



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 TEPELNÉ SÍTĚ PRO LINEÁRNÍ MOTORY

DESIGN OF SYNCHRONOUS LINEAR MOTOR THERMAL NETWORK

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Čech

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ladislav Knebl

BRNO 2020



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Jan Čech

ID: 182925

Ročník: 2

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Návrh tepelné sítě pro lineární motory

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Prostudujte metodiku tvorby tepelných sítí.
2. Navrhněte tepelnou síť pro zvolený typ lineárního motoru.
3. Proveďte výpočet pomocí metody tepelné sítě.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Patočka M.: Magnetické jevy a obvody. VUTIUM, Brno, 2011.
- [2] Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv.1. Skriptum, FEKT, VUT Brno.
- [3] Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv.2. Skriptum, FEKT, VUT Brno.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 1.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Ladislav Knebl

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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 práce se ve své první části zabývá studiem lineárního synchronního motoru. Úvod práce se věnuje stručnému popisu lineárního motoru včetně jeho příslušenství. Je zde uveden princip lineárních motorů a jejich obecné výhody a nevýhody. Následuje přehled a rozdělení lineárních motorů, které mají v současné době praktické využití. Druhá část práce se zabývá teoretickým popisem forem sdílení tepla. Třetí část práce se zabývá návrhem modelu ekvivalentního tepelného obvodu lineárního motoru se železným jádrem. Tento model se poté využil pro výpočet teplot jednotlivých částí motoru. Tyto hodnoty se následně porovnály s hodnotami vypočtenými metodou konečných prvků.

Klíčová slova

lineární motor, odporová síť, tepelná síť, tepelný odpor, synchronní, ztráty, železné jádro, metoda konečných prvků, Ansys Workbench, Tepelná simulace

Abstract

The first part of this thesis deals with the study of linear motors. The introduction of the thesis deals with the brief description of the linear motor, including its accessories. This part explains principle of linear motors, their general advantages and disadvantages. The next section contains an overview and division of the currently used linear motors. The second part deals with the theoretical description of forms of heat transfer. The third part of the thesis deals with the design of an equivalent thermal circuit model of a linear iron-core linear motor with permanent magnet. Hereafter, the proposed design will be used to calculate the temperatures of the individual motor units. The temperatures are later compared with the results obtained with finite element method.

Keywords

linear motor, resistance network, thermal network, thermal resistance, synchronous, losses, iron core, finite element method, Ansys Workbench, Thermal simulation

Bibliografická citace:

ČECH, Jan. Návrh lineárních motorů. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/123303>. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Ladislav Knebl.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Návrh tepelné sítě pro lineární motory“ 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 semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální 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: **1. června 2020**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Ladislavovi Kneblovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **1. června 2020**

.....

podpis autora

Obsah

1. Úvod.....	15
2. Lineární motor	16
2.1 Historie.....	16
2.2 Obecný princip a konstrukce.....	17
2.3 Obecné výhody a nevýhody	18
2.3.1 Absence mechanického převodu	18
2.3.2 Cena	18
2.3.3 Chlazení	19
2.3.4 Tření.....	19
2.4 Příslušenství	19
2.4.1 Senzorická soustava.....	20
2.4.2 Odměřovací systémy.....	21
2.4.3 Řídící systémy.....	22
2.4.4 Mechanické vedení	22
2.5 Rozdělení lineárních motorů.....	23
3. Synchronní lineární motor	26
3.1 Lineární motor se železným jádrem.....	27
4. Sdílení tepla	29
4.1 Vedení	29
4.2 Záření	31
4.3 Proudění	32
4.3.1 Laminární proudění.....	34
4.3.2 Turbulentní proudění	35
4.4 Tepelně elektrická analogie.....	35
5. Výpočet teplotních poměrů v LEM	36
5.1 Odporová síť	36
5.2 Výpočet ztrát v motoru.....	37
5.2.1 Ztráty ve vinutí.....	37
5.2.2 Hysterezní ztráty	38
5.2.3 Ztráty vířivými proudy.....	38
5.2.4 Ztráty v permanentních magnetech.....	39

5.3	Parametry zkoumaného motoru	40
5.4	Tvorba odporové sítě.....	41
5.5	Metoda konečných prvků v programu Ansys Workbench.....	49
5.5.1	Model motoru v CAD	50
5.5.2	Nastavení materiálů	52
5.6	Nastavení simulace.....	52
5.7	Porovnání výsledků.....	59
6.	Závěr	61
	Literatura.....	63

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:

LEM	...	Lineární elektrický motor
SLEM	...	Synchronní lineární elektrický motor
PM	...	Permanentní magnety

Symboly:

2p	...	počet pólů	[-]
B	...	magnetická indukce	[T]
c	...	rychlost světla ve vakuu	[m·s ⁻¹]
C _v	...	materiálový koeficient vířivých ztrát	[-]
d	...	tloušťka plechů	[m]
d _{potrubí}	...	průměr potrubí	[m]
f	...	frekvence	[Hz]
Gr	...	Grashoffovo kritérium	[-]
h	...	koeficient nucené konvekce, Planckova konstanta $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$	[W·m ⁻² ·K ⁻¹], [J·s]
h ₁	...	koeficient nucené konvekce vodního chlazení	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
h ₂	...	koeficient nucené konvekce mezi okolím a vrchní plochou primární části	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
h ₃	...	koeficient nucené konvekce mezi okolím a boční plochou primární části	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
h ₄	...	koeficient nucené konvekce mezi okolím a vrchní plochou sekundární části	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
h ₅	...	koeficient nucené konvekce mezi okolím a boční plochou sekundární části	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
C _h	...	materiálový koeficient hysterezních ztrát	[-]
I _f	...	fázový proud	[A]
J	...	proudová hustota	[A·m ⁻²]
k	...	Boltzmannova konstanta $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$	[J·K ⁻¹]
l	...	délka	[m]
l _{PM}	...	šířka PM	[m]

m	...	počet fází	[-]
$M_{0\lambda}$...	spektrální intenzita vyzařování	$[W \cdot m^{-3}]$
Nu	...	Nusseltovo kritérium	[-]
p	...	Počet drážek pro vodní chlazení, tepelný tok	[-], [W]
P_2	...	výkon LSM	[W]
P_{Cu}	...	Jouleho ztráty	[W]
P_h	...	hysterezní ztráty	[W]
P_{PM}	...	celkové ztráty v PM	[W]
Pr	...	Prandtlovo kritérium	[-]
P_v	...	vířivé ztráty	[W]
q	...	hustota tepelného toku	$[W \cdot m^{-2}]$
Q	...	množství tepla	[J]
q_{kon}	...	měrný tepelný tok	$[W \cdot m^{-2}]$
R_{conv1}	...	konvekce vodního chlazení	$[K \cdot W^{-1}]$
R_{conv2}	...	konvekce mezi okolím a vrchní plochou primární části	$[K \cdot W^{-1}]$
R_{conv3}	...	konvekce mezi okolím a boční plochou primární části	$[K \cdot W^{-1}]$
R_{conv4}	...	konvekce mezi okolím a vrchní plochou sekundární části	$[K \cdot W^{-1}]$
R_{conv5}	...	konvekce mezi okolím a boční plochou sekundární části	$[K \cdot W^{-1}]$
Re	...	Reynoldsovo kritérium	[-]
R_{epoxid}	...	tepelný odpor epoxidu	$[K \cdot W^{-1}]$
R_f	...	odpor vinutí jedné fáze	$[\Omega]$
$R_{izolační\ papír}$...	tepelný odpor izolačního papíru	$[K \cdot W^{-1}]$
R_{jho}	...	tepelný odpor jha	$[K \cdot W^{-1}]$
R_{magnet}	...	tepelný odpor magnetu	$[K \cdot W^{-1}]$
R_{ocel}	...	tepelný odpor oceli sekundárního dílu	$[K \cdot W^{-1}]$
R_{PM}	...	elektrický odpor PM	$[\Omega]$
$R_{vzduch\ mezera}$...	tepelný odpor vzduchové mezery	$[K \cdot W^{-1}]$
R_{ϑ}	...	tepelný odpor	$[W \cdot K^{-1}]$
S	...	plocha	$[m^2]$
t	...	čas	[s]
T	...	termodynamická teplota	[K]
V	...	objem látky	$[m^3]$

V_{Cu}	...	objem mědi	$[m^3]$
v_s	...	synchronní rychlost	$[m \cdot s^{-1}]$
W_{PM}	...	délka PM	$[m]$
α_{Cu}	...	teplotní součinitel elektrického odporu	$[K^{-1}]$
α_g	...	součinitel přestupu tepla vedením	$[W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}]$
λ	...	součinitel tepelné vodivosti, vlnová délka	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}], [m]$
μ_f	...	dynamická viskozita vody	$[Pa \cdot s]$
μ_w	...	dynamická viskozita vody o teplotě stěny potrubí	$[Pa \cdot s]$
ρ_{Cu}	...	rezistivita mědi	$[\Omega \cdot m^{-1}]$
ρ_{PM}	...	rezistivita PM	$[\Omega \cdot m^{-1}]$
τ	...	pólová rozteč	$[m]$
τ_n	...	rozteč zubů	$[m]$
ω	...	úhlová rychlost	$[rad \cdot s^{-1}]$
ω_{PM}	...	úhlová rychlost pulzů při přechodu zubu nad magnetem	$[Hz]$

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Princip lineárního motoru [6]	17
Obr. 2-2 Sestava lineárního motoru, modifikováno z [8]	20
Obr. 2-3 Topologie lineárních motorů, modifikováno z [11]	24
Obr. 2-4 Dělení lineárních motorů podle principu, modifikováno z [11].....	25
Obr. 3-1 Lineární motor se železným jádrem, modifikováno z [7]	28
Obr. 4-1 Znázornění gradientu teploty a izoterm, převzato z [13]	29
Obr. 4-2 Průběh rychlosti u laminárního proudění, převzato z [13].....	34
Obr. 5-1 Hysterezní smyčka, převzato z [11]	38
Obr. 5-2 Schéma permanentního magnetu, převzato z [11]	39
Obr. 5-3 Schéma lineární motoru, převzato z [16]	41
Obr. 5-4 Schéma motoru s vyznačenými elementy, převzato z [16].....	42
Obr. 5-5 Ekvivalent vinutí motoru pro tepelnou síť, převzato z [16].....	43
Obr. 5-6 LEM s vyznačenými konvekcemi, převzato z [16].....	45
Obr. 5-7 Zjednodušená tepelná síť, převzato z [16]	46
Obr. 5-8 Vývojový diagram analytické metody	48
Obr. 5-9 Model LEM	50
Obr. 5-10 Model LEM pro tepelné výpočty	51
Obr. 5-11 Skutečná délka sekundární části.....	51
Obr. 5-12 Vývojový diagram metody konečných prvků	53
Obr. 5-14 Model pro získání koeficientu nucené konvekce	55
Obr. 5-15 Model LEM pro tepelné výpočty	56
Obr. 5-16 Tepelná analýza.....	57
Obr. 5-17 Výsledná teplota zjednodušené části motoru pro teplotu okolí 20 °C	58
Obr. 5-18 Výsledná teplota zjednodušené části motoru pro teplotu okolí 30 °C	58

Seznam tabulek

Tab. 1 Rozsahy síly pro jednotlivé motory s nepřetržitým provozem a bez přídavného chlazení [11].....	25
Tab. 2 Kritéria pro přestup tepla konvekcí, převzato z [13]	33
Tab. 3 Tepelně elektrická analogie, upraveno z [14].....	35
Tab. 4 Parametry zkoumaného LSM LSE10W	40
Tab. 5 Tepelné vlastnosti materiálů [17]	40
Tab. 6 Vlastnosti vzduchu při atmosférickém tlaku, dostupné z [19]	41
Tab. 7 Tepelné odpory konvekce tepla	44
Tab. 8 Výsledné hodnoty veličin pro analytickou metodu	47
Tab. 9 Výsledek analytické metody pro teplotu chladicí vody a okolí 20 °C	49
Tab. 10 Výsledek analytické metody pro teplotu chladicí vody a okolí 30 °C	49
Tab. 11 Výsledek metody konečných prvků pro teplotu chladicí vody a okolí 20 °C ...	59
Tab. 12 Výsledek metody konečných prvků pro teplotu chladicí vody a okolí 30 °C ...	59
Tab. 13 Srovnání pro teplotu okolí 20 °C	59
Tab. 14 Srovnání pro teplotu okolí 30 °C	60

1. ÚVOD

Elektrické motory jsou nejrozšířenějšími typy motorů vůbec. Jsou používány téměř ve všech oblastech lidské činnosti. Vyrábějí se ve všech možných velikostech od mikromotorů v hodinkách a jiných přesných mechanikách až po obrovské elektromotory v lokomotivách či důlních strojích. Používání elektromotorů se neustále rozšiřuje ve všech oblastech lidské činnosti, čímž nevyhnutelně vznikají nové požadavky na vývoj motorů s lepšími vlastnostmi a charakteristikami. Vzhledem k tomu, že elektromotory se vyrábějí většinou ve velkých sériích je možné investovat značné prostředky na výzkum a vývoj těchto motorů tak, aby se uspokojily nové a náročné požadavky všech zákazníků. Výzkum a vývoj nových elektromotorů využívá rovněž poznatky z jiných vědních oborů z nichž je možno uvést objev nových vysokoteplotních supravodičových materiálů či piezoelektrické keramiky. Ačkoli elektromotory jsou neustále zdokonalovány a vyráběny v obrovských sériích a ve značné variabilitě, přesto existuje značný prostor pro jejich další inovace a zlepšení [1].

Jedním z nových typů elektrických motorů je elektrický lineární motor. Tento motor je nově používán zejména při manipulacích s materiálem, a to zejména tam, kde je požadována vysoká přesnost pohybu. Výhodou elektrického lineárního motoru je fakt, že generuje přímo lineární sílu, není tedy třeba měnit pohyb rotační na pohyb posuvný. To umožňuje tomuto motoru dosahovat vysoké přesnosti, požadované dynamiky a velmi vysoké regulovatelnosti. Větší uplatnění elektrických lineárních motorů a s tím spojená jejich větší výroba by měla vést tak jako u rotačních motorů k poklesu jejich ceny a zároveň ke zlepšení vlastností [2].

Tato diplomová práce se zabývá teoretickým popisem lineárního synchronního motoru se železným jádrem. Častým trendem je dnes důraz na zvyšování účinnosti a dynamiky stroje, přitom je důležité brát v potaz i tepelné omezení. Výsledky z tepelného modelu ovlivňují minimální rozměry stroje a také jeho maximální zatížitelnost. V další části diplomové práce jsou položeny teoretické základy k modelaci oteplení lineárního motoru a je zde uvedena přímá aplikace této metody na skutečný motor. Výsledek metody odporové sítě je porovnán s metodou konečných prvků.

2. LINEÁRNÍ MOTOR

Zatímco standardní elektrický motor vykonává rotační pohyb, lineární elektrický motor (LEM) vykonává pohyb lineární, posuvný. Tento posuvný pohyb vykonává bez mechanického převodu. Absence potřeby a tím i existence převodu rotačního pohybu na pohyb posuvný je velkou výhodou LEM. Technické přednosti LEM, ke kterým patří zejména přesnost, rychlost posunu, vysoká životnost a konečně i snadná údržba, jsou důvodem jejich stále širšího uplatnění v průmyslu, dopravě ale i ve stavebnictví. Výroba LEM a jejich uplatnění v praxi se v posledních letech značně rozvíjí a rozšiřuje, což vede k dalšímu výzkumu a vývoji LEM s novými charakteristikami a vlastnostmi, a rovněž i ke snižování nákladů na jejich výrobu [1].

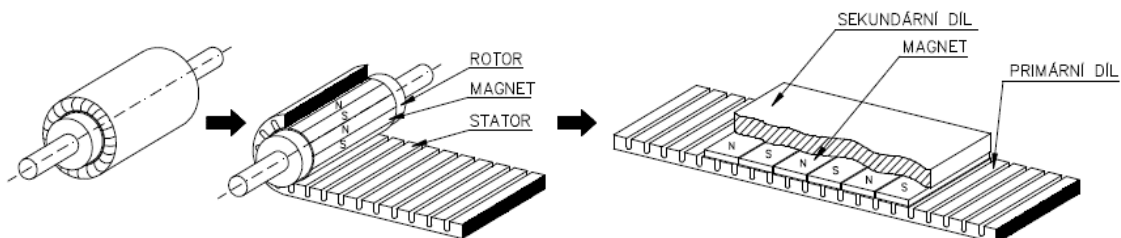
2.1 Historie

Princip fungování LEM je znám stejně dlouho jako princip rotačního motoru. Jako první popsal princip fungování LEM v čtyřicátých letech 19. století Charlese Wheatstone. Jednalo se však spíše o teoretický popis, praktické využití by bylo velmi komplikované. První praktický návrh LEM učinil německý vynálezce Alfred Zehden, který si nechal princip LEM v roce 1905 patentovat. K sestrojení prvního funkčního LEM však došlo až v roce 1935 díky Hermannu Kemperovi. Pro svou na tehdejší dobu složitou konstrukci a vysoké náklady na výrobu se tento motor nedočkal využití v praxi. Návrh konstrukce LEM s permanentními magnety v trubce z nerezové oceli navržený a vyvinutý anglickým inženýrem Hughem Peterem Kellym byl prvním návrhem, který bylo možno použít v praxi. Výroba a využití LEM se však zpočátku rozvíjela velmi pomalu oproti výrobě a využití rotačních elektrických motorů. I když technologie výroby byla již zvládnutá, stále byla výroba LEM velmi drahá oproti výrobě rotačních elektrických motorů o stejném výkonu. Teprve zvládnutím a zejména zlevněním výroby permanentních magnetů ze vzácných zemin, polovodičových součástek a supravodičů se stala výroba LEM levnější, což umožnilo mnohem širší uplatnění LEM v praxi. V posledních letech jejich výroba strmě stoupá [3], [4].

2.2 Obecný princip a konstrukce

LEM pracují na stejném principu jako rotační elektrické motory. Na rozdíl od rotačního, LEM si lze představit jako synchronní, případně asynchronní motor rozvinutý do roviny, viz obr. 2-1. Posuvná síla v LEM je obdobná síle rotace v motoru rotačním. V obou typech motorů dochází k interakci magnetického pole primárního a sekundárního dílu. Touto interakcí dochází k vytvoření posuvné či rotační síly. Jednotlivé typy LEM se liší podle konkrétního způsobu vyvolání posuvné či rotační síly [5].

Pokud se týká obecné konstrukce LEM je možno definovat dvě základní součásti LEM a to primární posuvnou část, někdy zvanou jezdec, a sekundární část, někdy zvanou lože, základna či stator. Primární část bývá tvořena feromagnetickým svazkem. Tento svazek je nejčastěji vyroben z elektrotechnických plechů a trojfázovým vinutím uloženým ve drážkách tohoto plechu. V této primární části bývá umístěno teplotní čidlo a také Hallova sonda. Obojí je nezbytné pro řízení motoru. Sekundární část je zpravidla delší, ale existují i motory s delší primární částí. Sekundární část u synchronního lineárního elektrického motoru (SLEM) bývá nejčastěji tvořena ocelovou podložkou. Na tuto ocelovou podložku jsou přilepeny permanentní magnety (PM) ze vzácných zemin. Zda se bude pohybovat primární nebo sekundární část, rozhoduje konkrétní konstrukce LEM. V naprosté většině je pohyblivá primární část. Délka sekundární části je teoreticky neomezená. Na jedné sekundární části může být instalováno i více primárních částí. Jak ukázala praxe, velkým problémem je konstrukce pohyblivého přívodu k primární části, neboť je nutno primární část připojit k napájecímu kabelu, snímači polohy a případně i k přívodu a vývodu chladicího média. Všechny tyto přívody jsou extrémně mechanicky namáhané. Musí mít tedy velkou houževnatost a zároveň nebránit pohybu primární části [6].



Obr. 2-1 Princip lineárního motoru [6]

2.3 Obecné výhody a nevýhody

Výhody LEM již byly popsány v úvodu 2. kapitoly. Je to zejména absence převodu rotačního pohybu na pohyb posuvný a přesnost a rychlost pohybu. Mezi základní nevýhody patří zejména zatím poměrně vysoká cena, nutnost chlazení a obecně vyšší technické nároky na konstrukci.

2.3.1 Absence mechanického převodu

Posuvného pohybu je možné docílit konstrukcí elektrického rotačního motoru spolu s mechanickým převodem rotačního pohybu na pohyb posuvný nebo pomocí LEM. Ten nepotřebuje mechanické převody, neboť sám vykonává posuvný pohyb. Díky absenci mechanického převodu se výrazně zvyšuje spolehlivost systému, snižuje složitost a poruchovost. Oproti konstrukci rotačního motoru s mechanickým převodem dosahuje LEM vysokých zrychlení a vysokých rychlostí. Je možno říct, že rychlost i zrychlení jsou limitovány pouze napětím sběrnice a rychlostí řídicí elektroniky. Nejvyšší rychlost LEM v běžném průmyslovém využití nepřesahuje $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Za LEM lze však považovat i železniční soupravy Maglev v Japonsku, kde rychlost primární části LEM, tedy vlaku, dosahuje podle [1] rychlosti až $167,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($603 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$) [7].

Další velkou výhodou LEM je jejich přesnost polohování. Oproti mechanickému polohování dosahují výrazně vyšší přesnosti, a to až v řádu jednotek mikrometrů. Přesnost LEM je dána zejména jeho řídicí jednotkou, která musí obsahovat zpětnovazebnou smyčku. Vzhledem k široké škále těchto řídicích jednotek je možné konstatovat, že přesnost LEM je do určité míry limitována jen řídicí jednotkou a její cenou [7].

2.3.2 Cena

I přes značný rozvoj výroby LEM v posledních letech je jejich množství stále zanedbatelné s počty vyrobených kusů rotačních elektrických motorů. Relativně nízká výroba s sebou nese stále ještě poměrně vysoké náklady, a tím i ceny LEM. Mezi nejnákladnější součásti synchronního LEM patří PM ze vzácných zemin. Délka sekundární části LEM tedy zásadním způsobem ovlivňuje výslednou cenu. Další neméně významnou nákladovou položkou je enkodér pro zpětnou vazbu. Tato zařízení bývají mnohem dražší než obdobná zařízení používaná u rotačních elektrických motorů. Podle [7] je cena 100 mm lineárního enkodéru okolo 500 \$ (cca 11000 Kč). Cena tohoto

enkodéru je navíc významně závislá na délce sekundárního dílu. Další významnou nákladovou položkou může být chlazení, což reprezentuje minimálně čerpadlo, chladič a rozvody. Přes všechna tato fakta je možno předpokládat, že množství vyrobených LEM bude dále stoupat a se zvyšující se výrobou bude dále klesat cena těchto motorů, a tím opět stoupat jejich další využití v praxi [7].

2.3.3 Chlazení

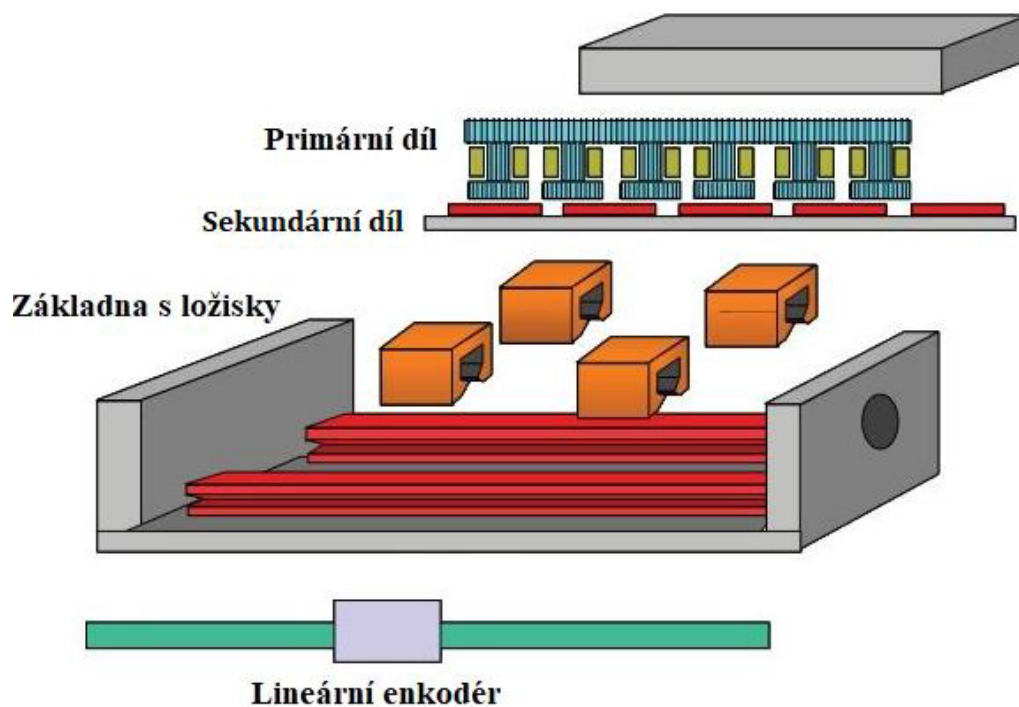
Ne všechna energie dodaná motoru se přemění na energii pohybovou. Nemalá část této energie je díky hysterezi a vířivým proudům přeměněna na tepelnou energii. Taktéž v LEM je nemalá část energie přeměněna na teplo. Vyšší teplota motoru neznamená jen nižší účinnost motoru, ale má také vliv na funkce všech zařízení a nástrojů upevněných na primární část LEM. Chlazení primární části je komplikované, protože primární část se pohybuje, a tedy přívod i odvod chladicího média musí být řešen pohyblivými součástmi, což klade vysoké nároky na jejich odolnost. Jako chladicí médium se nejčastěji používá voda nebo vzduch [7].

2.3.4 Tření

Skutečnost, že LEM mají jen minimální tření, je velkou výhodou, může to však být i zdroj nebezpečí. Pokud během práce LEM dojde k výpadku napětí, primární část se může nekontrolovaně a tím nevhodně posunout či případně i narazit a poškodit se [7].

2.4 Příslušenství

Ačkoliv teoreticky k provozu LEM nám postačuje pouze primární a sekundární část, v praxi potřebujeme celou škálu doprovodných komponentů. Mezi nejdůležitější patří soustava senzorů a řídicí jednotka, které nám zajišťují, že motor se bude nacházet a pohybovat v předem stanovených polohách a rychlostech. Kromě senzorů polohy může být LEM vybaven i jinými senzory měřícími např. teplotu, hmotnost, rychlost atd. Mimo tyto komponenty LEM potřebuje mechanické součásti jako například vedení, dorazy, krytování atd. a synchronní LEM potřebuje navíc ještě frekvenční měnič. Ukázka sestavy LEM s příslušenstvím je možné vidět na následujícím obrázku obr. 2-2 [6].



Obr. 2-2 Sestava lineárního motoru, modifikováno z [8]

2.4.1 Senzorická soustava

Senzorická soustava zajišťuje správnou funkčnost, přesnost polohování, řízení rychlosti posuvu a v neposlední řadě také bezpečnost. Senzorická soustava je tvořena elektronickými součástkami. Tyto součásti zajišťují, aby vstupní měřené veličiny byly správně změřeny a zpracovány tak, aby vytvořily odpovídající výstupní veličiny, které předají do řídicí jednotky LEM, a tento vykoná činnosti v souladu s těmito pokyny. Mezi nejčastější výstupní veličiny můžeme zařadit elektrické veličiny (napětí, elektrický proud, indukčnost), optické (změna barvy, jasu atd.), mechanické (posunutí, rotace) a teplotní. Kromě čidel, která zajišťují řádný provoz LEM, musí být každý LEM vybaven bezpečnostními čidly, která zabraňují nechtěnému poškození motoru. Jedná se zejména o čidla zabraňující přehřátí motoru, nárazu apod [5].

Mezi další důležitá čidla patří čidlo přítomnosti. Jedná se o bezpečnostní zařízení, které má za úkol zabránit prudkým nárazům pohyblivé primární části na mechanický doraz. Přesto je vhodné dorazy vyrábět z elastických materiálů, což v případě prudkého nárazu primární pohyblivé části do tohoto dorazu, výrazně snižuje riziko jejího poškození případně zničení. Použitím indukčního spínače můžeme docílit toho, že se primární pohyblivá část zastaví ještě před tím, než by došlo k nárazu [5].

Rovněž je nutno počítat s tepelnými ztrátami motorů, a tím s jejich zahříváním. Tyto ztráty jsou způsobeny jednak elektrickými ztrátami, k nimž patří zejména ztráty ve vinutí a ztráty způsobené brzděním motoru, kdy se generuje proud, a také mechanickými ztrátami, k nimž patří zejména mechanické tření. Energie uvolněná v souvislosti s brzděním motoru se přeměňuje na tepelnou energii, což je důvod, proč LEM často vyžadují ve své konstrukci chladicí zařízení. Elektrický proud vzniklý při brzdění pohyblivé primární části je však také možno odvést do měniče a nechat tepelnou energii vyzářit na jeho součástkách. V tomto případě je nutno pomocí nejčastěji používaných odporových čidel sledovat teplotu vinutí a také teplotu měniče. Nejlepším a také nejúspornějším řešením je zpětná rekuperace elektrické energie zpět do sítě. Možnost rekuperovat energii je závislá na typu LEM [5].

2.4.2 Odměřovací systémy

Přesného polohování LEM se dosahuje pomocí takzvaného odměřovacího zařízení. Odměřovací zařízení může mít mnoho podob, existuje totiž mnoho metod, jak vyrobit zpětnovazebnou smyčku. K neznámějším patří zejména analogové převodníky, potenciometr na bázi pastorku a ozubeného řemene, laserové interferometry a mnoho dalších. Možnost jejich použití závisí zejména na jejich přesnosti a také na jejich ceně. Nejčastěji se jako odměřovací zařízení používá lineární enkodér. Toto zařízení generuje jako výstup skupinu pulzů (ang. pulse train). Tyto pulsy vznikají tím, že čtecí hlava se pohybuje po referenční lineární stupnici. Tato čtecí hlava bývá obvykle umístěna na primární pohyblivé části LEM a lineární stupnice na sekundární nepohyblivé části. Během svého pohybu čtecí hlava vysílá signály do kontroléru, který je dále zpracovává. Nejčastěji se používá optický a magnetický enkodér [7].

Jako první lineární enkodéry se začaly používat enkodéry optické. Měly již velmi vysokou přesnost požadovanou pro řízení LEM. Optické enkodéry pracují na principu fotoelektrického jevu, přičemž existují dva druhy těchto enkodérů, které se liší tím, že jeden využívá principu odraženého paprsku a druhý využívá transmisní metody. Elektrické signály se generují tím, že paprsek světla je směřován na optickou mřížku a v závislosti na poloze touto mřížkou projde či neprojde. Výhodou těchto enkodérů je skutečnost, že pracují bez dotyku a jejich činnostmi nevzniká žádné tření, a tím i opotřebování materiálu. Optické enkodéry jsou díky tomu velmi spolehlivé. Největší výhodou optických enkodérů je však jejich velká přesnost. V současné době lze pomocí

optických enkodérů určovat přesnost a polohu v řádu nanometrů. Díky tomu patří k nejčastějším typům používaných enkodérů [1], [9].

Magnetický enkodér se skládá stejně jako optický enkodér ze dvou částí. Úlohu lineární stupnice optického enkodéru zde plní magnetická páska, kterou je možno nalepit na sekundární část, nebo magnetická páska může být přímo součástí sekundární části. Magnetická páska je tvořena z pravidelně střídajících se magnetických pólů. Funkci čtecí hlavy u magnetického enkodéru plní nejčastěji takzvaná Hallova sonda. Tato sonda při pohybu nad magnetickou páskou generuje signály. Magnetické enkodéry jsou sice levnější než enkodéry optické, jsou však mnohem méně přesné. Vzdálenosti pomocí magnetických enkodérů je možno měřit v řádu mikrometrů. Optické enkodéry jsou tedy mnohem přesnější [5].

Sinusový lineární enkodér je třetí možností pro odměřování. Tento enkodér generuje sinusový a kosinusový analogový signál. Přestože se jedná o analogovou variantu odměřování, dosahují tyto enkodéry poměrně vysoké přesnosti, a to řádu desítek nanometrů [8].

2.4.3 Řídící systémy

Ve velké většině běžných aplikací se podle [6] využívají číslicové regulátory. Regulaci tvoří tři zpětnovazební smyčky, a to proudová, rychlostní a polohová. Zpětnovazební smyčky pro kontrolu zrychlení a pásmové propustnosti se používají jen v některých speciálních případech, a to zejména pro zlepšení stability pohonu [6].

Řídící systém jednak přijímá informace od LEM o jeho okamžitém stavu a také uděluje LEM instrukce pro činnost. Řídící systém je většinou tvořen interpolátorem a procesorem s dostatečně vysokou operační rychlostí. Součinností sensorické soustavy a řídicího systému je možno registrovat nežádoucí stavy LEM jako je přetížení, vypadávání ze synchronismu, narušení stability regulace atd. [6].

2.4.4 Mechanické vedení

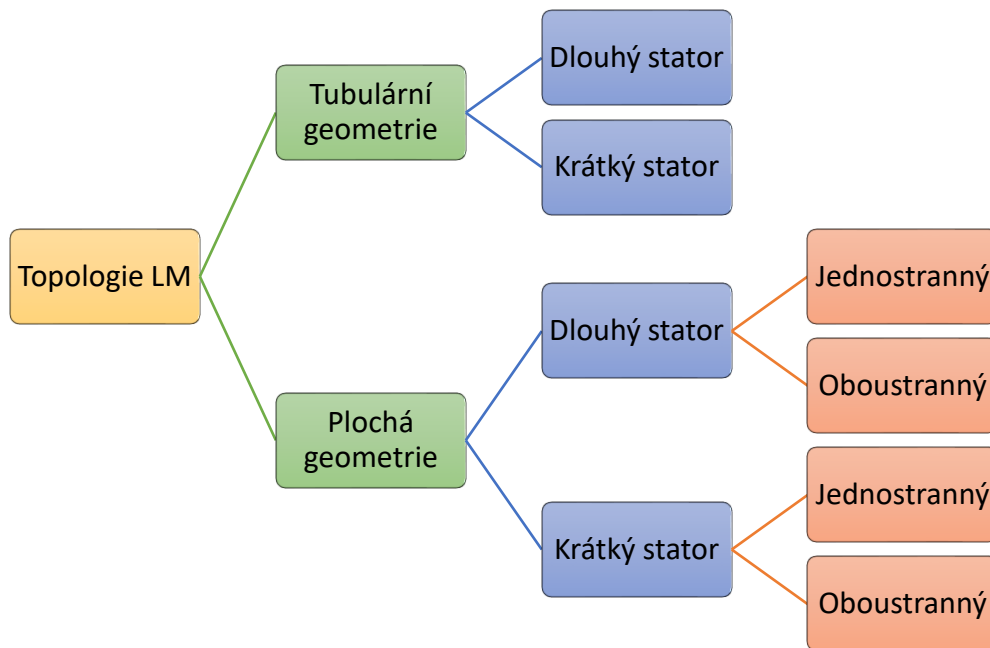
Velké požadavky jsou kladeny na základnu sloužící k uložení LEM a to z několika důvodů. LEM vytváří poměrně velkou tažnou sílu, proto musí být základna dostatečně odolná proti síle motoru. Nesmí docházet k jejímu posunu ani k její deformaci. Základna také musí být odolná vůči vibracím, které jsou způsobeny provozem motoru. Podle [10] platí pravidlo, že základna pro provoz LEM by měla mít alespoň třikrát větší hmotnost,

než je hmotnost primárního pohyblivého dílu včetně jeho zátěže. Navíc je nutno konstruovat základnu tak, aby její vlastní mechanická frekvence nebyla mezi 50-500 Hz. V opačném případě by výsledkem mohlo být zmenšení přesnosti polohování, případně i vibrace. [10]

Rovněž velmi důležitým úkolem je výběr správného ložiska pro pohyb primární části LEM. Tato ložiska musí vyhovět mnohým náročným požadavkům. K nejvýznamnějším patří zejména odolnost proti vysokému zrychlení a zpomalení, odolnost vůči vysoké rychlosti, vysoká přesnost, vysoká pevnost a nízká tepelná roztažnost. V neposlední řadě je třeba uvést i požadavek na ne příliš vysokou cenu. V praxi se nejvíce používají kluzná, valivá a vzduchová ložiska. Pro nižší nároky na přesnost je možno použít kluzná ložiska. Tato ložiska lze zase uplatnit tam, kde jsou velké nároky na hmotnost pohyblivé části, neboť kluzná ložiska obecně snesou velmi velké zatížení. Valivá ložiska se jeví jako velmi dobrý kompromis mezi ložisky kluznými a vzduchovými. Je možno je poměrně značně zatížit, dosahují dobré tuhosti a po celé délce dráhy dosahují výborné přímosti a rovinnosti pohybu. V případech, kdy je vyžadována maximální přesnost, se používají vzduchová ložiska. Teoreticky nemají omezení pro maximální rychlost ani pro akceleraci. Rovněž ztráty způsobené mechanickým třením jsou zanedbatelné [8].

2.5 Rozdělení lineárních motorů

V této kapitole je uvedena stručná klasifikace jednotlivých lineárních motorů s cílem poskytnout přehled různých možností provedení. Rozdělení LEM není přesně dané a může se mírně lišit podle autora. Klasifikace, která je použita v této kapitole, je převzata z disertační práce [11]. Tato práce dělí LEM podle topologie, viz obr. 2-3, a podle fyzikálního principu, viz obr. 2-4. Toto rozdělení LEM se jeví jako nejobjektivnější a nevíce srozumitelné.

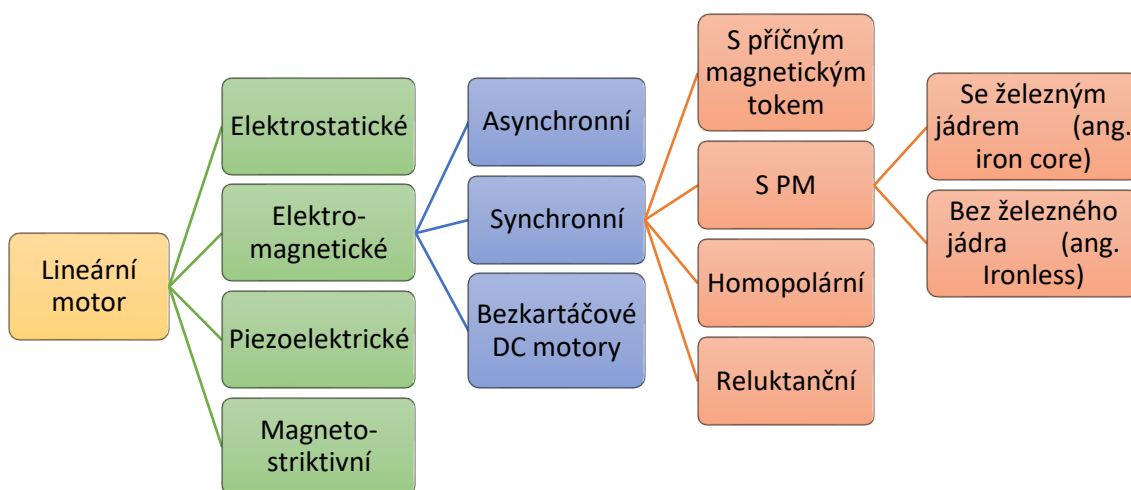


Obr. 2-3 Topologie lineárních motorů, modifikováno z [11]

LEM mohou být rozděleny na dvě základní skupiny – tubulární a ploché. Dále lze LEM rozdělit podle toho, zda mají krátký či dlouhý stator.

Každá konstrukce motoru má své vlastní výhody a nevýhody, které definuje oblasti aplikace. LEM mohou být primárně děleny podle topologie jako tubulární nebo ploché. Tato základní geometrie se pak může vyrobit ve dvojnásobném provedení, a to s krátkým nebo dlouhým statorem. Rozdíl mezi dlouhým a krátkým statorem je v délce napájecí části vůči budíci. Motor s dlouhým statorem má primární část delší než sekundární část. Ve většině aplikací je sekundární část mobilní. V tomto případě je primární část s vinutím napájena ze zdroje a sekundární část zastává roli buzení. U krátkého statoru je tomu přesně naopak, primární část je kratší nežli sekundární část motoru. Mobilní částí motoru je v tomto případě primární část. Obě možnosti mají své uplatnění. Dlouhý stator se využívá například v železniční dopravě, protože není potřeba napájet jezdce. Krátký stator se využívá v běžných průmyslových aplikacích, příkladem mohou být některé osazovací automaty a CNC stroje. Nevýhodou je nutnost napájet pohyblivou část motoru [11], [5].

Principů, na kterých je založena konstrukce LEM je více. Liší se podle toho, jakého fyzikálního jevu využívají ke svému pohybu. Jedna z možností je využití principu elektrostatiky k lineárnímu pohybu. Další možností je využití piezoelektrického jevu pro lineární pohyb, třetí skupinu LEM tvoří motory založené na magnetostriktivním jevu. Tyto dva principy se liší jen materiálem, z kterého je LEM vyroben. V případě piezoelektrického jevu je síla tvořena za přítomnosti zdroje elektrického pole a v případě magnetostriktivního je síla tvořena díky přítomnosti zdroje magnetického pole. Poslední, ale nejvíce rozšířený, je lineární motor pracující na principu elektromagnetismu. Tímto druhem LEM se zabývá i tato práce [11].



Obr. 2-4 Dělení lineárních motorů podle principu, modifikováno z [11]

V následující tabulce je možné vidět orientační rozsah síly pro jednotlivé druhy LEM za předpokladu nepřetržitého provozu a bez vodního chlazení.

Tab. 1 Rozsahy síly pro jednotlivé motory s nepřetržitým provozem a bez přídavného chlazení [11]

Druh motoru	Maximální síly na cm^{-2}
Asynchronní lineární motor	$2 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-2}$
Synchronní lineární motor se železným jádrem	$6 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-2}$
Synchronní lineární motor bez železného jádra	$3 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-2}$
Reluktanční lineární motor	$2 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-2}$
Lineární motor s příčným magnetickým tokem	$3 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-2}$

3. SYNCHRONNÍ LINEÁRNÍ MOTOR

Synchronní lineární motor je podle [1] druhem lineárního motoru, který je sestaven tak, že jeho mechanický pohyb je synchronizován s magnetickým polem, tedy že mechanická rychlost je stejná jako rychlost posuvného magnetické pole. V anglické literatuře bývá primární díl SLEM označován jako „armature“ nebo „forcer“. V tomto případě primární díl vytváří posuvné magnetické pole, zatímco sekundární díl LSM vytváří stejnosměrný magnetický tok.

Podle [1] můžeme tento magnetický tok označovat jako budící systém. Jiného principu využívají takzvané reluktanční motory, které pracují na principu změny magnetického odporu. Synchronní rychlost SLEM je definována vztahem:

$$v_s = 2 \cdot f \cdot \tau = \frac{\omega}{\pi} \cdot \tau, \quad (3.1)$$

kde v_s je synchronní rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], f je vstupní frekvence napětí [Hz], τ je rozteč pólů [m] a ω je úhlová rychlost [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]. Synchronní rychlost LEM nezáleží na počtu pólů ($2p$) [1].

Posuvná síla SLEM s PM má dvě složky, první složka vzniká po interakci mezi posuvným magnetickým polem a statickým stejnosměrným magnetickým tokem. Druhá složka vzniká při změně reluktance během posunu. Posuvná síla v ose x je podle [1] definována následovně:

$$F_x = \frac{P_2}{v_s}, \quad (3.2)$$

kde F_x je posuvná síla v ose x [N], P_2 je výkon [W] a v_s je synchronní rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Konstrukce primárního dílu SLEM je tvořena nejčastěji třífázovým vinutím. Toto vinutí může být v provedení se železným jádrem nebo bez železného jádra. Základem sekundárního dílu je elektromagnetické buzení. Místo elektromagnetického buzení mohou být použity PM, což se v praxi velmi často vyskytuje. Použití PM místo elektromagnetického buzení je však ekonomicky nevýhodné v případě, že se SLEM pohybuje na dlouhé vzdálenosti, což je podle [1] více než 10 m. Typickým příkladem, kde není možno použít PM, jsou vozidla na bázi magnetické levitace.

Jestliže otáčíme manuálně rotační motor s PM v kombinaci s cívkami na železném jádře nebo posunujeme LEM s PM, všimneme si, že dochází k pravidelné změně síly, kterou je potřeba vyvinout k otáčení motoru. Stejně je to i u LEM při jeho manuálním

posunování. Tento jev se nazývá cogging. Tento jev je způsoben přitažlivými silami mezi jádry cívek a permanentními magnety. Síla působící proti pohybu se nazývá zádržná síla. Zádržná síla je způsobena přitažlivou silou mezi železným jádrem cívek a permanentními magnety. Velikost této síly se periodicky opakuje, a to v závislosti na pozici primární části vůči sekundární části. Funkce velikosti této síly má sinusový tvar. Tato zádržná síla působí proti síle posuvné, která umožňuje pohyb LEM. Tyto dvě síly se skládají a výsledkem je kolísání posuvné síly. Toto kolísání může významným způsobem ovlivnit přesnost posunu, rychlosti a kontroly pozice. Toto kolísání se projevuje zejména při nižších rychlostech posunu. Jestliže kolísání síly není vhodným způsobem řešeno, může zapříčinit i vznik nežádoucích vibrací a zvuků. Potlačení těchto nežádoucích jevů se může docílit upravením konstrukce motoru, a to tak, že PM jsou uloženy zkoseně. Další možností je jiná volba primárního dílu tak, aby nebyl feromagnetický. Podrobněji se problematikou cogging zabývá literatura [1] a [5].

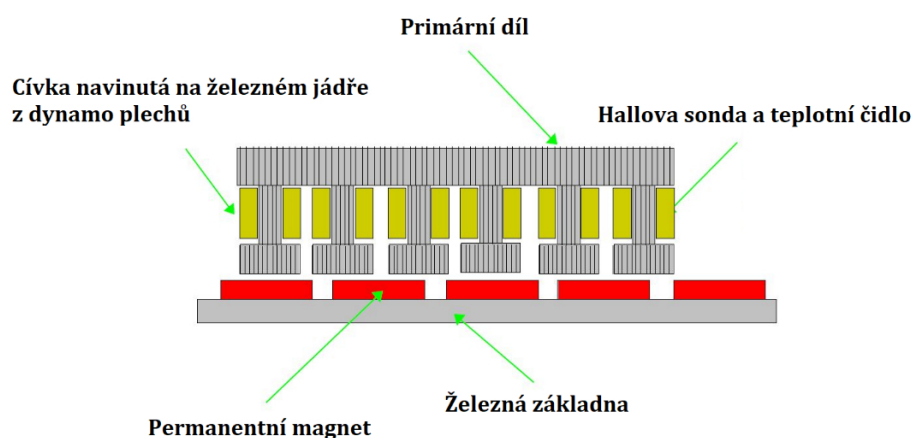
3.1 Lineární motor se železným jádrem

Tento LEM má konstrukci obdobnou jako klasický synchronní LEM s PM. V anglicky psané literatuře je tento motor uváděn pod názvem „Toothed linear synchronous motor“ neboli SLEM se „zuby“. Pojem zuby vznikl podle výčnělků mezi drážkami, na kterých je navinuto vinutí primárního dílu. Schéma konstrukce tohoto motoru je znázorněno na obr. 3-1. Primární díl tohoto motoru je tvořen jádrem z dynamo plechů, okolo kterého je navinuto vinutí. Uvnitř vinutí je umístěna Hallova sonda rovněž i teplotní čidlo. Sekundární díl je vyroben z PM ze vzácných zemin. Tyto PM jsou upevněny na základnu [7].

Velkou výhodou tohoto typu motoru je, že dosahuje velmi dobrých měrných výkonů na objem. Díky železnému jádru tento motor rovněž velmi dobře odvádí teplo, což je další velmi významnou výhodou tohoto typu motoru. Pokud je přesto potřeba chlazení motoru, může být toto chlazení přímo propleteno primárním dílem [7].

Pomocí těchto motorů se jako jedno z možných využití podle [12] polohuje vrtačka desky plošných spojů od firmy Posalux. V tomto případě motory musí pohybovat s materiálem o hmotnosti až 500 kg, a to rychlostí až $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, přičemž dosahují zrychlení až $1g$. Tento druh LEM využívá i firma Arri, která tyto LEM aplikuje ve svých tiskárnách. To umožnilo významným způsobem zvýšit rychlost a zkvalitnit tiskový proces, neboť

LEM se železným jádrem umožňuje velmi přesné polohování. Více informací o této aplikaci je možné nalézt v literatuře [12].



Obr. 3-1 Lineární motor se železným jádrem, modifikováno z [7]

Mezi nevýhody LEM se železným jádrem patří zejména velká přitažlivá síla mezi primární a sekundární částí. Tato síla je způsobena vzájemným působením PM, jimiž je tvořena sekundární část a železným jádrem primární části. Vysoká hodnota přitažlivé síly je dána tím, že mezi primárním a sekundárním dílem je jen malá vzdálenost. Sekundární díl odděluje od primárního jen malá vzduchová mezera, která má obvykle okolo 0,8 mm. Velikost přitažlivé síly se liší i tím, jestli má tento LEM chlazení. V případě, kdy LEM chlazení nemá, činí přitažlivá síla asi pětinasobek síly posuvné. Jestliže LEM má přídavné vodní chlazení, je přitažlivá síla přibližně 3krát větší nežli síla posuvná. Přitažlivou sílu můžeme kompenzovat tím, že použijeme oboustrannou geometrii, tedy že umístíme další PM v opačné pozici, než je sekundární díl. Tím dojde k úplnému vyrušení přitažlivé síly. Nevýhodou je složitější konstrukce, a tím i výrazně vyšší cena. Velkým problémem tohoto řešení je i fakt, že tento systém je velmi choulostivý na změnu vzdálenosti primárního dílu od PM na sekundárním dílu i od PM použitých na vyrovnání přitažlivé síly. I malá změna vzdálenosti primárního dílu od PM může vést k destabilizaci celého systému. Rovněž zvýšený cogging je další nevýhodou tohoto druhu motoru. Lze ho však vhodnou konstrukcí výrazně potlačit [1].

4. SDÍLENÍ TEPLA

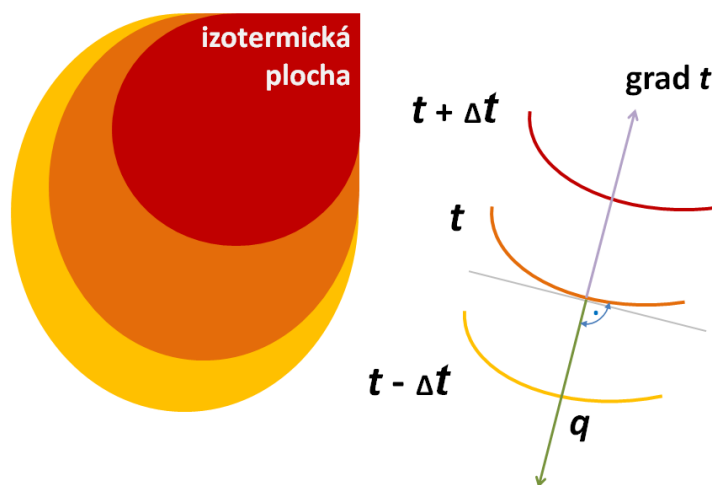
Podle druhého zákona termodynamiky je sdílení tepla přenos energie z oblasti o vyšší teplotě do místa s teplotou nižší. Existují tři základní principy sdílení tepla, a to vedením (kondukcí), prouděním (konvekci) a zářením (radiací). Tyto tři formy sdílení tepla jsou součástí takřka všech přírodních dějů a stejně tak i lidských činností. V praktickém použití se většinou setkáváme se všemi třemi druhy sdílení tepla zároveň. Nastávají však určité situace, kdy je některá složka sdílení tepla dominantní, případně může být nějaká složka zanedbatelná a na probíhající děj nebude mít vliv. Stejně termodynamické zákony platí pro všechny tři formy sdílení tepla jak v materiálu, tak v konkrétní technologii [13].

4.1 Vedení

Sdílení tepla vedením vychází z druhého termodynamického zákona, při kterém dochází k přenosu tepla z místa o vyšší teplotě do místa s teplotou nižší. Vedení tepla neboli konduktace se vyskytuje obecně v tuhých látkách anebo v tekutinách, jež nejsou v pohybu. V materiálu dochází ke změně teploty ve všech směrech. Růst teploty je tedy dán gradientem teploty, to je vektor kolmý k izotermě a je orientován ve směru nárůstu tepla. Podle [13] je gradient teploty definován následovně:

$$\text{grad } T = \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\delta T}{\delta y} + \frac{\delta T}{\delta z}, \quad (4.1)$$

kde T je termodynamická teplota [K]. Znázornění gradientu teploty a izoterm je možné vidět na následujícím obrázku obr. 4-1.



Obr. 4-1 Znázornění gradientu teploty a izoterm, převzato z [13]

Tepelný tok je množství tepla přenesené přes izotermickou plochu za jednotku času. Pokud tepelný tok se vydělí příslušnou plochou, vznikne hustota tepelného toku q . Z definice tedy plyne:

$$P = q \cdot S, \quad (4.2)$$

kde P je tepelný tok [W], q je hustota tepelného toku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$], S je plocha [m^2]. Podle literatury [13] je množství tepla procházející izotermickou plochou definováno jako:

$$Q = P \cdot t = q \cdot S \cdot t, \quad (4.3)$$

kde Q je množství tepla [J], t je čas [s], q je hustota tepelného toku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$], S je plocha [m^2]. Na tyto základní znalosti navazuje První Fourierův zákon. Tento zákon říká, že hustota tepelného toku je přímo úměrná zápornému gradientu teploty. Platí tedy podle [13] následující vztah:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } T, \quad (4.4)$$

kde q je hustota tepelného toku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$], T je termodynamická teplota [K] a λ je součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]. Součinitel teplotní vodivosti je tedy konstanta úměrnosti mezi q a $\text{grad } T$. Jedná je o fyzikálně tepelný parametr. Tato veličina závisí na teplotě, tlaku a chemickém složení dané látky. Podle [13] je součinitel tepelné vodivosti a jeho vztah s ostatními tepelnými veličinami definován takto:

$$\lambda = -\frac{Q}{\text{grad } T \cdot S \cdot t}. \quad (4.5)$$

Součinitel přestupu tepla vedením neboli měrná chladihost je podle [14]:

$$\alpha_{\vartheta} = \frac{P}{\Delta T \cdot S} = \frac{1}{R_{\vartheta} \cdot S} = \frac{\lambda}{l_x}, \quad (4.6)$$

kde α_{ϑ} je součinitel přestupu tepla vedením [$\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$], R_{ϑ} je tepelný odpor [$\text{W} \cdot \text{K}^{-1}$]. Tepelný odpor je definován podle [11] jako:

$$R_{\vartheta} = \frac{l_x}{\lambda \cdot S}. \quad (4.7)$$

U heterogenních materiálů není snadné určit jejich tepelný odpor. Heterogenními materiály se myslí kombinace materiálů, jako jsou v LEM např. železné plechy, mezi kterými je izolace, podobné je to u cívek, které jsou obaleny izolací a zalité epoxidem. Proto pro tvorbu modelu budou muset být přijaty zjednodušující podmínky [11].

4.2 Záření

Druhým typem sdílení tepla je záření neboli radiace. Tento druh sdílení tepla nezávisí na hmotném prostředí. Z toho plyne, že radiace se uskutečňuje i ve vakuu. Přenos tepla se uskutečňuje pomocí elektromagnetických vln, které se šíří rychlostí světla. Základní myšlenkou kvantové teorie světla je, že atomy jsou schopné absorbovat/emitovat jen určité množství energie. Max Planck objevil, že záření, které atomy vyzáří nebo pohlčí, nemá libovolnou energii. Energie se emituje/pohlcuje tedy jen po určitých dávkách – kvantech. Podle [13] je energie záření dána vztahem:

$$Q = h \cdot f, \quad (4.8)$$

kde h je Planckova konstanta $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ [J·s] a f je frekvence [Hz]. Pro sdílení tepla jsou nejdůležitější frekvence v rozsahu vlnových délek od 10^{-4} až do 10^{-7} , v tomto intervalu se nachází ultrafialové, infračervené a viditelné záření [13].

Množství vyzářené energie závisí na teplotě tělesa. Černé těleso je těleso, které vyzařuje, případně pohlcuje maximální množství energie. U absolutně černého tělesa je v rovnováze vyzařování a pohlcování energie, to ještě nezávisí na chemickém složení tělesa, ale jen na jeho teplotě. Protože v praxi se dokonale černé těleso vyskytuje jen zřídka, vznikl pojem šedé těleso. Záření šedého tělesa je při stejné teplotě a při stejných vlnových délkách nižší nežli tělesa černého. Odtud plyne definice emisivity ε , jedná se o poměr vyzařování šedého tělesa k vyzařování černého tělesa na určité vlnové délce a při stejné teplotě. Emisivita černého tělesa je rovna 1, emisivita šedého tělesa leží mezi 0 a 1. Emisivita závisí na typu povrchu tělesa, lesklé povrchy mají emisivitu blízkou 0 a hrubé mají emisivitu blízkou 1. [13]

Nejdůležitější rovnicí pro sdílení tepla zářením je Planckův zákon spektrálního rozdělení monochromatického světla je podle [15] definován takto:

$$M_{0\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda \cdot T}} - 1}, \quad (4.9)$$

kde $M_{0\lambda}$ spektrální intenzita vyzařování [$\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$], k je Boltzmannova konstanta $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ [J·K⁻¹], λ je vlnová délka [m], c je rychlost světla ve vakuu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] a T je termodynamická teplota [K].

4.3 Proudění

Proudění tepla neboli konvekce je závislá na hmotném prostředí. Konvekce probíhá v tuhých, kapalných a plynných látkách. Sdílení tepla prouděním se uskutečňuje v pohybujícím se prostředí. Ke sdílení tepla prouděním může dojít mezi tekutinou a tuhou látkou, mezi dvěma plynnými, dvěma kapalnými látkami anebo mezi kapalnou a plynnou látkou. Konvekce se rozděluje na přirozenou a nucenou. Obě konvekce probíhají společně. Podíl zastoupení nucené nebo přirozené konvekce se odvíjí od rychlosti tekutiny. Přirozená konvekce je tím větší, čím menší je rychlost nuceného proudění.

Přirozená konvekce je většinou vyvolána působením gravitačního pole na nerovnoměrně prohřáté tekutiny. Přirozenou konvekci tak vyvolá tíhová síla.

Nucená konvekce je vyvolána extérním zásahem do tekutiny. Tekutina je nucena do pohybu např. čerpadlem nebo ventilátorem [13].

Při přestupu tepla mezi tekutinou a tuhou látkou se teplo šíří přes laminární podvrstvu a pak prouděním. Podle [13] je možné matematicky definovat tepelný tok q , který se uskutečňuje mezi povrchem stěny a proudící tekutiny pomocí rovnosti I. Fourierova zákona a Newtonova zákona:

$$q_{kon} = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_{kon} \cdot (T_{povrch} - T_{tekutina}), \quad (4.10)$$

kde q_{kon} je měrný tepelný tok [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$], λ je součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], α_{kon} je součinitel přestupu tepla konvekcí [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] a n je normála k povrchu [m]. Součinitel přestupu tepla konvekcí je možné vyjádřit z předchozí rovnice takto:

$$\alpha_{kon} = -\frac{\lambda}{(T_{povrch} - T_{tekutina})} \cdot \frac{\partial T}{\partial n}. \quad (4.11)$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí definuje množství tepla, předané za jednotku času mezi tekutinou a jednotkovou plochou povrchu stěny za rozdílu teplot 1 K. Tento součinitel stanovuje intenzitu výměny tepla na rozhraní tekutiny a povrchu stěny. Čím je součinitel větší, tím větší je i intenzita přestupu tepla. Proto je důležité při výpočtech tuto hodnotu stanovit správně. Pro určení tohoto součinitele se používají empirická data zpracovaná do kriteriálních rovnic. Platnost těchto rovnic je vymezena rozsahem měření. Pro všechny podmínky nelze stanovit univerzální rovnici pro přestup tepla. Z tohoto důvodu byla stanovena obecná kriteriální rovnice sdílení tepla konvekcí, jenž popisuje celý proces sdílení tepla. Rovnice obsahuje bezrozměrná čísla, která byla získána pomocí

empirických vztahů. Popis jednotlivých kritérií včetně způsobu výpočtu je uveden v následující tabulce, viz tab. 2 [13].

Tab. 2 Kritéria pro přestup tepla konvekcí, převzato z [13]

Kritérium	Značka	Vztah	Význam
Nusseltovo	Nu	$Nu = \frac{\alpha_{kon} \cdot l}{\lambda}$	Sdílení tepla konvekcí
Reynoldsovo	Re	$Re = \frac{v_s \cdot d}{\nu}$	Poměr sil setrvačných a viskozity
Grashoffovo	Gr	$Gr = \frac{g \cdot \gamma \cdot \Delta T \cdot l^3}{\nu^2}$	Přirozená konvekce skutečné tekutiny
Prandtlovo	Pr	$Pr = \frac{\nu}{a}$	Sdílení tepla v tekutinách
Fouriérovovo	Fo	$Fo = \frac{a \cdot \tau}{l^2}$	Rychlost šíření tepla v tělese. Bezrozměrný čas
Pomerancevovo	Po	$Po = \frac{q_v \cdot l^2}{\lambda \cdot \Delta T}$	Teplotní pole s vnitřním objemovým zdrojem

Podle typu děje je možné kritériální rovnici zjednodušit za určitých podmínek. Pokud neuskutečňujeme děj s vnitřním objemovým zdrojem, tak neuvažujeme Pomerancevovo kritérium. Pro stacionární děj nemusíme brát v úvahu Fourierovo kritérium. Bezrozměrné souřadnice nemusíme také uvažovat, pokud je Nusseltovo kritérium po celém povrchu stěny konstantní. Zjednodušený tvar kritériální rovnice má pak podle [13] následující tvar:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr). \quad (4.12)$$

Při nucené konvekci nemá Grashoffovo kritérium na proudění vliv, pak kritériální rovnice má tvar:

$$Nu = f(Re, Pr). \quad (4.13)$$

Při přirozené konvekci je hlavní Grashoffovo kritérium, díky tomu je možné zjednodušit rovnici na tvar:

$$Nu = f(Gr, Pr). \quad (4.14)$$

Pro výpočet teplotního pole LEM je nutné znát kritériální rovnici pro nucenou konvekci. Při nuceném proudění je charakteristické Reynoldsovo kritérium. Pro případ laminárního proudění v trubkách a kanálech je kritériální rovnice následovná:

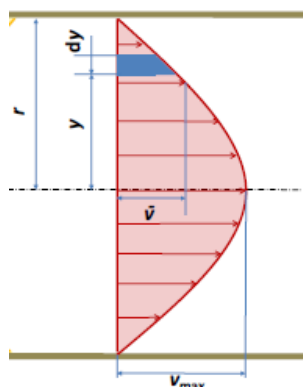
$$Nu = \sqrt[3]{f 3,66^3 + 1,61^3 \cdot Re \cdot Pr \cdot \frac{d}{l}}. \quad (4.15)$$

Pro turbulentní proudění platí podle [13] následující rovnice:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{prům}}\right)^{0,25}. \quad (4.16)$$

4.3.1 Laminární proudění

Pokud v tekutině nastane laminární proudění, tak se částice kapaliny pohybují ve vrstvách. Tyto vrstvy se nemísí mezi sebou. Částice se tedy nepřemisťují po průřezu. Tyto nekonečně tenké vrstvy kloužou jedna po druhé. Tekutina má viskozitu, která se projevuje tak, že sousedící částice na sebe působí třecí silou. Protože na stěně potrubí se zachytávají částice, tak rychlost částic roste od stěny potrubí směrem do osy potrubí. Pokud v trubce s kruhovým průřezem je laminární proudění ustálené, pak je setrvačná síla nulová a stejně tak hmotnostní síla. Aby bylo proudění v rovnováze, tak třecí síla a tlaková síla musí být v rovnováze. Ve všech průřezích trubky je stejný rychlostní profil tekutiny. Rychlostní profil je parabolický, viz obr. 4-2 [13].



Obr. 4-2 Průběh rychlosti u laminárního proudění, převzato z [13]

4.3.2 Turbulentní proudění

Při turbulentním proudění se částice pohybují s větší rychlostí než při laminárním proudění. Částice, kromě posuvné rychlosti, má ještě turbulentní rychlost, díky níž se částice přemísťují po průřezu. Dochází tedy k pohybu částic ve všech směrech, ty se mezi sebou mísí a předávají si kinetickou energii. Rychlostní profil se tedy blíží k obdélníku tím více, čím je větší rychlost proudění tekutiny.

Proudění tekutiny se jeví jako nahodilé, a přitom se také mění její fyzikální vlastnosti (např. viskozita). Může docházet k shlukům, pulsům, vírům tekutiny. Těmito jevy může být silně ovlivněno sdílení tepla [13].

4.4 Tepelně elektrická analogie

Mezi tepelnými a elektrickými veličinami vzniká analogie na základě formální shody rovnic. Tato shoda se následně použije pro tvorbu odporové sítě. Podle [14] jsou elektrické a tepelné veličiny z fyzikálního hlediska naprosto ekvivalentní veličiny, ale z širšího hlediska tomu tak není. V některých případech daná veličina nemá svůj ekvivalent anebo se nepoužívá. V následující tabulce jsou uvedeny tepelné veličiny a jejich elektrický ekvivalent, viz tab. 3.

Tab. 3 Tepelně elektrická analogie, upraveno z [14]

Tepelná veličina		Elektrická veličina	
Veličina	Jednotka	Veličina	Jednotka
Tepelná energie	[J]	Elektrický náboj	[C]
Tepelný výkon	[W]	Elektrický proud	[A]
Oteplení	[K]	Elektrické napětí	[V]
Tepelný odpor	[K/W]	Elektrický odpor	[Ω]
Měrný tepelný tok	[W·m ⁻²]	Proudová hustota	[A·m ⁻²]

5. VÝPOČET TEPLOTNÍCH POMĚRŮ V LEM

V této kapitole je uveden výpočet tepelných poměrů ve skutečném LEM od společnosti Baumüller. Není tudíž možné dosazovat konkrétní hodnoty, a to kvůli možnému úniku citlivých dat. V práci je uveden pouze výsledek.

Výpočet teplotních poměrů v elektrických strojích je stejně důležitý jako výpočet magnetických poměrů. Tepelné veličiny určují maximální přípustnou proudovou hustotu pro nominální pracovní bod. Přenos tepla má principiálně restriktivní charakter pro výkon motoru. Proto je nutné při návrhu motoru brát v potaz i tepelné poměry. Pro dosažení dobrých výsledků přenosu tepla je důležité mít dobře navržený chladič motoru a taky dobrý přestup tepla z motoru do okolí. Problematika přenosu tepla je velmi komplexní záležitost, protože se zde uplatňuje radiace, kondukce a i konvekce [11].

SLEM často pracuje s velkými proudy za účelem dosažení velké síly. To produkuje ztráty, které mohou vést k rychlému a významnému nárůstu teploty, ty následně mohou vést k poškození izolace anebo k demagnetizaci PM. Pokud by se tedy v motoru neměřila teplota mohlo by dojít k jeho poškození. Tudíž nárůst teploty je hlavní omezení výkonu. Proto zkoumaný motor má i vodní chlazení, které výrazně zlepšuje výkonové vlastnosti motoru. Tepelná analýza má dvě funkce, první je rozložení teploty v motoru a druhá určení optimální proudové hustoty a záběrného momentu podle výpočtu nárůstu teploty [16].

O výpočtu tepelných poměrů v SLEM je zatím obtížné najít nějaké relevantní vědecké práce. Ještě navíc o vodou chlazeném SLEM. Přidáním vodního chlazení se stane výpočet ještě mnohem komplikovanější, protože vstoupí do modelu další parametry jako teplota vody na vstupu a na výstupu z motoru a průtok [16].

5.1 Odporová síť

Simulace fyzikálních jevů pomocí aplikace metody odporové sítě je založena na vytvoření ekvivalentního elektrického modelu. Model pak následně lze vypočítat jako běžný elektrický obvod, díky analogii Fourierova a Ohmova zákona. Pro aplikaci této metody je nezbytné znát přesně parametry motoru a jeho součástí. Mezi tyto parametry patří např. rozměry, materiál, konstrukce atd. Princip této metody spočívá v rozdělení zkoumaného předmětu na elementární části. Tyto části se poté poskládají do odporové

sítě, která reprezentuje daný stroj. Díky takovéto síti s mnoha elementy je možné relativně přesné analyzování tepelných poměrů [17].

Jednotlivé prvky odporové sítě jsou uzly a větve. Každý uzel je definován teplotou a může být zdrojem tepelného toku (výkonu). Větve odporové sítě vedou tepelný tok mezi jednotlivými uzly, jsou tvořeny tepelným odporem, případně tepelnou vodivostí. Větve mohou zastupovat i více tepelných odporů, které mohou být libovolně napojeny mezi sebou. Výsledkem takového zapojení je celkový sérioparalelní odpor větve. Teplo se odvádí do okolí pomocí odporů. Odpor je připojen ke zdroji napětí, který reprezentuje okolní teplotu. Velikost odporu charakterizuje efektivitu přestupu tepla. Každý uzel v modelu pak charakterizuje střední teplotu v dané části. Přesnost metody je založená na počtu elementů modelu a správnosti sestavení. Metoda je dobrá hlavně pro výpočet ustálených hodnot oteplení [18].

5.2 Výpočet ztrát v motoru

Základním vstupním parametrem pro výpočet tepelných poměrů v motoru jsou ztráty v motoru. Ztráty v synchronním lineárním motoru se železným jádrem jsou převážně Jouleho a dále ztráty v železe. Ty se skládají ze ztrát hysterezních a ztrát způsobenými vířivými proudy [11].

5.2.1 Ztráty ve vinutí

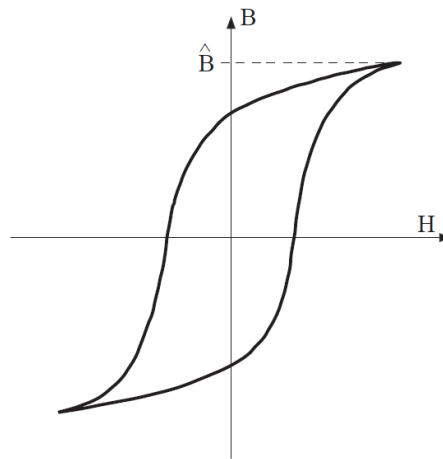
Stanovení ztrát ve vinutí primární části LEM se železným jádrem je založeno na elektrickém odporu vinutí a procházejícím proudem. Ztrátám ve vinutí primární části se říká Jouleho ztráty. Ty jsou závislé na teplotě, protože elektrický odpor mědi roste s teplotou. Bez uvažování skinefektu jsou Jouleho ztráty definovány takto:

$$P_{Cu}(T) = m \cdot R_f(T) \cdot I_f^2 = \rho_{Cu} \cdot V_{Cu} \cdot J^2 \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot \Delta T), \quad (5.1)$$

kde P_{Cu} jsou Jouleho ztráty [W], m je počet fází [-], R_f je odpor vinutí jedné fáze [Ω], I_f je fázový proud [A], ρ_{Cu} je rezistivita mědi [$\Omega \cdot m^{-1}$], V_{Cu} je objem mědi [m^3], J je proudová hustota [$A \cdot m^{-2}$] a α_{Cu} je teplotní součinitel elektrického odporu [K^{-1}].

5.2.2 Hysterezní ztráty

Hysterezní ztráty jsou způsobeny nelinearitou mezi magnetickou indukcí B a intenzitou magnetického pole H v materiálu. Tyto ztráty jsou úměrné ploše hysterezní smyčky a frekvenci. Pokud je hysterezní smyčka souměrná jako na obr. 5-1, tak hysterezní ztráty jsou úměrné čtverci magnetické indukce. Tyto ztráty je možné redukovat pomocí použití feromagnetických materiálů s úzkou hysterezní křivkou (FeNi nebo FeSi) anebo snížením frekvence [11].



Obr. 5-1 Hysterezní smyčka, převzato z [11]

Hysterezní ztráty jsou podle [11] definovány takto:

$$P_h = V \cdot C_h \cdot B^2 \cdot f, \quad (5.2)$$

kde P_h jsou hysterezní ztráty [W], V je objem látky [m^3], C_h je materiálový koeficient hysterezních ztrát [-], B je magnetická indukce [T] a f je frekvence [Hz].

5.2.3 Ztráty vířivými proudy

Vířivé ztráty jsou způsobeny rozptylovým magnetickým tokem. Tento tok indukuje v materiálu napětí, které následně způsobí průchod proudu materiálem. Tyto ztráty jsou úměrné čtverci frekvence a čtverci magnetické indukce. Ztráty vířivými proudy jsou definovány podle [11] následovně:

$$P_v = V \cdot C_v \cdot B^2 \cdot f^2 \cdot d^2, \quad (5.3)$$

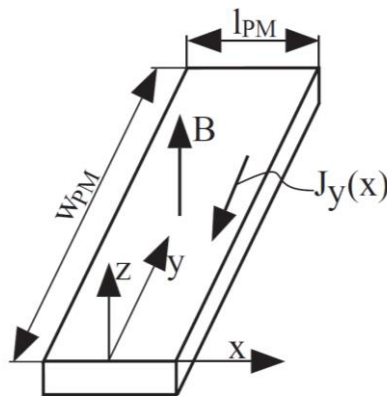
kde P_v jsou vířivé ztráty [W], C_v je materiálový koeficient vířivých ztrát [-] a d je tloušťka plechů [m].

5.2.4 Ztráty v permanentních magnetech

Rezistivita PM z vzácných zemin je poměrně nízká ($\rho_{PM} \cong 100 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m^{-1}$), proto zde mohou vznikat nezanedbatelné ztráty vlivem změny magnetického pole vyvolaného vinutím primární části motoru. Ztráty v PM při dané proudové hustotě uvnitř magnetu jsou dány následujícím vztahem:

$$J_y(x) = \frac{x}{\rho_{PM}} \cdot \frac{dB}{dt}, \quad (5.4)$$

kde J je proudová hustota [$A \cdot m^{-2}$], x je délka PM [m], ρ_{PM} je rezistivita PM [$\Omega \cdot m^{-1}$] a t je čas [s].



Obr. 5-2 Schéma permanentního magnetu, převzato z [11]

Za předpokladu, že indukované proudy v PM nemění proudovou hustotu magnetického toku ve vzduchové mezeře a vektor hustoty magnetického toku je kolmý k povrchu magnetu a také není závislý na poloze, tak proudová hustota působí pouze ve směru osy y . Séma PM je možné vidět na obr. 5-2. Výsledný vztah podle [11] pro výpočet ztrát v PM je dán vztahem:

$$P_{PM} = \frac{\left(\frac{2 \cdot W_{PM} \cdot \omega_{PM} \cdot B \cdot \tau_n \cdot \pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \sin\left(\frac{l_{PM} \cdot \pi}{\tau_n}\right) \right)^2}{R_{PM}}, \quad (5.5)$$

kde P_{PM} jsou celkové ztráty v PM [W], W_{PM} je délka PM [m], ω_{PM} je úhlová rychlost pulzů při přechodu zubu primární části nad magnetem [Hz], τ_n je rozteč zubů [m], l_{PM} je šířka PM [m] a R_{PM} je elektrický odpor PM [Ω]. Celý postup odvození ztrát v PM je uveden v [11]. Na závěr je nutné ztráty v jednom magnetu vynásobit počtem magnetů aktivních v rámci primární části.

5.3 Parametry zkoumaného motoru

Protože v této práci se metoda tepelné sítě aplikuje na skutečný motor od společnosti Baumüller, není možné dosazovat konkrétní hodnoty, a to kvůli možnému úniku citlivých dat. Metoda tepelné sítě je aplikovaná na lineární synchronní motor se železným jádrem a permanentními magnety. Základní parametry nezbytné pro další výpočty jsou uvedené v následující tabulkách, viz tab. 4, tab. 5 a v následující tabulce jsou uvedeny vlastnosti vzduchu při atmosférickém tlaku. hodnoty byly opět pro obě metody stejné, viz tab. 6. v programu ansys workbench bylo nutné tyto hodnoty změnit.

tab. 6. Parametry materiálu byly převzaty z [17], protože nebyla k dispozici data od výrobce. Pro výpočet ztrát v permanentních magnetech je nutné znát jejich rezistivitu. Ta byla stanovena na hodnotu podle [11] a to $\rho_{PM} = 1,3 \mu\Omega \cdot m^{-1}$. Parametry motoru od výrobce je možné vidět v tab. 4.

Tab. 4 Parametry zkoumaného LSM LSE10W

Posuvná síla	Nominální proud	Počet pólů	Počet drážek
F_n	I_n	$2p$	Q_{dr}
[N]	[A]	[-]	[-]
650	5,5	5	15

V následující tabulce jsou uvedeny tepelné parametry materiálů použitých v analytické metodě i v metodě konečných prvků, viz tab. 5.

Tab. 5 Tepelné vlastnosti materiálů [17]

Materiál	Tepelná vodivost	Hustota	Měrná tepelná kapacita
	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	$[kg \cdot m^{-3}]$	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
Plech primární části	50	7800	434
Měď	385	8900	380
Epoxid	0,8	1800	900
Izolační papír	0,18	930	1340
Ocel 1018	45	7800	460
Permanentní magnet	8,95	7500	502
Vzduch	0,0259	1,205	1005

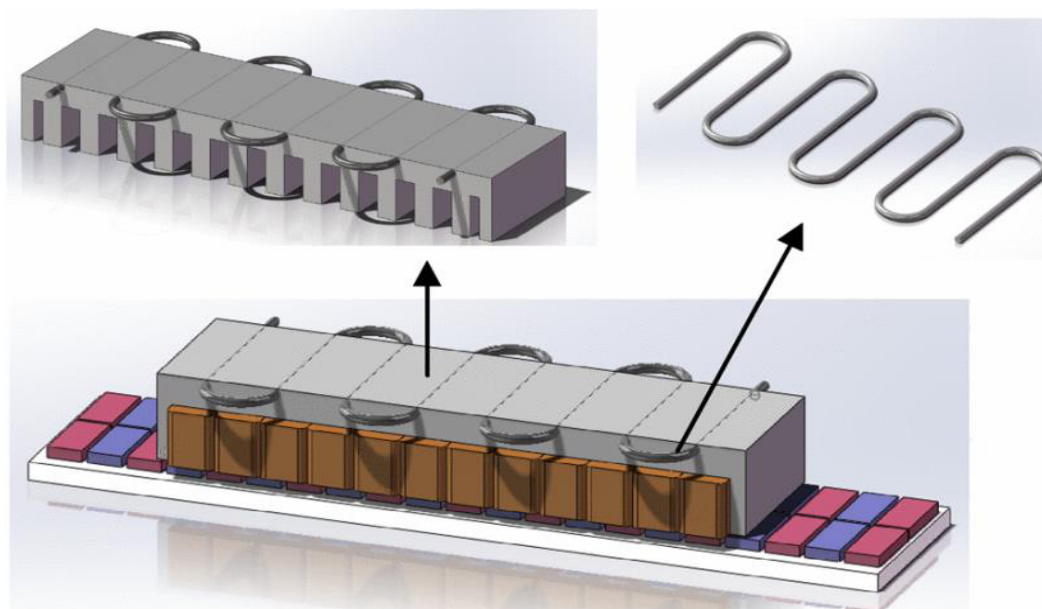
V následující tabulce jsou uvedeny vlastnosti vzduchu při atmosférickém tlaku. Hodnoty byly opět pro obě metody stejné, viz tab. 6. V programu Ansys Workbench bylo nutné tyto hodnoty změnit.

Tab. 6 Vlastnosti vzduchu při atmosférickém tlaku, dostupné z [19]

Teplota	Dynamická viskozita	Kinetická viskozita	Prandtlovo číslo
[°C]	$[10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$	$[10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	[-]
20	1,8205	1,5111	0,71559
30	1,8680	1,6036	0,71375

5.4 Tvorba odporové sítě

Pro tvorbu tepelné sítě je využit vědecký článek [17], který se touto problematikou zabývá. Článek srovnává metodu odporových sítí s metodou konečných prvků, kde metoda odporové sítě dosahuje velmi dobrých výsledků. Pro tento typ výpočtu tepelných poměrů v LEM s železným jádrem existuje jen velmi málo prací. Jelikož tepelný model obsahuje i vodní chlazení, tak se následný výpočet značně komplikuje. Umístění vodního chlazení v LEM je uvedené na následujícím obrázku, viz obr. 5-3.



Obr. 5-3 Schéma lineárního motoru, převzato z [16]

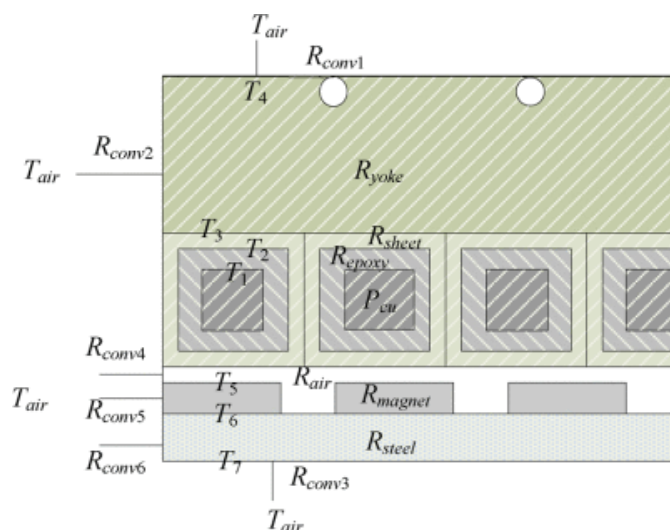
Podle [17] je nejdůležitějším faktorem pro správný a přesný výpočet určení tepelných odporů kondukce a odporů konvekce. Naprosto klíčový segment modelu je stanovení tepelného odporu nucené konvekce chladicí vody, která chladí primární díl. Pro

snadnější tepelný výpočet je nutné geometrii motoru značně zjednodušit. Nejen odstranit zaoblení, ale zjednodušit motor jako celek. Dalším zjednodušením je, že teplo se šíří pouze podélně. Obecně se vypočítá odpor R_{epoxid} , $R_{izolace}$, R_{jho} , R_{vzduch} , R_{magnet} , R_{ocel} pomocí následujícího vztahu:

$$R_v = \frac{l}{\lambda \cdot S'} \quad (5.6)$$

kde l je délka [m], λ je tepelná vodivost materiálu [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] a S' je průřez [m^2].

Další zjednodušením je nahrazení vinutí, izolace a epoxidu pomocí ekvivalentních čtverců, viz obr. 5-1. Vinutí obou fází umístění v jedné drážce je převedeno na čtvercový průřez. Okolo vinutí je umístěná izolace, a to celé je zalité epoxidem. Díky tomu se jedná o soustředné čtverce, tak se výrazně ulehčí výpočet jednotlivých tepelných odporů. Toto zjednodušení je nutné zejména kvůli komplikovanému tvaru drážky, a tudíž i vinutí a izolaci, viz obr. 5-4.

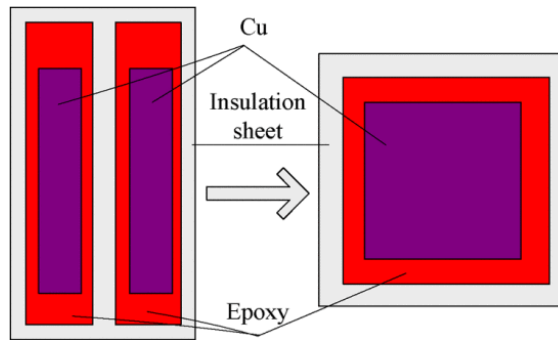


Obr. 5-4 Schéma motoru s vyznačenými elementy, převzato z [16]

Geometrie motoru je značně zjednodušená pro analytickou metodu. Byly odstraněny všechny složité geometrie a motor se transformoval do následujícího modelu. Tloušťku epoxidu je nutné vypočítat na základě činitele plnění mědi, rozměru izolačního papíru a velikosti drážky. Tato data zde nemohou být opět uvedena kvůli utajení.

Vinutí je zjednodušené tak, že se neuvažuje jeho propojení na koncích drážek. Tím se z trojrozměrného vinutí stane dvojrozměrné. Ztráty ve vinutí se počítají na základě odporu. Takže toto zjednodušení nemá vliv na přesnost výpočtu ztrát ve vinutí. Vinutí, jenž propojuje dvě drážky se chladí lépe, nežli to umístěné v drážkách. Takže tímto

zjednodušením nedojde k přehlédnutí teplotního extrému. Schéma zjednodušení drážek je možné vidět na následujícím obrázku, viz obr. 5-5.



Obr. 5-5 Ekvivalent vinutí motoru pro tepelnou síť, převzato z [16]

Dalším předpokladem pro další výpočty je to, že průměrná rychlost motoru je rovna rychlosti vzduchu v opačném směru.

Podle [16] je vztah pro výpočet průřezu čtvercového rámu jako na předešlém obrázku u izolace a u epoxidu následující:

$$R_v = \frac{1}{4} \cdot \frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{2 \cdot \lambda \cdot l'} \quad (5.7)$$

kde l je délka drážky [m], d_1 je vnější délka strany čtverce [m] a d_2 je vnitřní délka strany čtverce [m].

Protože se vyskytuje v prostoru vzduchové mezery velký teplotní gradient, R_{vzduch} musí být určen velmi přesně. Podle [16] je možné tepelný odpor vzduchové mezery upravit pomocí výsledků z metody konečných prvků anebo zjistit experimentálně. Nicméně i s využitím pouze vztahu (5.6) je možné dosáhnou dobré přesnosti. Protože mezi magnety je vzduchová mezera, tak se vztah (5.6). rozšíří i o člen, který reprezentuje odpor vzduchu mezi dvěma magnety. Odpor vzduchové mezery je tedy definován následujícím způsobem:

$$R_v = \frac{l}{\lambda \cdot S_1} + \frac{1}{2p + 1} \cdot \frac{C}{\lambda \cdot S_2}, \quad (5.8)$$

kde $2p$ je počet pólů [-], C je konstanta založená na přenosu tepla do sekundární části motoru [m], S_1 je průřez vzduchové mezery [m²] a S_2 je průřez vzduchové mezery mezi PM [m²]. Podle [16] je v LEM se železným jádrem a s vodním chlazením odvedeno asi jen 0,1 % tepla do okolí pomocí vzduchové mezery. Pro takové případy platí, že se konstanta $C=2$. Mezi magnety v sekundárním dílu je ve skutečnosti epoxid, takže ve vztahu (5.8) je možné vynechat druhý člen.

Dále je třeba vypočítat jednotlivé odpory tepelné konvekce mezi pevnými částmi motoru a okolím. Jednotlivé tepelné odpory konvekce jsou uvedeny v následující tabulce, viz tab. 7.

Tab. 7 Tepelné odpory konvekce tepla

Označení	Popis
R_{conv1}	Nucená konvekce vodního chlazení
R_{conv2}	Konvekce mezi okolím a vrchní plochou primární části
R_{conv3}	Konvekce mezi okolím a boční plochou primární části
R_{conv4}	Konvekce mezi okolím a vrchní plochou sekundární části
R_{conv5}	Konvekce mezi okolím a boční plochou sekundární části

Podle [16] jsou jednotlivé konvekce určeny následujícím vztahem:

$$R_{conv} = \frac{1}{h \cdot S} \quad (5.9)$$

kde h je koeficient nucené konvekce [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] a S je plocha dané části [m^2].

Vodní chlazení odvádí až 90 % veškerého generovaného tepla z motoru. Vodní chlazení zamezuje zvýšení teploty a díky tomu je možné motor více zatěžovat. Čím nižší je teplota chladicí vody, tím více je možné motor zatěžovat. Avšak chladicí voda, by neměla být chladnější o více než 3 K, aby nedošlo ke kondenzaci vodní páry. Výpočet bude proveden pro teplotu okolí 20 °C a 30 °C. [16]

Průtok v chladicím potrubí bývá od 1 l/min až do 6 l/min. Průtok vody je stanoven pro další výpočty jako 1 l/min. Pro tento průtok je proudění v chladicích trubkách turbulentní. Za tohoto předpokladu je možné určit koeficient nucené konvekce vodního chlazení pomocí následujícího vztahu:

$$h_1 = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot p_r^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu_f}{\mu_w}\right)^{0,14} \cdot \lambda_{voda} \cdot d_{potrubí} \quad (5.10)$$

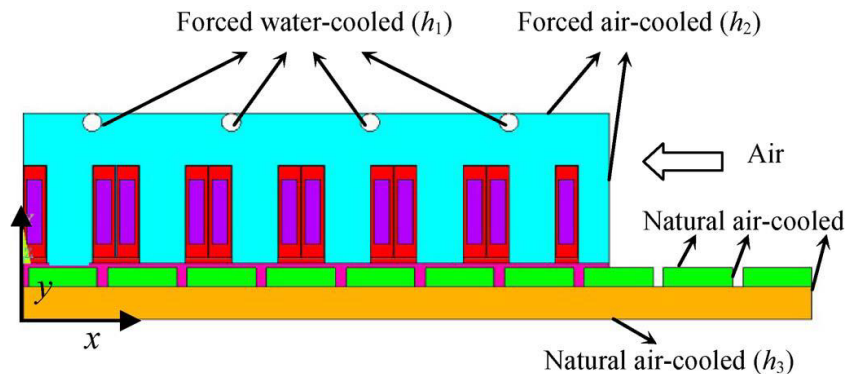
kde μ_f je dynamická viskozita vody [$\text{Pa} \cdot \text{s}$], μ_w je dynamická viskozita vody o teplotě stěny potrubí [$\text{Pa} \cdot \text{s}$], $d_{potrubí}$ je průměr potrubí [m]. Dynamická viskozita se odvíjí od teploty chladicí vody a teploty stěny potrubí. Pro další výpočet je uvažována teplota chladicí vody konstantní a teplota stěny potrubí shodná s teplotou jha LEM.

Protože Reynoldsovo číslo proudění okolního vzduchu nedosahuje hodnot větších nežli $3 \cdot 10^5$, tak je toto proudění laminární. Protože primární díl se pohybuje s měnící se

rychlostí a směrem, je nutné určit jeho průměrnou rychlost pohybu. Ta byla stanovena jako 40 % z maximální rychlosti při nominálním zatížení. Zrychlování a brždění motoru je velmi rychlé, a proto je možné ho v tepelných výpočtech zanedbat. Pro vrchní část motoru platí vztah:

$$h_2 = 0,3326 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot P_r^{\frac{1}{3}} \cdot \lambda_{vzduch} \cdot l_x, \quad (5.11)$$

kde l je délka motoru v ose x , viz obr. 5-6 [m].



Obr. 5-6 LEM s vyznačenými konvekcemi, převzato z [16]

Pro boční část primární části motoru platí následující vztah:

$$h_3 = 0,16 \cdot Re^{0,699} \cdot \lambda_{vzduch} \cdot l_x. \quad (5.12)$$

Jak je z dvou předešlých vztahů patrné, tak u nuceného chlazení vzduchem záleží především na rychlosti vzduchu. Tudiž není nutné tyto hodnoty řešit iteračně. Přirozená konvekce sekundárního dílu se vypočítá podle [16] následujícími vztahy. Pro přirozenou konvekci horní plochy magnetů platí vztah:

$$h_4 = 0,54 \cdot (G_r \cdot P_r)^{0,25} \cdot \lambda_{vzduch} \cdot l_x. \quad (5.13)$$

Pro boční část sekundárního dílu platí následující vztah:

$$h_5 = \left[0,825 + \frac{0,387 \cdot (G_r \cdot P_r)^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{P_r} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right]^2 \cdot \lambda_{vzduch} \cdot l_x. \quad (5.14)$$

Konkrétně představuje tepelný odpor R_{conv} vodní chlazení a nucené chlazení vzduchem, viz obr. 5-6. Odpor nucené konvekce chladicí vody $R_{vodní\ chlazení}$ se určí pomocí následujících vztahu:

$$R_{vodní\ chlazení} = \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{h_1 \cdot S_1}, \quad (5.15)$$

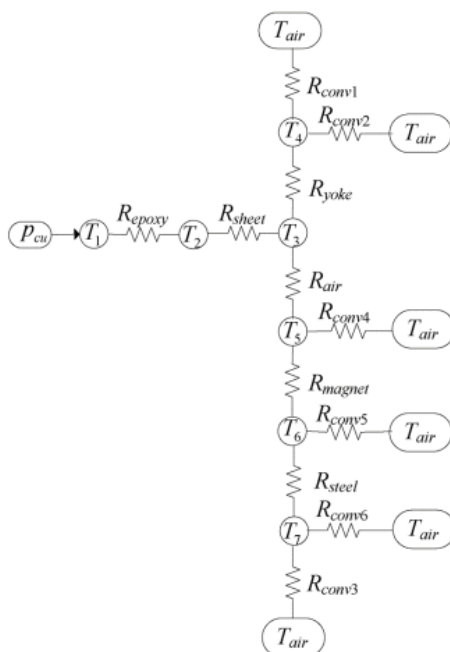
kde p je počet drážek pro vodní chlazení [-], h_1 je nucená konvekce vodou [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$], S_1 je plocha povrchu potrubí [m^2].

Jednotlivé odpory R_{conv} se určí pomocí následujících vztahu:

$$R_{conv} = \frac{1}{h \cdot S}. \quad (5.15)$$

Jak je z tab. 8 patrné tak vodní chlazení oproti konvekci proudícím vzduchem je téměř zanedbatelná. Nicméně u sekundární dílu je konvekce proudícím vzduchem jediná forma sdílení tepla. Radiace se nebere v potaz, protože rozdíl teplot mezi motorem a okolím je relativně malý. Okolní teplota byla zvolena na 20 °C a na 30 °C.

Výsledná tepelná síť vznikne spojením všech elementů. Na následujícím obrázku (obr. 5-7) je uvedena výsledná zjednodušená tepelná síť LEM s železným jádrem a PM. Jedná se jen o zjednodušený model, pro snadnější pochopení. [16]



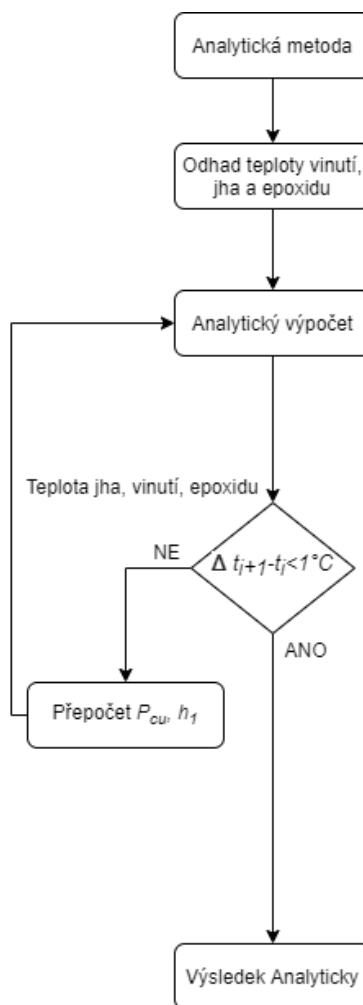
Obr. 5-7 Zjednodušená tepelná síť, převzato z [16]

Tab. 8 Výsledné hodnoty veličin pro analytickou metodu

Název	Označení	Hodnota	Jednotka	Vztah
Ztráty ve vinutí	P_{Cu}	70	[W]	(5.1)
Vířivé ztráty	P_v	5,3	[W]	(5.3)
Ztráty v PM	P_{PM}	21	[W]	(5.5)
Tepelný odpor jha	R_{jho}	0,0251	[K/W]	(5.6)
Tepelný odpor magnetu	R_{magnet}	0,008	[K/W]	(5.6)
Tepelný odpor oceli sekundární části	R_{ocel}	0,0017	[K/W]	(5.6)
Tepelný odpor epoxidu	R_{epoxid}	0,077	[K/W]	(5.7)
Tepelný odpor izolačního papíru	$R_{izolační}$ <i>papír</i>	0,1639	[K/W]	(5.7)
Tepelný odpor vzduchové mezery	R_{vzduch} <i>mezera</i>	1,689	[K/W]	(5.8)
Nucená konvekce vodního chlazení	R_{conv1}	0,0603	[K/W]	(5.9); (5.15)
Konvekce mezi okolím a vrchní plochou primární části	R_{conv2}	0,58	[K/W]	(5.9); (5.11)
Konvekce mezi okolím a boční plochou primární části	R_{conv3}	0,482	[K/W]	(5.9); (5.12)
Konvekce mezi okolím a vrchní plochou sekundární části	R_{conv4}	12,84	[K/W]	(5.9); (5.13)
Konvekce mezi okolím a boční plochou sekundární části	R_{conv5}	13,63	[K/W]	(5.9); (5.14)

Následně se odporová síť zadala do programu Matlab Simulink. Za využití knihovny Simscape je vmodelování takovéto odporové sítě velmi intuitivní a jednoduché. V modelu, za předpokladu využití knihovny Simscape, nesmí chybět blok „Solver configuration“, jinak nebude simulace fungovat. Napětí (teplota) bylo měřeno pomocí bloku „Voltage Sensor“. Ztráty jsou v modelu reprezentovány proudovými zdroji. Okolní teplota je reprezentována zdroji napětí. Jednotlivé tepelné odpory včetně vztahu jsou uvedeny v tab. 8. Do jednotlivých bloků byla zadána přímo veličina z prostředí Matlab, takže je možné model snadno upravovat. Díky tomu je možné model

snadno měnit. Rychlost takového výpočtu je v řádu jednotek sekund. Po prvním výpočtu je nutné opravit zvolené teploty vinutí, epoxidu a jha. Teplota vinutí ovlivňuje ztráty v mědi na základě vztahu (5.1). Teplota epoxidu udává jeho tepelnou vodivost, jelikož je jeho teplota poměrně nízká, je možné konduktivitu považovat za konstantní. Úprava hodnoty vodivosti by byla na místě od cca 70 °C. Teplota jha udává tepelný spád u vodního chlazení na základě vztahu (5.15). Čím větší je teplotní rozdíl mezi vodou a jhem, tím účinnější je vodní chlazení. Jak funguje iterace v analytickém modelu je uvedeno na následujícím obrázku, viz obr. 5-8.



Obr. 5-8 Vývojový diagram analytické metody

Podmínkou ukončení iterace je ustálení teploty jha, vinutí a epoxidu. Za ustálený stav je v této simulaci považována situace, kdy nová výsledná teplota se neliší od té původní o více než 1 K. Na dosažení tohoto stavu stačily tři iterace, během nich se teplota ustálila. Výpočet proběhl dvakrát, jednou pro teplotu okolí a chladicí vody 20 °C a následně 30°C.

Výsledné hodnoty z analytické metody jsou uvedeny v následující tabulce, pro 20 °C viz tab. 9 a pro 30 °C

Tab. 9 Výsledek analytické metody pro teplotu chladící vody a okolí 20 °C

Umístění	Měď	Epoxid	Izolační papír	Jho	Sekundární díl
Teplota [°C]	43,1	37,7	26,2	25,2	45,2

Výsledky analytické metody pro teplotu 30 °C jsou uvedeny v tab. 10.

Tab. 10 Výsledek analytické metody pro teplotu chladící vody a okolí 30 °C

Umístění	Měď	Epoxid	Izolační papír	Jho	Sekundární díl
Teplota [°C]	53,7	48,7	36,2	34,1	57,3

5.5 Metoda konečných prvků v programu Ansys Workbench

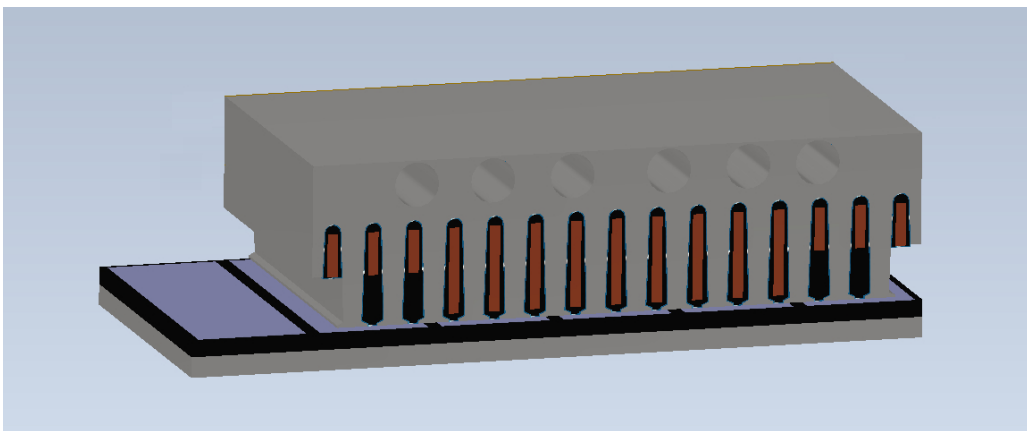
V této kapitole je popsán postup tvorby tepelné analýzy v programu Ansys Workbench. Pro tuto metodu byl nejprve vytvořen 3D model v programu Autodesk Inventor Professional 2020. To proto, že je tvorba modelu v tomto programu daleko jednodušší. Následně se model exportoval do programu Ansys Workbench, kde pak byla nastavena tepelná simulace. Vstupní parametry materiálů a ztrát byly stejné jako v analytické metodě. Protože tepelná simulace LEM s vodním chlazením je velmi komplexní záležitost a byla k dispozici pouze licence programu Ansys s omezeným počtem uzlů, musel být model zjednodušený a rozdělený na více částí. Podrobněji o tvorbě simulace v kapitole 0.

Program Ansys využívá k výpočtu metodu konečných prvků. Jde o to, že geometrický model si rozloží velký počet uzlů. Spojitý tvar tedy dostane disktrétní podobu o konečném počtu uzlů. Veličina je pak iteračně počítána v každém tomto uzlu. Tuto metodu je možné využít k určení velké škály různých veličin. Tato simulace se zaměřuje na tepelnou analýzu. V následujících kapitolách je ukázáno, jak se postupuje při tvorbě tepelné analýzy.

Byla zvolena „Transient Thermal“ simulace. V této simulaci je možné volit čas, po který je objekt vystaven zvoleným tepelným podmínkám. Čas simulace byl volen tak, aby se dosáhlo ustálené teploty. Díky této simulaci je možné vidět simulaci v čase.

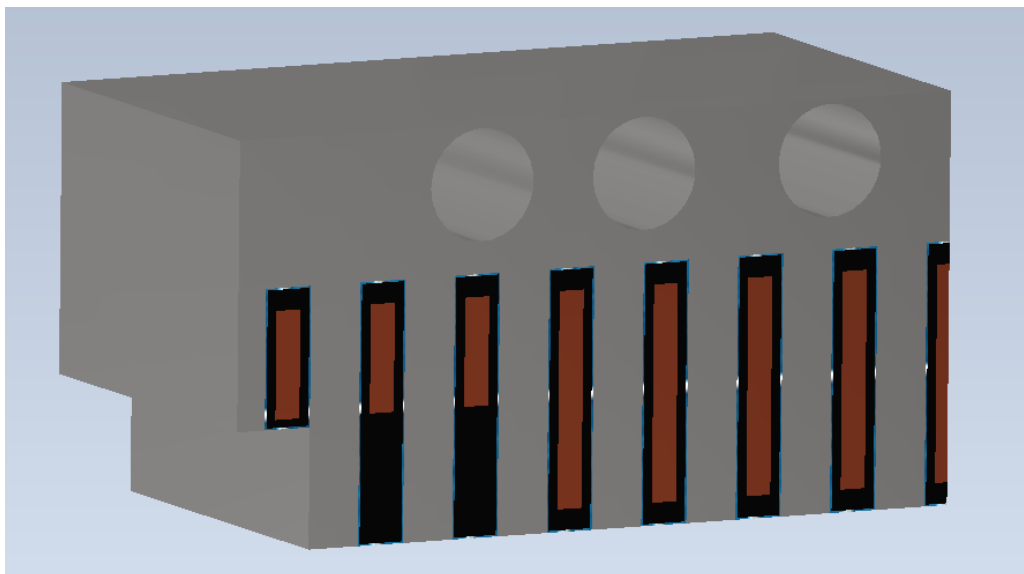
5.5.1 Model motoru v CAD

Jak je uvedeno dříve model LEM byl vytvořen v programu Autodesk Inventor Professional 2020. Model je možné vytvořit přímo v prostředí Ansys, ale tvorba komplikovanějšího tělesa je v prostředí Autodesk mnohem uživatelsky příjemnější. Nejprve se vymodelovaly jednotlivé součásti LEM a to jho, epoxid primární části, izolační papír, vinutí, permanentní magnety, epoxid sekundárního dílu a oceli sekundárního dílu. Geometrii LEM je opět nutné zjednodušit, aby byla vhodná pro metodu konečných prvků. Je vhodné odstranit veškeré zbytečné detaily motoru, které nemají vliv na přesnost analýzy, ale mají velký vliv na délku jejího výpočtu. Příkladem takových nadbytečných detailů je například zaoblení hran, otvory na šrouby a podobné (ve skutečnosti tam šroub bude) atd. Vhodné je také vytvořit rovnoměrnou síť, ta vede k rychlejší konvergenci, a tedy i k přesnějším výsledkům s menším počtem iterací. Díky zjednodušení na tvary blízké kvádru, dojde k rovnoměrnému rozprostření sítě (mesh). Z těchto součástí se poté vytvoří sestava, kterou je možné vidět na následujícím obrázku, viz obr. 5-9.



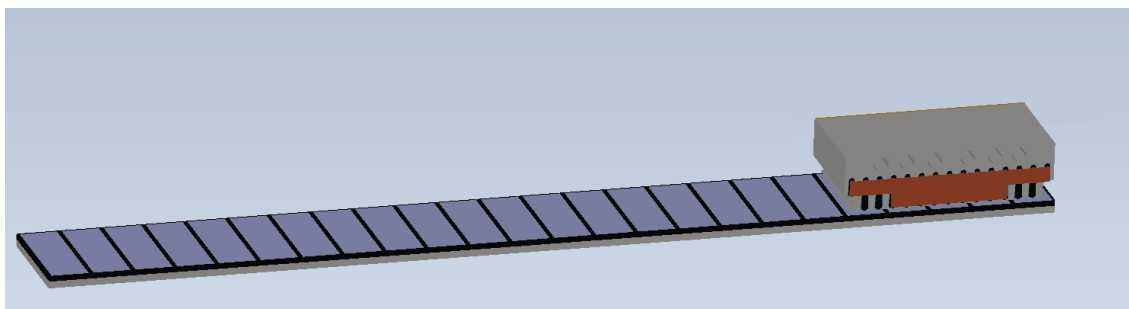
Obr. 5-9 Model LEM

Po zjednodušení drážek a redukci na $\frac{1}{4}$ původních rozměrů je získán ideální model pro tepelnou analýzu. Vzhledem k tomu, že počet uzlů je ve školní licenci omezený, je toto rozumný kompromis mezi přesností a snahou o dosažení malého počtu uzlů. Velké množství uzlů vnikne při tvorbě uzlů v oblasti izolačního papíru, jenž je velmi tenký a aby měl nějaký vliv na analýzu, tak musí být uzly rozmístěné velice jemně. Výsledný zjednodušený model je možné vidět na obr. 5-10.



Obr. 5-10 Model LEM pro tepelné výpočty

Ve skutečnosti je délka sekundárního dílu mnohem delší. Tato varianta je nutná pro určení tepelného toku putující z primární části motoru do sekundární části. Tato verze je nutná v dalším výpočtu, aby se určil tepelný tok, který jde z primární do sekundární části. Šlo ale jen o odhad, protože takto se uvažovala konvekce, ale ve skutečnosti se motor pohybuje a dochází tedy převážně ke konvekci. Na druhou stranu je toto zjednodušení dostatečně přesné, protože vzduchová mezera je velice malá, a to v řádu desetin milimetru.



Obr. 5-11 Skutečná délka sekundární části

Délka sekundární části je variabilní a záleží na konkrétní aplikaci, jak dlouhá bude. Pro tepelný model byla zvolena zhruba čtyřnásobná délka sekundární části, nežli je délka motoru. Opět není možné dávat přesné rozměry kvůli utajení.

Vinutí bylo zjednodušeno na tvar obdélníku. Vinutí uvnitř drážky je obklopeno epoxidem. Mezi epoxidem a jhem motoru je ještě izolační papír. Ten má velice malou tepelnou vodivost, takže i přes jeho velmi malý průměr (desetiny mm), tak je vhodné ho

uvažovat. Ve skutečnosti je motor na závěr zalitý epoxidem. To ovlivní nucenou konvekci vzduchu po bocích LEM, ale ta stejně není uvažována. Protože je zanedbatelná oproti vodnímu chlazení. Další důvody, proč se neuvažoval epoxid po bocích motoru, byla absence výkresové dokumentace, a taky aby srovnání modelů bylo relevantní.

Model z Autodesk Inventor Professional 2020 exportuje do souboru .sat. (save as text). Následně je možné ji importovat do programu Ansys.

5.5.2 Nastavení materiálů

Vlastnosti materiálů jsou stejné jako u analytické metody, viz kapitola 5.3. Simulace se snaží napodobit provoz za normálního provozu, pro který byl motor navržen. Až na plechy primární části mají všechny materiály stejné tepelné vlastnosti bez ohledu na směr šíření tepla. Plechy jsou od sebe izolované, a to snižuje tepelnou vodivost, a proto ve směru s orientací drážek je vodivost výrazně menší. Nicméně proto, že je model LEM souměrný, tak to nemá v tomto případě vliv. Uvažovaný činitel plnění železa je tak uvažovaný jako 1. Průtok chladicí vody byl opět stanoven na 1 l/s.

Materiály se nastaví po vybrání příslušné analýzy. Pro tuto analýzu byla vybrána analýza „Transient Thermal“. V bloku „Transient Thermal“ se materiály pro simulaci nastaví v záložce „Engineering Data“. Některá data jsou uložena v databázích programu, ale byla změněna, aby korespondovala s analytickou metodou.

5.6 Nastavení simulace

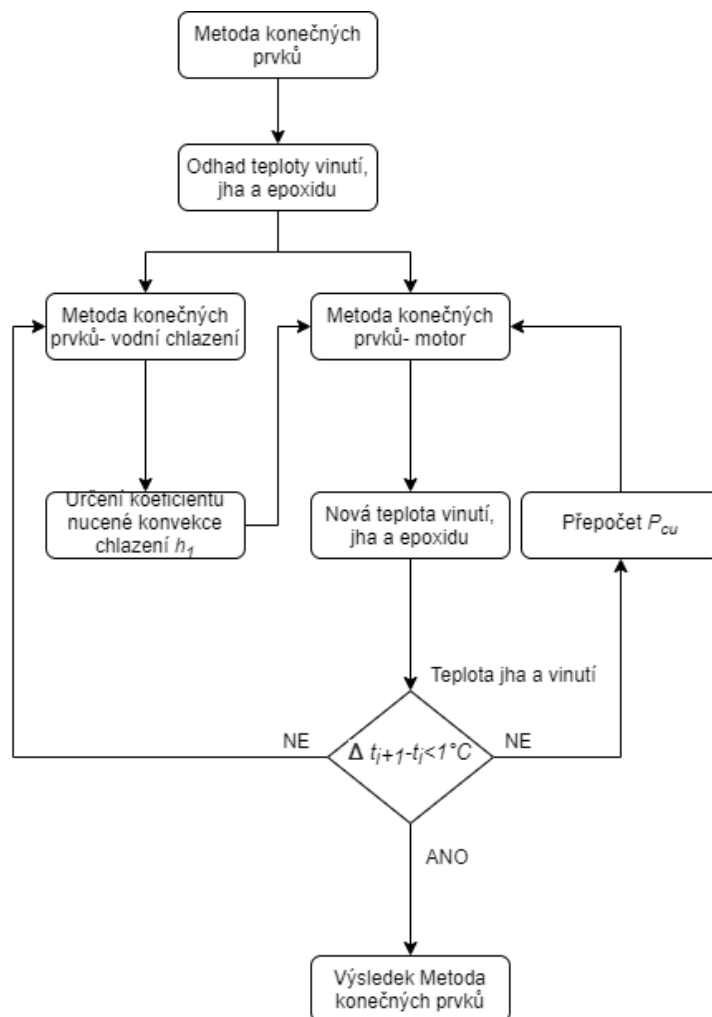
Po nastavení materiálů je možné se přesunout na další krok a tím je import geometrie motoru ze .sat souboru. Jako první je dobré si pojmenovat vybrané plochy, které bude dále v simulaci potřeba. To jsou plochy vstupů a výstupů chladicí vody, teplosměnná plocha trubek a části LEM, kde je měřena teplota.

V simulaci jako první se nastavuje mesh. Tu je nutné upravit zejména u izolačního papíru, kde je ta automaticky vygenerovaná nedostačující. Izolační papír je totiž velice tenký a automaticky generovaná mesh byla pro něj nevyhovující. Stejně tak byla zpřesněna mesh i u ostatních materiálů. Výsledkem byla pak dostatečně přesná mesh s cca 500 000 uzly.

Protože je simulace příliš komplexní pro školní licenci, tak byla simulace rozdělena na dvě. První simulace je zaměřena na určení koeficientu nucené konvekce

chlazení. Ta druhá se zaměřuje na rozložení teploty v LEM. Stejně jako u analytické metody je nutné použít iterační metodu. Opět je odhadnuta teplota jha, epoxidu a vinutí. Z teploty vinutí jsou určeny ztráty. Pokud by byl epoxid teplejší nežli 70 °C, začala by se výrazně měnit jeho vodivost. Do té doby je stejná jako v tab. 5. Teplota jha značně ovlivňuje účinnost vodního chlazení. Čím je větší rozdíl mezi chladicí vodou a teplotou teplosměnné plochy, tím je chlazení tělesa účinnější.

Jako první analýza je popsána ta, jenž určí koeficient nucené konvekce vodního chlazení. Tento koeficient je následně nutný pro výpočet druhé simulace. Výsledkem druhé analýzy je poté teplota jha, které se dosadí opět do první analýzy. Tento cyklus stačí zopakovat cca 2x až 3x, než dojde k ustálení na požadovanou přesnost. Tedy, že při změně parametrů nedojde ke změně výsledné teploty o více než 1 K. Takto se udělá analýza pro teplotu okolí a chladicí vody 20 °C a poté následně i pro 30 °C. Celý postup při iteraci je uvedený na následujícím obrázku, viz obr. 5-12.



Obr. 5-12 Vývojový diagram metody konečných prvků

První simulace bude „Fluid Flow (fluent)“ tento druh simulace umožňuje výpočet koeficientu nucené konvekce. Zde byl vytvořen velmi jednoduchý model, který má určit, jak efektivní je vodní chlazení. Na základě počátečního odhadu byla nastavena teplota jha. Teplota chladicí vody byla zvolena 20 °C a 30 °C.

Jako první se zvolí záložka „Geometry“, kde se importuje geometrický model z .sat souboru. Soubor se importuje pomocí následujícího příkazu „File“→„Import External Geometry File“, následně je nutné zvolit funkci „Generate“ pro vytvoření geometrie tělesa.

Následně v záložce „Mesh“ se nastaví hustota sítě. Síť je možné nechat na automatickém vygenerování. Po zkontrolování automaticky generované sítě je nutné pojmenovat plochy vstupů a výstupů chladících trubek, teplosměnnou plochu, objem tekutiny a objem modelu primární části. Pojmenování jednotlivých ploch a objemů je nejen dobré pro lepší orientaci v dalších částech analýzy, ale také je nutné mít označená místa, z nichž se budou na závěr sbírat data. Pojmenování části se dělá pomocí kliknutí pravým tlačítkem na vybranou plochu či objem a vybrání funkce „Create Named Selection“.

Dalším krokem je nastavení samotné simulace v záložce „Setup“. Řešení simulace vychází ze zákona zachování energie. Kde podle [20] platí následující rovnice:

$$Q_{in} + Q_g - Q_{out} = Q_{aku} = \frac{dE}{dt} \quad (5.16)$$

kde Q_{in} je energie do soustavy vstupující [J], Q_g je energie soustavě generována [J], Q_{out} je energie soustavě odebírána [J], Q_{aku} je akumulovaná energie v tělese [J] a $\frac{dE}{dt}$ je změna energie v tělese [J]. V ustáleném stavu je změna energie v tělese rovna nule. Jako první se nastaví gravitace. Ta se určí podle pozice tělesa v souřadném systému. Dále se v záložce „Models“ vybere možnost „Energy“ a zapne se. Tím se nastaví řešení tepelné analýzy na základě výše zmíněného zákona zachování energie.

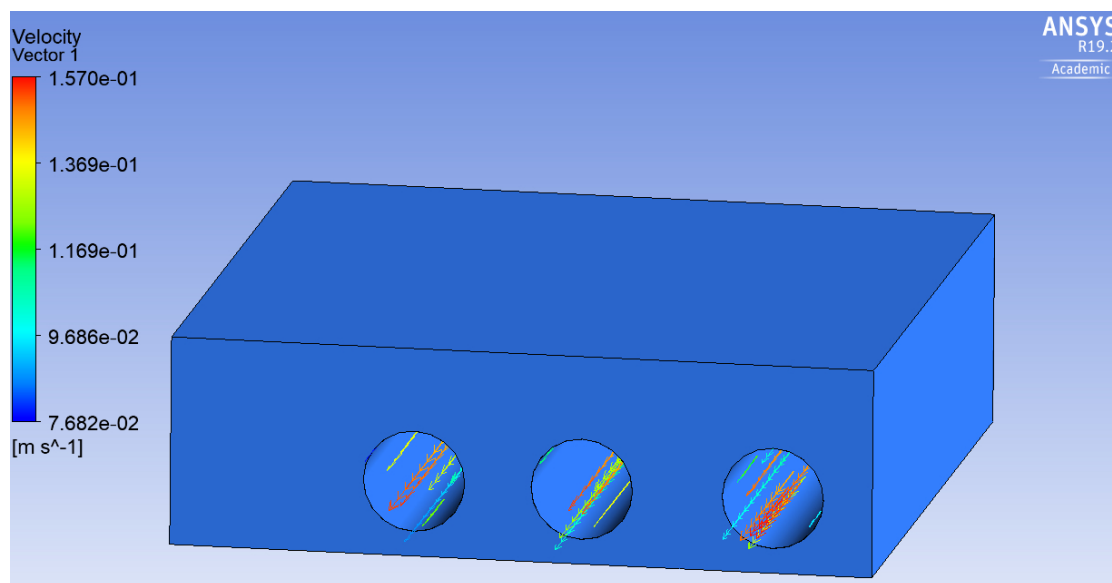
Dále se nastaví materiály použité v simulaci. Tomto případě se jedná o vodu a ocel. Parametry plechů byly upraveny podle tab. 5. Parametry vzduchu byly ponechány na výchozích hodnotách použitých v programu Ansys.

V záložce „Cell Zone Conditions“ se nastaví použité materiály, tedy chladicí voda a plechy. Dále se v záložce „Boundary Conditions“ vyberou následující parametry simulace. Na vstupní plochy chladících trubek se nastaví podmínky chladicí vody. Jako

první se nastaví typ a to „velocity-inlet“. Následně v záložce „edit“ nastaví se rychlost vody. V zadání nebyla uvedena přímo rychlost chladicí vody, ale její průtok. Je tedy nutné přepočítat průtok z l/s na rychlost m/s ze znalosti plochy průřezu chladicí trubky. Následně se tedy nastaví rychlost chladicí vody a v další záložce „Thermal“ se nastaví teplota chladicí vody. Ta se uvažuje v celém objemu konstantní. To ale neodpovídá realitě, ale vzhledem k omezené školní licenci je nutné toto zjednodušení podstoupit. Stejně zjednodušení je uvažováno i v analytické metodě. Na výstupní plochu chladicí trubky se nastaví „pressure-outlet“. Zde není nutné nastavovat žádné další parametry.

Teplota jha je nastavena na zvolenou teplotu, která se následně upraví podle interačního diagramu. Normálně by bylo možné obě simulace sloučit v jednu, ale kvůli omezené školní licenci nebylo možné udělat jen jednu komplexní analýzu. Teplota vody je nastavena na 20 °C a pro další simulaci následně na 30 °C. Úprava se provádí ve výše zmíněných okrajových podmínkách analýzy.

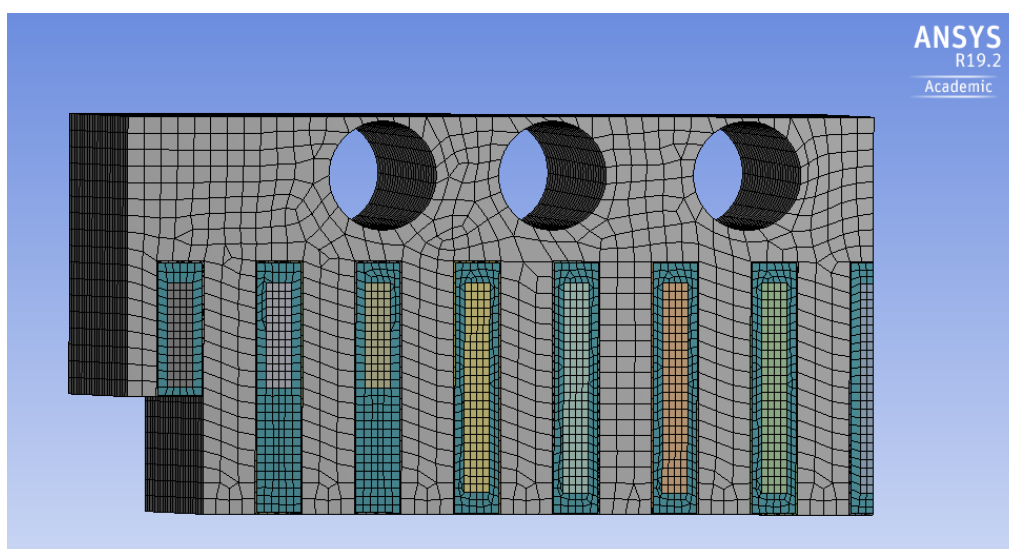
Pro výpočet byla použita výpočetní metoda na základě schématu „SIMPLEC“ a bylo provedeno 200 interací. Výsledný model pro získání koeficientu nucené konvekce vodního chlazení je uvedený na následujícím obrázku. Je na něm znázorněná rychlost chladicí média, to je pouze ilustrační. Hledaný koeficient se získá v záložce „Results“, kde se zvolí možnost „Surface integrals“ a zde se vybere plocha chladicí trubek. Následně se zvolí „Facet Average“, „Wall Fluxes“ a „Surface Heat Transfer Coef.“. Pro dosažení relevantních výsledků je nutné opět použít interaci, viz obr. 5-12.



Obr. 5-13 Model pro získání koeficientu nucené konvekce

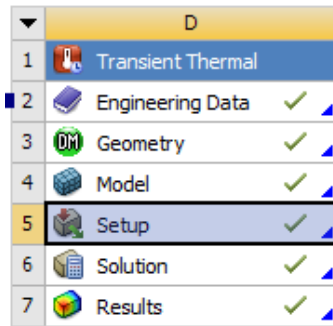
Obdobný postup se využije u získání koeficientu nucené konvekce pro horní část LEM. Na to je nutné celý motor uzavřít do válce pomocí funkce „Enclosure“. Poté se postupuje stejně jako předchozím případě.

Druhá simulace se zabývá samotnou tepelnou simulací LEM. Import sestavy a tvorba sítě je stejná jako u předchozí simulace. Opět kvůli nedostatečným možnostem školní licence je nutné model zjednodušit anebo rozdělit. V této simulaci se zvolily obě možnosti. Protože sekundární část LEM je poměrně rozměrná, tak musela mít vlastní simulaci. Model pro tepelnou analýzu byl zredukován na 1/4 za využití symetrie, aby bylo možné opět dosáhnout kompromisu mezi počtem uzlů omezených licencí a přesností. Obzvláště je nutné věnovat pozornost automaticky vytvořené síti v oblasti izolačního papíru. Papír je velmi tenký a automaticky generovaná síť nedosahuje požadované hustoty a může pak dojít ke skreslení výsledků. Finální model je uveden na následujícím obrázku, viz obr. 5-14.



Obr. 5-14 Model LEM pro tepelné výpočty

Jako další krok je nutné otevřít model v záložce „setup“, viz obr. 5-15. Zde je nutné definovat použité materiály. Hodnoty byly upraveny podle těch použitých v analytické metodě, viz kapitola 5.3. Definice materiálů se provádí v záložce „Geometry“ a následně se poté vybere v záložce „Assignment“ požadovaný materiál součásti.



Obr. 5-15 Tepelná analýza

Následně se nastaví tepelné podmínky simulace, jako první se zadají ztráty v železe a ve vinutí počítané pomocí vztahu (5.1) a (5.3). Protože do programu Ansys se zadávají objemové ztráty, bylo nutné tuho hodnotu přepočítat. Toho lze dosáhnout pomocí následujícího vztahu a ze znalosti objemu mědi v motoru. Objem vinutí a jha je jiný v reálném LEM a jiný v modelu. Nicméně celkové ztráty musí být stejné v tepelné simulace a taky v reálném LEM. Proto je nutné přepočítat ztráty na reálný objem použitý v simulaci. To je možné zjistit v parametrech součásti. Měrné objemové ztráty vinutí i ztrát v železe se tedy počítají na základě následujícího vztahu:

$$p_v = \frac{P_{Ztráty}}{V_{simulace}} \quad (5.17)$$

kde p_v jsou měrné objemové ztráty [$W \cdot m^{-3}$], $P_{Ztráty}$ je ztrátový výkon ve vinutí potažmo v železe [W] a V je objem vinutí potažmo jha [m^3]. Ty se poté nastaví do simulace pomocí funkce „Internal Heat Generation“ v příslušné součásti a hodnotou podle vztahu (5.17).

Dalším krokem je přiřazení nucené konvekce chladící vody a vrchní plochy LEM. Na to slouží funkce „Convection“, do které byly zadány koeficienty nucené konvekce z předchozí simulace. Tuto funkci aplikujeme na vnitřní plochu chladícího potrubí a vrchní část LEM. U všech funkcí je nutné zkontrolovat teplotu okolí, jestli odpovídá zadáním simulace, tedy 20 °C a 30 °C.

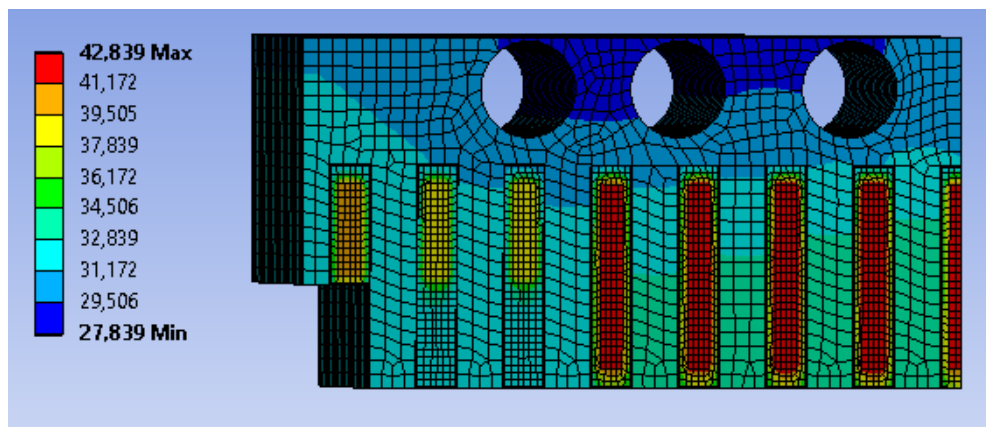
Posledním krokem je nastavení hledaných výsledků. Pro teplotní analýzu LEM a porovnání s analytickou metodou, je vhodné využít funkci „Temperature“ v záložce „Solution“, tato funkce se aplikuje na vybranou součást. Výsledkem pak bude průměrná teplota v dané součásti. Délka simulace byla 7200 sekund, tedy dvě hodiny. Během druhé hodiny simulace nevzrostla teplota v žádné součásti o 1 K a simulace byla ukončena.

Časově závislá simulace byla zvolena proto, že je v možné vidět průběh oteplení LEM, a to bylo nápomocné při ladění simulace, a také pro lepší pochopení.

Následně je nutné provést iterace podle schématu na obr. 5-12. K dosažení přesných výsledků stačily 3 iterace. Podmínkou ukončení iterace je dosažení maximálního rozdílu teplot mezi iteracemi 1 K.

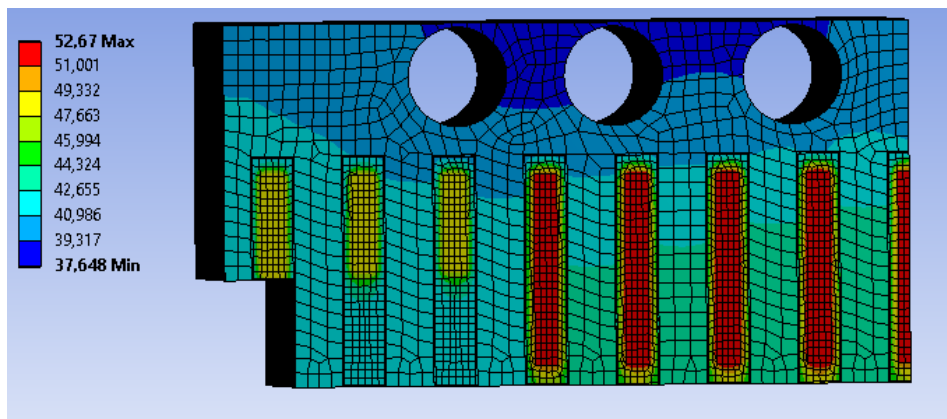
Stejný postup se poté zopakuje pro okolní teplotu 30 °C a teplotu vody 30 °C. Je nutné také přepočítat koeficienty nucené konvekce, protože jsou teplotně závislé. Stejně tak je nutné v simulacích přenastavit všechny teploty na teplotu okolí 30 °C.

Výsledek ze simulace je možné vidět na následujících obrázcích. Z obr. 5-16 a obr. 5-17 je patrné rozložení teplot v LEM. Nejvyšší teploty dosahovalo logicky vinutí, ve kterém se vytváří největší ztrátové teplo. Nejchladnější místo je uprostřed horní části poloviny LEM, kde se kombinují dohromady účinky nucená konvekce vzduchu a vody.



Obr. 5-16 Výsledná teplota zjednodušené části motoru pro teplotu okolí 20 °C

Výsledek druhé simulace pro 30 °C je na následujícím obrázku, viz obr. 5-17. Lze téměř konstatovat, že pouze došlo pouze k posunutí všech teplot o 10 °C.



Obr. 5-17 Výsledná teplota zjednodušené části motoru pro teplotu okolí 30 °C

Výsledky průměrných teplot ze druhé simulace pro teplotu okolí a vody 20 °C jsou uvedeny v následující tabulce, viz tab. 11.

Tab. 11 Výsledek metody konečných prvků pro teplotu chladicí vody a okolí 20 °C

Umístění	Měď	Epoxid	Izolační papír	Jho	Sekundární díl
Teplota [°C]	41,4	36,5	33,1	31,4	48,2

Výsledky ze druhé simulace pro teplotu okolí a vody 30 °C jsou uvedeny v následující tabulce, viz tab. 12.

Tab. 12 Výsledek metody konečných prvků pro teplotu chladicí vody a okolí 30 °C

Umístění	Měď	Epoxid	Izolační papír	Jho	Sekundární díl
Teplota [°C]	51,1	46,4	42,9	41,0	56,5

5.7 Porovnání výsledků

V této kapitole jsou srovnány výsledky mezi analytickou metodou a metodou konečných prvků simulovanou v prostředí Ansys Workbench. Srovnání je možné vidět v následujících tabulkách, viz tab. 13 pro 20 °C a tab. 14 pro 30 °C.

Tab. 13 Srovnání pro teplotu okolí 20 °C

Teplota okolí 20 °C	Analytická metoda	Metoda konečných prvků	Absolutní chyba	Relativní chyba
Jednotka	[°C]	[°C]	[K]	[%]
Měď	43,1	41,4	1,7	4,1
Epoxid	37,7	36,5	1,2	3,3
Izolační papír	26,2	33,1	-4,9	-14,8
Jho	25,2	31,4	-6,2	-19,7
Sekundární díl	45,2	48,2	-3,0	-6,2

Srovnání metod pro teplotu okolí a vody 30 °C je uvedeno v tab. 14.

Tab. 14 Srovnání pro teplotu okolí 30 °C

Teplota okolí 30 °C	Analytická metoda	Metoda konečných prvků	Absolutní chyba	Relativní chyba
Jednotka	[°C]	[°C]	[K]	[%]
Měď	53,7	51,1	2,6	5,1
Epoxid	48,7	46,4	2,3	5,0
Izolační papír	36,2	42,9	-6,7	-15,6
Jho	34,1	41,0	-6,9	-16,8
Sekundární díl	57,3	56,5	0,8	1,4

Jak je možné z tab. 13 a tab. 14 vidět, tak analytická metoda dosahuje relativně dobrých výsledků se srovnáním s metodou konečných prvků. Největší odchylka nastává v teplotě jha. To je způsobené tím, že analytická metoda neuvažuje zuby motoru. Zuby motoru se zahřívají mnohem více než svrchní část jha. To je způsobené horším chlazením. Nicméně i přesnost metody konečných prvků je tady zatížena chybou, a to zjednodušením tvaru drážek do pravoúhlé podoby. Pro zlepšení výsledků analytické metody bylo vhodné jho rozdělit do více částí. Tím by se značně zlepšila přesnost metody pro výpočet teploty jha.

6. ZÁVĚR

Tato diplomová práce navazuje na bakalářskou práci [21], která se zabývala výpočtem magnetického toku v LEM pomocí metody odporové sítě. Tato diplomová práce na stejný LEM aplikuje metodu odporové sítě pro výpočet tepelných poměrů.

Začátek diplomové práce se věnuje stručnému představení lineárních motorů. Začíná stručným popisem historie LEM, jeho obecných výhod a nevýhod. Jako jeden z největších problémů současných LEM je jejich relativně vysoká cena. To je způsobeno malým výrobním množstvím těchto motorů. Naopak největší výhodou LEM je absence mechanického převodu k dosažení posuvného pohybu. To je velká výhoda zvláště pro aplikace, kde je vyžadována velká přesnost a kompaktnost pohonu. Dále se práce zabývá příslušenstvím LEM. Protože LEM je relativně nová záležitost, tak není nijak unifikované její dělení, rozdělení LEM použité v této práci vychází z disertační práce [11]. Ve 3. kapitole je uveden podrobný popis lineárního synchronního motoru se železným jádrem.

Prvním úkolem diplomové práce byl teoretický základ tepelných jevů v materiálech, to je uvedeno ve 4. kapitole. Je zde uveden popis konvekce, kondukce a radiace. Všechny tyto formy přestupu tepla jsou uplatňovány při provozu LEM. Jejich znalost je nezbytný předpoklad pro tvorbu tepelné sítě LEM se železným jádrem.

Druhým úkolem bylo seznámení s tvorbou tepelných sítí. Popis tvorby tepelné sítě je uveden v 5. kapitole této práce. Zkoumaný motor byl lineární synchronní motor LSE10W od firmy Baumüller. Všechny parametry simulace odpovídají skutečným hodnotám motoru. Na základě rešerše bylo zjištěno, že tepelný návrh LEM se železným jádrem a s vodním chlazením je velmi komplexní záležitost a není mnoho vědeckých publikací, které by se zabývaly touto problematikou. Do modelu vstupuje velmi mnoho proměnných, které se dají stanovit jen obtížně a je nutné hodně z nich odhadovat. Při tvorbě tepelného modelu bylo převážně postupováno v souladu s teoretickými poznatky obsaženými ve vědecké publikaci [16]. Princip metody odporové sítě, která simuluje tepelné poměry v LEM, je v rozdělení motoru na segmenty a pak rozdělit ty na elementy. LEM s železným jádrem má dva základní segmenty, a to primární a sekundární díl. Tyto segmenty poté rozdělíme na jednotlivé elementy. Vhodnou volbou odporové sítě a jejich parametrů je možné získat velmi přesné informace o tepelných poměrech v LEM.

Třetím úkolem diplomové práce bylo samotné provedení výpočtu odporové sítě. To bylo realizováno v programu Matlab a Simulink. Za využití knihovny Simscape je vymodelování takovéto odporové sítě velmi intuitivní a jednoduché. Ve výpočtu je nutné provést iterace, viz obr. 5-8. Výsledky analytické metody jsou uvedeny v tab. 9 pro teplotu okolí 20 °C a v

výsledky analytické metody pro teplotu 30 °C jsou uvedeny v tab. 10.

tab. 10 pro teplotu okolí 30 °C.

Další část práce se následně zabývá ověřením výsledků analytické metody pomocí simulace v programu Ansys Workbench. Ta musela být rozdělena do čtyř částí, kvůli omezené školní licenci. Simulace byla rozdělena na tepelnou simulaci primární části, tepelnou simulaci sekundární části, výpočet koeficientu nucené konvekce chladicí vody a výpočet nucené konvekce okolního vzduchu. Opět bylo nutné provést iteraci pro dosažení správných hodnot, viz obr. 5-12. Srovnání teplot jednotlivých částí LEM je možné vidět v tab. 13 a srovnání metod pro teplotu okolí a vody 30 °C je uvedeno v tab. 14.

tab. 14. Hodnoty dosahují relativně dobré přesnosti, až na teplotu izolačního papíru a jha. Tam je odchylka až 6,9 K. Tato velká odchylka u teploty jha je dána tím, že analytická metoda neuvažuje zuby motoru. Zuby motoru se zahřívají mnohem více než vrchní část jha, a to kvůli horšímu chlazení. Proto je teplota jha v analytické metodě nižší.

Porovnání výsledků ukázalo, že metoda tepelné sítě může být dobrý nástroj pro návrh elektrických strojů. Velkou výhodou této metody je její rychlý a relativně přesný výpočet ve srovnání s MKP. Velkou nevýhodou této metody je její obtížná konstrukce a doladění. Tvorba tepelné sítě není uživatelsky přívětivá a je těžké v ní odhalit chybu, případně výrazně změnit atributy motoru.

LITERATURA

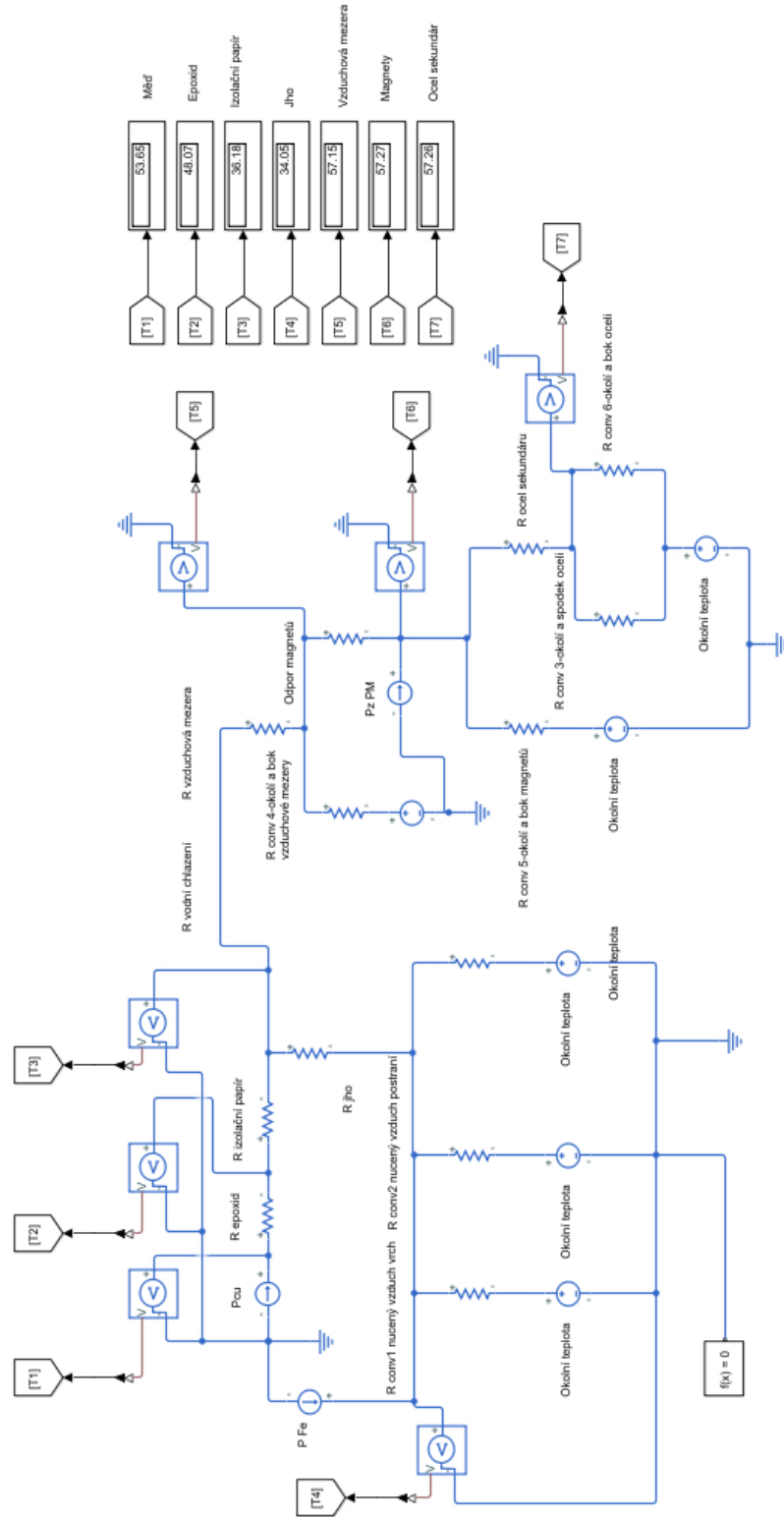
- [1] GIERAS, Jacek a Zbigniew PIECH. *Linear synchronous motors: transportation and automation systems*. Boca Raton, Fla: CRC Press, 1999. ISBN 08-493-1859-9.
- [2] HOLUB, Gustav. Přímé lineární motory – ano, či ne?. *ELEKTRO*. 2011, **2011**(06), 55.
- [3] HELLINGER, R. a P. MNICH. Linear Motor-Powered Transportation: History, Present Status, and Future Outlook. *Proceedings of the IEEE* [online]. USA: IEEE, 2009, **97**(11), 1892-1900 [cit. 2017-09-22]. DOI: 10.1109/JPROC.2009.2030249. ISSN 0018-9219. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/document/5280196/>
- [4] Linear motor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2017-09-25]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_motor
- [5] ROMAN, Jan. *Řízení lineární pohonů HIWIN* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014 [cit. 2017-09-19]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/33337>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Pavel Houška.
- [6] Lineární motory. In: *Http://www.vues.cz* [online]. [cit. 2017-09-30]. Dostupné z: http://www.vues.cz/file/424/CZ_LIN-OBECNE_020909.PDF
- [7] BARRETT, Jack, Tim HARNED a Jim MONNICH. Linear motor basics. In: *Parker Hannifin Corporation* [online]. [cit. 2017-10-05]. Dostupné z: <http://www.parkermotion.com/whitepages/linearmotorarticle.pdf>
- [8] Trilogy Linear Motor & Linear Motor Positioners. In: *Parker Hannifin Corporation* [online]. 2007 [cit. 2017-10-08]. Dostupné z: http://www.parkermotion.com/pdfs/Trilogy_Catalog.pdf
- [9] CHALOUPKA, Roman. *Návrh řízení osy s lineárním motorem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2015.

- [10] Dimensioning of linear motors. In: *Beckhoff* [online]. 2016 [cit. 2017-10-08].
Dostupné z: https://download.beckhoff.com/download/document/motion/al2000_dimensioning_en.pdf
- [11] CHEVAILLER, Samuel a Marcel JUFER. *Comparative study and selection criteria of linear motors*. Lausanne: EPFL (Lausanne), 2006. DOI: 10.5075/epfl-thesis-3569.
- [12] STAMPFLI, Herve. Linear motor applications: Ironcore versus Ironless Solutions. In: *Control design* [online]. Schaumburg: Putman media, 2005 [cit. 2017-11-04].
Dostupné z: https://www.controldesign.com/assets/Media/MediaManager/wp_035_etel_thompson.pdf
- [13] MACHÁČKOVÁ, Adéla. *Sdílení tepla a proudění: učební text*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN isbn978-80-248-2576-2.
- [14] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané stati z výkonové elektroniky: Svazek I. Tepelné jevy, činný výkon*. 3. vyd. Brno: VUT, 2000, 61 s. ISBN 80-214-1736-6.
- [15] Teplotní záření a Planckův vyzařovací zákon: Učební text k přednášce UFY102. In: *Jaroslav Hamrle* [online]. [cit. 2019-12-03]. Dostupné z: <http://alma.karlov.mff.cuni.cz/ufy102/Planckuv%20zakon.pdf>
- [16] LU, Qinfen, Xinmin ZHANG, Yi CHEN, Xiaoyan HUANG, Yunyue YE a Z. ZHU. Modeling and Investigation of Thermal Characteristics of a Water-Cooled Permanent-Magnet Linear Motor. *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. IEEE, 2015, **51**(3), 2086-2096 [cit. 2020-01-02]. DOI: 10.1109/TIA.2014.2365198. ISSN 0093-9994.
- [17] KOPECKÁ, Ivo. *Rozptylové ztráty v magnetických materiálech na konci statorového svazku*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
- [18] TOMAN, Marek. *Vázané modelování asynchronního motoru metodou fyzikálního modelování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2015, 63 listy + 1 CD-ROM. Diplomová práce. VUT.

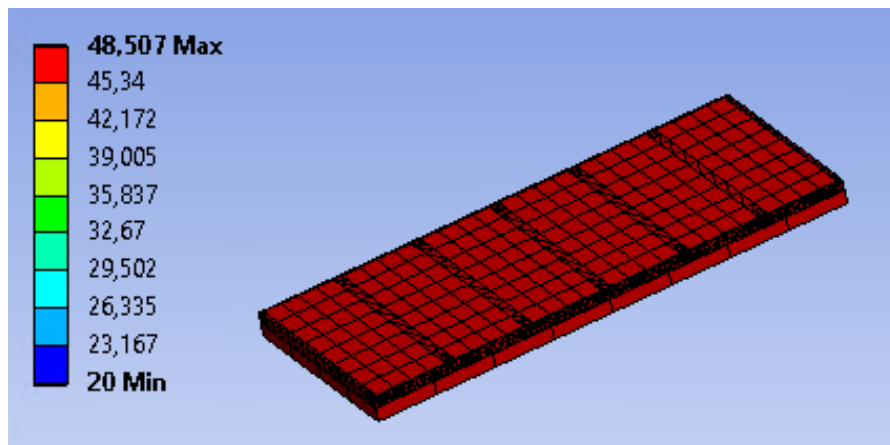
- [19] Properties of Air at atmospheric pressure. *The Engineering Mind Set* [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://theengineeringmindset.com/properties-of-air-at-atmospheric-pressure/>
- [20] KOLAJA, Adam. *Výpočtové a experimentální modelování přímého chlazení statorového vinutí synchronního motoru vodou*. 2008. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2008.
- [21] ČECH, Jan. *Návrh lineárního motoru s permanentními magnety*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018, 50 listů : ilustrace + 1 CD-ROM. Bakalářská práce. VUT.

Seznam příloh

Příloha 1 Ukázka analytického modelu v Matlab Simulink



Příloha 2 Teplotní simulace sekundárního dílu 20 °C



Příloha 3 Teplotní simulace sekundárního dílu 30 °C

