



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

VÝPOČET ZATÍŽENÍ ELEKTRICKÉHO POHONU BRÁNY

CALCULATION OF LOAD ON THE ELECTRIC DRIVE OF THE GATE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Daniel Randa

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Marcel Janda, Ph.D.

BRNO 2019



Diplomová práce

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

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Daniel Randa

ID: 161794

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Výpočet zatížení elektrického pohonu brány

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s konstrukcí pohonů pro posuvné brány.
2. Určete zdroje mechanického zatížení tohoto pohonu.
3. Vypočítejte zatížení pohonu brány pro konkrétní případ pomocí metody konečných prvků.
4. Výpočty proveďte pro více typů zatížení brány.
5. Výsledky vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MIČKAL, Karel. Technická mechanika I: pro střední odborná učiliště a střední odborné školy. 4., nezměn. vyd. Praha: Informatorium, 2008. ISBN 978-80-7333-063-7.

[2] DROZDA, Jiří. Příručka ANSYS Workbench. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2012. ISBN 978-80-01-05175-7.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 22.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Marcel Janda, Ph.D.

Konzultant:

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 zabývá konstrukcí pohonů pro samonosné brány. Respektive jsou zde rozebrány hlavní části, z kterých je pohon složen. Dále jsou zde řešeny hlavní body zatížení, které vznikají na samonosné bráně a jejím kontaktem s vodícími, nosnými a pohybovými prvky. Je zde také vysvětleno, co je třeba u pohonu hlídat, aby vyhověl pro daná zatížení, které všechny zhoršují rozpohybování konstrukce. V práci jsou také uvedeny základní typy výpočtů zatížení, kterými si můžeme parametry pohonu ověřit, zda vyhoví pro danou aplikaci.

Klíčová slova

samosná brána, motor, převodovka, kryt, pohon pro posuvné brány, konstrukce, nosné vozíčky, pojezdový profil, pracovní cykly, zatížení, hřeben, pastorek. síla

Abstract

This thesis deals with the construction of drives for self-supporting gates. The main parts from which the drive is folded are not discussed here. In addition, the main points of load are solved which arise on the self-supporting gate and its contact with the guiding, carrying carts and movement elements. And here is explained what needs to be taken care of by the drive to accommodate the loads, which all aggravate the movement of the structure. in the work are also presented the load types of load calculations by which the drive parameters can be checked for suitability for the application.

Keywords

self-supporting gate, engine, gearbox, case, electro-mechanical sliding gate operator, construction, carrying carts, slide profile, working cycles, load, comb, pinion. force

Bibliografická citace:

RANDA, Daniel. Výpočet zatížení elektrického pohonu brány. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119700>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Marcel Janda.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Výpočet zatížení elektrického pohonu brány jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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 **22. 5. 2019**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Marcelovi Jandovi, Ph.D.za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne **22. 5. 2019**

.....

podpis autora

Obsah

1	Úvod	1
2	Konstrukce pohonu brány.....	2
2.1	Motor pohonu pro posuvné brány	2
2.2	Asynchronní motor	2
2.3	BLDC motor.....	3
2.3.1	Hallova sonda	3
2.4	Převodovka	4
2.5	Montážní a seřizovací prvky.....	5
3	Zdroje mechanického zatížení na pohon.....	6
3.1	Mechanické zatížení pojezdových vozíčků	6
3.2	Mechanické zatížení na vodících prvcích	7
3.3	Mechanické zatížení na hřebenu brány	8
3.4	Klimatické vlivy zvyšující zatížení pohonu.....	9
4	Zatížení pohonu pro konkrétní případ.....	10
4.1	Výpočet hmotnosti konstrukce samonosné brány	10
4.2	Výpočty zatížení konstrukce samonosné brány na pohon	11
4.3	Vybraný sériově vyráběný pohon pro model brány	14
5	Rozbor a konstrukce synchronních strojů s PM.....	15
5.1	Provedení konstrukce	17
5.2	Provedení a navrhování statoru	18
5.3	Provedení a navrhování rotoru.....	19
5.3.1	Varianta s magnety na povrchu.....	20
5.3.2	Varianta se zapuštěnými magnety	20
5.3.3	Varianta s vnořenými magnety.....	20
5.4	Typy používaných permanentních magnetů	22
5.4.1	Feritové magnety	22
5.4.2	AlNiCo magnety	23
5.4.3	SmCo magnety	23
5.4.4	NdFeB magnety.....	23
5.5	Statorové vinutí u synchronních strojů s PM.....	24
5.6	Vinutí rozložené	26
5.6.1	Smyčkové vinutí	26
5.6.2	Vlnové vinutí.....	27
5.7	Vinutí soustředěné	27
5.7.1	Vinutí soustředěné jednovrstvé	28
5.7.2	Vinutí soustředěné dvouvrstvé	28
6	Výpočty zatížení pomocí MKP	29

6.1	Metoda konečných prvků	29
6.2	Vytvoření modelů	29
6.3	Nastavení analýzy ve Workbench	31
6.4	Vyhodnocení výsledků.....	35
7	Návrh BLDC motoru	36
8	ZÁVĚR.....	47
	Literatura	49
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	51

Seznam obrázků

Obrázek 1: Náčrtek principu Hallova jevu [4].....	3
Obrázek 2: Šnekové soukolí pohonu.....	4
Obrázek 3: Pojezdový vozíček s rámem brány	7
Obrázek 4: Vodící sloup s válečky a rám brány	8
Obrázek 5: modelové zobrazení pohonu a hřebenu na rámu brány.....	9
Obrázek 6: Závislost životnosti v pracovních cyklech na indexu provozního zatížení	12
Obrázek 7: Možnosti uložení permanentních magnetů na rotoru [12]	21
Obrázek 8: Demagnetizační charakteristika jednotlivých PM.....	24
Obrázek 9: Rozložené smyčkové vinutí [12]	26
Obrázek 10: Rozložené vlnové vinutí [12]	27
Obrázek 11: 1) jednovrstvé soustředěné vinutí, 2) dvouvrstvé soustředěné vinutí [12].....	28
Obrázek 12: Ukázka modelu brány - výška 2000 mm, plaňky, zavřená	30
Obrázek 13: Ukázka modelu brány - výška 1019 mm, jakly, otevírající.....	30
Obrázek 14: Orientační zobrazení parametrů statorového plechu	38
Obrázek 15: Ukázka magnetizační charakteristiky pro PM N35SH [17]	39
Obrázek 16: Orientační náčrtek rotoru s PM na povrchu rotoru	46

Seznam tabulek

Tabulka 1: Váhových koeficientů profilů a konstrukce [6]	11
Tabulka 2: Omezení v závislosti na délce brány [6]	12
Tabulka 3: Omezení v závislosti na hmotnosti brány [6]	12
Tabulka 4: Technické parametry zvoleného sériově vyráběného pohonu [6].....	14
Tabulka 5: Srovnání hodnot pro varianty bran s výškou 2000 mm, zavřená, 10 m·s ⁻¹	33
Tabulka 6: Srovnání hodnot pro varianty bran s výškou 1019 mm, zavřená, 10 m·s ⁻¹	33
Tabulka 7: Srovnání hodnot pro varianty bran s výškou 2000 mm, otevírání, 10 m·s ⁻¹	33
Tabulka 8: Srovnání hodnot pro varianty bran s výškou 1019 mm, otevírání, 10 m·s ⁻¹	33
Tabulka 9: Srovnání hodnot pro varianty bran s výškou 2000 mm, zavřená, 30 m·s ⁻¹	34
Tabulka 10: Srovnání hodnot pro varianty bran s výškou 1019 mm, zavřená, 30 m·s ⁻¹	34
Tabulka 11: Srovnání hodnot pro varianty bran s výškou 2000 mm, otevírání, 30 m·s ⁻¹	34
Tabulka 12: Srovnání hodnot pro varianty bran s výškou 1019 mm, otevírání, 30 m·s ⁻¹	34

1 ÚVOD

V dnešní době je velkým trendem automatizační technika. Tento trend platí i v oblasti vjezdů řešených pomocí automatizovaných bran, vrat nebo závorových systémů. Všechny z těchto řešení pro plynulý průjezd do objektu nebo z objektu ven potřebují pro svůj vykonávaný pohyb otevírání případně zavírání pohon. Tyto pohony se konstrukčně velmi liší dle jejich aplikace.

Jak je výše zmíněno, konstrukce se velmi liší i v případě omezení na oblast vjezdových bran. Za základní dělení bran můžeme zvolit brány křídlové a pojezdové. Pro brány křídlové máme motory nadzemní a podzemní a nově i motory zabudované do rámu brány. U pojezdových bran, které jsou předmětem řešení této práce, jsou nejčastěji používány pouze motory nadzemní.

V první části této práce je předmětem tématu samotné konstrukční zpracování pohonů používaných pro pohyb pojezdových bran. Tyto pohony vyrábí spousta výrobců především zahraničních firem. Každý používá jiné typy motorů. Konkrétně jde o motory jednofázové asynchronní s rozběhovými kondenzátory nebo BLDC motory. Obě tyto řešení obsahují převodovou skříň řešenou pomocí šnekového soukolí a řídicí jednotku.

Dalším zaměřením této práce je určení možných zdrojů, které způsobují mechanické zatížení samotného pohonu. Samozřejmě na takovém mechanickém zařízení je spousta takových zdrojů, které se mohou objevit jen za určitých podmínek nebo s větším opotřebením, které je dané používáním v provozu. Dále konkrétně třeba použitím vozíčků a pojezdových profilů které nelze reálně vyrobit naprosto přesně stejné, a proto vznikají různé vůle. Musíme tedy počítat se stálými mechanickými zatíženími a vlivy, které se projeví vždy. Výsledná zatížení v podobě působící síly na pohon budou vypočítávána pomocí metody konečných prvků v prostředí Workbench za pomoci analýzy CFX. Ve které bude zkoumáno několik různých variant ocelových konstrukcí vymodelovaných do podoby brány.

V posledním úkolu práce bude řešen návrh BLDC motoru dimenzovaný na zatížení získané s výše provedené analýzy CFX, aby dokázal pohybovat i s konstrukcí, pro kterou byla získána nejvyšší hodnota zatěžovací síly na pohon.

2 KONSTRUKCE POHONU BRÁNY

Pohon pro posuvné brány má jako základní součásti konstrukce, které se vyskytují u všech pohonů. Základem pohonu je samotný motor, na jehož hřídel navazuje šnekové kolo. Na šnekové kolo poté navazuje převodovka se spojkou. Celé ústrojí je uloženo a přišroubováno do ocelového krytu, který je spojen s kotevní deskou. Dalšími součástmi jsou jednotlivá plastová pouzdra pro součásti jako například napájecí trafo v případě bezkartáčových motorů a u jednofázových asynchronních motorů je v pouzdru uložen rozběhový kondenzátor. Dále je v krytu řídicí elektronika s programovatelnou jednotkou. K elektronice je pomocí vodičů napojena přípojnice na přivedení vodičů od fotobuněk, lampy, anténa a vodiče od napájecí sítě případně od záložního zdroje. Vše je pak přikryto plastovým krytem, který prezentuje výrobce pohonu. V krytu je otvor na pastorek, pomocí kterého se pak přes hřeben přišroubovaný na rámu brány uvádí brána do pohybu. V krytu je taktéž vyveden otvor pro klíč pro odblokování pohonu v případě výpadku elektrické energie.

2.1 Motor pohonu pro posuvné brány

Jak bylo již výše zmíněno motory používané v pohonech pro posuvné brány mohou být různé. Jednou z variant je asynchronní motor, a to buď trojfázový nebo jednofázový anebo BLDC motor. Asynchronní motory trojfázové se používají pro nejtěžší a největší brány. Případnou výjimkou může být nadměrná četnost otevírání a zavírání u objektu, u kterého je pohon použit pro danou bránu.

2.2 Asynchronní motor

U asynchronních motorů trojfázových je díky třem fázím, které jsou od sebe vzájemně posunuty o 90 stupňů, vytvořeno točivé magnetické pole. Jedná se o kartáčové motory.

V případě jednofázových motorů je třeba k nim připojovat rozběhové kondenzátory, protože motor díky napájení z jedné fáze není schopen vytvořit točivé magnetické pole, a proto je třeba zapříčinit fázový posun. [3]

2.3 BLDC motor

Jedná se o motor tzv. bezkartáčový, jak plyne z anglického brushless a DC, protože je napájený ze stejnosměrného napětí. Jedná se o motorky s elektronickou komutací. Odpadá zde tedy nutnost údržby v případě opotřebení kartáčů, komutátoru a problém s kluzným kontaktem. [5]

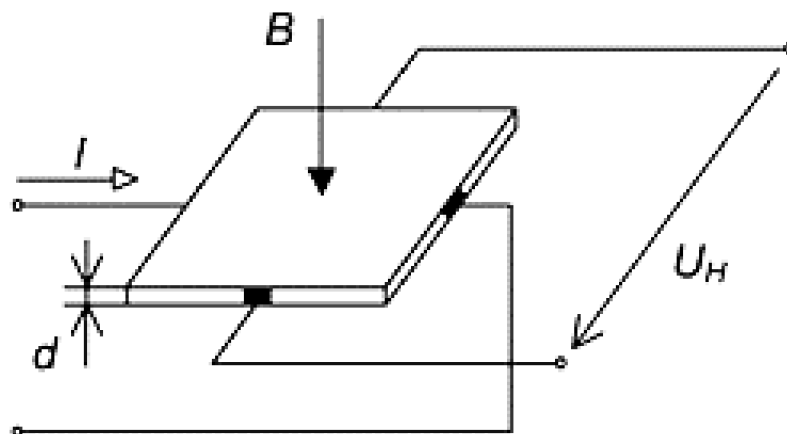
Konstrukce BLDC motoru je podobná jako u ostatních elektromotorů ale liší se především řešením rotoru, na kterém jsou umístěny permanentní magnety vyrobených z kovů vzácných zemin. Stator je řešený pomocí vinutí. Dále se motor liší především řešením hlídání polohy rotoru, kdy je zde oproti mechanickému komutátoru využito elektrické snímání polohy.

Elektronickou komutaci mají u BLDC motorku na starosti Hallovy sondy. Pomocí, kterých snímáme polohu rotoru. [5]

2.3.1 Hallova sonda

Hallova sonda je hlavní a nejdůležitější součástí snímače, který slouží pro snímání polohy rotoru u BLDC motoru. Tato sonda je založena na Hallovém jevu. Tento jev vzniká v důsledku Lorentzovy síly, když tato síla působí na náboj, který se pohybuje v magnetickém poli. [1]

Jev Lorentzovy síly můžeme vypočítat na elektricky vodivé destičce kterou prochází v podélném směru proud a kolmo na plochu působí magnetická indukce B viz. obrázek 1. Vzájemným působením elektrického a magnetického pole dochází k rozdělení nosičů náboje na jednu a na druhou stranu. Tím je zapříčiněn vznik tzv. Hallova napětí. Hallovo napětí je hodně malé, takže se snadno může zkreslit případným šumem. Velikost tohoto napětí se pohybuje v řádu do 30 mV. [1]



Obrázek 1: Náčrtek principu Hallova jevu [4]

2.4 Převodovka

Převodovek existuje několik druhů a typových provedení pro danou aplikaci a pohyb, na který je třeba upravit s převodováním na jinou úhlovou rychlost a jiný točivý moment rotačního pohybu.

Nejčastěji montovanými převodovkami jsou:

- čelní převodovka
- kuželočelní převodovka
- šneková převodovka
- planetová převodovka

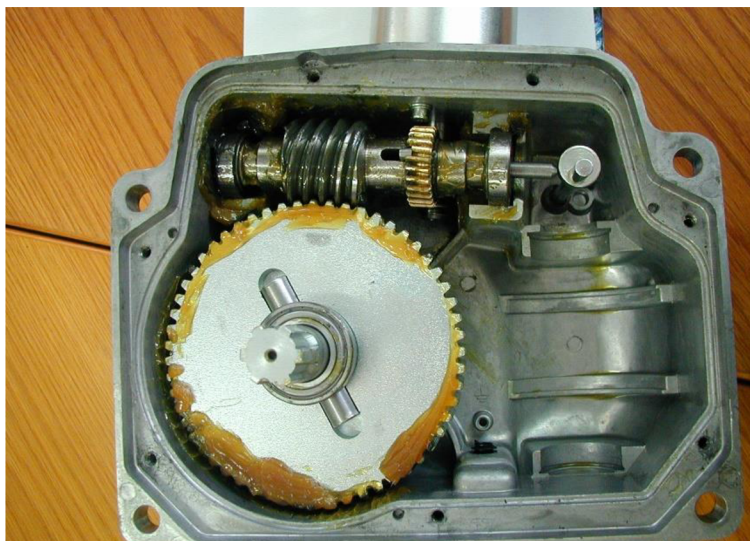
[2]

V případě pohonu pro pojezdovou bránu je používána šneková převodovka. Šneková převodovka nebo také šnekové soukolí je mezi převodovkami nejpoužívanější, protože se jedná o velmi efektivní řešení převodu pohybu do úhlu. Jedná se o samosvornou převodovku. Výraznou výhodou převodovky vzhledem k aplikacím, kde se dá využít, je nízká cena. Tuto převodovku také v případě potřeby můžeme jakkoli kombinovat s jinými typy převodovek, pokud je tedy třeba velice vysokého převodového poměru. Výhodami šnekové převodovky tedy jsou:

- velký převodový poměr
- nízká hmotnost a menší rozměr oproti jiným řešením
- samosvornost
- plynulost a tichost při chodu
- velká zatížitelnost

[2]

Jako nevýhodu můžeme vnímat například nižší účinnost pohybující se v rozmezí 45 až 60 procent, a s tím související nevýhodu, že s nižší účinností vzniká teplo, které je třeba odvádět dobrým mazivem. [2]



Obrázek 2: Šnekové soukolí pohonu

2.5 Montážní a seřizovací prvky

V této kapitole shrneme všechny ostatní prvky, ze kterých je konstrukce pohonu pro posuvnou bránu složena, ať už na první pohled viditelně nebo pod krytem.

Montážními prvky je myšlena kotevní deska s otvory pro napájecí kabely. Otvory musí být dost široké, protože kabeláž se přivádí v ochranných vroubkovaných hadicích zvaných také jako "husí krk". Kotevní deska je vyrobena z oceli a je povrchově upravena galvanickým pozinkem. Základní kotevní desku je často modifikovat tak, aby pastorek motoru měl dostatečný kontakt s hřebenem brány (viz. obrázek 2). Dalším montážním prvkem je forma z tvrdého plastu uzpůsobená na všechny prvky pohonu ať už napájecích, řídicích, anebo samotný motor a převodovku. Tato montážní forma je přichycena ke kotevní desce pomocí imbusových šroubů.

V případě seřizovacích prvků se jedná o šroub sloužící k úpravě momentu pohonu. K těmto prvkům můžeme přidat také šroub sloužící k odblokování pohonu. U některých pohonů můžeme najít místo normálního transformátoru autotransformátor, který je třeba nastavit v případě, že pohon z jakéhokoliv nepředpokládaného vnějšího vlivu nemá dobrý rozběh. [6]

Dalšími prvky jsou:

- řídicí elektronika a koncový spínač
- přípojnice s vodiči od transformátoru motoru a řízení
- spojovací materiál
- plastové kryty
- ložiska

3 ZDROJE MECHANICKÉHO ZATÍŽENÍ NA POHON

Na úvod této kapitoly je třeba zmínit že není zcela možné určit všechny působící zdroje mechanického zatížení na pohon. To je především tím, že pro pohon není vždy stejná poloha umístění stejné okolí a stejně tak samotná konstrukce brány se vždy liší ať už je to použitými pojezdovými profily nebo typem zvolených vozíčků které slouží jako nosné a umožňují pohyb brány. Některé menší zatížení můžeme zanedbat, protože nemají takový vliv na zatížení motoru tak podstatnou velikostí, aby pohon v případě konstrukce brány nebyl dostačující, ale můžeme určit mechanická zatížení, které se vyskytnou vždy a jsou značně výrazné v působení na výkonost stroje. Hlavní zdroje mechanického zatížení na pohon jsou:

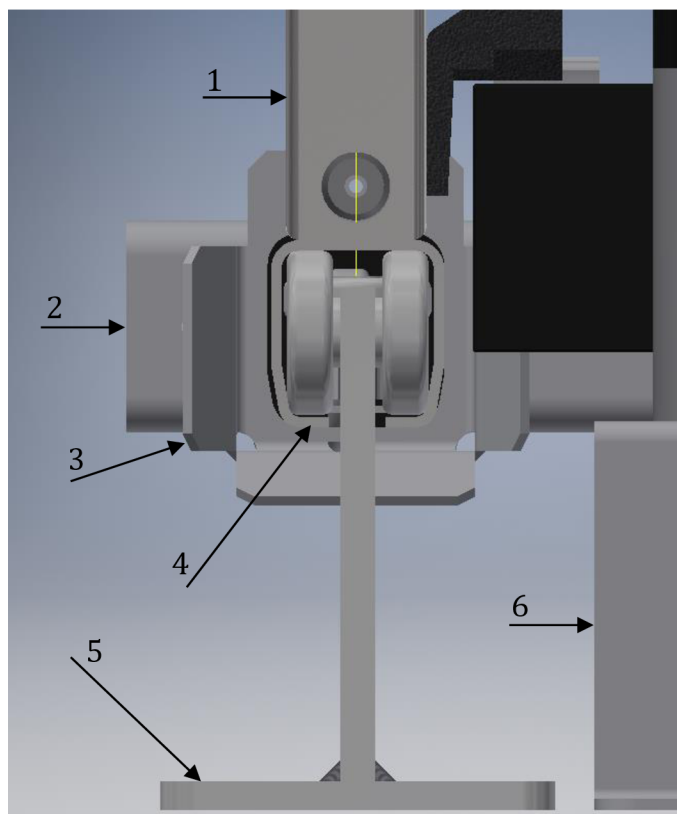
- pojezdové vozíčky a pojezdový profil
- vodící profil a součásti
- hřeben
- klimatické vlivy

Každý ze zmíněných bodů mechanických zatížení na pohon si detailně ukážeme v následujících podkapitolách na navrženém modelu pomocí programu Autodesk Inventor. U některých variant mechanických zatížení můžeme tyto zatížení snížit pomocí jiného konstrukčního řešení.

3.1 Mechanické zatížení pojezdových vozíčků

U vozíčků používaných pro pojezdové brány samonosné máme spoustu různých variant dle výrobců, kteří se zabývají výrobou a montáží těchto bran. Základním parametrem, který ale musí všechny vozíčky splňovat, je šířka na ložiskových uloženích dle profilů, ve kterých vozíčky jezdí. Tyto profily se liší dle průjezdové délky kterou musí samonosná brána uzavírat. Čím větší je průjezd tím větší a masivnější je i pojezdový profil jak v rozměrech šířky a výšky, tak i tloušťky profilu, a to z důvodu větší váhy brány a větší páky, která působí při otevírání a zavírání, než dosáhne svých koncových poloh.

Mechanické zatížení působí přímo v místě doteku ložiskových koleček a pojezdového profilu. V některých výjimečných situacích může docházet i k bočnímu tření mezi pojezdovým profilem a nosným vozíčkem. To z důvodu špatné výroby pojezdového profilu v ocelárně. Tento způsob tření také může způsobit případný poryv větru, pokud je výplň brány buď plná anebo hustá neboli její větrování je nízké.

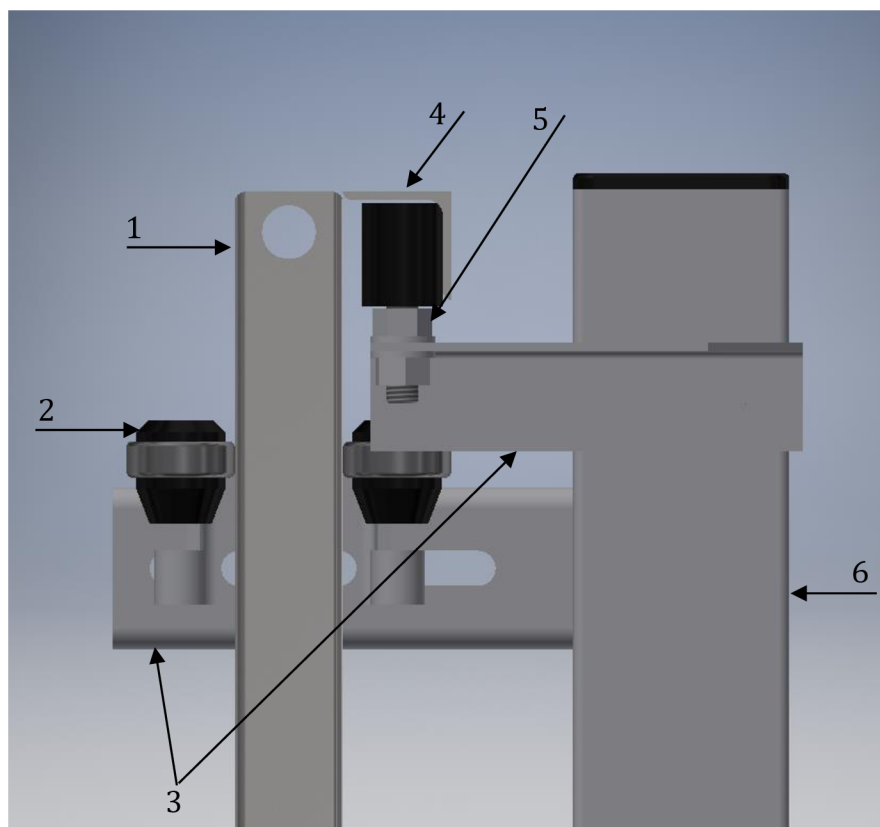


Obrázek 3: Pojezdový vozíček s rámem brány

1 – rám brány; 2 – pomocná konzole; 3 – dojezdová kapsa; 4 – pojezdový profil;
5 – nosné vozíčky; 6 – kotevní deska pohonu

3.2 Mechanické zatížení na vodících prvcích

V tomto případě je myšleno vedení pojezdové brány v horní části. K vedení se používá vodící sloup ze svařovaného dutého čtvercového profilu, na kterém jsou přišroubované ocelové konzoly, které drží tzv. vodící válečky. Vodící válečky je možné provést v několika provedeních. Nejběžněji používané jsou šroubované, kde hlavním vodícím materiálem a také nejlevnějším je plastový váleček další používanou variantou je mosazný váleček na šroubu a třetí nejběžnější je za použití ložiska. Poslední ložiskové provedení je neúčinnější vzhledem k mechanickému namáhání na pohon. Toto namáhání vzniká v kontaktu těchto vodících válečků a použitého vodícího profilu navařeného na rámu brány. Jako vodící profil se používají L profily nebo U profily dle obrázku 4.



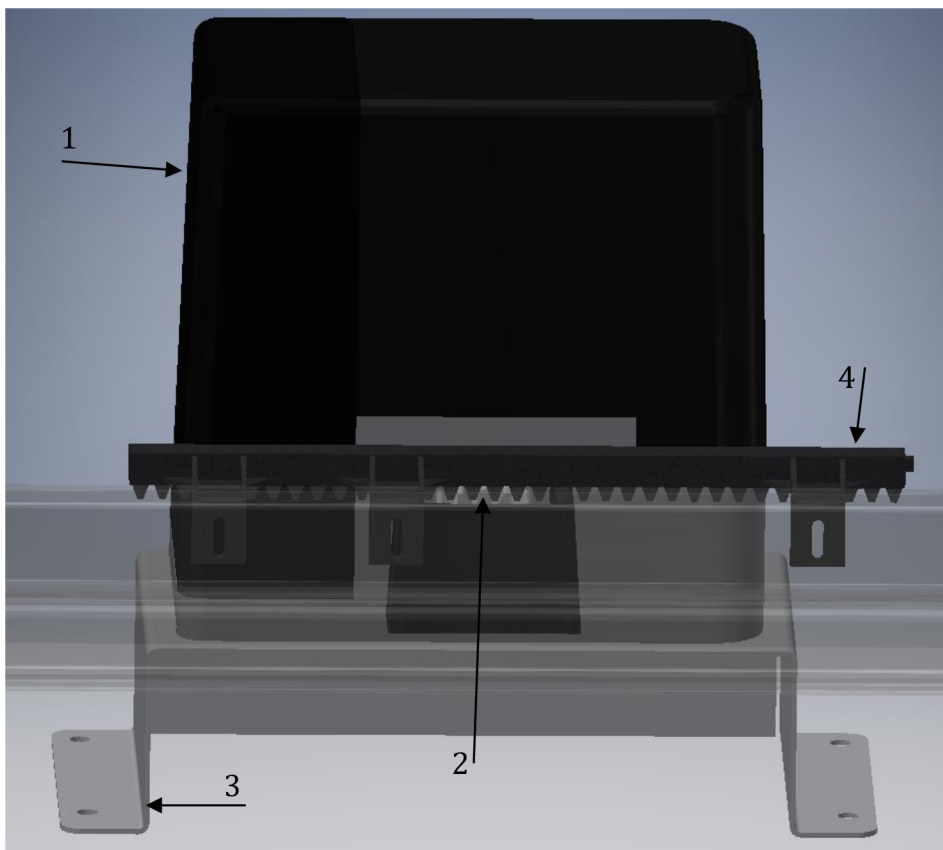
Obrázek 4: Vodící sloup s válečky a rám brány

1 – rám brány; 2 – horní doraz; 3 – pomocné konzole; 4 – vodící profil;
5 – vodící válečky; 6 – vodící sloup

3.3 Mechanické zatížení na hřebenu brány

Zatížení vzniká v místě styku pastorku na pohonu a přišroubovaného hřebenu na rámu brány. Hřebeny jsou různé podle instalace a konstrukce, na které budou namontovány k jejímu pohybu. Máme hřeben plastový s vnitřní kovovou výztuhou a pak celokovový hřeben. Plastový hřeben s vnitřní kovovou výztuhou je na konstrukce, na které stačí slabší pohon, tedy je vhodný pro nižší hmotnost oproti hřebenu celokovovému. Plastový hřeben s pohonem je na zobrazen modelu na obrázku 5. Ocelový hřeben je pro silné pohony, které musí pohybovat mohutnými konstrukcemi.

Ve výjimečných případech, kdy je pohon použit u brány, která jezdí na pozemku s větším stoupáním, zde přidáváme pomocnou mechanickou brzdu. Tato brzda pomáhá pohonu brzdit, protože brána zavírající se z kopce působí na motor s větším zatížením než stejná brána zavírající se na rovném povrchu.



Obrázek 5: modelové zobrazení pohonu a hřebenu na rámu brány
1 – pohon; 2 – pastorek; 3 – kotevní deska; 4 - hřeben

3.4 Klimatické vlivy zvyšující zatížení pohonu

V této kapitole zmíníme nejběžnější klimatické vlivy působící na bránu. Úplně nejčastějším klimatickým vlivem, který dokáže způsobit naprostou nefunkčnost pohonu co se týká pohybu s bránou je velká rychlost větru. Tento problém se především vyskytuje u bran s plnou výplní nebo u výplní které mají velkou hustotu vzoru s menším rozměrem v případě tahokovů nebo děrovaných plechů. Dalším případem může být i dřevěná výplň jakkoli orientovaná např. vodorovně nebo horizontálně s malými mezerami mezi jednotlivými deskami. Dalším případem klimatického vlivu zhoršující podmínky pohonu pro posuv brány je zimní období, kdy se často stává, že může zamrznat usazená voda v pojezdovém profilu nebo na hřebenu. Dalším problémem může být napadlý sníh, protože brána se nachází přibližně 50 – 70 mm nad zemí měřeno od terénu po pojezdový profil samonosné brány.

4 ZATÍŽENÍ POHONU PRO KONKRÉTNÍ PŘÍPAD

Zde se přímo zaměříme na řešení namodelované brány a přiřazení pohonu vzhledem k jejím parametrům. Parametry myslíme šířku a výšku průjezdu, kterou bude brána uzavírat. Z těchto parametrů se přímo odvíjí délka celé brány a také velikost profilů z jakých je třeba bránu svařit. Po tom, co jsou tyto parametry přesně určeny můžeme spočítat váhu konstrukce, ke které je třeba ještě připočítat váhu pojezdového profilu a poté určíme mohutnost vodičského systému a sloupu jako takového. Dojezdovou část v tuto chvíli nemusíme řešit. Pojezdový profil si určíme také až po zjištění celkové velikosti brány ovšem tento parametr ještě ovlivňuje četnost zavírání a otevírání neboli cyklů, které musí samonosná brána provést za hodinu. Právě tyto cykly nám mohou ovlivnit výběr daného pohonu dle jeho možného zatížení. Můžeme si tedy zvolit pohon vzhledem k váze brány, ale případný zvolený pohon který by vyhovoval na hmotnost konstrukce samonosné brány nám mohou změnit právě tyto cykly, které samonosná brána musí vykonat za hodinu.

4.1 Výpočet hmotnosti konstrukce samonosné brány

U namodelované samonosné brány máme určenu světlou šířku průjezdu 4 m a výšku 2 m, kterou brána musí u objektu uzavřít. Model brány je zhotoven z uzavřených svařovaných obdélníkových profilů s průřezem 60x40x3 mm a výplň tahokov z raženého plechu je chycena pomocí L profilů 40x40x3 a 20x20x3.

Celkový výpočet délky brány a její váhy je následující.

Výpočet délky samonosné brány:

$$d = \text{překryt} + \text{šířka otvoru} + 95 \text{ mm} = 1585 + 4000 + 95 = 5680 \text{ mm} \quad (4.1)$$

Označení d v rovnici 4.1 nám určuje celkovou délku brány. Překrytem je myšlen prostor brány, který je při stavu zavřené brány nosným bodem samonosné brány (část pod nosnými vozíčky). Šířka otvoru je zaměřený prostor pro uzavření. Konstanta v podobě 95 mm se připočítává jako rozměr sloužící pro dojezd brány, aniž by dojezdové prvky brány zasahovaly do prostoru průjezdu.

Výpočet celkové váhy konstrukce samonosné brány:

Tabulka 1: Váhových koeficientů profilů a konstrukce [6]

profil	[kg/m]	l [m]	m [kg]
Jekl 60x40x3	4,35	22,82	99,27
L 40x40x3	1,84	23,57	43,36
L 20x20x3	0,88	17,89	15,74
CP444	5,30	5,68	30,10
Tahokov	3ks	23,32 kg/ks	69,96
Celková váha			258,43
Zinkování	5 %	0,05	12,92
Výsledná váha			271,35

Z takto získané hmotnosti celé konstrukce i s povrchovou úpravou můžeme přistoupit k dalšímu bodu a tím je přiřazení nosných vozíčků. Ty je možné přiřadit dle pojezdového profilu označeného v tabulce 1 jako CP444 který je na konstrukce do hmotnosti 300 kg nebo průjezdu 4500 mm.

4.2 Výpočty zatížení konstrukce samonosné brány na pohon

Z výše získaných údajů můžeme přistoupit k navržení pohonu pro automatizaci brány tak, aby tento pohon vyhovoval zatížení, které bude konstrukce vyvíjet na zvolený pohon.

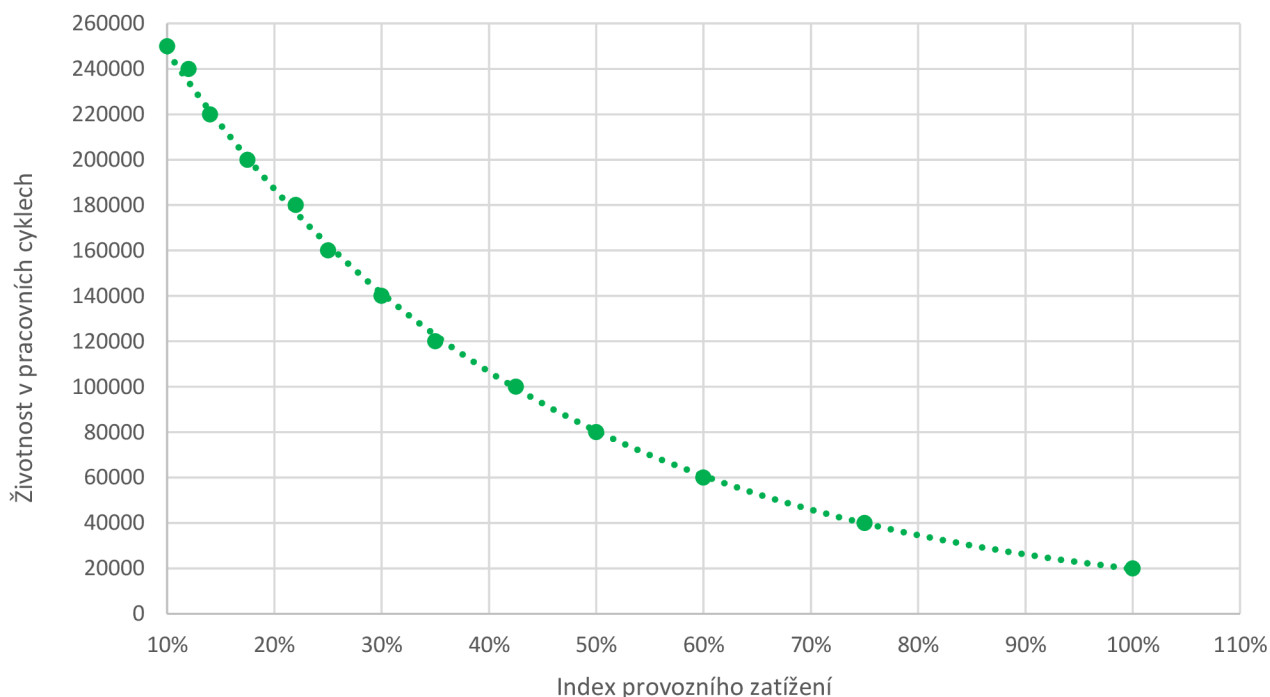
U pohonu je nejdůležitější co nejlépe si zjistit skutečné provozní podmínky. Tyto podmínky byly probrány v předchozích kapitolách. S těmito podmínkami musí být počítáno v případě určení síly, které je zapotřebí k uvedení samonosné brány do chodu a poté, aby v chodu vydržela po celé délce dráhy, kterou brána musí urazit k úplnému uzavření průjezdu. Tato síla by neměla překročit polovinu nominální hodnoty síly, kterou motor využívá k chodu brány ovšem již v rozpořehovaném stavu. K síle je vztažen kroutící moment, který musí pohon vyvinout k počátečnímu záběru, který uvede bránu do chodu a moment je definován u pohonu jako maximální kroutící moment. Nominální hodnota kroutícího momentu, který bránu pohybuje již v chodu je taktéž poloviční oproti maximálnímu a tuto hodnotu bychom při návrhu neměli překročit. Rezerva 50 procent nám zaručuje, že si pohon poradí i s případnými klimatickými podmínkami, protože například velmi nepříznivé povětrnostní podmínky nám mohou výrazně zhoršit tření. Také je třeba vzít v potaz pracovní cykly pohonu za hodinu a maximální počet jdoucích cyklů po sobě viz. tabulka 2, 3 a graf 1.

Tabulka 2: Omezení v závislosti na délce brány [6]

Délka křídla [m]	Max. počet cyklů/h	Max. počet cyklů jdoucích po sobě
Až 4	40	20
4 - 6	25	13
6 - 8	20	10
8 - 10		

Tabulka 3: Omezení v závislosti na hmotnosti brány [6]

Hmotnost brány [kg]	Procentuální počet cyklů [%]	Max. povolená rychlost
Až 200	100	Nejvyšší
200 - 400	80	Velmi vysoká
400 - 500	60	Vysoká
500 - 600	50	Střední
600 - 800		



Obrázek 6: Závislost životnosti v pracovních cyklech na indexu provozního zatížení

Graf 1 nám určuje celkovou teoretickou životnost která exponenciálně klesá se zatížením pohonu. Toto zatížení se procentuálně vztahuje na délku brány. Do hranice 4 m je to 10 procent, v rozsahu od 4 do 6 m se vztahuje 20 procent a 6 až 8 m je 35 %. Pro větší délky se u zvoleného pohonu životnost neurčuje. [6]

Výpočet tíhové síly: [7]

$$F_G = m \cdot g = 271,35 \cdot 9,81 = 2661,9 \text{ N}$$

Jedná se o sílu, kterou působí samonosná brána na pojezdové vozíčky po jejím usazení.

Výpočet třecí síly pro nominální stav: [7]

$$F_{T1} = f_1 \cdot F_G = 0,1 \cdot 2661,9 = 266,19 \text{ N}$$

Koeficient tření f_1 se může lišit i v případě dvou stejných vyrobených konstrukcí. Uvažujeme ho, ale přibližně 0,1, protože se předpokládá, že výroba a montáž konstrukce proběhne s určitými přesnostmi a projde patřičnou kontrolou před závěrečným usazením. Tím je myšleno například, že pojezdový profil projde kontrolou měření vnitřního rozměru ve, kterém se budou pohybovat nosné vozíky a také, že nosné vozíky při jejich montáži budou usazeny v zákrytu. Zjištěná hodnota třecí síly F_{T1} odpovídá pro nominální stav. Není zde počítáno se zvýšeným třením klimatických nebo jiných vlivů, které mají velký vliv na tření.

Výpočet třecí síly pro zhoršené tření klimatickými vlivy: [7]

$$F_{T2} = f_2 \cdot F_G = 0,2 \cdot 2661,9 = 532,4 \text{ N}$$

Při výpočtu třecí síly, která může nastat v případě působení zhoršených klimatických vlivů se uvažuje koeficient tření dvakrát takový oproti nominálnímu stavu. I tento stav, ale musí zvolený pohon zvládnout ovšem vztahuje se k jeho maximálnímu zatížení. Je samozřejmé, že počet cyklů za hodinu a jdoucích po sobě se při takové situaci snižuje přibližně na polovinu.

Výpočet momentu síly pro nominální stav: [7]

$$M_1 = F_{T1} \cdot r = 266,19 \cdot 0,03 = 7,99 \text{ Nm}$$

Jedná se o potřebný moment, který pohon musí dodávat na hřeben brány, v situaci, kdy je brána již v pohybu. Pohon tedy musí překonat třecí sílu, která proti němu působí. Záběrný moment, který uvede bránu do pohybu by měl být dvojnásobný. Poloměr pastorku označený jako r je 30 mm dle níže komentovaného sériově vyráběného pohonu.

Výpočet momentu síly pro zhoršený stav tření: [7]

$$M_2 = F_{T2} \cdot r = 532,4 \cdot 0,03 = 15,98 \text{ Nm}$$

4.3 Vybraný sériově vyráběný pohon pro model brány

Z výpočtů provedených v kapitolách 4.1 a 4.2 zvolíme pohon, který by vyhovoval pro bezpečný a plynulý provoz. Tento pohon by měl dosahovat hodnot vyšších v oblasti zatížení, než jakých bylo dosaženo výpočtem. U pohonu nebude specifikovaný výrobce, ale pouze jeho parametry, kterých dosahuje při posuvu samonosné brány viz. tabulka 4.

Tabulka 4: Technické parametry zvoleného sériově vyráběného pohonu [6]

Technické parametry pohonu	
Maximální kroutící moment při rozjezdu [odpovídající schopnosti vyvinout sílu, která uvede bránu do chodu]	18 Nm [600 N]
Nominální kroutící moment [odpovídající schopnosti vyvinout sílu, která udrží bránu v chodu]	9 Nm [300 N]
Rychlost v nominálním stavu	0,15 m/s
Rychlost při chodu naprázdno	0,31 m/s
Maximální délka nepřetržitého provozu	7 minut
Životnost	v rozsahu 20.000 až 250.000 cyklů
Maximální příkon při rozjezdu [a odpovídající hodnota v ampérech]	515 W [2,5 A]
Napájení	230 V AC 50 Hz
Provozní teploty	-20 °C až +50 °C
Krytí zařízení	IP 44

Zvolený pohon, který vyhovuje spočteným parametrům má šnekovou převodovku, přes kterou pomocí pastorku s roztečí 60 mm přenášíme moment na hřeben brány. V pohonu je nainstalován BLDC motor napájený 24 V. Řídící jednotka je naprogramována na 6 rychlostí a to 100, 85, 70, 55, 45 a 30 procent. Dráhu posunu vzhledem k rychlostem si můžeme rozdělit přibližně na čtvrtiny. Myšleno tak, že přibližně jednu čtvrtinu se brána po záběru pohonu uvádí do nominální rychlosti pohonu, dvě čtvrtiny pokračuje v nominální rychlosti a poslední čtvrtině dráhy začne pohon rychlost přibrzďovat do naprosté nulové rychlosti, aby došlo k tzv. měkkému dorazu. [6]

5 ROZBOR A KONSTRUKCE SYNCHRONNÍCH STROJŮ S PM

Pro navržené a zanalyzované modely samonosných bran jsem zvolil variantu pohonu s BLDC motorem. V této kapitole si, tedy něco málo povíme o konstrukci a návrhu BLDC motoru obecně a poté přistoupíme k samotnému návrhu motoru přímo pro pohon pro modelové brány.

Motorem BLDC rozumíme synchronní bezkartáčový motor jehož komutace je provozována elektronicky. Stejně jako u jiných točivých elektrických strojů se tento synchronní stroj skládá ze dvou částí a to ze statoru s vinutím což je pevnou částí stroje a rotační pohyblivé části rotoru. Pevná část stator je podobně jako u jiných elektrických točivých strojů tvořená z jednotlivých dynamo plechů, ve kterých jsou vyražené drážky pro vinutí. Pohyblivá točivá část rotor je u tohoto typu elektrických točivých strojů tvořena z permanentních magnetů, které oproti jiným strojům nahrazují budící vinutí. Rotor může být u synchronních strojů tvořen buď jako hladký anebo s vyniklými póly. Provedení synchronního stroje s hladkým rotorem můžeme najít především u strojů rychloběžných. Varianta synchronního stroje s vyniklými póly se nachází spíše u strojů, u kterých máme požadavek na velký moment. Permanentní magnety na rotoru můžeme tedy mít na povrchu rotoru a nebo mohou být magnety zapuštěny do konstrukce rotoru.

V synchronních strojích bývá nejčastěji statorové vinutí řešeno jako trojfázové. Provedení jednotlivých fází ve statoru je takové, že jsou od sebe fáze vzájemně posunuty o 120° elektrických. Při průchodu proudem takovým vinutím pak dochází k točivému magnetickému poli. Vzniklé magnetické pole statoru následně interaguje s konstantním magnetickým polem rotoru, které vytváří permanentní magnety a tím nám vzniká moment. Následně dochází k otáčení rotoru. Rychlost otáčení rotoru je synchronní. Tato rychlost je vlastně synchronní úhlovou rychlostí, která je závislá na frekvenci napájení a počtech pólů daného stroje. Pro výpočet takové rychlosti můžeme použít vztah:

$$\omega_s = \frac{2\pi f}{p}$$

[19, 20]

Ve vztahu vidíme f což je označení pro frekvenci napájecího napětí, p nám označuje počet pólů.

Synchronní stroj jako takový pracuje pouze se synchronními otáčkami, které jsou určeny magnetickým točivým polem statoru. Stejně tak se synchronní stroj chová i při zatížení. K tomu je třeba říci, že u případné změny výkonu synchronního stroje ať už navýšení nebo snížení tak přímo neovlivňuje otáčky daného synchronního stroje. Tyto změny mají vliv na pole točivé a budící, s tím že výše zmiňované změny výkonu tedy ovlivňují působení těchto polí a to tím, že se mezi poli vyskytne vzájemný posun zátěžného úhlu, který se také označuje písmenem β .

Moment u synchronního stroje můžeme vyjádřit právě pomocí výše zmíněného zátěžného úhlu, u kterého právě zátěžný úhel β a jeho velikost určuje samotné pracovní režimy synchronního stroje. Takovou momentovou rovnici můžeme vyjádřit jako:

$$M = \frac{U_1 \cdot U_0 \cdot m \cdot \sin \beta}{\omega \cdot X_s} \quad [19, 20]$$

V případě že bychom mohli uvažovat konstantní veličiny v tomto vztahu. Konkrétně tedy úhlovou rychlost, konstantní buzení a svorkové napětí kde tedy je:

$$k = \frac{U_1 \cdot U_0 \cdot m}{\omega \cdot X_s}$$

Po dosazení máme tedy:

$$M = k \cdot \sin \beta \quad [19, 20]$$

Vzorce, které jsme si takto vyjádřili a popsali, nám tedy popisují závislost momentu synchronního stroje právě na zátěžném úhlu. Pokud je zátěžný úhel nulový tak navzájem působící pole synchronního stroje není přítomný posun a tedy nemůže vzniknout žádný moment. Synchronní stroj tedy pracuje v nezátěženém stavu. Pracovní stavy u synchronního stroje můžeme, tedy popsat následovně, když je zátěžný úhel $\beta > 0$, tak v takovém případě synchronní stroj pracuje v motorickém režimu, můžeme také říci, že zátěžný úhel určuje míru opoždění rotoru vůči výslednému magnetickému toku. Pro stav kdy $\beta < 0$ se synchronní stroj nachází v generátorickém režimu to znamená, že magnetické pole statoru a rotoru je předbíháno rotorem. Jak je vidět z předchozích popisů jednotlivých stavů synchronního stroje v závislosti na zátěžném úhlu, tak je tento úhel a jeho velikost velice důležitý, protože v případě, že nastane stav u zátěžného úhlu, kdy $\beta = \pi/2$ je vyšší nad tuto hodnotu, tak moment odpovídá momentu zvratu a stroj tzv. vypadne ze synchronizmu, což znamená, že se stroj nachází ve stavu poruchy.

[19, 20]

Napájení synchronních strojů s permanentními magnety provádíme pomocí měničů. Provedení měniče se odvíjí od typu napájeného synchronního stroje s permanentními magnety. Díky zjištění napájení a případně pracovních průběhů těchto strojů můžeme rozlišit synchronní stroje s permanentními magnety. Ovšem ať se jedná o jakýkoliv typ synchronního stroje s permanentními magnety tak tyto typy strojů potřebují snímání polohy rotoru, aby správně pracovali. Toto snímání u takových strojů provádíme elektronicky.

Konkrétně u typu synchronního stroje s permanentními magnety, který je napájen proudy, které mají obdélníkové průběhy. Tento motor je elektricky komutovaný a je bezkartáčový. Tedy BLDC (brushless direct current) napájecí napětí je stejnosměrného charakteru u těchto strojů. Motor je napájen ze 3 fází, kdy dvě z těchto fází jsou aktivní a zbylá komutuje. Abychom ohlídali, zda nám komutace funguje správně jsou zde použity Hallovy sondy. [19,20]

5.1 Provedení konstrukce

Pro naši potřebu se budeme zabývat pouze typem synchronního stroje s permanentními magnety ve variantě provedení jako motoru s radiálním magnetickým tokem. Toto provedení motoru je nejvíce používaným typem z celkové tří možných provedení těchto strojů. Jen pro zmínku dalšími jsou motor s axiálním magnetickým tokem a motor s transversálním tokem.

U provedení motoru s radiálním magnetickým tokem se setkáme s konstrukcí, která je velice podobná běžným točivým strojům. Tato varianta je z výše zmíněných tří variant nejjednodušší a také méně nákladná. V drážkách statoru, který je složen z jednotlivých plechů je uloženo hlavní vinutí a rotor je buď plný anebo také složený z plechů. Permanentní magnety tak můžeme mít buď uvnitř rotoru anebo jsou připevněny na povrchu rotoru. Samozřejmě tyto motory nejsou ideální všechny typy provedení elektrických strojů spolu nesou vlastní výhodné a nevýhodné vlastnosti. Pokud bychom si chtěli tyto vlastnosti ujasnit u našeho řešeného stroje tak všeobecné vyjádření výhod a nevýhod BLDC motoru by mohlo být následující:

Výhodné vlastnosti:

- není třeba budícího vinutí tedy nevznikají ztráty v tomto vinutí
- dále díky PM odpadá problém s rozběhem při porovnání s jiným synchronními stroji
- dosahují vyšší účinnosti
- velice dobrý poměr mezi výkonem a objemem stroje
- můžeme u nich dosáhnout vyšší momentové přetížitelnosti

Nevýhodné vlastnosti:

- kvůli PM stálá přítomnost budícího pole
- problém s odbuzením
- nutné řízení stroje
- je zde možný problém s demagnetizací permanentních magnetů
- provozní teploty stroje nám mohou ovlivnit magnetické vlastnosti
- vyšší cena spjatá se složitější výrobou

5.2 Provedení a navrhování statoru

Tak jak už bylo výše zmíněno synchronní stroje s PM mohou být velice podobným jiným strojům, tato podobnost spočívá především u statoru. Konkrétně se statorem asynchronních strojů. Tedy se jedná o provedení vzájemně izolovaných elektrotechnických plechů do válcového tvaru. Zmíněné plechy v sobě mají vyražené drážky, kdy v těchto drážkách právě u BLDC motorů bývá navinuto tři fázové vinutí. Provedení tvaru ať už samotného plechu nebo prostříhaných drážek vzniká stejně jako při výrobě těchto plechů i u jiných běžných strojů.

Při návrh BLDC můžeme v případě plechů použít stator z asynchronního stroje, ale jen pokud nedbáme tolik na provozní vlastnosti stroje a zároveň se nám hodí snížení nákladů na výrobu stroje. Případně vytvoříme úplně novou geometrii plechů. Tímto krokem samozřejmě dosáhneme nejlepších provozních vlastností a požadavků na stroj ovšem za cenu zvýšení nákladů.

Stator je tedy tvořený jednotlivými elektrotechnickými plechy, které jsou od sebe odizolovány. U těchto plechů je třeba také mít na paměti, že jejich mechanické a magnetické vlastnosti se mohou lišit dle příměsí obsažených v plechu a také jakou formou technologie byly plechy vyrobeny. Při návrh plechů je tedy třeba dbát na co nejlepší vybalancování ekonomických nákladů na výrobu, ale zároveň ,i zachování co nejlepších parametrů plechů pro jejich danou aplikaci. Dále je třeba zmínit, že pokud plánujeme případnou větší výrobu než třeba laboratorního jednoho kusu, je třeba uvážit také jak velkou příměs křemíku by měly elektrotechnické plechy obsahovat, a to z toho důvodu, že čím je větší je obsazení křemíku v plechu tím je tento plech tvrdší a dochází k většímu opotřebení prostřihovacího zařízení. Správnou kvalitu plechů pro navrhovanou aplikaci taky je třeba vzít v potaz průběh magnetizační charakteristiky a měrné ztráty při různých frekvencích.

Právě s provozní frekvencí se nám pojí rychlost provozních otáček stroje. Dále nám frekvence spolu s magnetickou indukci ovlivňuje ztráty v železe a to tak, že při zvýšení těchto veličin dojde k navýšení zmíněných ztrát. Ztráty v železe tvoří ztráty vířivými proudy a ztráty hysterezní.

Tyto ztráty se snažíme snížit právě složením statoru z jednotlivých vzájemně odizolovaných elektrotechnických plechů. Při navrhování plechů je třeba dbát na to, aby byl zachován určitý kompromis u velikosti plochy navrhované drážky pro vinutí a zbylými dalšími rozměry plechů, protože nechceme, aby docházelo k případnému přesycování při normálním provozu stroje.

5.3 Provedení a navrhování rotoru

Základní myšlenky ohledně rotorů používaných u synchronních strojů s permanentními magnety jsme si již řekli výše. Přesto je třeba zmínit, že rotor může být zkonstruovaný pomocí vzájemně odizolovaných elektrotechnických plechů (dynamo plechů) anebo jako celistvý plný kus s utvořenými prostory pro PM. Při návrhu jakékoliv z těchto dvou variant je třeba si pohlídat, aby rotor v takovém provedení měl dostatečně dimenzované jho, aby nedocházelo k jeho přesycování.

Dále můžeme mít rotory provedené jako vnější nebo jako vnitřní. Pro naši aplikaci se budeme zabývat pouze s rotorem vnitřním. Vnitřní rotor je také použit u většiny ostatních běžných strojů. U tohoto provedení je velkou výhodou univerzálnost použití a jednoduchost chlazení statoru, který je na vnějšku. Nevýhodou tohoto provedení je samotná instalace permanentních magnetů a to z toho důvodu, aby byly dostatečně upevněné. Z toho nám vyplývá, že můžeme i různé možnosti zavedení permanentních magnetů na rotor. Samozřejmě každá z variant provedení rotoru s permanentními magnety má vliv na provozní vlastnosti stroje. Správným tvarováním permanentních magnetů můžeme docílit lepších výsledků u vlastností stroje.

Tedy můžeme permanentní magnety mít na rotoru provedené následujícími třemi nejběžnějšími variantami:

- rotor s magnety na povrchu
- rotor se zapuštěnými magnety
- rotor s vnořenými magnety

5.3.1 Varianta s magnety na povrchu

Jak vyplývá z názvu magnety jsou v tom provedení připevněné přímo na povrchu. To samozřejmě sebou nese výhody i nevýhody. Očividnou nevýhodou je připevnění permanentních magnetů na rotor tak, aby opravdu pevně drželi. Tedy v případě že bychom od stroje chtěli velmi vysoké otáčky mohlo by toto provedení být nepoužitelné. Největší výhodou této aplikace permanentních magnetů je dosažení poměrně vysoké magnetické indukce v mezeře.

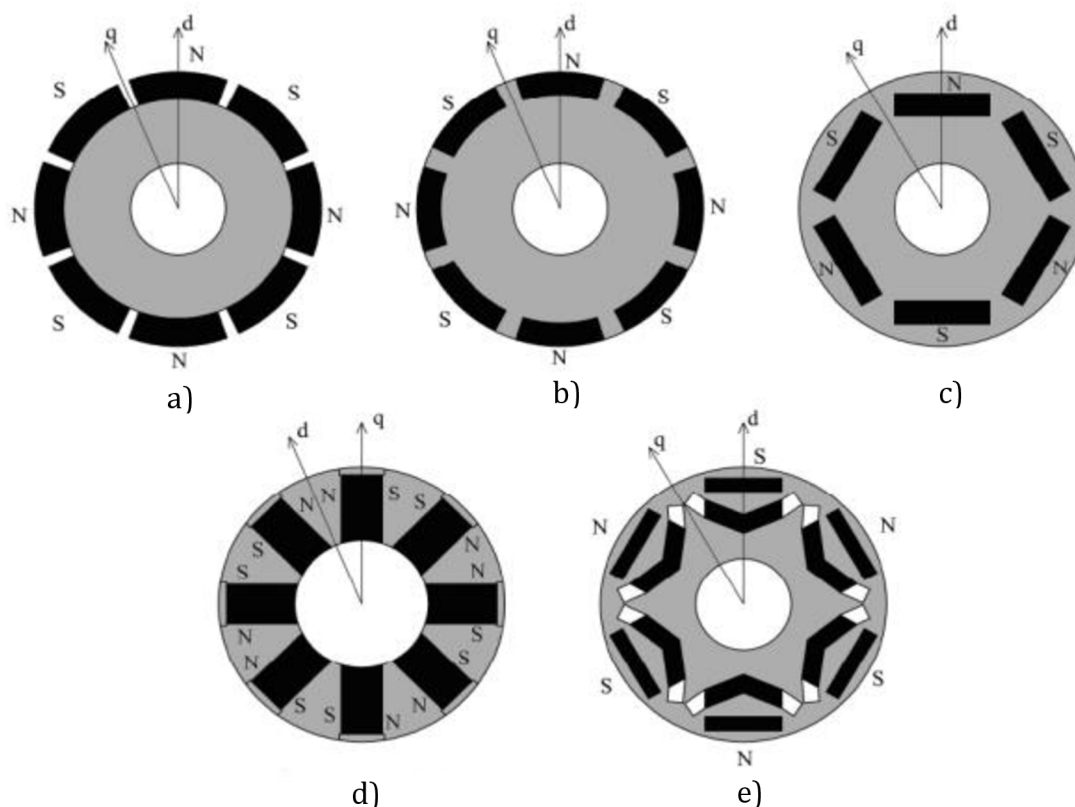
V případě synchronních strojů s permanentními magnety je třeba magnety mít v provedení geometrie půloblouku. To může být náročnější na provedení, reálně se tedy půloblouku chceme co nejvíce přiblížit.

5.3.2 Varianta se zapuštěnými magnety

V případě této varianty jsou v rotoru utvořeny výřezy nebo – li drážky, do kterých jsou vnořeny magnety s póly umístěnými na vnější i vnitřní straně pláště magnetu. Tomu způsobu magnetování permanentních magnetů se říká radiální. Při tomto provedení uložení magnetů získáme hladký povrch rotoru. Toto provedení již je mechanicky pevnější oproti provedení s magnety na povrchu rotoru. Uložené magnety totiž lépe odolávají odstředivým silám. Ovšem magnetická indukce bývá u této varianty nižší než u předchozí, protože dochází k většímu rozptylu magnetického toku do železa rotoru.

5.3.3 Varianta s vnořenými magnety

U varianty rotoru s vnořenými magnety se jedná o variantu, která je mechanicky nejodolnější. Proto se tato varianta především používá pro vysokootáčkové stroje. Oproti předchozím variantám provedení uložení magnetů je konstrukčně nejnáročnější na výrobu. Tím, že jsou permanentní magnety uloženy uvnitř rotoru tak jsou jak mechanicky odolné, tak lépe zvládají pulzování pole ve vzduchové mezeře. U některých provedení rotorů v této variantě se také můžeme setkat s dvou nebo vícevrstevným uložením magnetů na pól. Tím docílíme zvýšení magnetické indukce ve vzduchové mezeře.



Obrázek 7: Možnosti uložení permanentních magnetů na rotoru [12]

Na obrázku číslo 6 vidíme ukázky uložení magnetů dle indexů, a které rozlišujeme následovně:

- a) provedení s magnety na povrchu rotoru
- b) provedení zapuštěných magnetů v povrchu rotoru
- c) magnety vnořené pod povrchem uvnitř rotoru
- d) magnety uvnitř rotoru v provedení radiální orientace
- e) magnety umístěné v rotoru dvojitou vrstvou

Na to abychom magnety dokázali přichytit na povrch rotoru nebo případně je vložit do rotoru se používají dva typy technologií. Pro výrobu v menším množství a uchycení magnetů na rotor se magnety magnetují před umístěním na rotor. V druhém případě, a to v případě velkosériové výroby se magnety demagnetizují a uchycují na rotor v nezmagnetizovaném stavu. Je k tomu zapotřebí specializovaných technologií a prostředků.

5.4 Typy používaných permanentních magnetů

Jednou z nejdůležitějších součástí při návrhu stroje, který využívá permanentních magnetů, je zvolení právě typu permanentních magnetů, myšleno ve smyslu z jakého materiálu budou permanentní magnety. Právě totiž výběrem permanentních magnetů výrazně ovlivňujeme vlastnosti navrhovaného stroje. Proto je třeba pro vhodný výběr na danou aplikaci počítat s magnetickými vlastnostmi permanentních magnetů, které se k nim vztahují vzhledem k materiálu. Právě samotné magnetické vlastnosti jednotlivých materiálů jsou poměrně velkou měrou závislé na teplotě, se kterou vlastnosti prochází změnou. Tedy pokud teplota permanentních magnetů přesáhne jistý bod, kterému se říká Curiova teplota tak dochází k výraznému zhoršení magnetických vlastností permanentních magnetů. Permanentní magnety pracují v druhém kvadrantu magnetizační křivky, ze které můžeme vyčíst potřebné parametry se kterými můžeme dále kalkulovat. Dále chceme dosáhnout, aby magnetizační křivka byla co nejlineárnější. Pokud je možné vyhovujícím způsobem natvarovat permanentní magnet můžeme se tím více přiblížit požadovanému tvaru průběhu magnetické indukce. V případě samotného návrhu magnetu je nutné dbát na rozměry, především na výšku daného magnetu, a to z toho důvodu, aby nedocházelo k nechtěné demagnetizaci PM.

K tomu nám navazuje magnetování permanentních magnetů. Pro magnetování permanentních magnetů se nejhojněji používají dva typy:

- radiální magnetování
- axiální magnetování

V případě elektrických strojů se běžně užívá radiálního směru magnetování.

Na výběr při návrhu stroje s buzením permanentními magnety máme dnes z následujících čtyř možností:

- feritové magnety
- AlNiCo magnety
- SmCo magnety (ze vzácných zemin)
- NdFeB magnety (ze vzácných zemin)

5.4.1 Feritové magnety

Jedná se o cenově nejpříjemnější permanentní magnety což je jejich velkou výhodou v poměru ceny za kilogram, která je nejnižší z možných PM. Feritové magnety jsou tvořeny na základě oxidů, a to buď železitého anebo uhličitanů barya případně stroncia. Další výhodou feritových permanentních magnetů je dobrá chemická odolnost. Určitou nevýhodou může právě být velká závislost magnetických vlastností na teplotě, a ne zcela dobré vlastnosti pro náročnější aplikace.

5.4.2 AlNiCo magnety

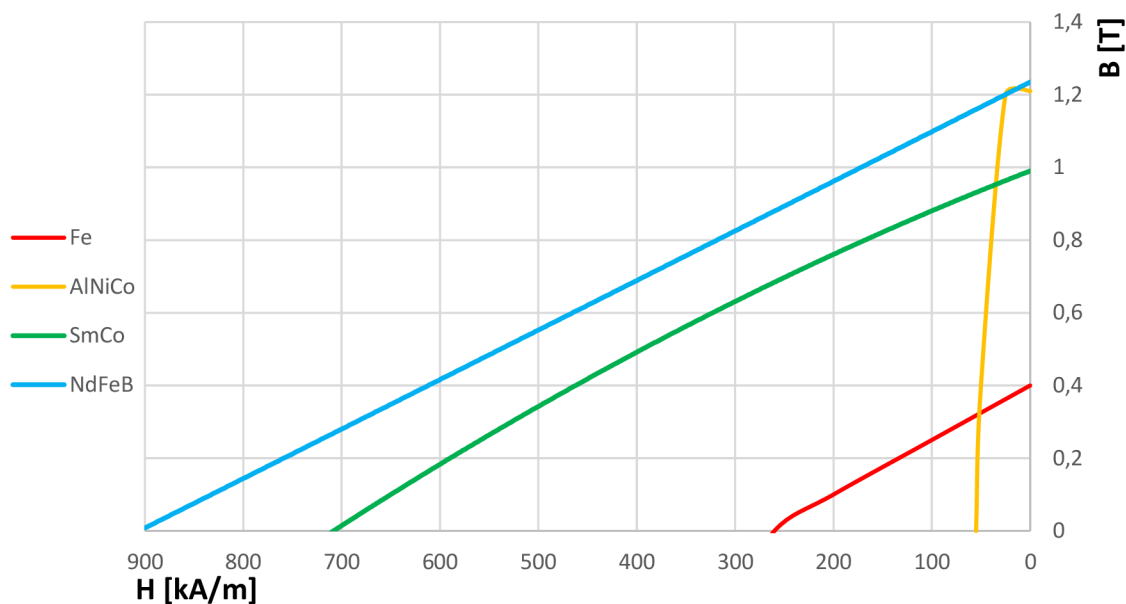
Jedná se o permanentní magnety vytvořené ze směsí hliníku, niklu, kobaltu a železa. Tenhle typ permanentních magnetů můžeme říci má hlavní výhodu v tom, že je nejstabilnější z pohledu magnetických vlastností vzhledem k závislosti na teplotě. Dále se vyznačují vysokou remanencí při vyšších teplotách a odolností vůči korozi. Díky tomu je možné tyto permanentní magnety použít, pokud je zapotřebí, aby magnety odolaly velkým provozním teplotám anebo případně i tam kde je zapotřebí stálost magnetických vlastností při různých teplotách. Tyto magnety mají i svou nevýhodu, a to v případě nelineárnosti jejich demagnetizační charakteristiky a nižší koercitivní silou oproti ostatním. Právě z těchto důvodů plyne, že dané PM snadno zmagnetizujeme, ale stejně tak snadno může dojít k jeho demagnetizaci.

5.4.3 SmCo magnety

Jedná se o magnety vytvořené ze vzácných zemin, a to konkrétně ze samaria a kobaltu. Tyto magnety jsou velmi tvrdé a vynikají svými kvalitními magnetickými vlastnostmi. Konkrétněji mají SmCo magnety vysokou remanentní magnetizaci a velmi dobrou koercitivní silou. Jejich magnetizační charakteristika v druhém kvadrantu hysterezní smyčky je téměř lineárního průběhu. Magnety jsou bohužel velice nákladné, ale svoji využitelnost nacházejí v případě strojů, u kterých oceníme velký výkon v poměru ku hmotnosti stroje.

5.4.4 NdFeB magnety

Tyto magnety opět patří do skupiny permanentních magnetů vytvořených ze vzácných zemin. Tentokrát se jedná o složení magnetů z materiálů neodým, železo a bor. Stejně jako u předchozích PM ze vzácných zemin i tyto magnety se vyznačují velmi dobrými magnetickými vlastnostmi a magnetizační charakteristika v druhém kvadrantu je také téměř lineární. Jedná se i o nejsilnější typ magnetů. Pokud uvažujeme teploty okolního prostředí, jaké jsou u nás běžné mohou tyto permanentní magnety dosahovat i lepších magnetických vlastností než je tomu u PM SmCo. U těchto magnetů se ovšem setkáváme s problémem chemické neodolnosti. Takže tyto magnety je třeba proti tomuto nedostatku ochránit za pomoci například nátěry z epoxidu. Tyto permanentní magnety také spadají do kategorie s vyšší cenou.



Obrázek 8: Demagnetizační charakteristika jednotlivých PM

5.5 Statorové vinutí u synchronních strojů s PM

Vinutí je uloženo ve statorových drážkách, které jsou ještě vyložené izolací (vyložení zvyšuje elektrickou pevnost izolačního systému a chrání vinutí mechanicky před poškozením). Jako u jiných strojů zde máme trojfázové vinutí, tenhle typ se vyskytuje nejčastěji mohou se, ale najít výjimky, které jsou vícefázové. Díky vinutí, pokud je protékáno proudem a za pomoci magnetického pole od permanentních magnetů na rotoru dochází k vytváření momentu stroje. Vinutí je řešeno ve valné většině pomocí měděného vodiče (jedná se o elektrotechnickou měď). Podíl mědi je zde 99,99 % a bývá ošetřena izolačním lakem. Z vodiče je třeba poté utvořit tvarováním závit. Závity poté tvoří cívku. Takové cívky, které patří k jedné fázi a jsou vzájemně propojené, a to sériově nebo paralelně náleží do cívkových skupin. Cívky mají dvě aktivní strany, které jsou uloženy do dvou rozdílných drážek se vzdáleností mezi nimi o cívkový krok. Drážka může být vyplněna vinutím buď jednou cívkovou stranou anebo se o drážku dělí dvě strany sousedících fází.

Při provozu stroje je vinutí protékáno elektrickým proudem a vznikají na něm Jouleovy ztráty, tedy vinutí se stává zdrojem tepla. U návrhu stroje je třeba tedy dodržet maximální povolenou ustálenou teplotu. Tato teplota musí dosahovat nižších hodnot, než je dovolená teplota, kterou nám určuje třída použité izolace. Právě teplo, které nám vzniká ve vinutí a uniká nám i do okolí je třeba snižovat za pomoci chlazení stroje, aby nemohlo dojít k ovlivnění magnetů vzrůstem teploty,

protože bychom si ovlivnili jejich vlastnosti nebo dokonce může hrozit jejich demagnetizace.

Ideálně bychom samozřejmě chtěli, aby nám vinutí vyplnilo drážku naprosto bez mezer v celém její ploše, ovšem to není prakticky možné, protože mezi vodiči vznikají vzduchové mezery a část drážky si bere i izolace. S tímto jevem je tedy třeba tedy kalkulovat, a to tak že musíme užitečné zaplnění drážky mědí v poměru k celkové plochy drážky. Tomuto přepočtu z poměru odborně říkáme činitel plnění drážky. V činiteli se promítají technologie, tvar a velikost drážky, průměr použitého vodiče. Hodnoty činitele plnění se mohou pohybovat v rozmezí $k_{Cu} \Rightarrow [0,5 - 0,6]$ používaný pro stroje na malé napětí a $k_{Cu} \Rightarrow [0,3 - 0,45]$, který je pro stroje na vysoké napětí.

Činitel plnění drážky můžeme dopočítat, pokud známe počet vodičů, průměr tohoto vodiče a plochu drážky, a to dle vztahu:

$$k_{pCu} = \frac{N \cdot D^2}{S_d}$$

Pokud máme drážku ve čtvercové geometrii, tak máme výpočet činitele plnění drážky v následující formě:

$$k_{pCu} = \frac{N \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{S_d} = \frac{\pi \cdot N \cdot D^2}{4S_d}$$

Počet vodičů je označen jako N, průměr vodiče je ve vztahu označen D a plocha drážky je označena S_d .

Statorové vinutí má ovšem další možnosti provedení. Tyto možnosti můžeme rozdělit dle provedení, počtu vrstev vinutí v drážce a dle počtu drážek na pól. Vinutí ve zmíněných možnostech dělení máme tedy:

- | | | |
|-------------------------------|---------------|---------------------------------------|
| Provedení: | - rozložené | - smyčkové |
| | | - vlnové |
| | - soustředěné | |
| Počet vrstev vinutí v drážce: | | - jednovrstvé |
| | | - dvouvrstvé |
| Počet drážek na pól: | | - celistvý počet drážek na pól a fázi |
| | | - zlomkový |

5.6 Vinutí rozložené

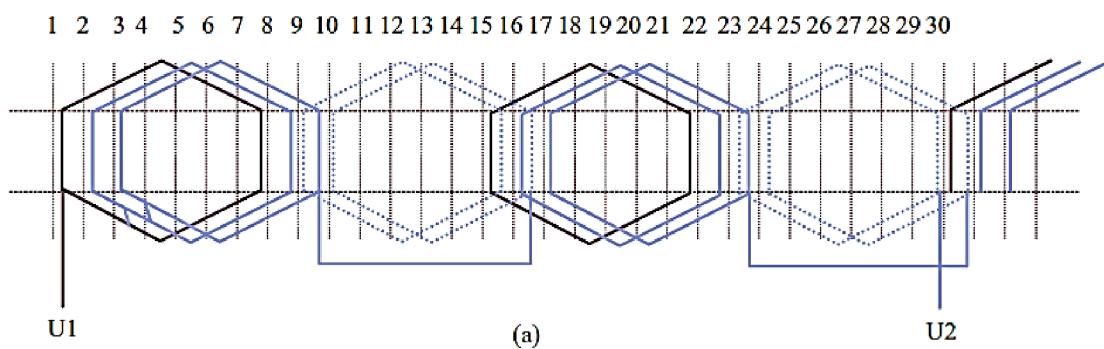
Jedná se o jednu z nejpoužívanějších variant pro stroje s trojfázovým vinutím. Rozložené vinutí je typické pro asynchronní stroje. Pro navíjení je toto vinutí vzhledem k proveditelnosti jednoduché a méně finančně nákladné. Navíjení tohoto vinutí můžeme provádět buď strojově anebo ručně. Tento typ vinutí má bohužel svoji jednoduchost spjatou s nevýhodami a těmi jsou především větší výška čel z důvodu, že dochází k překrývání vinutí jednotlivých fází. Právě délka čel nám způsobuje vznik neužitečného objemu vinutí, protože spotřebujeme více materiálu a z tohoto přebytku materiálu nám narůstají i ztráty.

5.6.1 Smyčkové vinutí

V tomto provedení rozloženého vinutí máme propojené konce jedné koncové skupiny s následující skupinou vinutí. Cívky smyčkového vinutí bývají ve tvaru smyčky a jsou navinuty přes sebe tím způsobem, že se poté cívkové skupiny propojují.

Řešení vinutí za pomoci tohoto typu sebe nese výhodu navíjení se zkráceným krokem, a to dokonce na míru dvou třetin pólové rozteče. Využitím zkráceného kroku docílíme zmenšení rozptylu a redukuje také ztráty přídatné v drážce.

Vinutí smyčkového používáme především pokud navrhujeme stroj, který bude pracovat s velkým procházejícím proudem a nižšími hodnotami napětí.

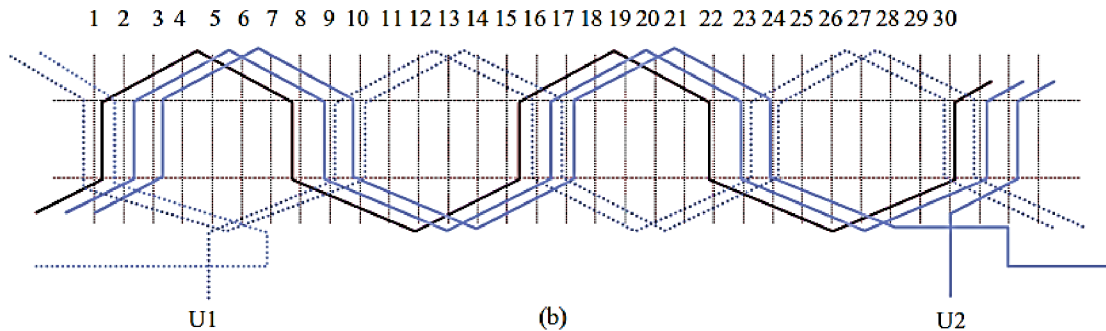


Obrázek 9: Rozložené smyčkové vinutí [12]

5.6.2 Vlnové vinutí

Základním princip u tohoto vinutí je v tom, že zde se propojuje konec cívkové skupiny a začátek další cívkové skupiny. Tento způsob provedení tvarem připomíná vlnu.

Tohoto vinutí se využívá pro stroje navrhované pro nízké provozní proudy a vysoké napětí.



Obrázek 10: Rozložené vlnové vinutí [12]

5.7 Vinutí soustředěné

Tento typ vinutí nás v případě synchronních strojů s permanentními magnety zajímá v dnešní době nejvíce, protože se pro tento typ strojů používá stále častěji. Tímto řešením vinutí se dostáváme k výhodě ve smyslu nepřekrývajících se čel vinutí. S tím je spojené, že dojde k výraznému zmenšení výšky čel vinutí. Právě to, že dokážeme tímto řešením zmenšit čela vinutí získáme snížení ztrát ve vinutí, více aktivní mědi a tím tedy můžeme dosáhnout i vyšší účinnosti. Dále pokud bychom zanechali stejné objemové řešení stroje, ale za použití tohoto vinutí mohli bychom docílit toho, že se zmenšením čel vinutí tak můžeme prodloužit statorový svazek a díky tomu dosáhnout vyššího momentu stroje.

Utvořené cívky pomocí soustředěného vinutí mají totožný střed. Tedy v případě dvou nebo více cívek v jedné cívkové skupině může být vinutí řešeno jako zdvojené tzv. plné cívky anebo nezdojené a tím máme tzv. půlcívkky.

U synchronních strojů s permanentními magnety je běžně používáno zapojení cívek do série pro stejnou fázi. Kolem statorového zubu tak navíjíme pouze jednu cívku.

Soustředné vinutí dále rozdělujeme do jednovrstvých a dvouvrtvých dle toho kolik je zapotřebí cívkových stran.

5.7.1 Vinutí soustředěné jednovrstvé

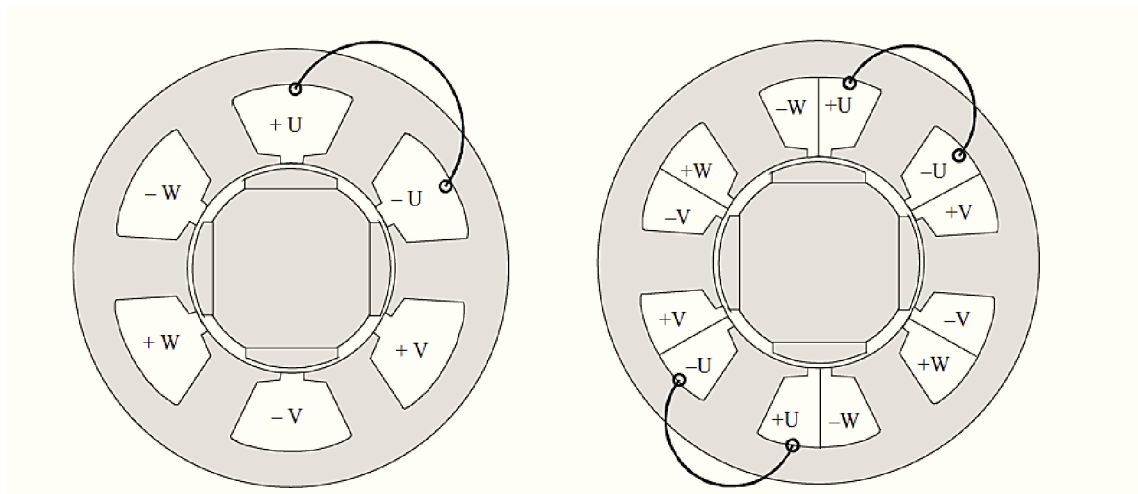
Provedení tohoto vinutí je takové, že strana cívky jednovrstvého vinutí nám vyplní celou plochu drážky, s tím je spojena skutečnost, že počet cívek se rovná polovičnímu počtu drážek. U jednovrstvého vinutí není možné použít navíjení cívky se zkráceným krokem. Při návrhu stroje je tedy třeba dodržet, abychom na statoru měli pouze sudý počet drážek.

Při samotném navíjení statoru u synchronních strojů s permanentními magnety u jednovrstvého vinutí, vždy navijíme ob jeden statorový zub. Cívka se, tedy nachází na každém druhém zubu. Výhodou jednovrstvého vinutí je docílení lepšího zaplnění drážky (vyšší činitel plnění drážky), ale i jednoduchost řešení tohoto vinutí.

5.7.2 Vinutí soustředěné dvouvrstvé

Zde v případě vinutí dvouvrstvého se řídíme pravidlem, kdy počet cívek je ve stejném počtu jako je počet statorových drážek. Jak můžeme vidět na obrázku číslo 10 tak je to dáno tím, že v drážce se nachází dvě cívkové strany. Oproti předchozí variantě vinutí je zde možné uplatnit zkráceného vinutí, případně zlomkového vinutí. Cívky u dvouvrstvého vinutí navijíme vždy tak, aby daná cívka byla vždy navinuta kolem jednoho statorového zubu.

Jak jsme si výše uvedli a ukázali na obrázku 10, jsou v drážce dvě cívkové strany a díky tomu do drážky zavádíme další izolaci, z čímž je spjato to, že se nám zhorší vyplnění drážky mědí (snížení činitele plnění drážky).



Obrázek 11: 1) jednovrstvé soustředěné vinutí, 2) dvouvrstvé soustředěné vinutí [12]

6 VÝPOČTY ZATÍŽENÍ POMOCÍ MKP

Před samotným provedením výpočtů zatížení bylo třeba připravit potřebné materiály, abychom mohly nastavovat analýzy k samotným výpočtům. Analýzy modelů byly prováděny pomocí programu ANSYS a jeho prostředí Workbench. Modely byly připravovány v Autodesk Inventor a převedeny na formát, který dokáže dále zpracovat výše zmíněný software. Výsledky byly dále vyhodnoceny a zpracovány pro další výpočty.

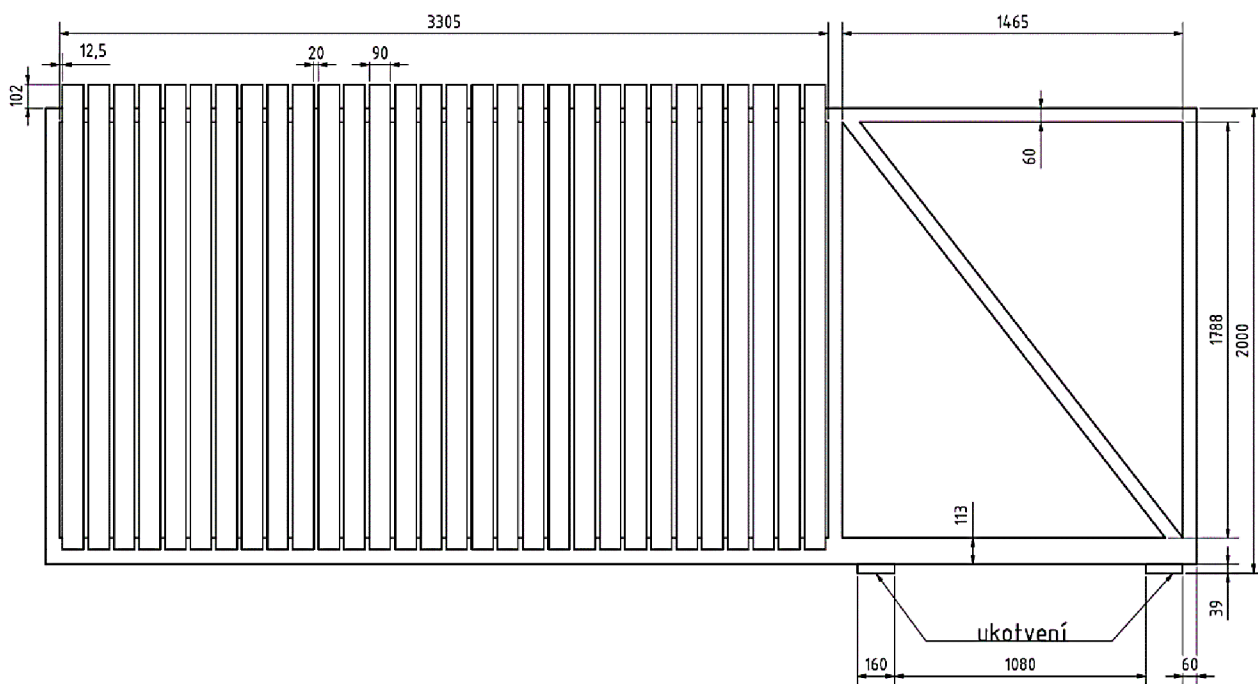
6.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků neboli také MKP (FEM) spočívá v rozdělení řešené oblasti na konečný počet podoblastí neboli prvků. Na příslušném modelu, který chceme dále zpracovávat pro další analýzy musíme vytvořit síť konečných prvků. Pro každý z takových prvků je kromě dimenze a tvaru význačný také počet a poloha uzlů. Tyto uzly sítě jsou vlastně body, ve kterých hledáme neznámé parametry řešení. Kvalitu zpracování a přesnost výsledků řešení nám ovlivňuje hustota a topologie prvků sítě.

U této metody také můžeme narazit na omezení v případě hardwaru anebo také na časové nároky, které mohou být značné v případě špatné optimalizace modelu anebo v případě jeho potřebné složitosti.

6.2 Vytvoření modelů

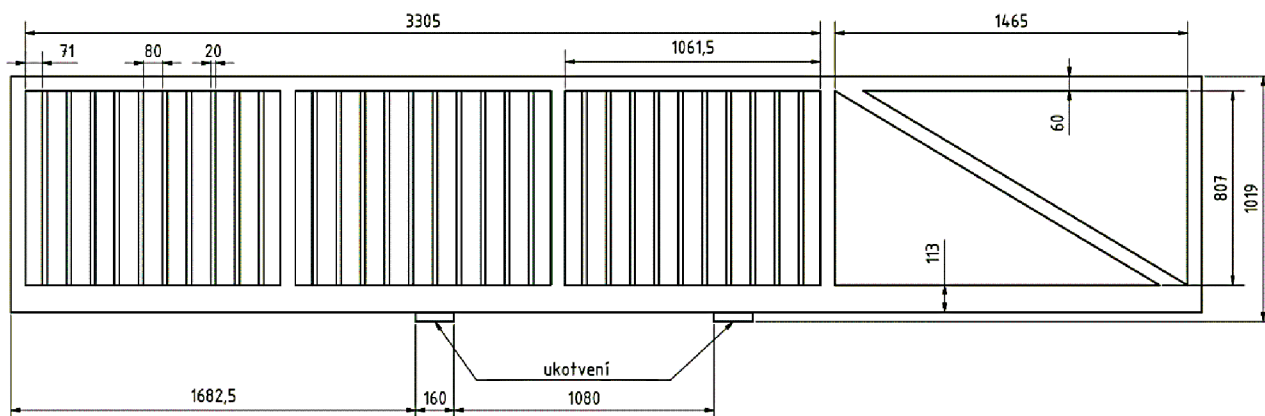
K analýzám bylo vytvořeno osm základních modelů jako sestavy z jednotlivých normovaných profilů v programu Autodesk Inventor. Ovšem vzhledem k zaoblení profilů a spousty dosedových ploch v sestavě docházelo k časově náročnému výpočtu a vzhledem k počtu složitých spojení, tvarů a množství součástí. Díky tomu nedošlo ani k vyhodnocení analýzy, protože u některých přechodů nedošlo k dobrému výpočtu modelu a vznikaly zde chyby. Proto byla potřeba jednotlivé modely výrazně zjednodušit tak, aby model byl vyhovující pro danou analýzu, ale zároveň co nejjednodušší, abychom dosáhli co nejlepší optimalizace. Model tedy byl změněn ze sestavy jednotlivých součástí, na jednu celistvou součást vytaženou do 3D ze 2D náčrtu základních tvarů u všech vytvářených modelů. Všechny modely ať už původní nebo nahrazené byly ukládány ve formátu sat, aby bylo možné s modely dále pracovat v následujícím softwaru, který potřebujeme pro řešení zatížení.



Obrázek 12: Ukázka modelu brány - výška 2000 mm, plaňky, zavřená

Na obrázku 11 máme vyobrazenou bránu s plaňkovou výplní, kde výška od země je 2000 mm. Celková délka rámu je 4950 mm. Brána je ve variantě ukotvení na jejím okraji tedy simuluje zavřený stav.

Všechny varianty modelů bran byly ve všech rozměrech stejné, změny byly právě ve variantách výplně a místa ukotvení brány, ale bylo provedeno pro výšku 2000 mm i 1019 mm. Dalšími variantami byly modely ve stejných variantách výplně a délce, ale byly odlišné na výškovém rozměru. Čímž bylo docíleno zmenšení plochy pro analýzy a tedy další možnost porovnání. N obrázku 12 je pro ukázkou zobrazena brána s jaklovou výplní a s ukotvením simulující průběh otevírání.



Obrázek 13: Ukázka modelu brány - výška 1019 mm, jakly, otevírající

6.3 Nastavení analýzy ve Workbench

Po zpracování výše zmíněných modelů, bylo třeba tyto modely ve formátu sat nahrát do prostředí Workbench a její vybrané analýzy pro naši práci. V prostředí Workbench jsme zvolili analýzu Fluid Flow (CFX). Pro práci s analýzou ji přetáhneme z okna možných systémů analýz do okna projektového schématu. V projektovém schématu se nám objeví jednotlivé položky nastavení pro zpracování výpočtů analýzy. Jako první je zde zpracování právě navrženého modelu neboli geometrie. Zde jsme pro naši práci vybrali možnost zpracování geometrie v odnoži Design Modeler (Space Claim geometry by byl zbytečně složitý pro naši potřebu). Do Design Modeleru jsme naimportovali vždy danou variantu modelu. Po vygenerování geometrie, bylo třeba model uzavřít do ohraničení (Enclosure) kde budeme dále nastavovat další podmínky pro analýzu. Ohraničení bylo nastavováno jako box a nestejnomyšerné. Zde byly zapsány jednotlivé parametry v souřadnicích x,y,z. Konkrétně bylo pro všechny modely nastaveno ohraničení [+x=2000 mm, +y=2000 mm, z=1000 mm, -x=2000 mm, -y=1 mm, -z=1000 mm] a následně vygenerováno.

Dále je třeba nastavit část analýzy Mesh, kde po otevření se nám objeví předchozí zpracovaná geometrie i s ohraničením, kterou potřebujeme zpracovat do elementů. Po prvotním zanalyzování modelu defaultním nastavením Meshe bylo vidět že je třeba zmenšit velikost elementu, aby docházelo k přesnějšímu zpracování modelu. Velikost elementu oproti přednastaveným hodnotám byla změněna přibližně na polovinu, a to na hodnotu 220 mm. Poté bylo zpuštěno finální vygenerování sítě elementů.

Třetím krokem nastavení je Setup, kde je třeba nastavit modelu výpočetní vstupní parametry pomocí okrajových podmínek. Pomocí Boundary nastavíme 3 z možností podmínek Inlet, Outlet, Opening a to na část ohraničení, kde Inlet byl nastaven na boční stranu čelně ze strany +x. V detailu podmínky byla ještě nastavena rychlost $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pro první variantu výpočtů a pro druhou variantu výpočtů na srovnání na $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dále Outlet na protější boční stranu ohraničení -x a v detailu podmínky byla doplněna hodnota relativního tlaku na 0 Pa. Poslední podmínkou bylo vybráno Opening a to na všechny zbylé plochy ohraničení tedy +y, -y, +z a -z. Podmínky pro samotný model není třeba vkládat, protože analýza už s ním počítá jako s pevným objektem který má své vlastní fyzikální parametry.

Jako následujícím a v pořadí čtvrtým krokem nastavení analýzy je Solution. Zde dochází k řešení a ověření předchozích nastaveních analýzy. A vyhodnocení výsledků.

V možnosti Result si můžeme zobrazit různé výsledky, a to pomocí různých nástrojů a možností grafických modifikací, které nám umožňují konkrétnější, detailnější nebo zajímavější zobrazení řešených jevů. [13]

Tyto výsledky byly třeba pro náš účel ještě vyhodnotit pomocí dalšího analyzačního systému, a to za pomoci Static Structural. Do této analýzy byly nahrány data už z předchozí analýzy Fluid Flow (CFX) a to přes možnost Solution a vložení do Static Structural Setup. Zde je převedena automaticky modelová geometrie a všechny nastavení a dosažená řešení. V engineering data byly vybrány materiály, které byly potřeba k dané variantě modelu. Možnosti Model, Setup, Solution a Result jsou zde společné a ve výběru kteréhokoliv z nich došlo k dalšímu nastavení a jejich úpravě a doplnění výsledných zobrazených výsledků.

Jako automatický materiál je zde vzduch a ocel používaná pro běžné profily. Dále dle varianty přidáme ještě nerezovou ocel a dřevo. V modelu byla upravena geometrie a to tím, že bylo potlačeno ohraničení. Přes Static Structural v modelu doplníme vliv gravitace, a to ve směru osy -y. Dále byla zvolena možnost Fixed Support a nastavena na spodní plochu geometrie na modelu simulující ukotvení brány. Kdy pro první variantu simulujeme plné vysunutí brány neboli zavřenou polohu a v druhé jako poloviční vysunutí kde simulujeme průběh otevírání. Jako další možný krok naimportujeme data z řešení předchozí analýzy CFX. Konkrétně Imported Pressure. V možnosti Solution byly nastaveny chtěné řešení a zobrazení intenzity namáhání, celkové deformace a působení síly. Součástí celkového řešení byl i nový Mesh současného stavu modelu.

Z výsledků je nejdůležitější vliv síly způsobené prouděním vzduchu na konstrukci. Kdy její velikost se nám zvětšuje na základě velikosti plochy, do které se proud vzduchu může opřít. Proto bylo vytvořeno několik variant modelů s různým typem vyplnění konstrukce, aby bylo možné porovnat vliv síly z proudění vzduchu na různou propustnost, ale také na případný součet samotné váhy konstrukce s přičtením právě působících sil, které nám ve výsledku ovlivňují celkové zatížení na pohon. Jak bylo dříve zmíněno právě z takto získaných výsledků celkového zatížení vybereme nejnepríznivější výsledek vyjádřený jako síla F_v v newtonech [N].

$$F_v = F_m \cdot f_1 + F_1 = F_m \cdot f_1 + \frac{F_2 \cdot L_2}{L_1}$$

V rovnici uvažujeme F_v jako výsledné celkové zatížení, se kterým musí pohon pracovat, F_m bereme sílu, kterou vytváří samotná hmotnost konstrukce, spočtenou pomocí vzorce $F_m = m \cdot g$, f_1 nám zahrnuje vliv tření, které nabývá hodnoty 0,1 pro nominální stav, F_1 je získaná síla v závislosti na rychlosti proudění větru a propustnosti výplní z analýzy CFX, L_1 a L_2 jsou délky ramen (přesahy brány u pohonu).

Tabulka 5: Srovnání hodnot pro varianty bran s výškou 2000 mm, zavřená, 10 m·s⁻¹

Varianta	m [kg]	propustnost [%]	Fv [N]
bez výplně	104	100	135,3
dřevěné plaňky	165	41,9	185,9
jakly	179	95,2	204,1
plný plech	207	30,4	245,9

Tabulka 6: Srovnání hodnot pro varianty bran s výškou 1019 mm, zavřená, 10 m·s⁻¹

Varianta	m [kg]	propustnost [%]	Fv [N]
bez výplně	88	100	115,7
dřevěné plaňky	108	41,9	153,5
jakly	122	95,2	146,7
plný plech	144	30,4	167,4

Tabulka 7: Srovnání hodnot pro varianty bran s výškou 2000 mm, otevírání, 10 m·s⁻¹

Varianta	m [kg]	propustnost [%]	Fv [N]
bez výplně	104	100	133,3
dřevěné plaňky	165	41,9	175,8
jakly	179	95,2	201,5
plný plech	207	30,4	231,6

Tabulka 8: Srovnání hodnot pro varianty bran s výškou 1019 mm, otevírání, 10 m·s⁻¹

Varianta	m [kg]	propustnost [%]	Fv [N]
bez výplně	88	100	113,6
dřevěné plaňky	108	41,9	146,3
jakly	122	95,2	144,3
plný plech	144	30,4	159,3

Tabulka 9: Srovnání hodnot pro varianty bran s výškou 2000 mm, zavřená, 30 m·s⁻¹

Varianta	m [kg]	propustnost [%]	Fv [N]
bez výplně	104	100	148,4
dřevěné plaňky	165	41,9	267,8
jakly	179	95,2	243,5
plný plech	207	30,4	462,9

Tabulka 10: Srovnání hodnot pro varianty bran s výškou 1019 mm, zavřená, 30 m·s⁻¹

Varianta	m [kg]	propustnost [%]	Fv [N]
bez výplně	88	100	124,6
dřevěné plaňky	108	41,9	222,6
jakly	122	95,2	182,4
plný plech	144	30,4	290,2

Tabulka 11: Srovnání hodnot pro varianty bran s výškou 2000 mm, otevírání, 30 m·s⁻¹

Varianta	m [kg]	propustnost [%]	Fv [N]
bez výplně	104	100	139,5
dřevěné plaňky	165	41,9	214,4
jakly	179	95,2	220,0
plný plech	207	30,4	333,8

Tabulka 12: Srovnání hodnot pro varianty bran s výškou 1019 mm, otevírání, 30 m·s⁻¹

Varianta	m [kg]	propustnost [%]	Fv [N]
bez výplně	88	100	117,8
dřevěné plaňky	108	41,9	179,0
jakly	122	95,2	161,2
plný plech	144	30,4	217,1

6.4 Vyhodnocení výsledků

Výsledky získané z analýz vidíme v tabulkách 5 – 12 a pomocí těchto výsledků jsme ověřili zmiňovaný koeficient tření určený pro nepříznivé klimatické podmínky. Tento koeficient je určený ve dvojnásobku hodnoty oproti běžnému koeficientu tření. Ověření tedy vyplývá z varianty plně výplně a velké působící rychlosti na rám kdy dochází ke zvětšení zatěžovací síly na pohon o skoro dvojnásobnou hodnotu. Můžeme si určit i číselně kdy vidíme v tabulce číslo 5 hodnotu síly pro nominální stav, kterému bývá běžně brána vystavena a k tomu vybereme hodnotu síly z tabulky číslo 12 kde se nachází výsledky z analýzy pro nepříznivé klimatické podmínky nebo – li výrazně větší rychlost proudění vzduchu (obě hodnoty vybrány z posledního řádku tabulek pro variantu brány s plným plechem). První zmíněná síla nabývá hodnoty 245,9 N a druhá zmíněná hodnoty 462,9 N. Podílem těchto dvou hodnot se dostáváme na hodnotu 1,88, tedy téměř blížící se k dvojnásobku nominálního stavu.

Dále z výsledků v tabulce vidíme jak se síla mění jak na rychlosti proudění vzduchu i u konstrukce bez výplně, tak i na propustnosti výplně. Propustností rozumíme plochu mezi jednotlivými prvky nebo profily v místě konstrukce rámu kudy může proudit vzduch skrz konstrukci brány. Rám bez výplně uvažujeme jako 100 % průchozí protože plochy profilů nám ve výsledcích neudělají velké rozdíly. Z výsledků vidíme, že především u velké rychlosti proudění vzduchu nám nižší průchodnost vzduchu může zvýšit výslednou sílu, i když je daná konstrukce s výplní lehčí než u varianty s těžší konstrukcí, ale větší propustností. Tento jev pozorujeme v tabulkách číslo 9 a 10 u variant s výplní dřevěných planěk s propustností 41,9 % a ocelových jaklů s propustností 95,2 %.

Můžeme také pozorovat z dosažených výsledků, že při nasimulovaném pohybu brány se při otevírání síla zmenšuje. Samozřejmě pro samotný pohon je snazší s bránou pohybovat, když je překonán prvotní záběrný moment. Dopočty působící síly na čelní stranu brány, tedy mohou vycházet z teorie působení sil na páku.

7 NÁVRH BLDC MOTORU

V této kapitole se budeme zabývat návrhem BLDC motoru pro pohon, který se stará o manipulaci s branou (otevírání – zavírání). Jeho výpočet budeme provádět na základě výše uvedených výsledků provedených metodou konečných prvků v prostředí Workbench. Konkrétně pro nejnepríznivější situaci, která nám nastala a vyšla ve vyhodnoceních těchto analýz. Nejnepríznivější stav zatížení můžeme určit z předchozích tabulek o číslech 5 – 12. Tento stav kdy pohon bude nejvíce zatěžován nám nastal v případě varianty modelu plného plechu ve výplni u brány s výškou 2000 mm a při rychlosti proudění vzduchu $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Přesnou hodnotu vidíme v tabulce číslo 9 a jedná se o působící výslednou sílu s hodnotou $F_v = 462,9 \text{ N}$.

Z takto získané zatěžovací síly si dopočítáme moment, se kterým bude pohon pracovat na výstupu neboli moment na pastorku pohonu při rozjezdu brány. Vypočítáme ho ze vztahu:

$$M = r_p \cdot F_v = 34,25 \cdot 10^{-3} \cdot 462,9 = 15,85 \text{ Nm}$$

Pro návrh motoru budeme počítat s parametry, které očekáváme od motoru, pro pohon jsou napětí $U_{DC} = 24 \text{ V}$, $P_n = 500 \text{ W}$, mechanické ztráty budeme pro výpočet uvažovat $\Delta P_{\text{mech}} = 20 \text{ W}$.

Jako prvním krokem byl provedený výpočet vypočtený převodový poměr u možné použitelné šnekové převodovky pro pohon, do kterého byl navržený motor.

$$i_{12} = \frac{D_2}{D_1} = \frac{81,3}{26,5} = 3,1$$

$$i_{13} = \frac{D_2}{D_1} = \frac{68,5}{26,5} = 2,6$$

$$i = i_{12} \cdot i_{13} = 8$$

V těchto máme D_2 které představuje průměr hnaného kola, D_1 je označení pro průměr hnacího kola, členy i_{12} a i_{13} jsou přepočtené převodové poměry mezi jednotlivými spoluzabírajícími ozubenými koly, i je tedy celkový vypočtený převodový poměr.

Z takto získaného převodového poměru můžeme přepočítat chtěný moment pohonu na moment se kterým budeme pracovat pro návrh BLDC motoru. Jedná se určení momentu přímo na samotném motoru. Jeho hodnotu určíme podle následujícího vztahu:

$$M_i = \frac{M}{i \cdot \eta} = \frac{15,85}{8 \cdot 0,6} = 3,3 \text{ Nm}$$

[14]

Vztah obsahuje tyto veličiny, M_i nám označuje vnitřní moment motoru, M je naše požadovaná maximální hodnota momentu i s převodovkou, η je účinnost odpovídající pro šnekovou převodovku.

Ze získané hodnoty momentu se můžeme přesunout k určení dalších parametrů motoru. Pro další výpočet ještě potřebujeme dopočítat hodnotu vnitřního výkonu P_i , který musí pokrýt jak požadovaný výkon stroje, tak i výkon mechanických ztrát ΔP_{mech} .

Jako další si určíme otáčky motoru při zatížení, k jejich hodnotě se dostaneme přes výpočet úhlové rychlosti. Získáme ji z následujícího vztahu:

$$\omega = \frac{P_i}{M_i} = \frac{520}{3,3} = 157,6 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

Veličiny v rovnici jsou následující ω je úhlová rychlost, P_i požadovaný výkon motoru, M vypočtený moment z předchozího kroku. Z takto získané hodnoty nyní můžeme získat výpočet otáček motoru při zatížení, a to dle vztahu který vypadá následovně.

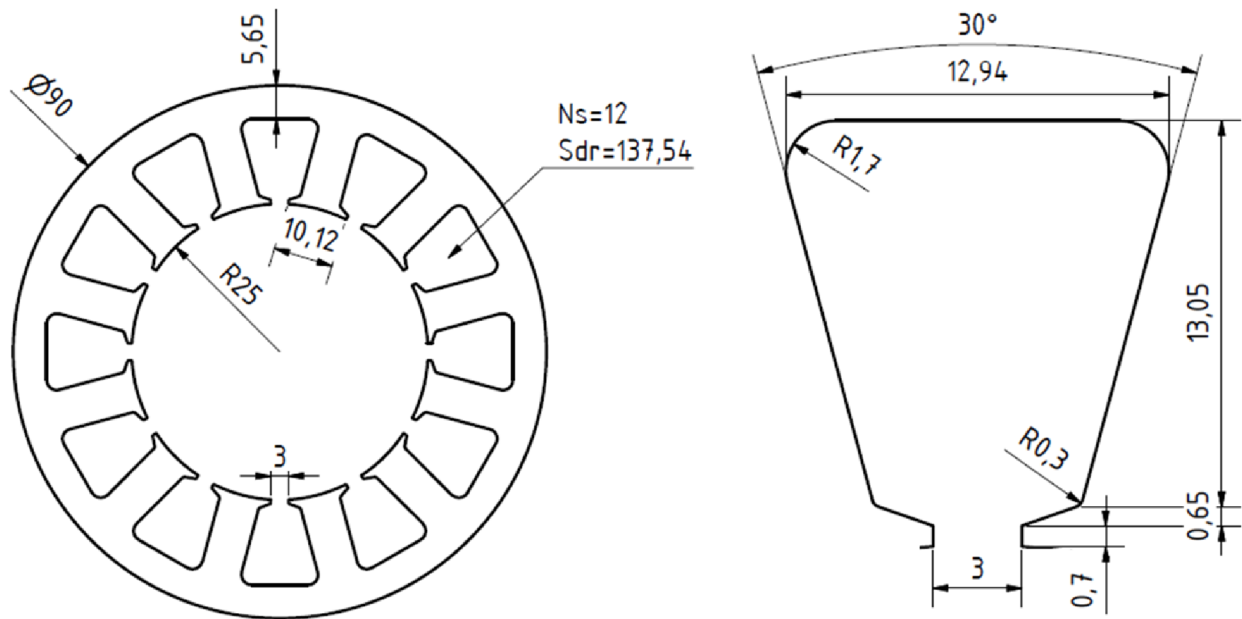
$$n = \frac{\omega \cdot 60}{2\pi} = \frac{157,6 \cdot 60}{2\pi} = 1505 \text{ min}^{-1}$$

Je třeba zmínit, že hodnota vnitřního momentu stroje nám určuje velikost stroje. Průměr stroje máme přibližně stanovený níže na obrázku 13 kde nám ho určuje statorový plech.

Ještě je třeba si určit možnou velikost vzduchové mezery, která se v případě malých strojů, jako třeba v našem případě volí poměrně velká v rozsahu délky 0,7 – 1 mm. Pro naši variantu řešení návrhu BLDC motoru zvolíme délku vzduchové mezery na $\delta = 0,7$ mm.

Do statorového plechu, který byl výše zmíněný a je zobrazený na další straně, je počítáno s vložením rozloženého vinutí. Jako další ze základních věcí, se kterou je třeba kalkulovat při návrhu třífázového stroje v tomhle případě BLDC motoru je počet pólů, se kterým dále souvisí počet drážek na pól a fázi. Pro náš návrh uvažujeme čtyřpólový stroj. Varianta čtyřpólového stroje v případě BLDC sebou nese ideálnější obdélníkový průběh indukovaného napětí, dále u této varianty získáme výhodu z pohledu menšího rozměru statorového a rotorového jha, konkrétně jejich výšky a také takto provedený stroj dosahuje menšího demagnetizujícího účinku při reakci kotvy. [18]

Dále je třeba si pro další výpočty určit geometrii, se kterou budeme dále počítat. Jak je vidět na obrázku 13, jedná se o plech statorového svazku. Vidíme zde rozměry potřebné pro návrh rotoru, které můžeme jednoduchými dopočty získat od vnitřního rozměru statorového plechu v tomto případě se jedná o hodnotu průměru 50 mm. Dále vidíme počet drážek a plochu jedné drážky, tyto rozměry jsou důležité pro návrh vinutí. Počet drážek máme tedy 12 a plocha jedné drážky je 137,54 mm².

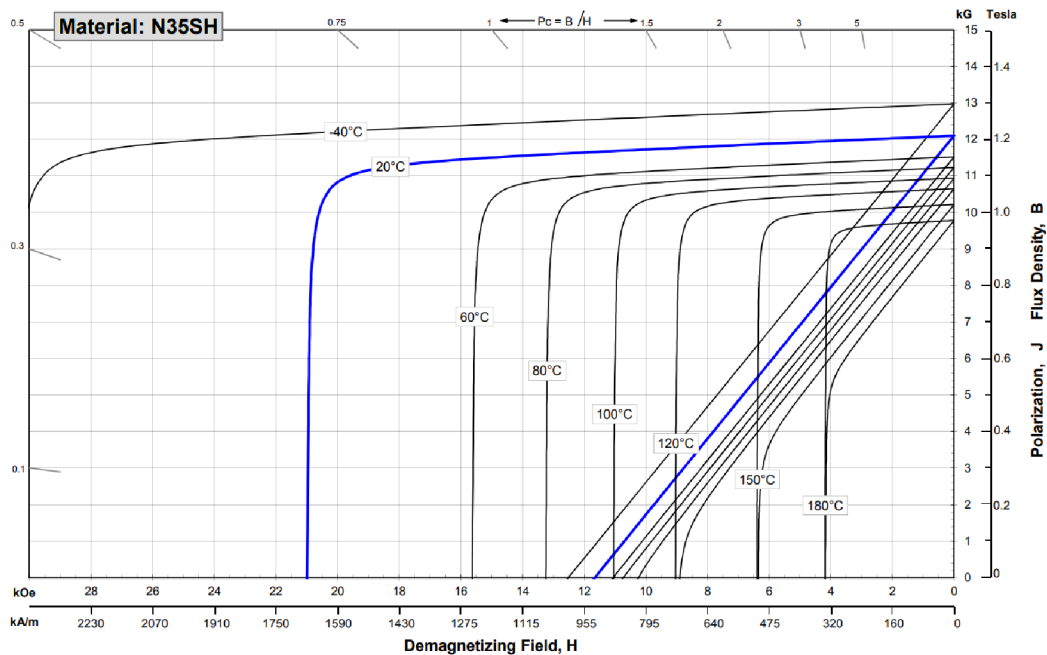


Obrázek 14: Orientační zobrazení parametrů statorového plechu

Z předchozích získaných informací a parametrů si nyní můžeme určit materiál permanentních magnetů. Samozřejmě z ekonomického hlediska se vždy nabízí použití feritových permanentních magnetů. Ovšem pokud máme požadavky na co nejlepších poměr výkonu ku hmotnosti, je třeba uvažovat nad permanentními magnety ze vzácných zemin. Pakliže se z těchto důvodů rozhodneme pro použití magnetů ze vzácných zemin, konkrétněji NdFeB, je nutno dobře uvážit provozní teploty stroje, protože právě u těchto magnetů se jejich maximální provozní teplota pohybuje v nižších hodnotách, než je tomu u ostatních permanentních magnetů. Zde pro náš výpočet použijeme právě permanentní magnety NdFeB s katalogovým označením N35SH. Počítáme s provozní teplotou do 80 °C. U vybraného permanentního magnetu máme následující parametry:

- Remanentní indukce $B_r = 1,07 \text{ T}$
- Koercitivní síla $H_c = 930 \text{ kA/m}$

[18]



Obrázek 15: Ukázka magnetizační charakteristiky pro PM N35SH [17]

Tím, že jsme vybrali magnety NdFeB můžeme se určit magnetickou indukcí ve vzduchové mezeře. V případě elektrických strojů s permanentními magnety NdFeB bývá magnetická indukce ve vzduchové mezeře v rozsahu 0,7 – 0,8 T. Zde provádíme prvotní výpočet stroje, tedy zvolíme střední hodnotu ze zmíněného rozsahu, a tedy $B_\delta = 0,75$ T. Ideální hodnotu můžeme dosáhnout až následnou optimalizací.

V dalším kroku se zaměříme na další výpočet důležitý pro návrh stroje, jedná se o určení délky svazku železa nebo – li také tzv. aktivní délku stroje, ve které nám právě vzniká výše vypočtený vnitřní moment stroje. Před tímto výpočtem je ovšem třeba si určit ještě několik parametrů, protože jak vyplývá z principu funkce BLDC motoru, tak vždy vinutí jedné fáze je odpojené tzv. komutuje a napájena jsou zbylá vinutí fází. Tedy tím, že při našem návrhu řešíme třífázový motor je možné uvažovat jako současně aktivní vždy vinutí dvou. Tyto vinutí jsou obsažené ve $2/3$ všech satorových drážek zde označeno jako $Q_s = 12$ a také maximální proudovou hustotu σ_{max} . Proudovou hustotu u malých a uzavřených elektrických strojů volíme v rozsahu 3,1 až 6,2 A/mm² tedy při tomhle předběžném návrhu si zvolíme její hodnotu na $\sigma_{max} = 5$ A/mm² Tedy pro výpočet vzorce, který vidíme níže použijeme přepočtení drážek následovně $Q_{SA} = 2/3 \cdot Q_s$. Ovšem předtím, než bude možné vypočítat celkovou délku svazku železa, je třeba si určit hodnotu celkového proudu ve všech současně aktivních vodičích uložených v drážkách statoru označený I_{tot} . Ve vzorci máme ještě obsažené údaje o ploše drážky S_{as} v součinu s činitelem plnění k_{pCu} , která volíme v běžné hodnotě 0,3 tyto dva parametry v součinu tvoří průřez mědi v drážce. [18]

Celkový proud ve všech současně aktivních drážkách tedy vypočteme podle následujícího vztahu kam dosadíme předem zmíněné a určené parametry.

$$I_{tot} = Q_{SA} \cdot S_{ds} \cdot k_{pCu} \cdot \sigma_{max} = \frac{2}{3} \cdot 12 \cdot 137,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,3 \cdot 5 \cdot 10^6 = 1650 \text{ A}$$

Pro určení potřebné délky svazku železa je zapotřebí ještě určit střední poloměr vzduchové mezery. Tento parametr vidíme v rovnici označený jako r_δ . Určíme ho následovně.

$$r_\delta = \frac{D_{Si}}{2} - \frac{\delta}{2} = \frac{50}{2} - \frac{0,7}{2} = 24,65 \text{ mm}$$

Ve vzorci vidíme vnitřní průměr statoru D_{Si} a délku vzduchové mezery δ , kterou jsme si určovali výše. Z takto získaných všech potřebných parametrů nyní můžeme dopočítat potřebnou délku svazku železa podle vzorce ve tvaru:

$$l_{Fe} = \frac{M_i}{r_\delta \cdot I_{tot} \cdot B_\delta} = \frac{3,3}{24,65 \cdot 10^{-3} \cdot 1650 \cdot 0,75} = 108 \text{ mm}$$

Jako další část výpočtů si určíme přibližné ztráty stroje především pro kontrolu reálné volby proudové hustoty, a tedy stačí je určit podle následující rovnice:

$$\Delta P_{max} = P_1 - P_2 = \frac{P_2}{\eta} - p_2 = \frac{500}{0,9} - 500 = 55,6 \text{ W}$$

Vzhledem k prvotnímu určení mechanických ztrát $\Delta P_{mech} = 20 \text{ W}$ můžeme dále dopočítat orientační rovnost ztrát.

$$\Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_d + \Delta P_{PM} = \Delta P_{max} - \Delta P_{mech} = 55,6 - 20 = 35,6 \text{ W}$$

Pro výpočet ztrát ve vinutí je zapotřebí si určit několik chybějících dílčích výpočtů, protože zatím zde nemůže použít běžný výpočet $\Delta P_{Cu} = R \cdot I^2$ je třeba si ztráty dopočítat s upraveného vzorce, ke kterému potřebujeme následující dílčí výpočty.

$$r_{ds} = \frac{1}{2} \cdot \frac{D_{Si} + D_{ds0}}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{50 + 78,7}{2} = 32,18 \text{ mm}$$

[18]

Tímto výpočtem jsme získali střední poloměr statorové drážky a D_{as} nám zde označuje vnější průměr drážek. Jako dalším dílčím výpočtem následuje šířka statorové drážky, a to výpočtem ze vztahu níže, do kterého dosadíme střední poloměr statorové drážky a šířku zubu statoru zde označeného jako b_{zs} . [18]

$$b_{as} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{as}}{Q_s} - b_{zs} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 32,18}{12} - 6,88 = 9,97 \text{ mm}$$

Následující dílčí výpočet je zjednodušený oproti praxi, a to díky tomu, že v praxi je nutné uvažovat konkrétní typ vinutí, křížení čel jednotlivých cívek atd. Jedná se o výpočet střední délky závitu, který je dán délkou svazku železa a délkou čela vinutí. Zjednodušení zde máme v podobě uvážení, že navinutá cívka je těsně obepnuta kolem statorového svazku. Což je bráno jako nejideálnější případ, je tím docíleno nejkratší délky. Pro samotný výpočet střední délky závitu je ještě zapotřebí určení délky oblouku spojujícího středy dvou drážek dané cívky. Pro 2p pólový stroj jej můžeme určit ze vztahu:

$$l_{z1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{as}}{2p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 32,18}{4} = 50,55 \text{ mm}$$

Takže střední délku závitu nyní můžeme spočítat pomocí vztahu:

$$l_z = 2 \cdot l_{Fe} + 2 \cdot b_{as} + 2 \cdot l_{z1} = 2 \cdot 108 + 2 \cdot 9,97 + 2 \cdot 50,55 = 337 \text{ mm}$$

Jak bylo dříve zmíněno, tak z principu funkce třífázového BLDC motoru vždy jedna fáze komutuje. Tedy můžeme uplatnit zjednodušení v podobě úvahy s objemem vinutí (mědi) ve dvou fázích a určenou proudovou hustotou. Díky tomu, že dvě současně aktivní fáze zabírají Q_{SA} nebo – li $Q_{SA}/2$ cívek. Takový objem získáme pomocí vztahu:

$$V_{CuA} = \frac{Q_{SA}}{2} \cdot S_{as} \cdot k_{pCu} \cdot l_z = \frac{8}{2} \cdot 137,5 \cdot 0,3 \cdot 337 = 5,5605 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Abychom mohli určit ztráty na vinutí je třeba si přepočítat měrný odpor mědi pro určených 80 °C provozní teploty stroje. Měrný odpor při této teplotě zjistíme díky výpočtu dle vztahu:

$$\begin{aligned} \rho_{Cu80} &= \rho_{Cu20} \cdot \left(1 + \frac{\vartheta - 20}{234,5 + 20}\right) = 1,724 \cdot 10^{-8} \cdot \left(1 + \frac{80 - 20}{234,5 + 20}\right) \\ &= 2,13 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m \end{aligned}$$

Ztráty ve vinutí tedy určíme následovným dosazením všech dopočtených dílčích a určených parametrů do vztahu ve tvaru:

$$\Delta P_{Cu} = \rho_{Cu80} \cdot \sigma_{max}^2 \cdot V_{CuA} = 2,13 \cdot 10^{-8} \cdot (5 \cdot 10^6)^2 \cdot 5,5605 \cdot 10^{-5} = 29,6 \text{ W}$$

Jako další části návrhu stroje bude určení výšky magnetu, a to pomocí pracovního bodu PM. Tento bod je v podstatě stanoven z určené magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Dále při tomto výpočtu uvažujeme odvození výpočtu výšky magnetu z upraveného vzorce magnetického napětí, ve kterém zanedbáme reakci kotvy. Uvažujeme totiž lineární části B-H charakteristiky feromagnetických materiálů, protože střední hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře pod pólem se nezmění (na jedné straně se příčná reakce kotvy zvýší a v druhé části se sníží). Ovšem je třeba poté provést kontrolní výpočet výšky magnetu, aby nedošlo k jeho nevratné demagnetizaci např. při rozběhu nebo přetížení. Získáme tedy vztah, který budeme dále upravovat k výslednému vyjádření. [18]

$$2 \cdot U_{mPM} = 2 \cdot U_{m\delta}$$

Magnetické napětí $U_{m\delta}$ v rovnici můžeme také spočítat přes intenzitu magnetického pole ve vzduchové mezeře pod zubem statoru a délky vzduchové mezery δ .

$$U_{m\delta} = H_{\delta max} \cdot \delta$$

Díky drážkám ve statoru není hodnota magnetické indukce pod pólem konstantní, ale v místě, kde je drážka otevřena dochází ke zvětšení vzduchové mezery a tím dochází k poklesu mag. indukce. Vliv drážkování si určíme pomocí Cartrova činitele k_c , který si vyjádříme ze vztahu:

$$k_c = \frac{\tau_{dS}}{\tau_{dS} - \kappa \cdot b_{dS1}} = \frac{12,91}{12,91 - 0,46 \cdot 3} = 1,12$$

Do výpočtu byly dosazeny dodatečné výpočty konstanty κ a drážkové rozteče τ_{dS} a to ze vztahů:

$$\kappa = \frac{\frac{b_{dS1}}{\delta}}{5 + \frac{b_{dS1}}{\delta}} = \frac{\frac{3}{0,7}}{5 + \frac{3}{0,7}} = 0,46$$

[18]

Parametrem b_{dS1} je myšlena šířka otevření statorové drážky.

$$\tau_{dS} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{\delta}}{Q_S} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 24,65}{12} = 12,91 \text{ mm}$$

V následném výpočtu si určíme hodnotu magnetické indukce pod zubem statoru, s touto hodnotu počítáme, protože uvažujeme nominální vzduchovou mezeru a díky tomu dosáhneme střední hodnoty B_{δ} .

$$B_{\delta_{max}} = k_C \cdot B_{\delta} = 1,12 \cdot 0,75 = 0,84 \text{ T}$$

Dále dopočítáme permeabilitu permanentního magnetu, a to za pomoci odečtu hodnot remanentní indukce a koercitivní síly charakteristiky permanentního magnetu, a to z jejího druhého kvadrantu kde lineární i při naší uvažované teplotě 80 °C.

$$\mu_{rPM} = \frac{B_r}{\mu_0 \cdot H_C} = \frac{1,07}{(4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}) \cdot 930 \cdot 10^3} = 0,916$$

Dalším výpočtem je intenzita magnetického pole pro určitý pracovní bod permanentního magnetu.

$$H_{PM} = \frac{B_{PM} - B_r}{\mu_0 \cdot \mu_{rPM}} = \frac{0,84 - 1,07}{(4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}) \cdot 0,916} = -199,8 \text{ kA/m}$$

Ze získaných hodnot nyní dopočítáme potřebnou výšku permanentního magnetu:

$$l_{PM} = \frac{B_{\delta_{max}} \cdot \delta}{\mu_0 \cdot H_{PM}} = \frac{0,84 \cdot 0,7 \cdot 10^{-3}}{(4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}) \cdot 199,8 \cdot 10^3} = 2,34 \cdot 10^{-3} \approx 2,5 \text{ mm}$$

Na vypočtenou hodnotu výšky permanentního magnetu dále provedeme kontrolu na demagnetizaci při maximálním proudu. Uvažujeme zde, že navrhovaný motor by měl odolat proudovému přetížení $I_k/I_n = 3$.

$$U_{mr} = \frac{Q_{SA}}{2p} \cdot S_{dcu} \cdot \sigma_{max} \cdot \frac{I_k}{I_n} = \frac{I_{tot}}{2p} \cdot \frac{I_k}{I_n} = \frac{1650}{4} \cdot 3 = 1237,5 \text{ A}$$

V místě styku magnetického pole permanentních magnetů a reakčního pole působí proti sobě, nemusí magnetická indukce v permanentních magnetech dosahovat určené hodnoty $B_{\delta_{max}}$. Z důvodu jisté bezpečnostní rezervy je možné uvažovat magnetickou indukci při maximálním proudu ve vinutí statoru takovou, aby neklesla v žádném místě magnetu pod $B_{\delta_{min}} = 0,15 \text{ T}$. [18]

Právě výšku magnetu ověříme na tuto hodnotu magnetické indukce a proudové přetížení, a to dle vztahu:

$$H_{PMk} = \frac{B_{PMk} - B_r}{\mu_0 \cdot \mu_{rPM}} = \frac{0,15 - 1,07}{(4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}) \cdot 0,916} = -799,3 \text{ kA/m}$$

Tedy ověření výšky magnetu je následující:

$$l_{PMk} = \frac{1}{H_{PMk}} \cdot \left(\frac{B_{\delta kmin}}{\mu_0} \cdot \delta + \frac{U_{mr}}{2} \right) = \frac{1}{799,3 \cdot 10^3} \cdot \left(\frac{0,15}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,7 \cdot 10^{-3} + \frac{1237,5}{2} \right) \\ = 0,88 \text{ mm}$$

Z kontrolního výpočtu výšky permanentních magnetů by měly trojnásobku proudu odolat PM o výšce 0,88 mm, a to z hlediska nevratné demagnetizace. Navržená výška magnetu 2,5 mm nám tedy vyhovuje.

V dalším návrhu pro stroj se budeme zabývat počtem závitů statorových cívek. Jedním z prvních myšlenek by mělo být jaké bude zapojení vinutí statoru. Pro náš návrh zvolíme zapojení do hvězdy. Tedy jak bylo již vícekrát zmíněno, tak princip třífázového BLDC motoru je, že v každém okamžiku budou na napětí připojeny dvě fáze. V tom případě bude maximální fázové napětí poloviční vůči stejnosměrnému meziobvodu měniče U_{DC} dle vztahu:

$$U_{fmax} = \frac{U_{DC}}{2} = \frac{24}{2} = 12 \text{ V}$$

Následným výpočtem si určíme velikost indukovaného napětí jedné fáze U_{ifmax} . Toto napětí je nižší o úbytek na tranzistoru měniče ΔU_{tr} a o úbytek na činném odporu vinutí fáze ΔU_{Rf} . Jako předběžný předpoklad těchto úbytků při jmenovitém proudu si je určíme jako $\Delta U_{tr} \approx 1 \text{ V}$ a $\Delta U_{Rf} \approx 1 \text{ V}$. Výpočet tedy bude následující:

$$U_{ifmax} = U_{fmax} - \Delta U_{tr} - \Delta U_{Rf} = 12 - 1 - 1 = 10 \text{ V}$$

Dále je možné dopočítat počet vodičů jedné fáze (jsou zapojeny do série) dle vztahu:

$$N_f = \frac{U_{ifmax}}{U_{ivmax}} = \frac{U_{ifmax}}{B_{\delta} \cdot l_{Fe} \cdot \omega \cdot r_{\delta}} = \frac{10}{0,75 \cdot 108 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{1505}{60} \cdot 24,65 \cdot 10^{-3}} = 32$$

Zde U_{ivmax} nám značí indukované napětí ve vodiči, který je ve statorové drážce.

[18]

Nyní je možné dopočítat počet vodičů v jedné statorové drážce, a to podělením počtu vodičů ve fázi a počtu drážek na fázi. Parametr q ve vztahu nám určuje počet drážek na pól a fázi, a $2p$ nám značí počet pólů. Vztah výpočtu je tedy ve tvaru:

$$N_{ds} = \frac{N_f}{q \cdot 2p} = \frac{32}{1 \cdot 4} = 8$$

Výsledek výpočtu nám tedy ukazuje, že v každé drážce bude uloženo 8 vodičů, jedna fáze tedy bude mít 16 závitů.

Ze získaného výpočtu počtu vodičů jedné statorové drážky si můžeme dopočítat průřez vodiče a to z prvotního stanovení jeho průměru a následnému přiřazení nejbližšího průměru vyráběného měděného vodiče. Požijeme následující vztahy:

$$d_v = \sqrt{\frac{S_{ds} \cdot k_{pcu}}{N_{ds}}} = \sqrt{\frac{137,5 \cdot 0,3}{8}} = 2,27 \text{ mm}$$

Nejbližší vyráběný rozměr vnějšího průměru měděného vodiče je 2,5 mm. Tuto hodnotu dosadíme do výpočtu průřezu vodiče ve vztahu:

$$S_v = \frac{\pi \cdot d_v^2}{4} = \frac{\pi \cdot 2,5^2}{4} = 4,9 \text{ mm}^2$$

Jako poslední z kroků našeho předběžného návrhu BLDC motoru si určíme výšku j_{ha} rotoru a statoru. V případě výpočtu j_{ha} rotoru uvažujeme pro zjednodušení pouze magnetický tok vyvolaný PM a předpokládáme zvolenou střední hodnotu magnetické indukce B_δ pod magnetem. Pro výpočet výšky j_{ha} rotoru ještě potřebujeme dopočítat pólovou rozteč τ_p nebo – li obloukovou vzdálenost dvou pólů, a to dle vzorce:

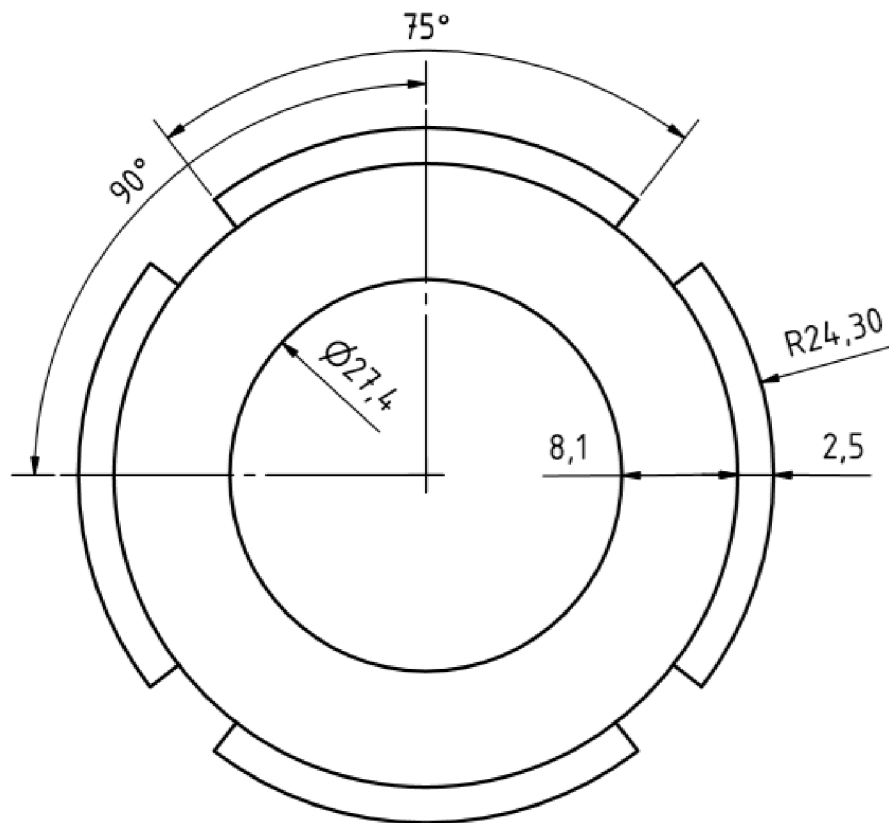
$$\tau_p = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_\delta}{2p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 24,65}{4} = 38,7 \text{ mm}$$

Při výpočtu výšky jha rotoru je třeba si zvolit pólové krytí α_{PM} nebo – li poměr mezi obloukovou délkou PM a pólovou roztečí. Hodnota oblouku magnetu se poměrně často volí na 150° elektrických a pólová rozteč je 180° elektrických. Pro výpočet bude ještě uvažována magnetická indukce ve jhu rotoru $B_{jr} = 1,5$ T z B-H charakteristiky feromagnetického materiálu (volí se v oblasti kolene). Výšku jha rotoru se tedy vypočítá dle tvaru vztahu:

$$h_{jr} = \frac{1}{2} \cdot \frac{B_\delta}{B_{jr}} \cdot \tau_p \cdot \alpha_{PM} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,75}{1,5} \cdot 38,7 \cdot \frac{150^\circ el}{180^\circ el} = 8,1 \text{ mm}$$

Výšku jha statoru můžeme odečíst z vyobrazeného statorového plechu na obrázku 13 nebo ji můžeme dopočítat z vypsanych rozměrů a to následovně:

$$h_{js} = \frac{D_{so} - D_{dso}}{2} = \frac{90 - 78,7}{2} = 5,65 \text{ mm}$$



Obrázek 16: Orientační náčrtek rotoru s PM na povrchu rotoru

8 ZÁVĚR

Na úvod diplomové práce byla zpracována teorie ohledně pohonů používaných k automatizaci posuvných bran. Tyto pohony byly popsány po jednotlivých součástech a byla zde vysvětlena problematika, kterou je třeba uvažovat, aby bylo docíleno správného navržení pohonu k dané konstrukci. Čímž je možné ovlivnit případné větší mechanické namáhání, a tedy případný předčasný servis pohonu. V rámci seznámení s pohonem posuvných bran tedy bylo řečeno, jaké se používají typy motorů v závislosti na zatížení, jak vzhledem k váze konstrukce, tak četnosti použití nebo – li počtu cyklů brány. Dále zde byla popsána běžně používaná převodovka u těchto pohonů.

V této práci také byl také proveden model samonosné brány dle, která byla i reálně vyráběna. Model samonosné brány byl vytvořený v programu Autodesk Inventor. Tento model posloužil především pro ukázkou jednotlivých míst, kde dochází ke vzniku zatížení na pohon. Parametry namodelované brány byly průjezdová šířka 4 metry, výška brány od terénu 2 metry. Z rozměrů brány byla vypočtena celková váha konstrukce, a to pře konstanty normovaných profilů od výrobce uváděných jako kg/m. Váha konstrukce vyšla 271,35 kg i s uvážením povrchové úpravy žárového zinku. Díky vypočtené váze bylo možné vyčíslit vlivy zatížení pomocí třecích sil do podoby momentu, který musí pohon překonat při záběru. Zatěžovací moment vyčíslený pro nejnepríznivější případ, a tedy zhoršené klimatické podmínky (koeficient tření = 0,2), díky kterému přiřazujeme vhodný pohon nabyl hodnoty 15,98 Nm.

Další část práce byla věnována teoretickému rozboru a popisu synchronních strojů s permanentními magnety na rotoru. Rozbor byl proveden z důvodu zvolení varianty BLDC motoru pro pohon bran, který byl v rámci práce navržen.

V následujícím úkolu bylo vypracování materiálů pro práci s analýzou v prostředí Workbench. V rámci vypracování materiálů je myšleno vytvoření osmi základních modelů konstrukcí bran s ukotvením simulujícím zavřenou bránu. Z nichž čtyři varianty z těchto osmi byly konstrukce s výškou 2000 mm a rozdílnými výplněmi (bez výplně, dřevěné plaňky, jakly, plný plech) a další čtyři varianty byly pro stejné typy výplní ale s rozdílnou výškou konstrukce a to 1019 mm. K těmto základním osmi modelům bylo vytvořeno dalších osm modelů ve zmíněných dvou výškách a se stejným typem výplní ale rozdílným místem ukotvení, které nám simulovalo případné otevírání. Myšlenkou v různorodosti bylo dosáhnout dostatku výsledků na porovnání nejnepríznivějších stavů ve smyslu působící síly na pohon, ke kterému jsme pak z dosaženého výsledku následně navrhovali BLDC motor. Všechny modely prošly analýzou CFX v prostředí Workbench a jejich výpočty byly provedeny metodou konečných prvků, kde byly testovány na rychlosti proudění

vzduchu $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Ze získaných výsledků z analýz byly vytvořeny srovnávací tabulky s číslem 5–12, ve kterých vidíme dosaženou výslednou sílu působící na pohon. Výsledek získaného nejnepříznivějšího stavu byl vypočten pro variantu konstrukce s výškou 2000 mm a výplň s plným plechem při rychlosti proudění vzduchu $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Hodnota síly se nachází v tabulce číslo 9 a její velikost je 462,9 N.

Ze získané nejvyšší hodnoty zatížení na pohon byl proveden návrh zmíněného BLDC motoru. Kdy jsme v prvotní fázi přepočítali vyčíslenou nejvyšší sílu na moment, který při rozběhu musí překonat pastorek pohonu. K motoru byla přiřazena převodovka s převodovým poměrem 8. Z přepočtu momentu za pomoci převodového poměru byla získána hodnota momentu pro samotný motor vyčíslena na hodnotu 3,3 Nm. Pro návrh byly použity vstupní parametry zmíněné v kapitole číslo 7 a v jejím třetím odstavci. Pro návrh stroje byly také použity permanentní magenty ze vzácných zemin, konkrétně N35SH. Magenty jsou sice předimenzované, ale odolají zvolené provozní teplotě $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Stroj byl navrhován jako předběžný návrh zahrnující zjednodušující předpoklady. Pro přesné určení všech parametrů a celkového zdroje by bylo vhodné použít výpočet pomocí metody konečných prvků.

LITERATURA

- [1] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. V Brně: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [2] FRANZ JOSEF MACK UND MICHAEL WAGNER-AMBS. [SEW-EURODRIVE]. *Getriebemotoren: Prinzip, Aufbau und Einsatz*. 3., aktualisierte Aufl. Landsberg/Lech: Verl. Moderne Industrie, 2001. ISBN 34-789-3247-5.
- [3] ŠEVČÍK, P. *Výpočet jednofázového asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 80 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.
- [4] Hallův jev. In: *Umel.feec* [online]. Brno, 2005 [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/bmms/projekty_2005/Sveda/03.htm
- [5] ŠIMON, Josef. BLDC aneb DC motor s nulovými náklady na údržbu. *ELEKTRO* [online]. 2011, (10), 12 - 14 [cit. 2018-01-03]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/bldc-aneb-dc-motor-s-nulovymi-naklady-na-udrzbu--10016>
- [6] Neveřejné interní dokumenty podniku
- [7] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a JEARL WALKER, DUB, Petr, ed. *Fyzika*. 2., přeprac. vyd. Přeložil Miroslav ČERNÝ. Brno: VUTIUM, c2013. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [8] MIČKAL, Karel. *Technická mechanika I: pro střední odborná učiliště a střední odborné školy*. 4., nezměn. vyd. Praha: Informatorium, 2008. ISBN 978-80-7333-063-7.
- [9] DROZDA, Jiří. *Příručka ANSYS Workbench*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2012. ISBN 978-80-01-05175-7.
- [10] KRAJÁNEK, Vladimír. *Návrh synchronního motoru s permanentními magnety pro pohon elektromobilu*. Plzeň, 2016. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Karel Hruška, PhD.
- [11] Axiální, diametrální i jiné – které typy magnetizace existují?. Unimagnet [online]. 20. 6. 2017 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.unimagnet.cz/blog/axialni-diametralni-i-jine-ktre-typy-magnetizace-existuji-n113?fbclid=IwAR1loV2IxjZsifP18Fqxjg-IKGPKxpjGaxhbrdePk3H4cEW1NV0s91WgfI>

- [12] GIERAS, Jacek F. Permanent magnet motor technology: design and applications. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, c2010. ISBN 978-1-4200-6440-7.
- [13] *ANSYS CFX Tutorials*. United states of America: SAS IP, 2013.
- [14] KOLÁČNÝ, Josef. *Elektronické pohony*. Brno: FEKT VUT.
- [15] DLOUHÝ, Jaroslav. Permanentní magnety. Liberec, 2017. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Prof. Mgr. Jiří Erhart, Ph.D.
- [16] HINKELMANN, Luboš, Jiří POLÁŠEK a aj. Řemesla: Zpracování kovů a opravárenství. ELUC [online]. Olomouc, 2015, 25.8.2015 [cit. 2019-05-20]. ISBN MSMT-7521/2015-40. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1904?fbclid=IwAR3pcKH1WGGw3gC97cgA7V-WB9kFhdV7L_48F9klfhHe4BWRoIrOMA2OI-c
- [17] NEODYMIUM IRON BORON MAGNETS. ARNOLD MAGNETIC TECHNOLOGIES [online]. Mason Digital, 2019 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://www.arnoldmagnetics.com/products/neodymium-iron-boron-magnets/?fbclid=IwAR2szIL1ozB4mmfEtVdjH7LXWo3cOPn_IFLIylCuXKkByKpgl7IAJKWIZss
- [18] VÍTEK O. Výpočet magnetického obvodu BLDC motoru s permanentními magnety. STUDIJNÍ PODKLADY. BRNO, 2012, 17 STR.
- [19] VOREL P. Synchronní stroje s permanentními magnety. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-7204-417-6
- [20] BUREŠ, P. Návrh synchronního stroje s permanentními magnety. Brno: Vysokéučení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 89s. Vedoucí práce: doc. Ing Ondřej Vítek, Ph.D.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

<i>AC</i>	alternate current; střídavý proud	[-]
<i>B</i>	magnetická indukce	[T]
<i>b_{dS1}</i>	šířka otevření statorové drážky	[mm]
<i>B_{jr}</i>	magnetická indukce jha rotoru	[T]
<i>BLDC</i>	označení pro bezkartáčový stejnosměrný motor	[-]
<i>B_{PMk}</i>	magnetická indukce při proudovém přetížení	[T]
<i>B_r</i>	remanentní indukce	[T]
<i>b_{ZS}</i>	šířka zubu statoru	[mm]
<i>B_δ</i>	magnetická indukce ve vzduchové mezeře	[T]
<i>B_{δmax}</i>	magnetická indukce pod zubem statoru	[T]
<i>CFX</i>	analýza Fluid Flow	[-]
<i>D</i>	průměr vodiče	[mm]
<i>d</i>	v práci užito jako délka samonosné brány	[mm]
<i>D₁</i>	průměr hnacího kola	[mm]
<i>D₂</i>	průměr hnaného kola	[mm]
<i>DC</i>	direct current; stejnosměrný proud	[-]
<i>D_{dSO}</i>	vnější průměr drážek	[mm]
<i>D_{Si}</i>	vnitřní průměr statoru	[mm]
<i>D_{so}</i>	vnější průměr statorového plechu	[mm]
<i>d_v</i>	vnější průměr vodiče	[mm]
<i>f</i>	frekvence napájecího napětí	[Hz]
<i>f₁</i>	nominální koeficient tření	[-]
<i>f₂</i>	koeficient tření zhoršených klimatických vlivů	[-]
<i>F₂</i>	síla rychlosti proudění větru	[N]
<i>F_G</i>	tíhová síla	[N]
<i>F_m</i>	síla, kterou vytváří samotná hmotnost konstrukce	[N]
<i>F_T</i>	třecí síla	[N]
<i>F_{t1}</i>	třecí síla pro nominální stav	[N]
<i>F_{t2}</i>	třecí síla pro zhoršené tření klimatické síly	[N]
<i>F_v</i>	výsledné celkové zatížení	[N]
<i>g</i>	gravitační zrychlení	[m/s ²]
<i>h</i>	max. počet cyklů	[-]
<i>H_c</i>	koercitivní síla	[kA/m]
<i>H_C</i>	koercitivní síla PM	[kA/m]
<i>h_{jr}</i>	výška jha rotoru	[mm]
<i>h_{js}</i>	výška jha statoru	[mm]
<i>H_{PM}</i>	intenzita magnetického pole PM	[kA/m]

H_{PMk}	intenzita mag. pole při proudovém přetížení	[kA/m]
i	převodový poměr	[-]
I_{tot}	celkový proud v aktivních vodičích	[A]
k_C	Cartrův činitel	[-]
k_{pCu}	činitel plnění drážky	[-]
l	celková délka jednotlivých použitých profilů	[mm]
l_{Fe}	potřebná délka svazku železa	[mm]
l_{PMk}	nejmenší přípustná výška magnetu	[mm]
l_z	střední délka závitu	[mm]
m	hmotnost konstrukce brány	[kg]
M	moment síly	[Nm]
M_1	moment síly pro nominální stav	[Nm]
M_2	moment síly pro zhoršený stav tření	[Nm]
MKP	metoda konečných prvků	[-]
N	počet vodičů	[-]
N_{dS}	počet vodičů v jedné statorové drážce	[-]
N_f	počet vodičů jedné fáze zapojených do série	[-]
p	počet pólpárů	[-]
P_i	hodnota vnitřního výkonu	[W]
PM	permanentní magnety	[-]
P_n	jmenovitý výkon	[W]
Q_s	počet statorových drážek	[-]
Q_{SA}	počet aktivních drážek	[-]
r	rameno síly	[-]
r_δ	střední poloměr vzduchové mezery	[mm]
S_{dS}	plocha drážky	[mm ²]
S_v	průřez vodiče	[mm ²]
U_{dc}	stejnoseměrné napětí	[V]
U_{fmax}	maximální fázové napětí v ss meziobvodu	[V]
U_{ifmax}	velikost indukovaného napětí jedné fáze	[V]
U_{mPM}	magnetické napětí PM	[V]
U_{mr}	magnetické napětí ve statorových drážkách	[A]
$U_{m\delta}$	magnetické napětí	[A]
V_{CuA}	objem mědi aktivních drážek	[m ³]
Δ_{PCu}	výpočet ztrát ve vinutí	[W]
Δ_{Pmech}	mechanické ztráty stroje	[W]
Δ_{URf}	činný odpor vinutí fáze	[V]
Δ_{Utr}	úbytek na tranzistoru měniče	[V]
κ	konstanta Cartrova činitele	[-]

τ_{dS}	drážkové rozteče	[mm]
α_{PM}	pólové krytí	[°el]
η	účinnost odpovídající pro šnekovou převodovku	[-]
μ_0	permeabilita vakua	[-]
μ_{rPM}	permeabilita PM	[-]
ρ_{Cu}	měrný odpor mědi	[$\Omega \cdot m$]
σ_{max}	proudová hustota	[A/mm ²]
τ_p	pólová rozteč	[mm]
ω	úhlová rychlost	[rad/s]