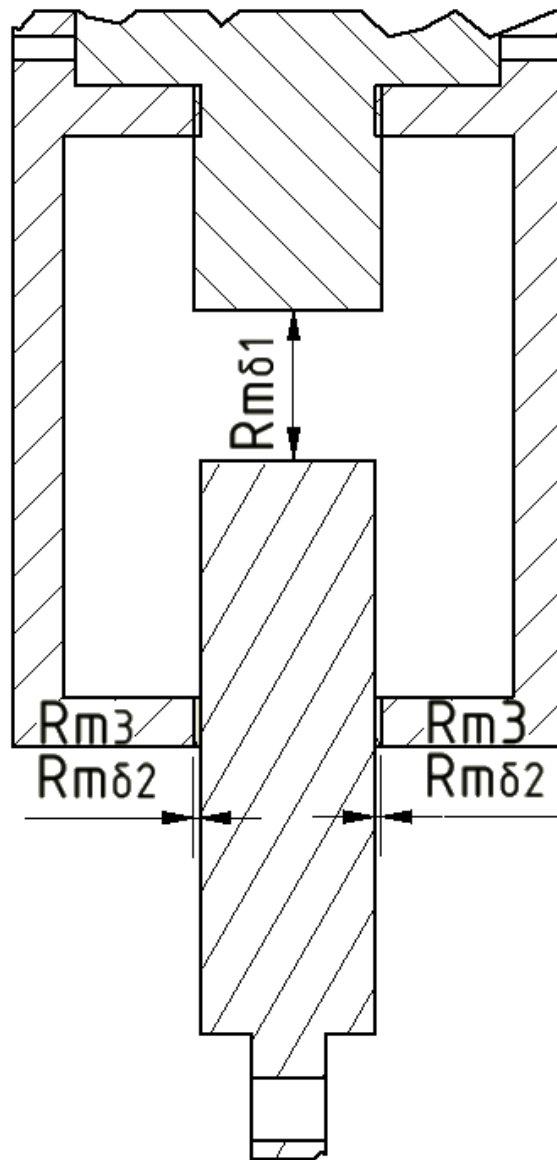
$$0,8 = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} 1,53 \cdot 10^{-4} \quad (4.4)$$

Z rovnice (4.4) se následně vyjádří magnetická indukce  $B$ .

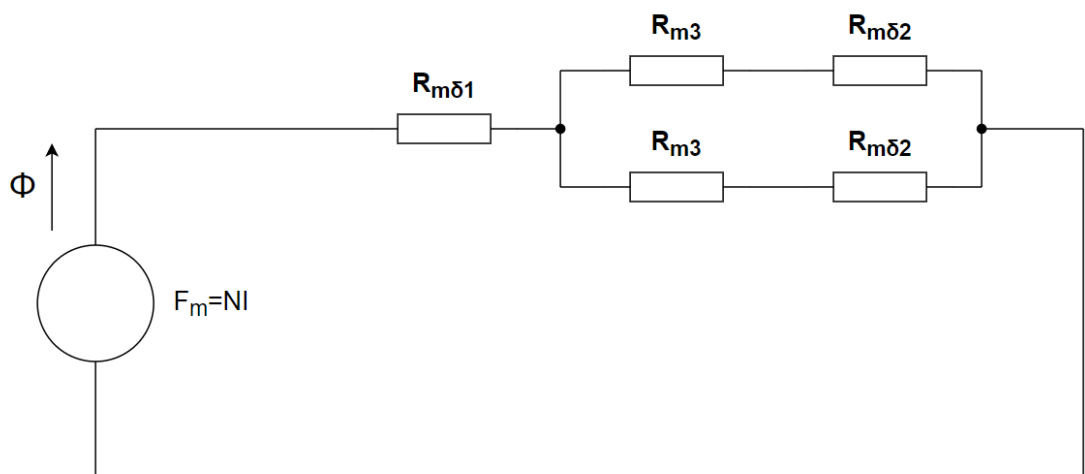
$$B^2 = \frac{0,8 \cdot 2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{1,53 \cdot 10^{-4}} = 0,01314 T^2 \quad (4.5)$$

$$B = \sqrt{B^2} = \sqrt{0,01314} = 0,115 T \quad (4.6)$$





Obr. 7: Model magnetických odporů elektromagnetu v řezu



Obr. 8: Náhradní schéma magnetických odporů

Výsledný magnetický odpor se vypočte podle rovnice (4.7).

$$R_{m\Sigma} = R_{m\delta 1} + \frac{1}{2}(R_{m3} + R_{m\delta 2}) \quad (4.7)$$

Magnetický odpor železa jádra lze zanedbat, protože je vůči magnetickému odporu vzduchových mezer řádově mnohem menší. Výsledný magnetický odpor se tedy vypočte podle rovnice (4.8).

$$R_{m\Sigma} = R_{m\delta 1} + \frac{1}{2}R_{m\delta 2} \quad (4.8)$$

Magnetický odpor vzduchové mezery  $R_{m\delta 1}$ :

$$R_{m\delta 1} = \frac{1}{\mu_0} \frac{x}{S} = \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7}} \frac{12 \cdot 10^{-3}}{1,53 \cdot 10^{-4}} = 62,4 \text{ MH}^{-1}. \quad (4.9)$$

Magnetický odpor vzduchové mezery  $R_{m\delta 2}$ :

$$R_{m\delta 2} = \frac{1}{\mu_0} \frac{l}{S_{1/2}} = \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7}} \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{\frac{1,53 \cdot 10^{-4}}{2}} = 5,2 \text{ MH}^{-1}. \quad (4.10)$$

Výsledný magnetický odpor  $R_{m\Sigma}$ :

$$R_{m\Sigma} = 62,4 + \frac{1}{2}5,2 = 65 \text{ MH}^{-1}. \quad (4.11)$$

Magnetomotorická síla  $F_m$  může být vyjádřena jako:

$$F_m = R_{m\Sigma} \cdot \phi = NI. \quad (4.12)$$

Ztéto rovnice lze vyjádřit vztah pro magnetický tok  $\Phi$ :

$$\phi = \frac{F_m}{R_{m\Sigma}} = BS. \quad (4.13)$$

Po dosazení známých hodnot vyjde:

$$F_m = BSR_{m\Sigma} = 0,115 \cdot 1,53 \cdot 10^{-4} \cdot 65 \cdot 10^6 = 1143 \text{ A}. \quad (4.14)$$

Pro známou velikost magnetomotorické síly  $F_m$  se určí požadovaný proud budící cívkou elektromagnetu a podle rovnice (4.15) se určí potřebný počet závitů.

$$N = \frac{F_m}{I} = \frac{1143}{0,5} = 2286 \text{ závitů} \quad (4.15)$$

**Tabulka 7: Závislost počtu závitů na el. proudu**

El. Proud [mA]	Počet závitů
100	11430
140	8164
300	3810
500	2286
750	1524
1000	1143

Jako nejvhodnější byl vybrán budicí proud 500 mA, pro který je požadovaný počet závitů budicí cívky 2286.

Průměr vodiče byl zvolen 0,4 mm.

**Tabulka 8: Souhrn navržených parametrů**

$B$	0,115 T
$R_{m\delta 1}$	62,4 MH <sup>-1</sup>
$R_{m\delta 2}$	5,2 MH <sup>-1</sup>
$R_{m\Sigma}$	65 MH <sup>-1</sup>
$F_m$	1143 A
$I$	0,5 A
N	2286 závitů
$d_v$	0,4 mm

## 4.3 Numerické ověření navrženého elektromagnetu

Pro numerické ověření modelu navrženého elektromagnetu byl použit software FEMM, který využívá metody konečných prvků a je lehce přístupný. Jedna z největších výhod metody konečných prvků spočívá v možnosti simulací jevů a dějů, které by se v praxi uskutečňovali velmi obtížně.

### 4.3.1 Program FEMM

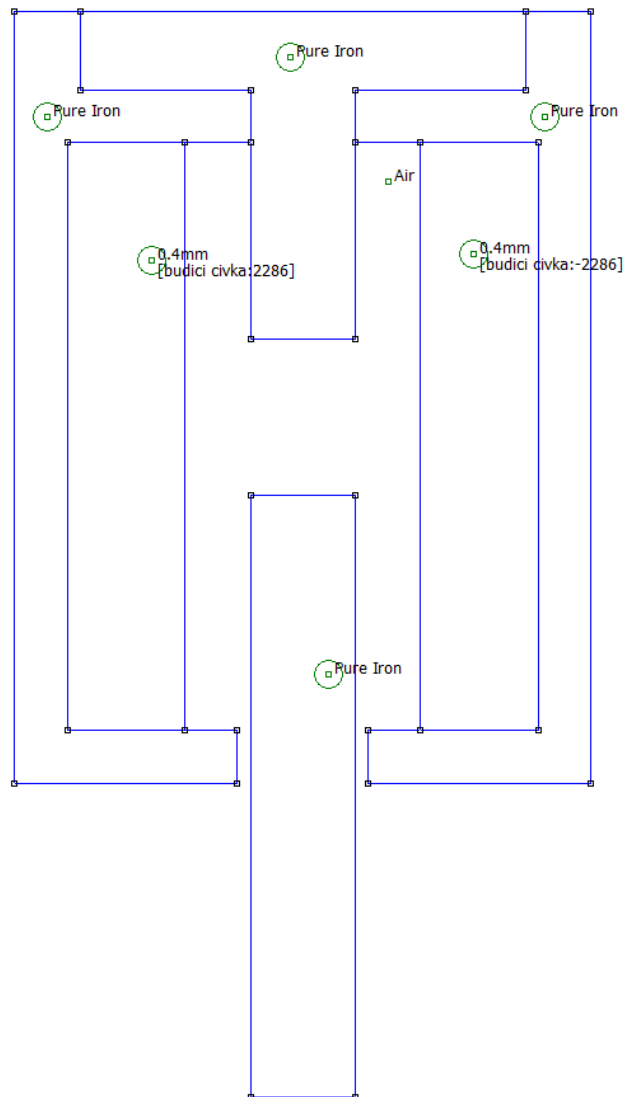
Program **FEMM** (Finite Element Method Magnetics) slouží k řešení nízkofrekvenčních, elektromagnetických úloh, pomocí dvourozměrných modelů, metodou konečných prvků. Nabízí možnost výpočtu v kartézském, nebo válcovém souřadném systému v řezu. FEMM není omezen počtem použitých elementů, je tedy možné vytvořený model opatřit libovolně jemnou matematickou sítí.

## 4.4 Model navrhovaného elektromagnetu v programu FEMM

V programu FEMM byl vytvořen model navrhovaného elektromagnetu podle požadovaných a vypočtených parametrů z kapitoly 4.1. Rozměry elektromagnetu, které nebyly vypočteny, byly navrženy tak, aby bylo možné elektromagnet vyrobit a zároveň byla úspora materiálu co největší. Rozměry elektromagnetu jsou zobrazeny v kapitole 4.7.

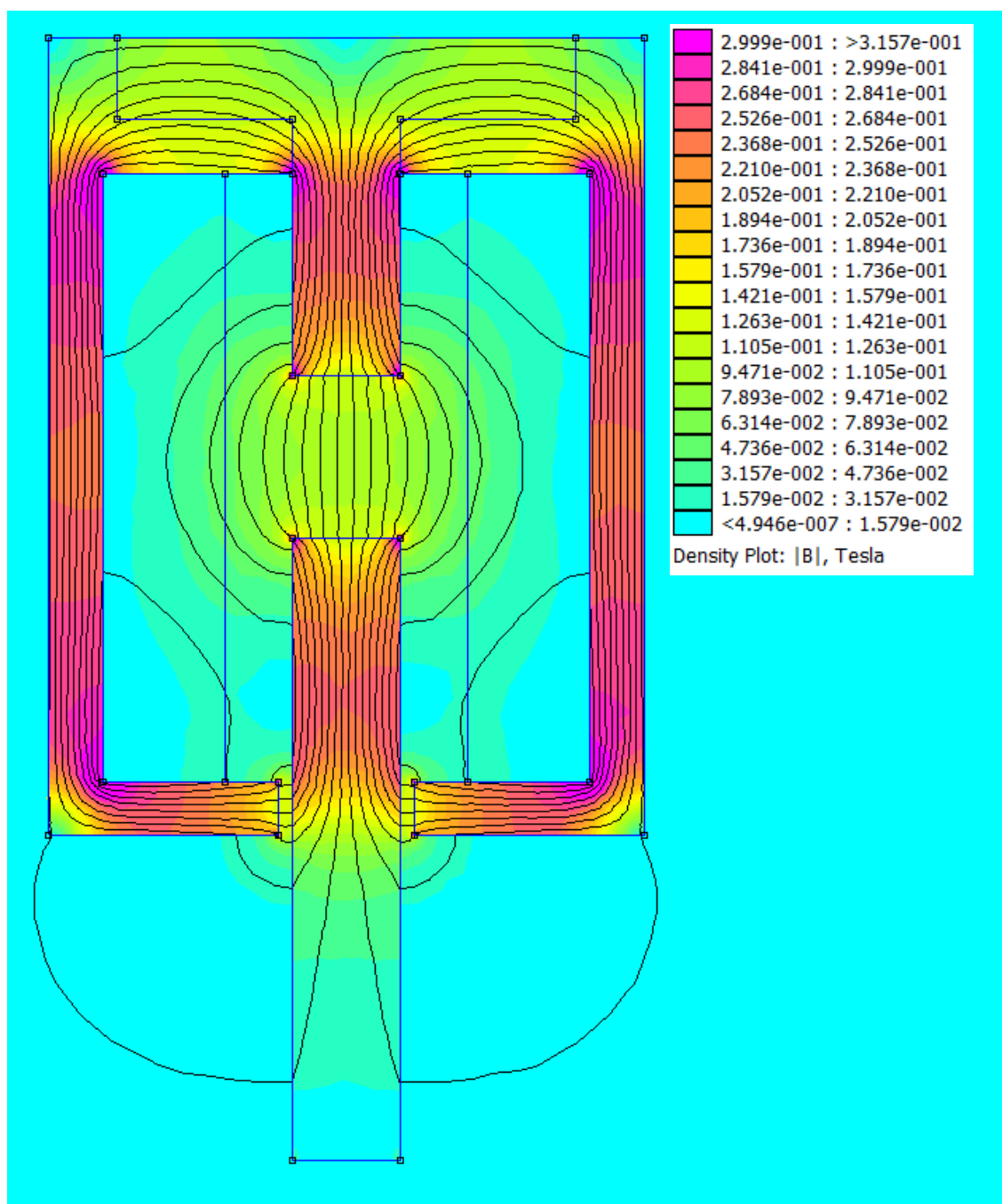
Pro vytvoření modelu elektromagnetu bylo použito několika zjednodušení, jinak by nebylo možné model v programu FEMM vytvořit. Program FEMM pracuje ve 2D systému souřadnic a nastavení hloubky (“z” osy) pro celý model, proto bylo nutné všechny kulaté části (kotvu a horní část) navedovat jako kvádry o stejném průřezu. Bronzový kroužek mezi spodní částí jádra a kotvou byl brán jako prodloužení vzduchové mezery.

Nejdříve bylo nutné vymodelovat všechny části elektromagnetu, definovat pracovní prostředí a okrajové podmínky. Dále byly definovány všechny pracovní plochy a materiály z knihovny materiálů. Pro lepší přesnost následné simulace bylo vhodné zjemnit síť elementů pro metodu konečných prvků.



Obr. 9: Model navrženého elektromagnetu v programu FEMM

Jako další krok byla provedena simulace zadaných parametrů. Program FEMM následně vykreslil model elektromagnetu včetně elektromagnetického pole a jeho součástí. Výsledný model je znázorněn na obrázku č. 9.



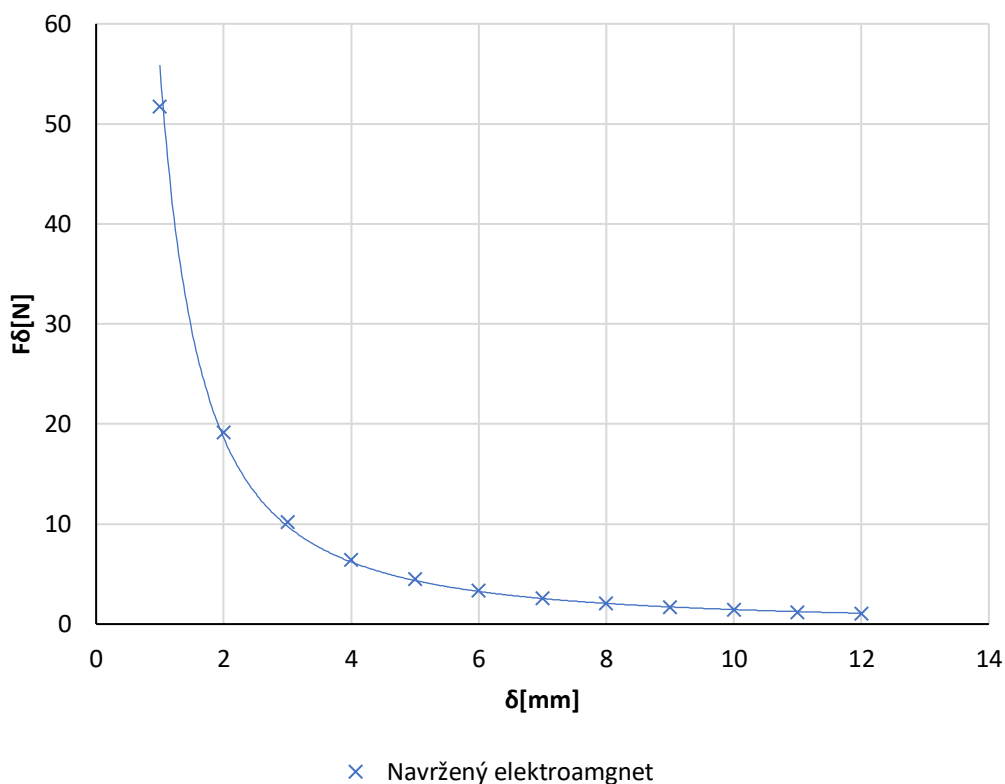
**Obr. 10: Rozložení magnetické indukce pro 2286 závitů a  $\delta=12$  mm**

## 4.5 Simulace navrhovaného elektromagnetu

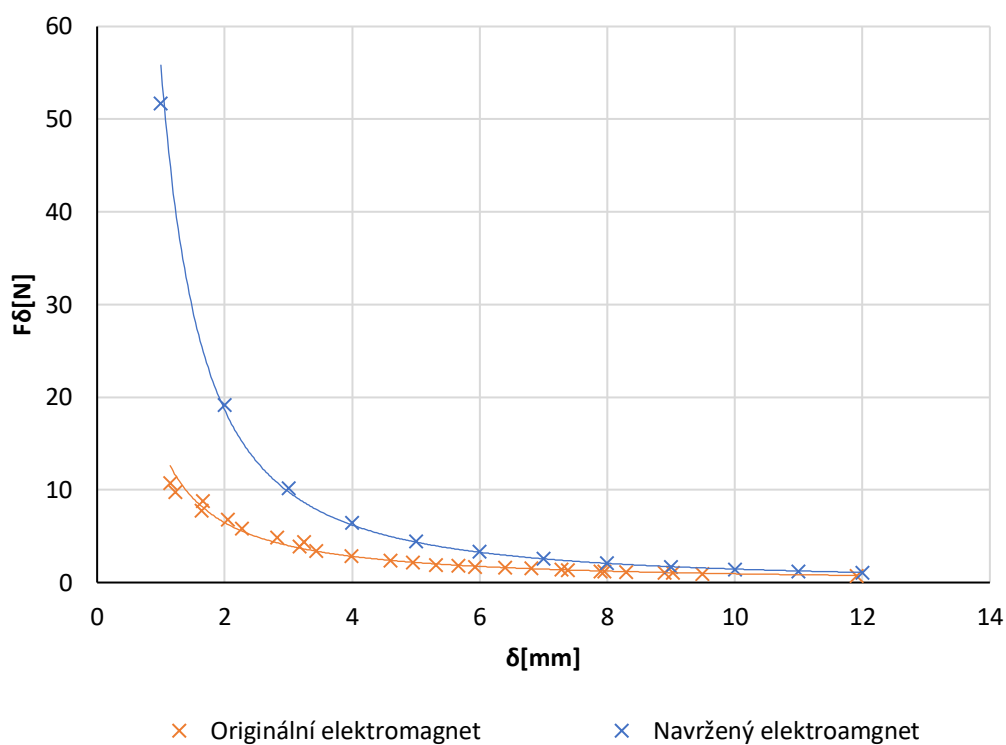
Simulování tahové charakteristiky probíhalo postupnými změnami velikosti vzduchové mezery mezi kotvou a horní částí elektromagnetu. Tímto způsobem byly odečteny hodnoty tahové síly pro různé velikosti vzduchové mezery (tabulka 9).

**Tabulka 9: Vypočítané hodnoty z programu FEMM**

$\delta$ [mm]	$F$ [N]
12	1,07
11	1,20
10	1,41
9	1,68
8	2,08
7	2,58
6	3,33
5	4,49
4	6,46
3	10,2
2	19,2
1	51,7

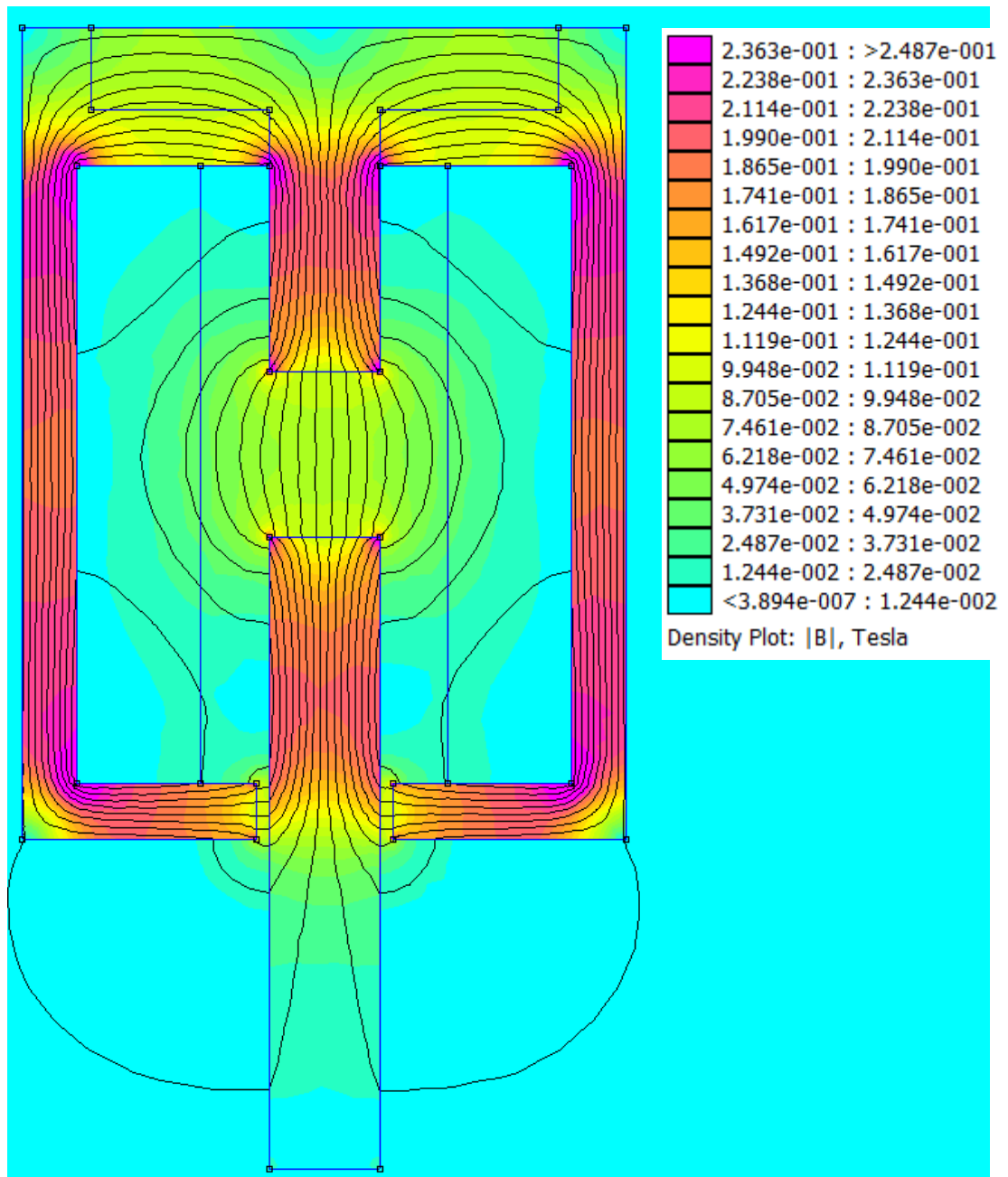


**Obr. 11: Tahová charakteristika navrženého elektromagnetu**



**Obr. 12: Srovnání statických tahových charakteristik původního a navrženého elektromagnetu**

V dalším kroku bylo nutné upravit parametry navrženého elektromagnetu, aby bylo možné proměřit větší část jeho tahové charakteristiky se závažími dostupnými ve školní laboratoři. V této fázi bylo nejjednodušší upravit závislost tahové síly na velikosti vzduchové mezery snížením počtu závitů budící cívky. Nový počet závitů byl pokusy zvolen na **1800 závitů**. Následovala další simulace s novým počtem závitů budící cívky.

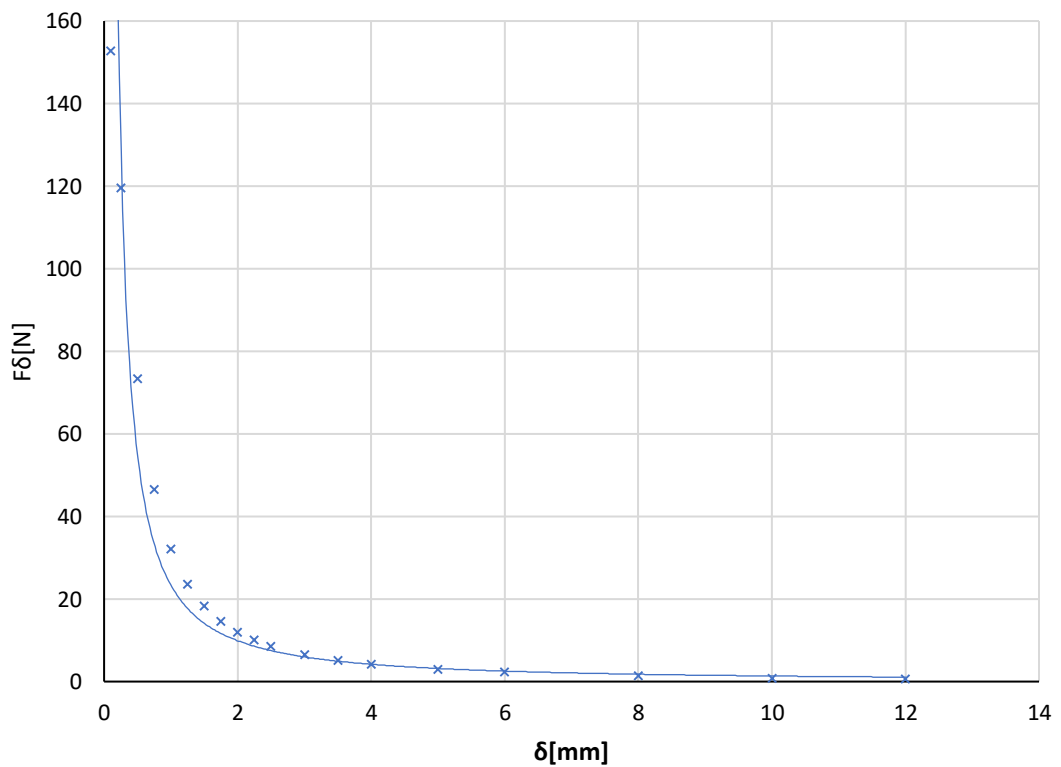


Obr. 13: Rozložení magnetické indukce pro 1800 závitů a  $\delta=12$  mm

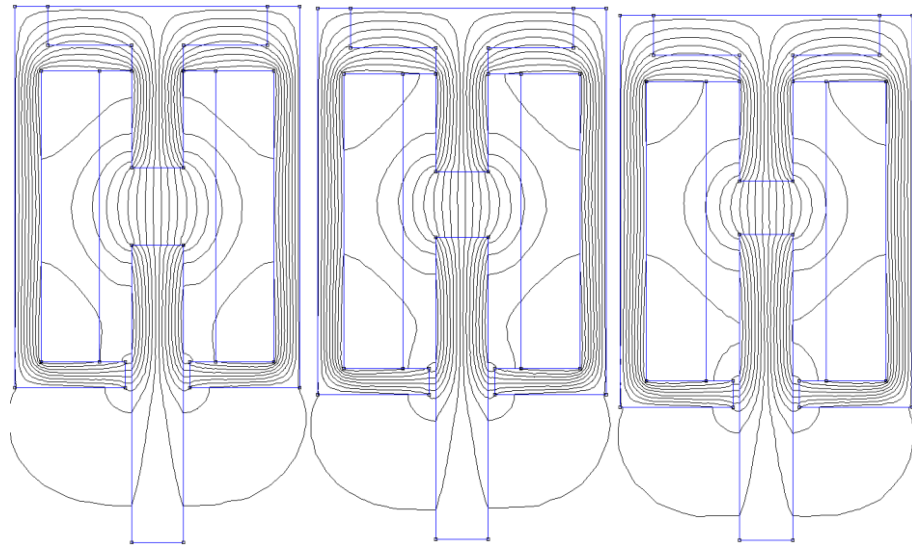


**Tabulka 10: Vypočítané hodnoty upraveného elektromagnetu**

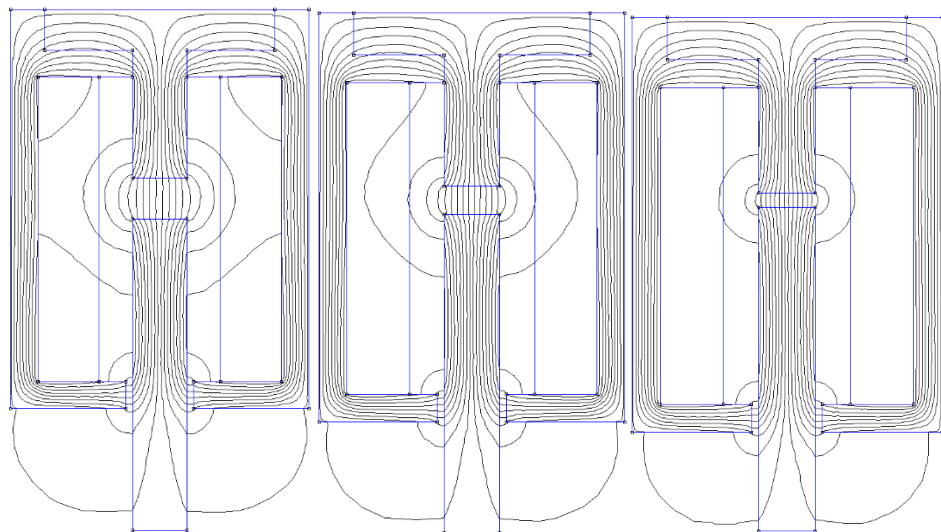
$\delta$ [mm]	$F$ [N]
12	0,63
10	0,87
8,0	1,50
6,0	2,31
5,0	3,01
4,0	4,21
3,5	5,15
3,0	6,49
2,5	8,56
2,25	10,1
2,0	12,0
1,75	14,6
1,5	18,3
1,25	23,6
1,0	32,1
0,75	46,6
0,5	73,5
0,25	120
0,1	153



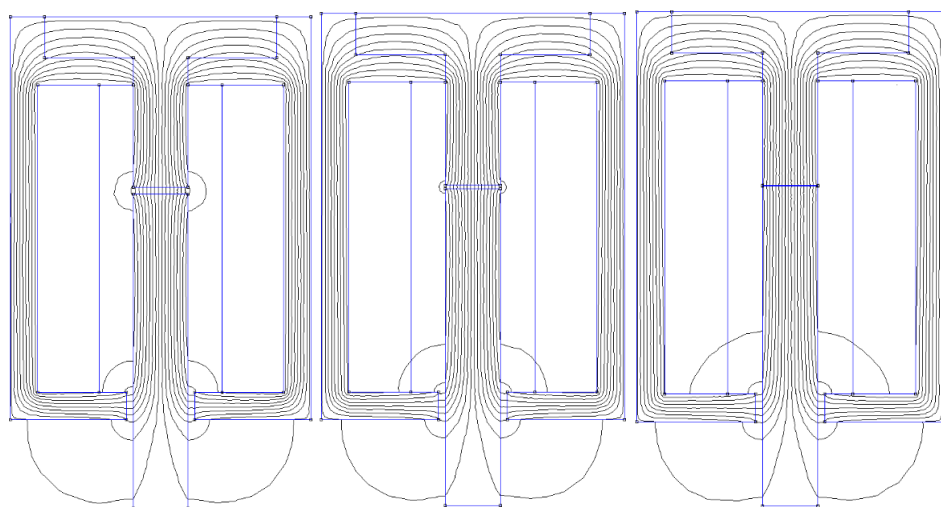
**Obr. 14: Tahová charakteristika navrženého elektromagnetu (1800 závitů)**



**Obr. 15: Rozložení magnetického indukčního toku pro  $\delta= 12, 10$  a  $8$  mm**



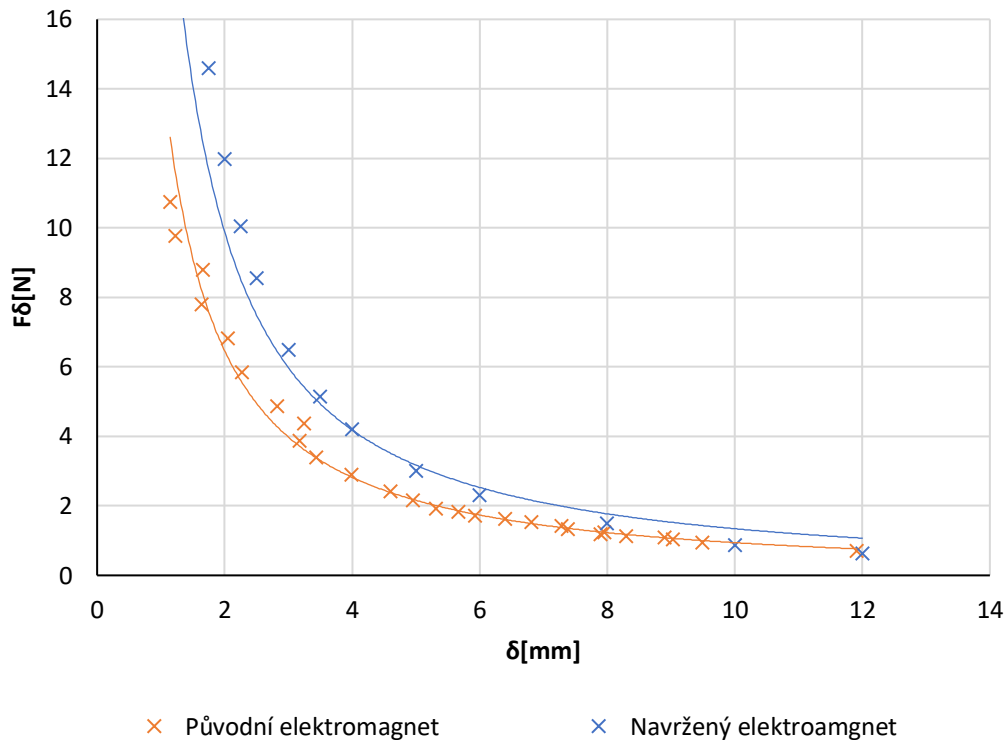
**Obr. 16: Rozložení magnetického indukčního toku pro  $\delta= 6, 4$  a  $2$  mm**



**Obr.17: Rozložení magnetického indukčního toku pro  $\delta= 1, 0,5$  a  $0,1$  mm**

## 4.6 Zhodnocení výsledků simulace navrženého elektromagnetu z programu FEMM

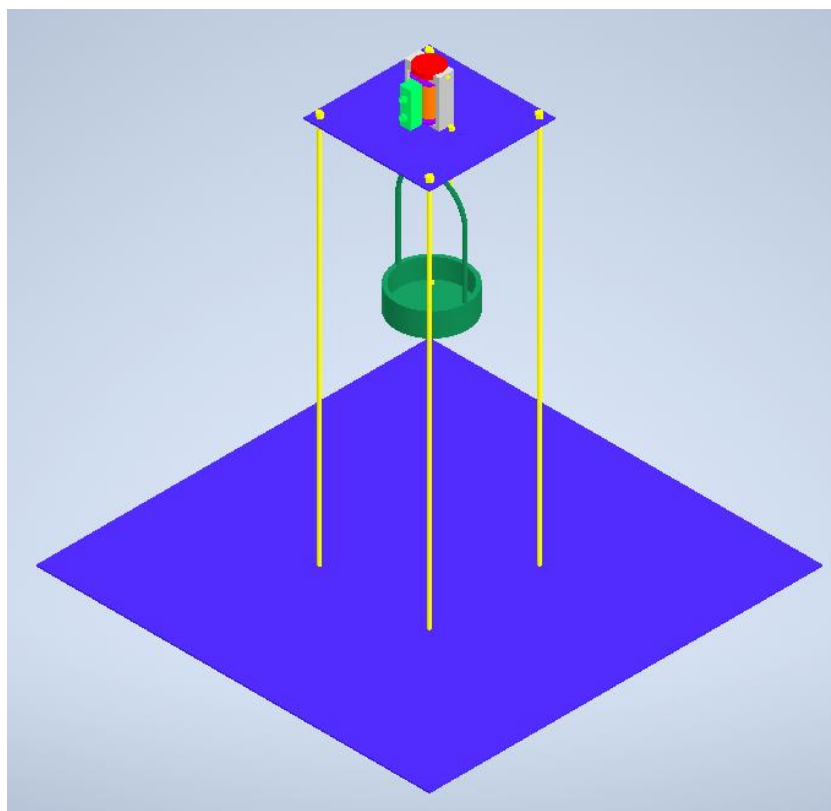
Naměřená statická tahová charakteristika původního plášťového elektromagnetu z laboratoře VUT a část tahové charakteristiky navrženého elektromagnetu získaná simulací v programu FEMM jsou zobrazeny na obrázku č. 18. Při porovnání obou tahových charakteristik je patrné, že se v zobrazené oblasti značně podobají, což bylo záměrem.



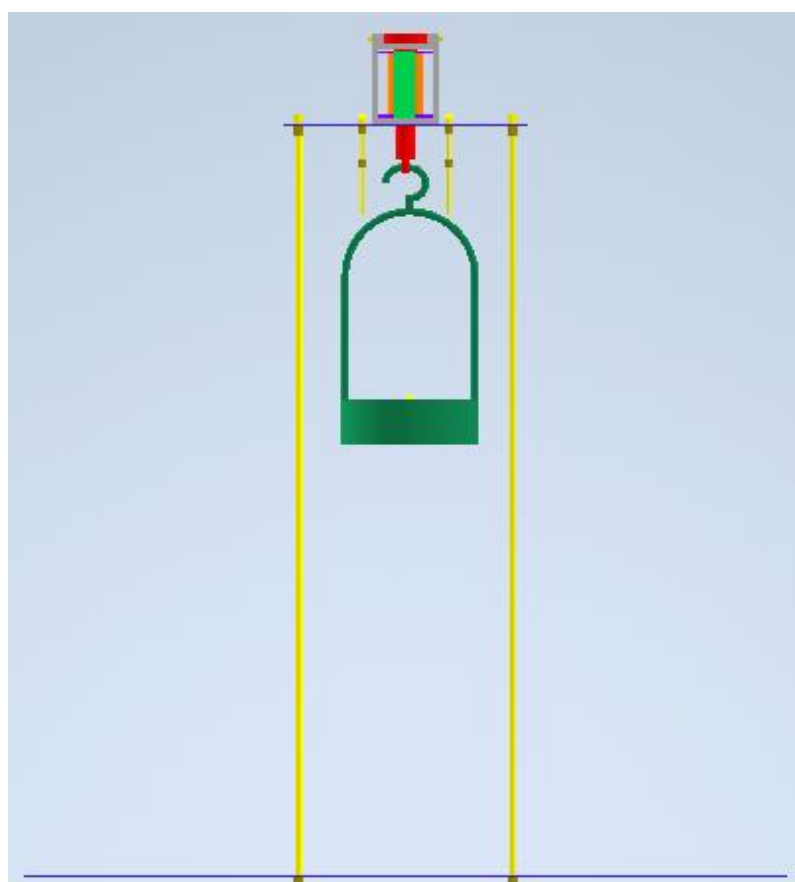
Obr. 18: Detailní srovnání tahových charakteristik původního a navrženého elektromagnetu

## 4.7 Navržený elektromagnet

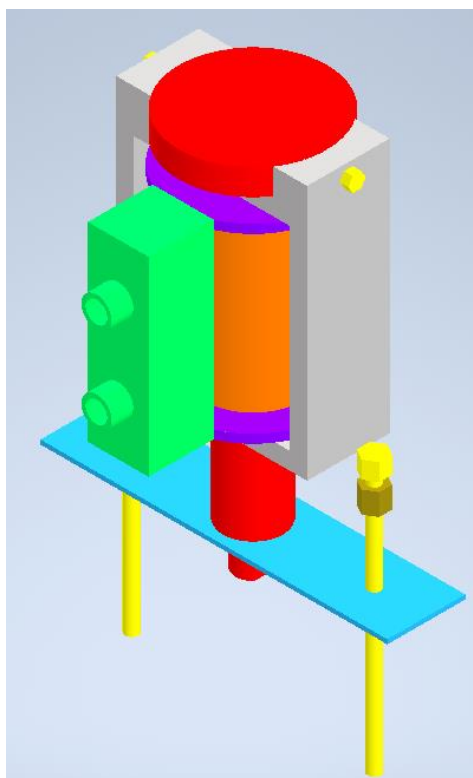
Stejnoseměrný jádrový elektromagnet navržený v předchozích kapitolách, bude sloužit k laboratorní výuce na VUT v Brně. Na obrázcích 19 a 20 je znázorněna celá měřicí úloha vymodelovaná v programu Inventor určená ke zjištění tahové charakteristiky elektromagnetu. Jednotlivé části jsou pro lepší přehlednost odlišeny barvami. Na obrázcích 21 a 22 je bližší pohled na horní část s elektromagnetem a konstrukcí pro přidržení kotvy.



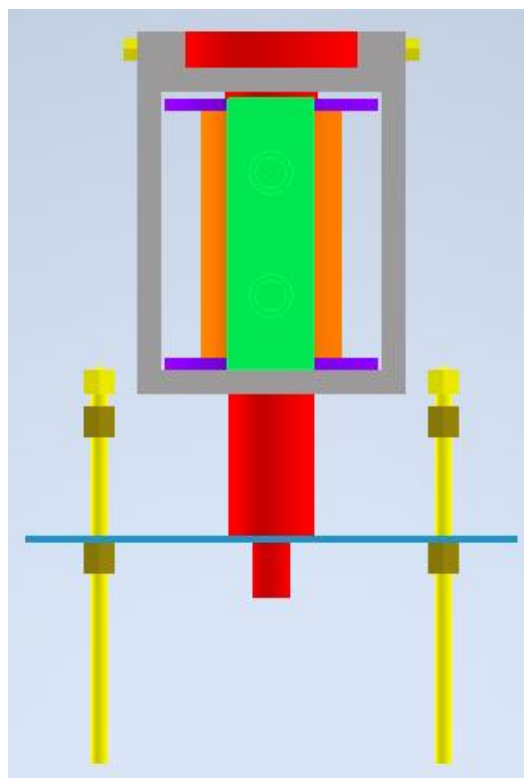
**Obr. 19: Model celé měřicí sestavy**



**Obr. 20: Model celé měřicí sestavy – pohled zepředu**

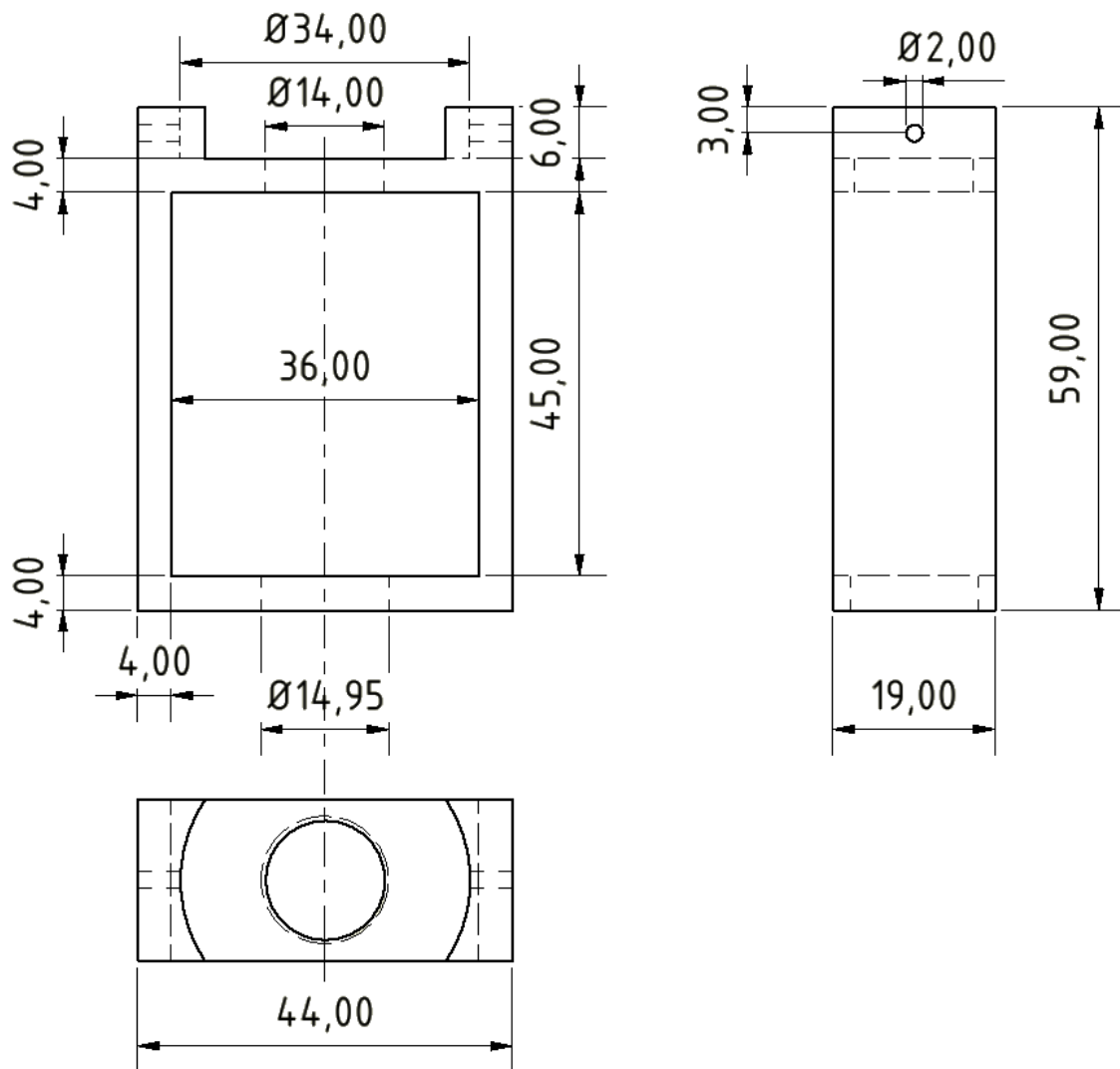


**Obr. 21: Detail horní části**

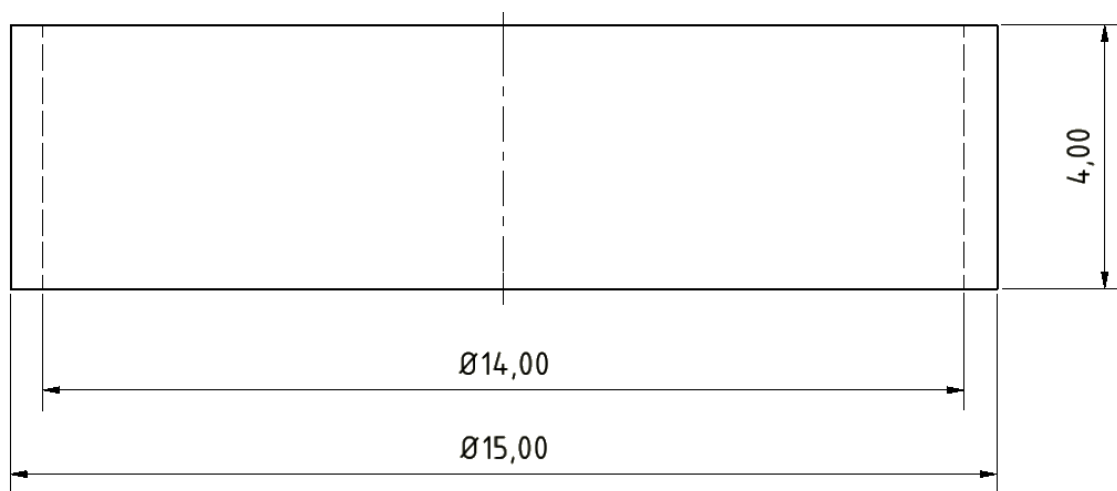


**Obr. 22: Detail horní části –  
pohled zepředu**

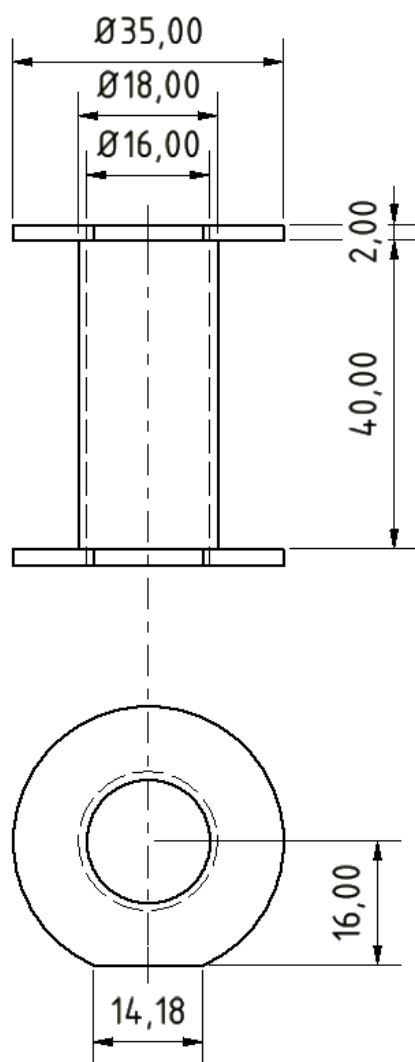
Rozměry jednotlivých částí, které je potřeba vyrobit jsou zobrazeny na obrázcích číslo 23 až 28. Tloušťka plošin (obr. č. 26, 27 a 28) může být zvolena dle potřeby. V modelu byla použita tloušťka 2 mm pro horní a spodní plošinu a 1 mm pro plošinu na udržení kotvy.



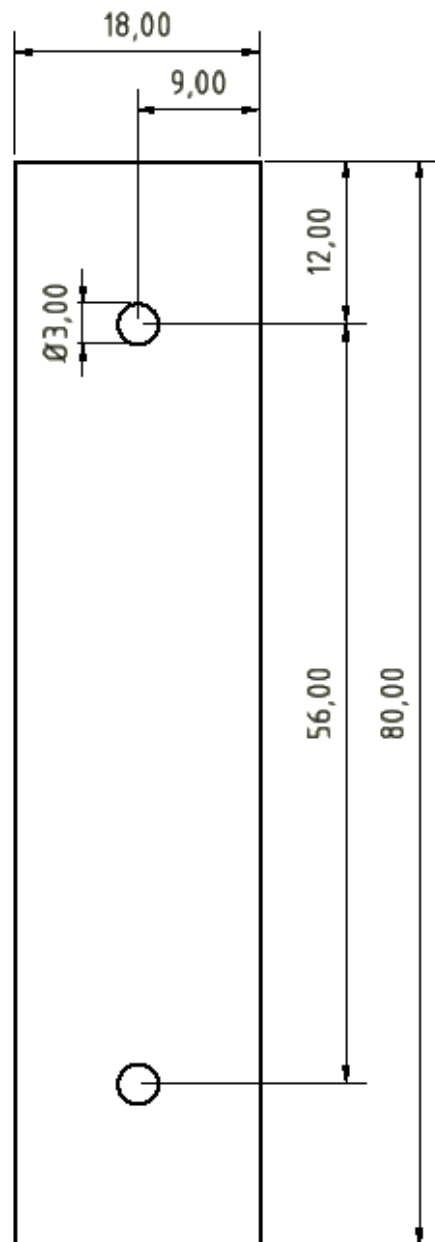
Obr. 23: Rozměry jádra



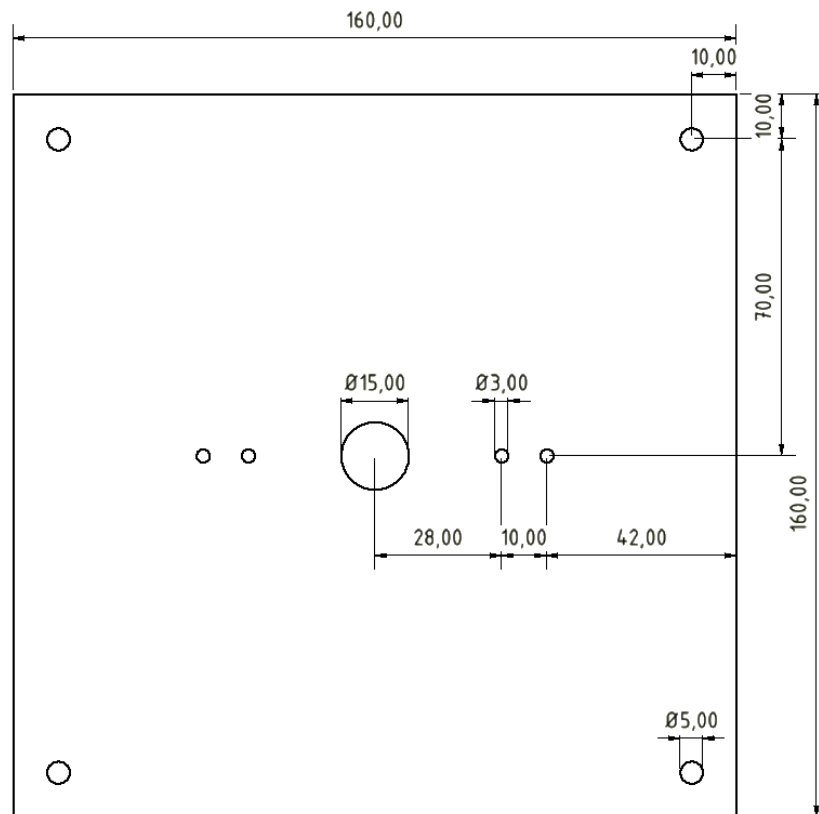
Obr. 24: Rozměry bronzového kroužku



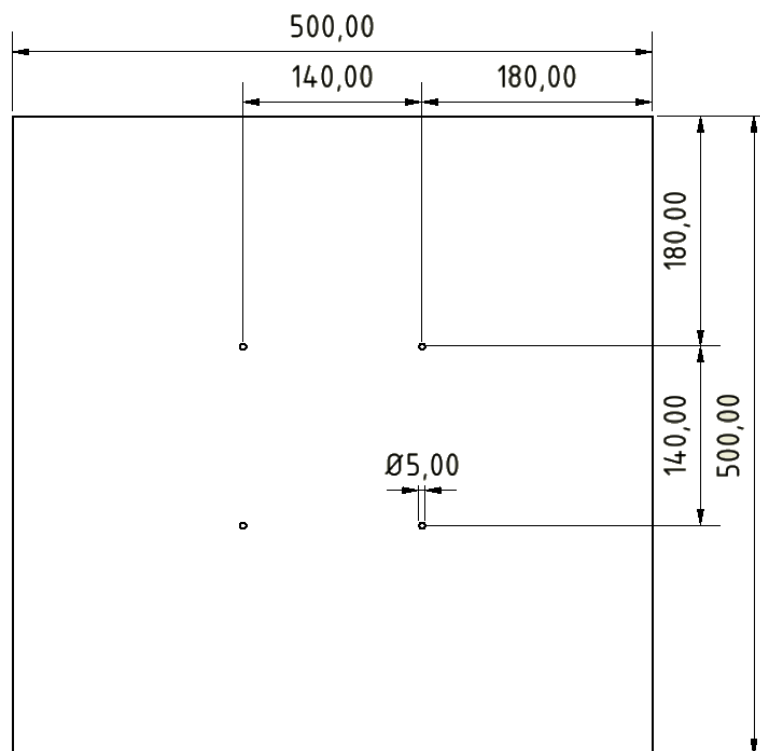
Obr. 25: Rozměry bubínku budicí cívky



Obr. 26: Rozměry plošiny pro kotvu



**Obr. 27: Rozměry horní plošiny**



**Obr. 28: Rozměry spodní plošiny**



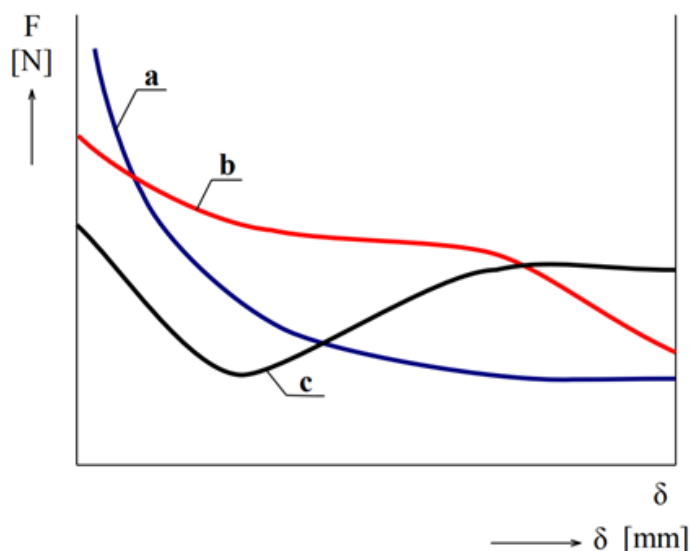
## 5. MĚŘENÍ NA STEJNOSMĚRNÝCH ELEKTROMAGNETECH

Zjišťování parametrů elektromagnetů výpočtem může být složité a nepřesné, protože se často používají zjednodušující předpoklady. Nejpresnější metodou zjištění daných parametrů je samotné měření na určitém elektromagnetu. V této kapitole je popsáno několik nejdůležitějších parametrů, které se na elektromagnetech měří a způsob jejich měření.

### 5.1 Statická tahová charakteristika

Závislost tahové síly  $F_\delta$  na zdvihu  $\delta$  (velikosti vzduchové mezery) se nazývá statická tahová charakteristika  $F_\delta=f(\delta)$ . Zjišťuje se měřením při stojící kotvě, kdy se po malých úsecích mění velikost vzduchové mezery. Přitom vždy zůstává konstantní jeden z elektrických parametrů vinutí budicí cívky. U elektromagnetů napájených stejnosměrným proudem zůstává během zdvihu konstantní budicí proud, při napájení střídavým proudem se na cívce nemění efektivní hodnota přiloženého napětí [4].

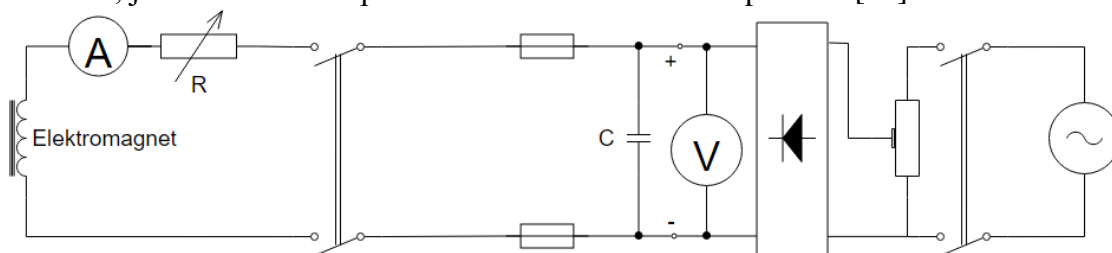
Statické tahové charakteristiky mohou nabývat mnoha různých tvarů viz obr. č. 29. Čára *a* představuje klasický hyperbolický průběh tahové síly stejnosměrného elektromagnetu. Čáry *b* a *c* představují extrémní případy. Průběh *b* se podobá průběhu běžného střídavého elektromagnetu a průběh *c* lze dosáhnout pouze speciální úpravou tvaru a polohy vzduchové mezery. Největší vliv na průběh tahové charakteristiky má druh napájecího proudu (stejnosměrný nebo střídavý), geometrické tvary a rozměry vzduchové mezery, ale také její uspořádání vzhledem k budicímu vinutí. Vliv základních rozměrů feromagnetického obvodu a průběh magnetizační křivky použitého materiálu je obecně mnohem menší [4][11].



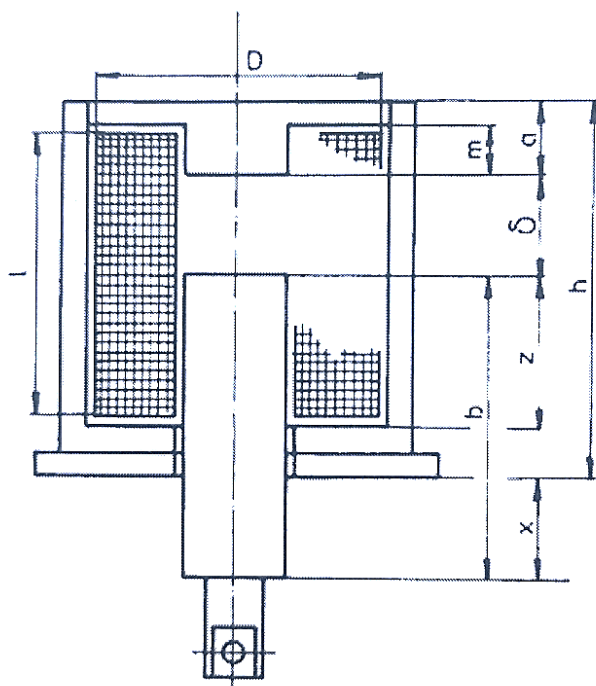
Obr. 29: Průběhy statických tahových charakteristik[4]

## 5.1.1 Postup měření

Schéma zapojení měřicího obvodu je zobrazeno na obr. č. 30. Při měření je důležité vždy udržovat proud budící cívkou na konstantní hodnotě. Měření probíhá postupným zvyšováním hmotnosti závaží zavěšeného na kotvě měřeného elektromagnetu a měřením vzdálenosti  $x$  zobrazenou na obr. č. 31. První hodnota je zaznamenána při nezatížené kotvě a mezi každým měřením. Měření se provádí bez proudu a s kotvou staženou do výchozí polohy. Vzdálenost  $x$  se pro vyšší přesnost měří dvakrát a počítá se s její střední hodnotou. Jednotlivé naměřené a vypočtené hodnoty se vynášejí do grafu, kde na vodorovné ose je velikost vzduchové mezery  $\delta$  a na svislé ose velikost tahové síly  $F$ . Body se poté proloží křivkou hyperbolického charakteru. Pokud některý z bodů leží výrazně mimo křivku, je vhodné měření pro danou velikost zatížení zopakovat [11].



Obr. 30: Schéma zapojení pro měření statické tahové charakteristiky[11]



Obr. 31: Důležité rozměry elektromagnetu[11]

## 5.2 Dynamická tahová charakteristika

Dynamická tahová charakteristika udává na rozdíl od statické tahové charakteristiky skutečný provozní stav při přitahování a odpadávání kotvy v každém okamžiku. Slouží

k určení velikosti tahové síly na čase  $F=f(t)$ , proudu na čase  $I=f(t)$  a také k určení velikosti vzduchové mezery v daném čase  $\delta=f(t)$ .

Pro pohyb kotvy v každém okamžiku platí rovnice (4.1):

$$Ri + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dx} \frac{dx}{dt} = U. \quad (5.1)$$

V případě, že feromagnetikum je nenasycené a velikost vzduchové mezery  $\delta$  je konstantní platí:

$$\frac{dL}{dx} \frac{dx}{dt} = 0. \quad (5.2)$$

Při rychlé změně magnetického toku při pohybu kotvy se v cívce budí elektromotorické napětí  $U_e$ :

$$U_e = i \frac{dL}{dx} \frac{dx}{dt}. \quad (5.3)$$

Elektromotorické napětí přímo úměrně své velikosti snižuje velikost budícího proudu a tedy i rychlost přitahu kotvy. Rovnice pro výpočet dynamické charakteristiky elektromagnetu se dá upravit pro závislost na magnetickém toku  $\phi$ , protože tyto veličiny jsou kvadraticky závislé.

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0} = \frac{\phi B}{2\mu_0} = \frac{\phi^2}{2\mu_0 S}. \quad (5.4)$$

Pro snímání dynamické tahové charakteristiky  $F=f(t)$ , lze odvodit charakteristiku magnetického toku  $\phi=f(t)$  a naopak. Tyto charakteristiky jsou závislé na charakteritice mechanické zátěže elektromagnetu, kterou udává působení setrvačných hmot systému, včetně kotvy a jejího vzájemného působení na systém.

Pro měření dynamické tahové charakteristiky se používá dynamický snímač polohy, který snímá celý průběh přitahu a odpadu kotvy. Z naměřených hodnot se poté vypočítá výsledná charakteristika.

### 5.3 Ověření oteplení vinutí a armatury

Průchodem proudu proudovodnou drahou přístroje má za následek vznik tepelných ztrát a ohřívání přístroje. Analytické vyjádření průběhu teploty v proudovodné dráze při dlouhodobém průtoku proudu se provádí za předpokladu, že ztráty jsou v celé proudovodné dráze rovnoměrné [11].

Teplo, které v každém časovém úseku v elementu proudovodné dráhy vzniká  $dQ=q \cdot V \cdot dt$  se částečně odvádí do okolí ( $\alpha_0 s \Theta dt$ ) a z části v elementu dráhy zůstane a zvyšuje její teplotu ( $c v d\Theta$ ). Matematicky je tato závislost vyjádřena rovnicí (5.5):

$$qVdt = \alpha_0 S \Theta dt + cVd\theta \quad (5.5)$$

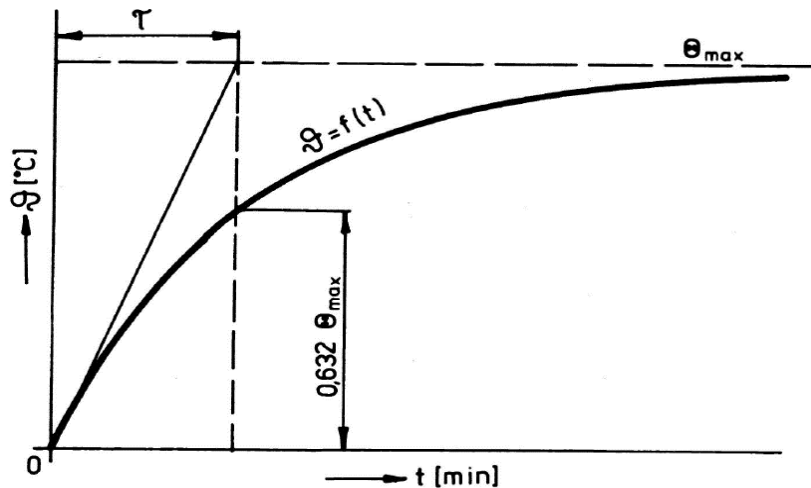
Řešením této diferenciální rovnice je vztah pro okamžité oteplení:

$$\vartheta = \frac{qV}{\alpha_0 S} \left( 1 - e^{-\frac{\alpha_0 S}{cV} t} \right) = \theta_m \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (5.6)$$

Oteplovací křivka je exponenciála a časová konstanta  $\tau$  je čas, za který by těleso dosáhlo ustáleného oteplení, kdyby neexistoval odvod tepla. Po dosažení maximálního oteplení nastává ustálený stav tepelné rovnováhy. V tomto stavu se veškeré teplo vznikající v proudovodné dráze předává chladícím povrchem do okolí, z toho plyne:

$$\theta = \frac{qV}{\alpha_0 S} = \frac{\sum RI^2}{\alpha_0 S}. \quad (5.7)$$

Oteplení v ustáleném stavu je přímo úměrné ztrátám ve vodiči a nepřímo úměrné ochlazovacím podmínkám. Výpočet oteplení proudovodné dráhy se provádí pouze ve stadiu konstrukčního návrhu. Pro posouzení slouží následné oteplovací zkoušky, při kterých při zatížení jmenovitým proudem nesmí oteplení části přístroje překročit dovolenou mezní teplotu izolace podle příslušné ČSN [11].



Obr. 32: Oteplovací křivka[11]

### 5.3.1 Metoda měření pomocí termočlánků

Přístroj se zatěžuje jmenovitým proudem a jmenovitým kmitočtem v poloze odpovídající normálnímu použití. Během zkoušky musí být přístroj i jeho přívody chráněny proti vnějšímu nežádoucímu ochlazování nebo ohřívání. Měření probíhá dokud se naměřená teplota nezvyšuje o více jak 1 °C za hodinu [11].

### 5.3.2 Měření oteplení ze změny odporu

Při použití metody měření oteplení proudovodné dráhy ze změny odporu se měří odpor za studena bez připojeného napájení a odpor vinutí zatížený jmenovitým proudem v zavřeném stavu. Termočlánkem připojeným na armaturu elektromagnetu se snímá teplota kontaktu elektromagnetu. Z naměřených hodnot lze vypočítat skutečné oteplení vodiče.

## 5.4 Špičkový proud při zapínání

Špičkový zapínací proud je maximální, okamžitá hodnota vstupního proudu odebraná budicí cívkou elektromagnetu při jeho zapnutí střídavým proudem. Vlivem saturace dochází ke snížení indukčnosti, což vede ke značnému navýšení proudu. Může přetrvat i několik period napájecího proudu. Magnetický tok cívky elektromagnetu je při běžném stavu závislý na kvadrátu připojeného napájecího napětí. Zapínací proud se v elektromagnetu objeví vždy, když při zapnutí bude nenulový rozdíl mezi zbytkovým (remanentním) magnetickým tokem  $\phi$  v budicí cívce a magnetickým tokem v ustáleném stavu [12].

Důležitými faktory ovlivňující velikost a průběh zapínacího proudu elektromagnetu jsou například hodnota odporu obvodu s vinutím budicí cívky, velikost a polarita zbytkového magnetického toku  $\phi$  v cívce. Dalším velice důležitým faktorem je velikost napájecího napětí a jeho fázový úhel v okamžik zapnutí [12].

Pro změření špičkového zapínacího proudu se může využít například rychlá sonda pro měření proudu. Jeho velikost může být až 50krát vyšší, než je jmenovitý proud procházející budicí cívkou v ustáleném stavu. Pro omezení velikosti zapínacího proudu lze využít například zvýšení impedance obvodu, snížení remanence nebo PWM měnič nebo předmagnetizaci. Jádru budicí cívky lze předmagnetizovat stejnosměrným proudem, nebo postupným najížděním elektromagnetu s napětím od malých hodnot až po jmenovitou hodnotu.

### 5.4.1 Závislost na fázovém úhlu

Fázový úhel závisí na okamžiku zapnutí. Velikost magnetického toku  $\phi$  lze vypočítat podle rovnice (5.8):

$$\phi = \phi_{\max} \sin(\omega t + \alpha) + \phi_{\text{rem}} + \phi_{\max} \sin \alpha \quad (5.8)$$

kde

$$\alpha = \theta - \frac{\pi}{2}. \quad (5.9)$$

Z rovnice (4.8) je patrné, že velikost magnetického toku  $\phi$  je závislá na zbytkové magnetizaci a fázovém úhlu. V případě, že je remanentní magnetický tok nulový a fázový úhel v okamžiku zapnutí  $90^\circ$ , tak se magnetický tok bude rovnat:

$$\phi = \phi_{\max} \sin(\omega t + 0) + 0 + \phi_{\max} \sin 0 \quad (5.10)$$

$$\phi = \phi_{\max} \sin(\omega t) \quad (5.11)$$

$$\phi = \phi_{\max}. \quad (5.12)$$

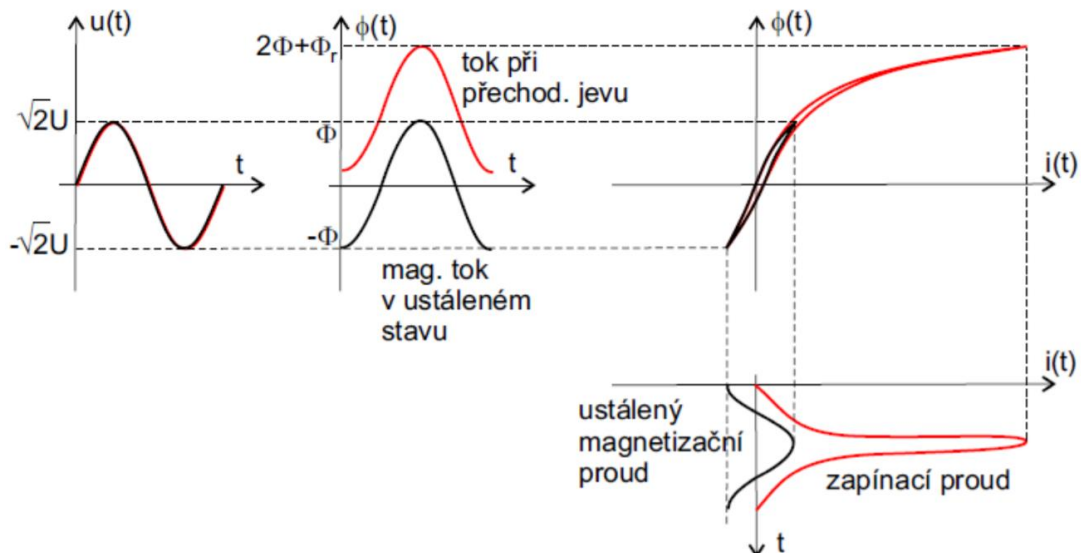
Pokud je ale fázový úhel v okamžik zapnutí roven nule, magnetický tok bude:

$$\phi = \phi_{\max} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + 0 + \phi_{\max} \sin \frac{\pi}{2} \quad (5.13)$$

$$\phi = \phi_{\max} \cos(\omega t) + \phi_{\max} \quad (5.14)$$

$$\phi = 2\phi_{\max} \quad (5.15)$$

Je patrné, že v případě zapnutí elektromagnetu s fázovým úhlem napájecího napětí  $90^\circ$  bude magnetický tok i zapínací proud minimální. Nejhorší možný případ nastane, pokud bude elektromagnet zapnut, když napájecí napětí prochází nulovou hodnotou [12].

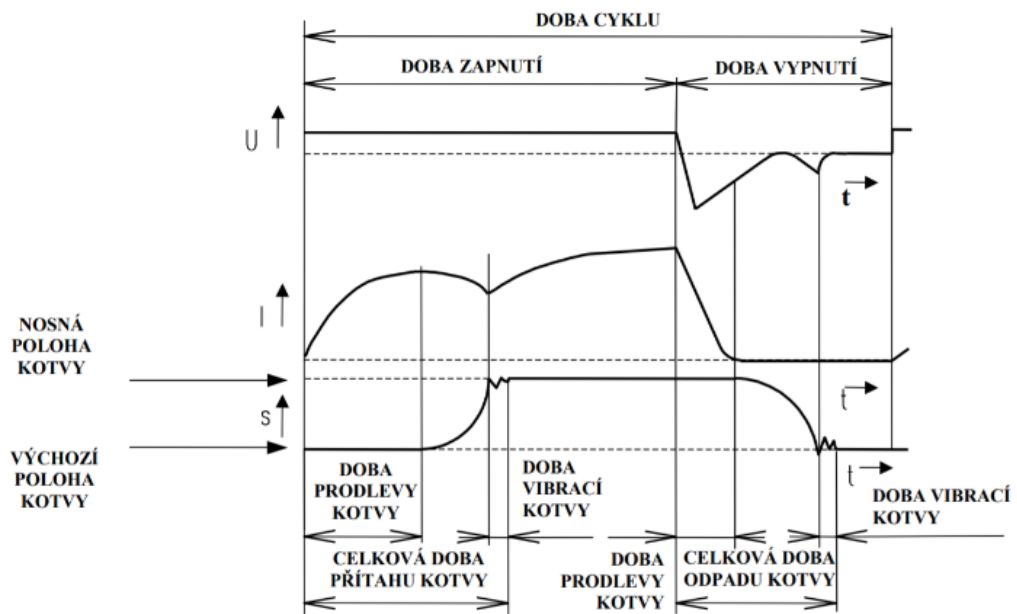


Obr. 33: Průběh zapínacího proudu [12]

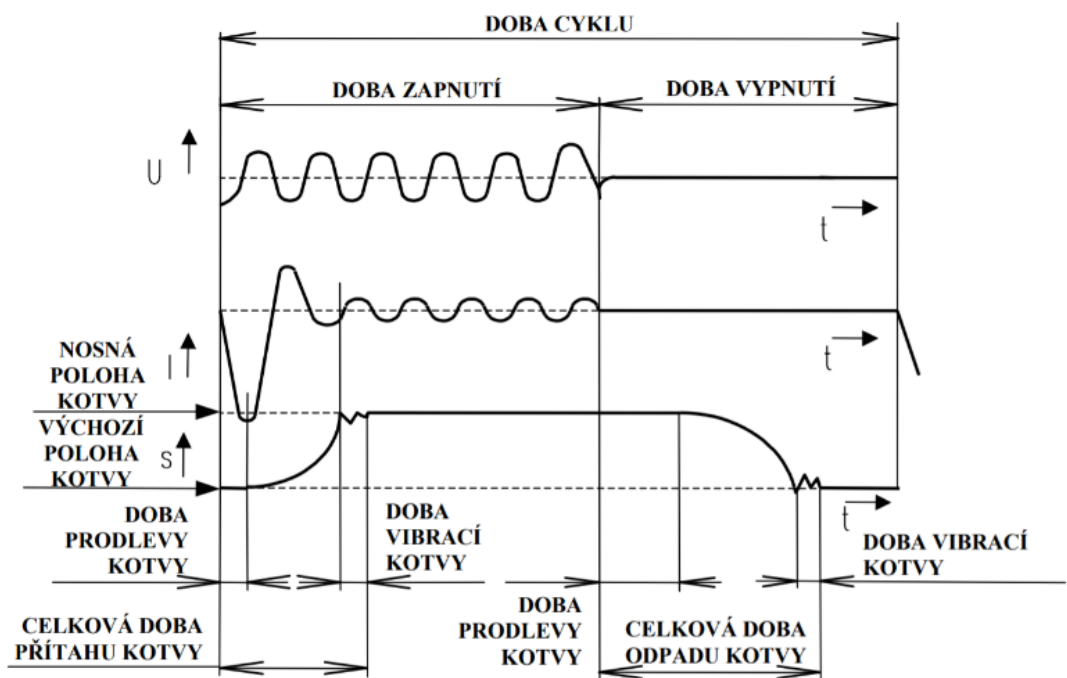
## 5.5 Špičkové přepětí při vypínání

Indukčnost budících cívek elektromagnetů se nepříznivě projeví při jejich vypínání vznikem přepětí. Při náhlém poklesu proudu se energie nashromážděná v magnetickém poli snaží zabránit přerušení toku proudu obvodem budící cívky. V obvodu dochází k přechodovým dějům které, s ohledem na vysoké hodnoty rezonanční impedance, mají za následek přepětí obvodu. Při přechodových jevech dochází k silnému namáhání izolace a opalování kontaktů. Podstatně se tak zkracuje jejich živostnost a současně napětově citlivé prvky paralelně připojené k vinutí cívky. Zároveň jsou i zdrojem rušivých signálů, které by se mohly kapacitní vazbou přenést do dalších obvodů a ovlivnit tak činnost například řídicích systémů. Ze zjištěných hodnot z praxe se může vytvořit při vypínání přepětí až 30-násobek jmenovité hodnoty [13].

Při měření přepětí při vypínání elektromagnetu se měří proud, napětí a průběh napětí na budící cívce elektromagnetu. Pro omezení napětíových špiček slouží přepětíové omezovače, které mohou být realizované například RC článkem, paralelně zapojeným k budící cívce nebo diodami. Velké elektromagnety jsou většinou napájené zdroji řízenými mikroprocesory, které zabrání náhlým poklesům budícího proudu pomalým snižováním po rampě [13].



Obr. 34: Zapínací a vypínací charakteristiky stejnosměrného elektromagnetu[14]



Obr. 35: Zapínací a vypínací charakteristiky střídavého elektromagnetu[14]

## 6. ZÁVĚR

Cílem této Bakalářské práce bylo vytvoření teoretické rešerše o elektromagnetech, postupu jejich návrhu, měření a navržení jádrového stejnosměrného elektromagnetu s výpočtem jeho parametrů, odsimulováním statické tahové charakteristiky a vytvořením technické dokumentace potřebné k jeho výrobě.

První část byla zaměřena na teoretický rozbor elektromagnetů a historii objevení elektromagnetu. Byl zde také vysvětlen princip na kterém pracují. Následně byla popsána konstrukce elektromagnetů a jejich rozdělení podle určitých kritérií. Jednotlivé typy byly podrobněji popsány pro přiblížení jejich charakteristických vlastností a výhod, popř. nevýhod. Pro stejnosměrné i pro střídavé elektromagnety bylo vysvětleno odvození výpočtu tahové síly  $F$ .

V další části byl popsán postup při návrhu stejnosměrného elektromagnetu. Z požadované velikosti tahové síly  $F$ , možného maximálního zdvihu (popř. velikosti vzduchové mezery)  $\delta$  a velikosti napájecího napětí  $U$  byl podrobně popsán postup výpočtu rozměrů budící cívky elektromagnetu, jako jsou například průměr jádra cívky, počet závitů a jejich uspořádání.

Následující kapitola obsahuje naměřené hodnoty reálného plášťového stejnosměrného elektromagnetu z laboratoře VUT a jeho statické tahové charakteristiky pro dva tvary kotvy. Získané hodnoty byly použity jako výchozí hodnoty pro návrh a výpočet parametrů jádrového stejnosměrného elektromagnetu. Tento elektromagnet byl následně simulován v softwaru FEMM, čímž byla získána jeho statická tahová charakteristika. V programu Inventor byl vytvořen 3D model navrženého elektromagnetu a model celé měřicí úlohy do laboratoří na změření jeho statické tahové charakteristiky. Všechny části, které je nutno vyrobit, byly zpracovány do technické dokumentace.

Poslední část byla věnována měření na elektromagnetech. Nejprve byl vysvětlen význam a postup měření statické tahové charakteristiky s představením několika možných tvarů pro různé typy vzduchových mezer. Následně byla představena dynamická tahová charakteristika a její rozdíl od statické. Pro dynamickou tahovou charakteristiku byla odvozena závislost, ze které lze vypočítat velikost tahové síly  $F$  nebo magnetické toku  $\phi$  v čase. Dále se tato kapitola věnovala ověření oteplení vinutí budící cívky, která nesmí překročit maximální dovolenou teplotu podle normy danou typem izolace. Poslední část této kapitoly se zabývá přechodovými ději, které vznikají při zapínání a vypínání elektromagnetů. Nejprve to byl špičkový proud při zapínání. Podrobněji byla popsána jeho závislost na fázovém úhlu napájecího napětí v okamžik zapnutí. Závěr se soustředil na špičkové přepětí vznikající při vypínání elektromagnetu z důsledku nashromáždění energie v magnetickém poli budící cívky.

Výsledkem této bakalářské práce je tedy navržený a odsimulovaný stejnosměrný jádrový elektromagnet podle parametrů naměřených na vzorovém plášťovém elektromagnetu. Je zde také vytvořena technická dokumentace nutná k výrobě měřicí úlohy do laboratoří VUT na měření statické tahové charakteristiky tohoto elektromagnetu.



# Literatura

- [1] History of Electromagnetism. The Bible According to Einstein: A Scientific Complement to the Holy Bible for the Third Millennium [online]. Jupiter Scientific Publishing Company, c1999, s. 113-115 [cit. 2019-11-08]. ISBN 0965517691. Dostupné z: <http://www.jupiterscientific.org/science/baeparts/historyelectromagnetism.html>
- [2] BYRNE, Charles. A Brief History of Electromagnetism [online]. Massachusetts, 2015 [cit. 2019-11-07]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/f572/71023d570232417f530ae19659fd915b3dbd.pdf>
- [3] CAVICCHI, Elizabeth. Series and Parallel Experimenting with Electromagnets. Univ. of Pavia, Italy: Pavia Project Physics, 1999.
- [4] KRÁL, Josef a Jaromír VANĚK. Elektromagnetické přístroje. Brno: VUT, 1984.
- [5] THOMPSON, Silvanus Phillips. The Electromagnet and Electromagnetic Mechanism: ., Cambridge University Press: Cambridge University Press, 2011. ISBN 9781108029216.
- [6] MRAVEC, Rudolf. Elektrické stroje a přístroje. Praha: SNTL, 1979.
- [7] HAVELKA, Otto. Elektrické přístroje. Praha : SNTL, 1985.
- [8] PATOČKA, Miroslav. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. V Brně: VUTIUM, 2011, 564 s. : il. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [9] MUSIL, Rudolf. Návrh brzdových elektromagnetů na střídavý a stejnosměrný proud: učební pomůcka pro 3. ročník středních průmyslových škol elektrotechnických. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
- [10] CIGÁNEK, Ladislav a Miroslav BAUER. Elektrické stroje a přístroje. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955.
- [11] GROSS, Boleslav. Laboratorní a numerická cvičení z elektrických přístrojů. Brno: VUT, 1983.
- [12] R, Gopika a Deepa SANKAR. Study on Power Transformer Inrush Current. IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering [online]. Kalady, India: Department of Electrical & Electronics Engineering, Adi Shankara Institute of Engineering Technology, , 59-63 [cit. 2020-01-02]. ISSN 2278-1676. Dostupné z: <https://www.iosrjournals.org/iosr-jeec/Papers/Conf.17017/Volume-2/8.%2059-63.pdf?id=7590>
- [13] GEC, Zdeněk. Vypínání relé a stykačů jako zdroj přepětí. Elektro: Časopis pro elektrotechniku [online]. c2014-2019, 05/2008, 2008(5), 22-23 [cit. 2019-12-23]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/vypinani-rele-a-stykacu-jako-zdroj-prepeti--11907>
- [14] SLOVÁCKÉ STROJÍRNÝ, A. S. VŠEOBECNÉ TECHNICKÉ INFORMACE. Uherský brod. Dostupné také z: [http://www.sub.cz/userfiles/spec/sub/files/katalogy\\_a\\_prospekty/elmagnety.pdf](http://www.sub.cz/userfiles/spec/sub/files/katalogy_a_prospekty/elmagnety.pdf)

- [15] SINOKO MW5 série standardní šrotu kovů Magnet pro vrakoviště.  
In: KINO Cranes [online]. Čína: Henan Sinoko jeřáby Co. [cit. 2020-01-07].  
Dostupné z: <http://cz.gantrycranesupplier.com/crane-parts/magnet-for-crane/sinoko-mw5-series-standard-scrap-metal-magnet.html>