

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Stavba výukového modelu motoru

Autor práce: Kryštof Švagr
Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Frank

Plzeň 2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Kryštof ŠVAGR**
Osobní číslo: **E17B0229P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Téma práce: **Stavba výukového modelu motoru**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování

1. Provedte návrh zjednodušených modelů
2. Vytvořte výkresovou dokumentaci
3. Zhotovte výukové modely



Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Veřejně dostupné informační zdroje, databáze www.ieee.org


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Frank**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan





Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

Abstrakt

Práce je v první části zaměřena na pohonné systémy použité v elektromobilech, jejich chlazení a potřebnou elektroniku pro provoz. Další část se zabývá vozy využívající ke svému pohonu některý ze zmíněných systémů. Poslední část se věnuje hlavnímu úkolu, vytvoření výukového modelu, který prezentuje konstrukci trakčního motoru použitého v elektromobilovém průmyslu.

Klíčová slova

Asynchronní motor, synchronní motor, BLDC, baterie, elektromobil

Abstract

The work is in the first part focused on the propulsion systems used in electric cars, their cooling and the necessary electronics for operation. The next part deals with cars using to drive one of the mentioned systems. The last part is devoted to the main task, the creation of an educational model that presents the design of a traction motor used in the electric vehicle industry.

Key words

Asynchronous motor, synchronous motor, BLDC, battery, electric vehicle

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni, dne

.....

Podpis

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat Ing. Zdeňku Frankovi za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích této práce.

Obsah

1 Úvod	11
2 Elektromotory	12
2.1 Asynchronní motor	12
2.1.1 Význam a použití	12
2.1.2 Princip	12
2.1.3 Konstrukce	14
2.2 Synchronní motory s permanentními magnety	16
2.2.1 Konstrukce statoru	16
2.2.2 Konstrukce rotoru	16
2.3 BLDC	17
2.3.1 Význam a použití	17
2.3.2 Princip	17
2.3.3 Konstrukce	18
2.4 Chlazení motorů v elektromobilovém průmyslu	19
2.4.1 Statorové chlazení	19
2.4.2 Rotorové chlazení	20
2.4.3 Chlazení olejem	21
3 Akumulátory vhodné pro trakční pohon	23
4 Koncepty pohonů v elektromobilech	25
4.1 Tesla model S	25
4.2 Koenigsegg Regera	29
4.3 BMW i3	31
5 Výukový model	34
6 Závěr	37
7 Přílohy	43

Seznam obrázků

1	Momentová charakteristika asynchronního stroje (převzato a upraveno z [7])	13
2	Účinnost asynchronního motoru s různými počty pólů [9]	15
3	Cena soustavy motor-převodovka podle počtu pólů [9]	15
4	Druhy rotoru synchronního stroje s permanentními magnety [3]	16
5	Principiální uspořádání BLDC motoru (převzato z [13])	18
6	BLDC motor z Hondy Accord 2005 (převzato z [13])	18
7	Chlazení a) šroubovitě, b) axiální (převzato a překresleno z [18])	20
8	a) Spirálové vzpěry v rotoru, b) využití vzpěry jako podpora čerpadla (převzato a překresleno z [18])	20
9	Chladicí kanál v duté hřídeli (převzato a překresleno z [17])	21
10	a) YASA P400R, b) dráha chladicího média (převzato a upraveno z [18])	22
11	Schéma Tesly S (převzato a překresleno z [26])	26
12	Průřez motoru (převzato a upraveno z [2])	27
13	Průřez hnací soustavy (převzato a upraveno z [31])	28
14	Koenigsegg Regera (převzato a upraveno z [35])	29
15	Pohonná jednotka (převzato a upraveno z [35])	30
16	BMW i3 (převzato a upraveno z [42])	31
17	Sestava motoru (převzato a upraveno z [43])	32
18	Rotor BMW i3 (převzato a upraveno z [43])	33
19	Řez modelu motoru	34
20	Statorové chlazení	35
21	Vytištěný model	36

Seznam tabulek

1	Porovnání akumulátorů [24]	24
---	----------------------------	----

Seznam symbolů a zkratek

n_s - synchronní otáčky magnetického pole [ot/min]

n - otáčky rotoru [ot/min]

f_1 - frekvence statorového vinutí [Hz]

p - počet pólů stroje [-]

s - skluz [-]

KDD - Koenigsegg Direct Drive

PMSM - Permanent magnet synchronous motor - synchronní motor s permanentními magnety

BLDC - Brushless DC electric motor - bezkartáčový stejnosměrný motor

WLTP - Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure - standard měření spotřeby a emisí

1 Úvod

Počet automobilů na světě se neustále zvyšuje, čímž úměrně narůstá produkce oxidu uhličitého. Z tohoto důvodu započal vývoj elektrických motorů pro pohon nebo pro zlepšení účinnosti spalovacího motoru. Ty jsou nahrazovány elektromotory či kombinací obou typů, tzv. hybridy. Výhody elektromotoru jsou především vysoká účinnost, jednoduchá konstrukce, a tím i menší poruchovost, absence hluku a vibrací.

Cílem práce je zkonstruovat a navrhnout model elektromotoru pro výukové účely, který bude vytvořen v program Solidworks a zhotoven pomocí technologie 3D tisku. Model bude inspirován trakčním motorem využívaným v elektromobilovém průmyslu. Práce na něm zahrnuje navržení jednotlivých dílů, vytištění, manuální úpravy a konečné sestavení.

Teoretická část bude věnována druhům elektromotorů a jejich chlazení, akumulátorům pro trakční pohon a ukázkám aplikace těchto technologií v konkrétních typech vozidel. V praktické části bude popsán návrh a realizace modelu motoru pro výukové účely.

2 Elektromotory

Každý výrobce se rozhoduje, jaký typ motoru zvolit pro své elektrické vozidlo. Automobil nejčastěji pohání asynchronní motor nebo synchronní stroj s permanentními magnety, stejnosměrný motor se používá zřídka. Indukční motor má oproti stejnosměrnému mnoho výhod, jako je robustnost, nízká cena, dobře zavedené výrobní techniky, hmotnost a účinnost. S rozvojem výkonové elektrotechniky a regulace dosahují pohony lepší účinnosti [1].

Mnoho dříve existujících indukčních motorů není schopno vyhovět z hlediska točivého momentu. Ty, které splňují vyšší požadavky na točivý moment, nejsou často tak účinné, jak je požadováno. Motory odolávající saturaci trpí nevýhodami, jako například vysoká cena, špatná spolehlivost či nežádoucí hmotnost. Elektrická vozidla mají velmi náročné požadavky na výkon, využití účinníku a měniče pohonů, vysokou účinnost, točivou sílu a maximální rychlost. Zároveň vyžadují, aby výsledné motory dosahovaly velké spolehlivosti, nízké hmotnosti, malých rozměrů a hromadné výroby při co nejnižších nákladech [2].

Bezpečné trvání přetížení motoru je řádově několik minut, dodaný točivý moment a výkon jsou omezeny maximálním jmenovitým výkonem měniče a baterie [3].

2.1 Asynchronní motor

2.1.1 Význam a použití

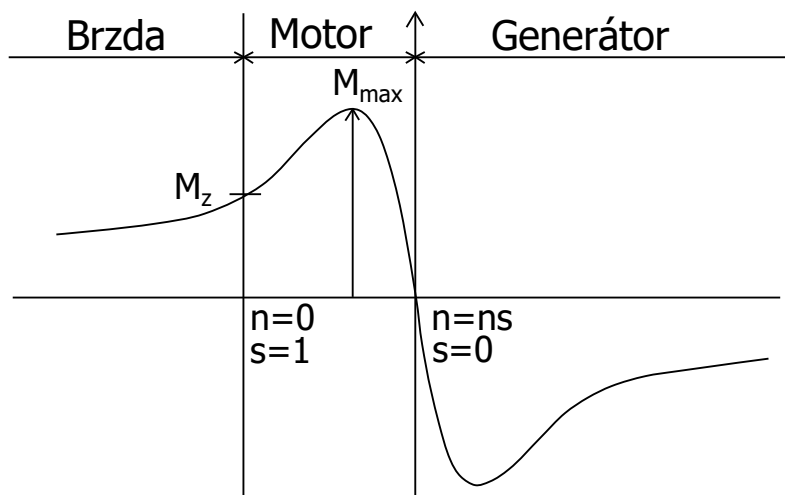
Nejrozšířenějším typem indukčních strojů jsou asynchronní motory. Z důvodu nejjednodušší konstrukce, a tím i nízké výrobní ceny, se používají jako pohon pro mnohá zařízení. Rovněž jsou velmi spolehlivé a nároky na jejich údržbu jsou minimální. Pomaloběžné motory se vyrábí s výkonem od několika desítek wattů do 20 MW. Stroje rychloběžné ($2p=2$, dvoupólové) jsou proveditelné přibližně do 6 MW. Využívají se např. do čerpadel, ventilátorů, jeřábů, výtahů, obráběcích strojů, pásových dopravníků atd. [4, 5].

2.1.2 Princip

Točivý moment indukčního motoru vzniká vzájemným působením točivého magnetického pole statorového vinutí a magnetického pole rotoru.

Ke vzniku točivého magnetického pole se nejčastěji využívá třífázové statorové vinutí. Fáze jsou vůči sobě pootočený o 120° a jsou napájeny třífázovým harmonickým proudem. Statorové magnetické pole protíná rotorové vodiče, v nichž se indukují napětí. To má za následek průchod elektrického proudu a vytvoření vlastního magnetického pole. Vzájemným působením statorového a rotorového magnetického pole vznikne točivý moment. Se zvyšující se rychlostí hřídele se snižuje vzájemná rychlost mezi statorovým a rotorovým

polem. Výsledkem je klesající frekvence proudu a nižší napětí v rotoru. Motor by se teoreticky mohl roztočit až na otáčky statorového pole, tzv. n_s . Při dosažení těchto otáček by se v rotoru přestalo indukovat napětí, došlo by k zániku proudu, a tím i točivého momentu. Ve skutečnosti je rotor mechanicky zatížen a nikdy nedosáhne n_s . Tento jev se nazývá skluz, jež udává, v jakém režimu stroj pracuje, viz obr. 1 [5, 6].



Obrázek 1: Momentová charakteristika asynchronního stroje (převzato a upraveno z [7])

Vztah pro výpočet synchronní rychlosti:

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (1)$$

kde:

n_s synchronní otáčky magnetického pole [ot/min]

f_1 frekvence statorového vinutí [Hz]

p počet pólpáru stroje [-].

Vztah pro výpočet skluzu:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}, \quad (2)$$

kde:

s skluz [-]

n_s synchronní otáčky [ot/min]

n otáčky rotoru [ot/min].

U stroje napájeného z měniče lze dosáhnout jak vysokého točivého momentu, tak i malého rozběhového proudu, neboť napájecí napětí a frekvence jsou variabilní. V porovnání se stroji konstruovanými pro provoz s konstantní frekvencí jsou změněny určité požadavky, např. výroba speciální klece rotoru s dosažením záběrného momentu pro danou aplikaci motoru. Vhodným výběrem napájecího napětí a frekvence lze docílit téměř maximálního počátečního točivého momentu. Pomocí minimálního řízení skluzu dosáhneme vysoké účinnosti [8].

2.1.3 Konstrukce

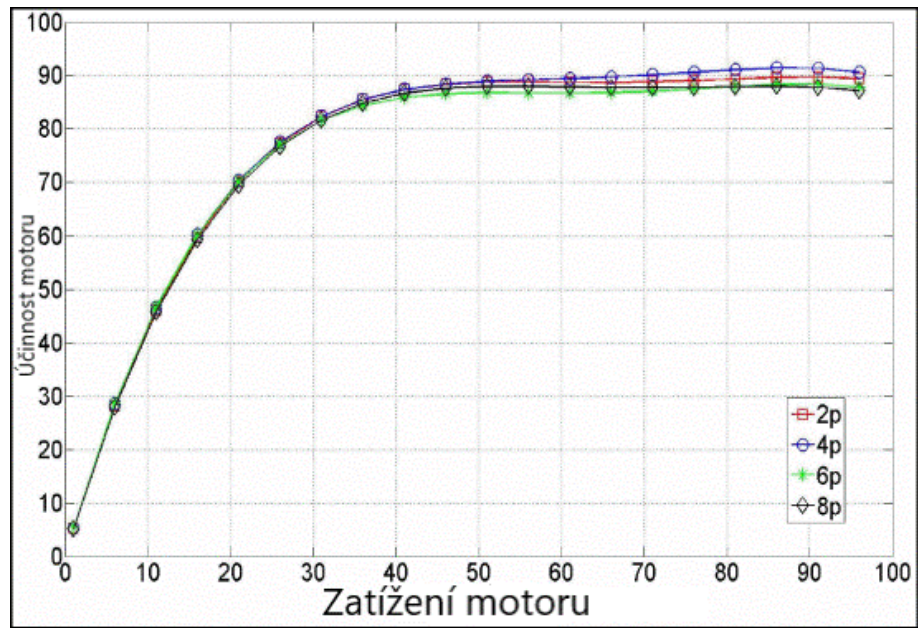
Struktura indukčního motoru pro trakční účely s proměnnou frekvencí je stejná jako u typického asynchronního motoru. Vzhledem k napájení střídačem a požadavkům elektrického trakčního systému vozidla se výkony indukčního motoru s proměnnou frekvencí výrazně liší od výkonů asynchronního motoru. Jedná se především o rozsah otáček (řádově desetitisíce), účinnost (využití maximální energie baterie), vysoký výkon a spolehlivost, velký a pravidelný točivý moment a minimální rozměry [1].

Počáteční návrh parametrů stroje zahrnuje nalezení vhodných stanovených požadavků s ohledem na minimální výrobní náklady, hmotnost atd. Mezi konstrukční parametry patří počet pólů, základní frekvence, geometrické rozměry, vinutí a jiné. V návrhu se také musí počítat s dalšími faktory, jež hrají důležitou roli u motoru s proměnnou frekvencí. Mezi ně patří například spínací frekvence, elektromagnetické zatížení, ztráty jádra a neharmonický proud.

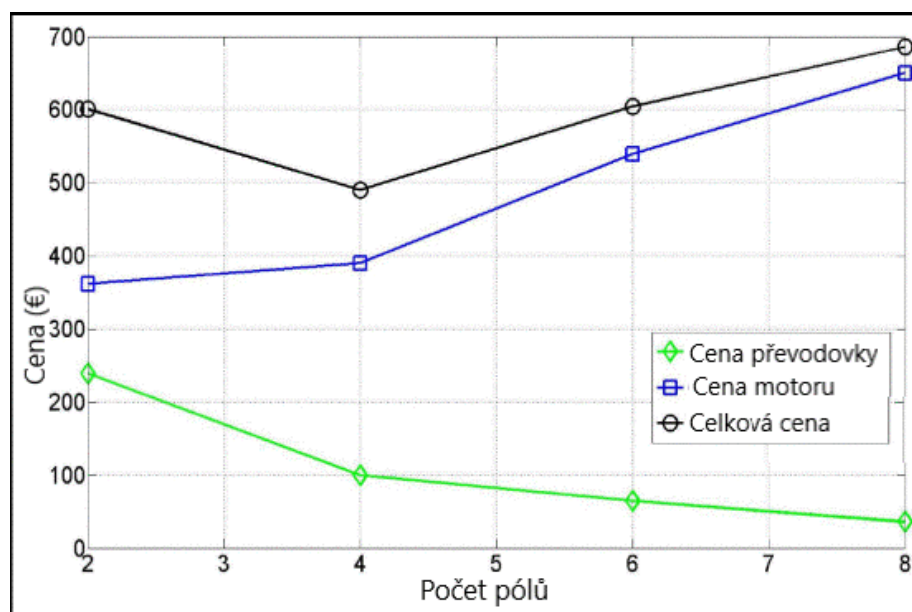
Počet pólů, které udávají točivý moment, zahrnuje kompromis mezi hmotností a účinností stroje. Pro elektromobil je nejlepší volbou čtyřpólový stroj.

Studie [9], porovnávající počet pólů (2, 4, 6, 8) v 7,5kW asynchronním stroji od firmy Siemens z vysoce účinné série IE2, potvrzuje výhody čtyřpólového stroje. Dle obr. 2 dosahuje nejvyšší účinnosti s výsledkem přes 90 % při 95% zatížení motoru. Dominancí čtyřpólového motoru je i nejdelší ujetá vzdálenost v běžném i agresivním způsobu jízdy po městě. Motory s větším počtem pólů dosahují lepšího záběrného momentu, s ním roste nežádoucí váha a cena soustavy motor-převodovka. Graf 3 zobrazuje ceny jednotlivých dílů sestavy. Z grafů vyplývá, že čtyřpólový stroj je nejvhodnějším kandidátem pro elektromobil. Kombinuje nejlepší účinnost s relativně nízkou hmotností za nejnižší cenu.

Ztráty indukčního motoru s proměnnou frekvencí jsou větší než ztráty využívající sinusové napájení [1]. Pro zmírnění nežádoucích účinků jako jsou ztráty v železe, hluk, vibrace, plazivé a synchronní točivé momenty, je třeba vzít v úvahu počet tyčí v měděné kleci nakrátko [1].



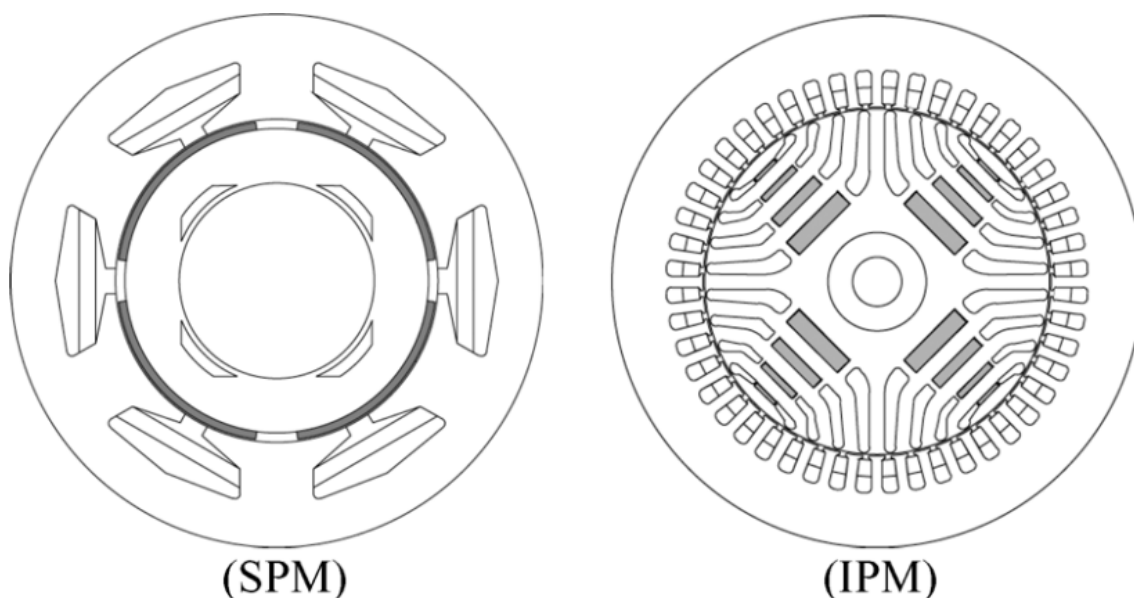
Obrázek 2: Účinnost asynchronního motoru s různými počty pólů [9]



Obrázek 3: Cena soustavy motor-převodovka podle počtu pólů [9]

2.2 Synchronní motory s permanentními magnety

Elektrická vozidla využívají synchronní motory s permanentními magnety pro svou vysokou hustotu výkonu a nízkou pulzaci momentu. Motory se rozdělují podle umístění permanentních magnetů, SPM - s povrchovým uložením (4 vlevo) a IPM s vnitřním uložením (4 vpravo).



Obrázek 4: Druhy rotoru synchronního stroje s permanentními magnety [3]

PMSM fungují za pomoci působení konstantního magnetického pole rotoru na točivé pole statoru. Permanentní magnety vytváří v rotoru stálé magnetické pole [10]. Díky jejich použití můžeme vyloučit ztráty na budícím vinutí, které najdeme na běžném synchronním stroji, což způsobuje větší účinnost, zmenšení a zlehčení rotoru [11].

2.2.1 Konstrukce statoru

Třífázové vinutí v synchronním motoru je uloženo v drážkách statoru tvořeného tenkými lisovanými elektrotechnickými plechy, podobně jako u asynchronního stroje. Důležitá je kvalita a tloušťka plechů, neboť na nich závisí mechanická výdrž motoru, tepelné a magnetické vlastnosti [11]. V motorech se nejčastěji používá zubové dvouvrstvé vinutí. Výhody tvoří především menší rozměry rotoru a nižší spotřeba mědi na statorovém vinutí [11].

2.2.2 Konstrukce rotoru

Magnetický tok se uzavírá na povrchu rotoru nebo těsně pod ním, a tím dovoluje mít v konstrukci dutiny na odlehčení. Dílčí segmenty permanentních magnetů tvoří póly,

které dosahují velikosti desetiny, nanejvýš jednotky centimetrů i u výkonných motorů. Permanentní magnety, nejčastěji SmCo (samarium-kobalt) nebo NdFeB (neodym-železo-bor), dosahují magnetické indukce ve vzduchové mezeře od 0,8 do 1,2 T (běžný ferit má indukci 0,3 až 0,4 T). Díky nim stroj dosahuje velkého magnetického toku s relativně malým objemem. K nevýhodám patří vyšší cena, komplikovaná technologie výroby a opravy. U stroje se musí správně přizpůsobit pracovní podmínky, neboť v závislosti na teplotě se mění vlastnosti magnetů. Po přechodu Curieového bodu, od 200 do 1000 °C dle použitého materiálu, se magnety odmagnetují.

Magnety jsou přilepeny a zabandážovány. Toto provedení zajišťuje dostatečnou mechanickou pevnost. Při výrobě rotorů se za malosériové výroby přilepují magnety zmagnetizované. Z důvodu působících sil vznikají komplikace s usazováním rotoru. Při výrobě větších sérií se nejdříve nalepí magnety a následně proběhne zmagnetizování. Nevýhodou je nutnost použití speciálních přípravků [12].

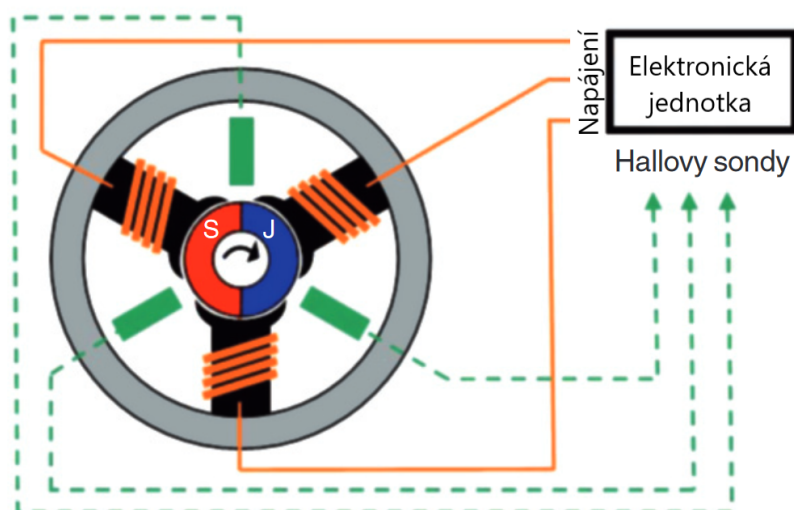
2.3 BLDC

2.3.1 Význam a použití

BLDC neboli bezkartáčový stejnosměrný motor se využívá především v drobné přepravní, modelářské a zemědělské technice, akumulátorovém nářadí, dopravních prostředcích všech druhů a dalších aplikacích. Tyto motory se nejčastěji používají do výkonu 20 kW. Jejich předností je oproti indukčním motorům dobrá účinnost, kterou však zastíňuje velké zvlnění momentu [13].

2.3.2 Princip

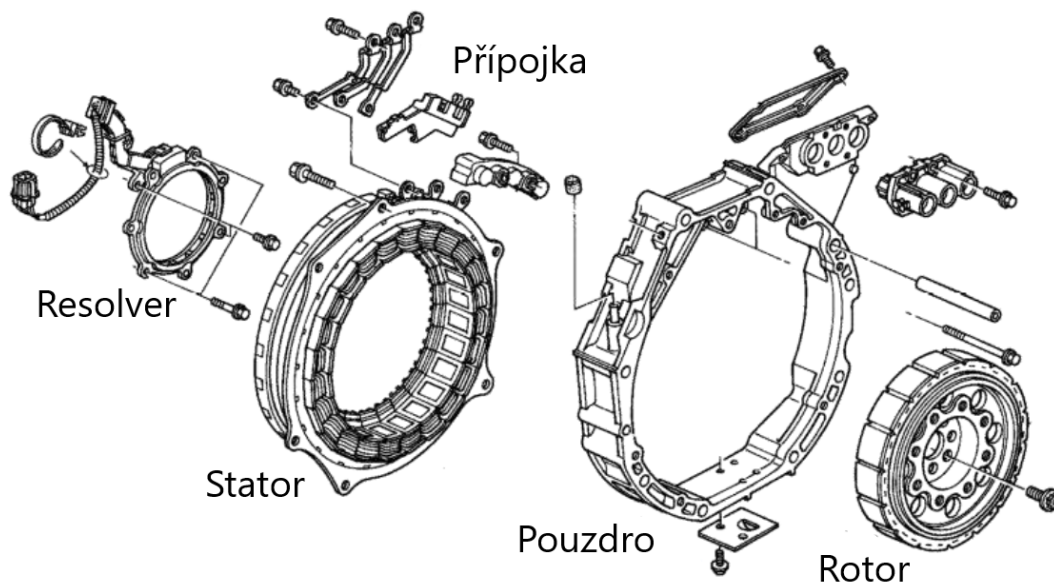
V minulosti se používaly výhradně komutátorové elektromotory derivační, sériové nebo s permanentními magnety. Nevýhoda komutátoru spočívá v nutné pravidelné údržbě kluzných kontaktů. BLDC stroje vyřešily problém nahrazením komutátoru elektronickou komutací. Součástí motoru se stala řídicí jednotka, jež má za úkol napájet a přepínat jednotlivá vinutí statoru (nahrazuje mechanický komutátor). Mikroprocesor zpracuje data od zpětné vazby a vygeneruje potřebné informace pro spínání výkonových FET tranzistorů. Malé stroje v sobě mají zakomponované Hallovy sondy indikující pozici rotoru. U větších strojů lze Hallovy sondy nahradit enkodérem nebo resolverem. Elektronická jednotka řízená mikroprocesorem umožňuje kromě regulace otáček také ochranu proti přehřátí, přetížení a přepólování [13].



Obrázek 5: Principiální uspořádání BLDC motoru (převzato z [13])

2.3.3 Konstrukce

BLDC využívají především hybridní automobily, neboť zvyšují moment spalovacího motoru v nízkých otáčkách. Optimální odezva motoru také umožňuje více konstantních rychlostí, jejich okamžitou regulaci a tišší pohonný systém [14]. Konstrukce se relativně shoduje s PMSM (viz kap. 2.2). Liší se v návrhu tvaru magnetických materiálů, jež mají vliv na výkon a hospodárnost motoru.



Obrázek 6: BLDC motor z Hondy Accord 2005 (převzato z [13])

Dokument [15] detailně popisuje BLDC motor použit v hybridním vozidle Honda Accord vyrobeném v roce 2005. Honda vyrobila šestnáctipólový motor se zubovým statorovým vinutím o 24 drážkách. Pasivní vzduchové chlazení je dostačující, magnety jsou uloženy těsně pod povrchem rotoru. Resolver zajišťuje dodání informací o pozici rotoru do řídicí jednotky, viz obr. 6.

2.4 Chlazení motorů v elektromobilovém průmyslu

Průchod elektrického proudu v měděném statorovém vinutí vytváří Jouleovy ztráty. K tomu se přidává mechanické tření v ložiscích. Dohromady významně snižují účinnost motoru a rychlost otáčení, což má za následek tepelné stárnutí a nakonec i zkrat motoru. Pro zvýšení životnosti a spolehlivosti je nezbytné optimalizovat teploty a systémy chlazení motoru [16].

K chlazení stroje se využívají různá chladicí média: vzduch, voda, olej, vodík. Vzduchem chlazený stroj má sice výhodu jednoduché konfigurace chladicího systému, ale jeho tepelná kapacita je relativně malá, což ztěžuje aplikaci na miniaturizovaný vysoce výkonný motor. Ačkoli chlazení olejem má obecně nižší tepelnou kapacitu než chlazení vodou, jeho výhodou je, že může současně chladit a mazat. Proto se využívá především v hybridních automobilech [17].

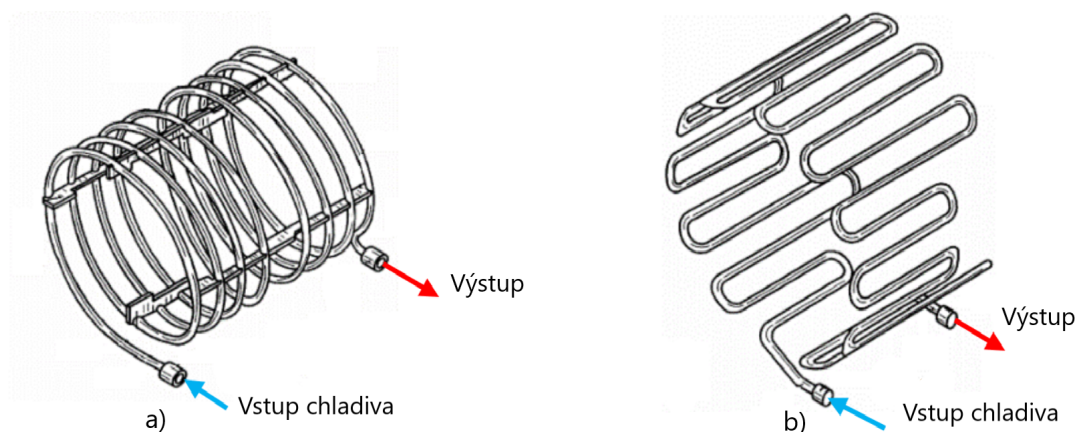
2.4.1 Statorové chlazení

Chlazení statoru odvádí přebytečné teplo ze stroje vytvořenými chladicími kanály. Chlazení rotoru může využívat vedení statoru. Konstrukce je navrhována podle požadovaného proudění a tvaru, rozlišujeme axiální nebo šroubovitě trasy. V současné době se především pro trakční účely využívá šroubovitý systém, axiální je předmětem výzkumu a vývoje [18].

Šroubovitě chlazení se obepíná kolem motoru do tvaru pružiny. Vnitřní součásti ochlazují, když prochází kapalina směrem dolů skrz motor, viz obr. 7a). Použití tohoto typu chlazení je v průmyslu využito například u elektromobilů značky Tesla a Nissan. Spirálové chlazení může pokrýt větší plochu povrchu než axiální, avšak to vyžaduje silnější čerpadlo chladicího okruhu [18].

Axiální chlazení směřuje průtokovou cestu chladiva do pouzdra, přes stator a zpět do chladicího okruhu, což zajišťuje dostatečné chlazení přes jeho odkrytou oblast, viz obr. 7b). Nevýhodou je významný pokles tlaku a teploty směrem k výstupu [18].

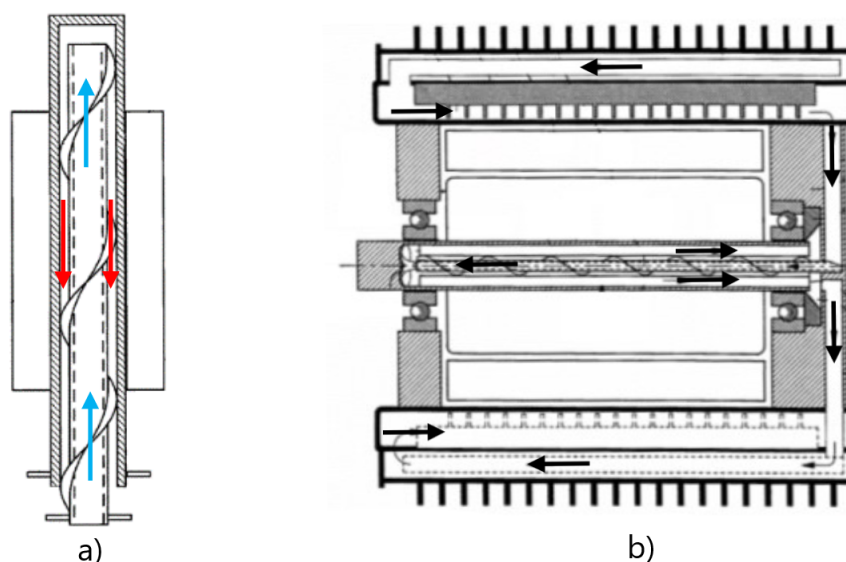
Konstrukce nucených chladících kanálů ovlivňují mechanismy proudění tekutiny, přenosu tepla a elektromagnetické vlastnosti trakčního motoru. Vhodná konstrukce zvyšuje schopnost přetížení motoru [18].



Obrázek 7: Chlazení a) šroubovitě, b) axiální (převzato a překresleno z [18])

2.4.2 Rotorové chlazení

Chlazení rotoru je z hlediska konstrukce omezenější než chlazení statoru, neboť je limitováno průměrem hřídele. Avšak poskytuje i mnohé výhody. Společnost Tesla Motor optimalizovala chlazení rotoru pro e. motorlektrické vozy díky patentované konstrukci hřídele.



Obrázek 8: a) Spirálové vzpěry v rotoru, b) využití vzpěry jako podpora čerpadla (převzato a překresleno z [18])

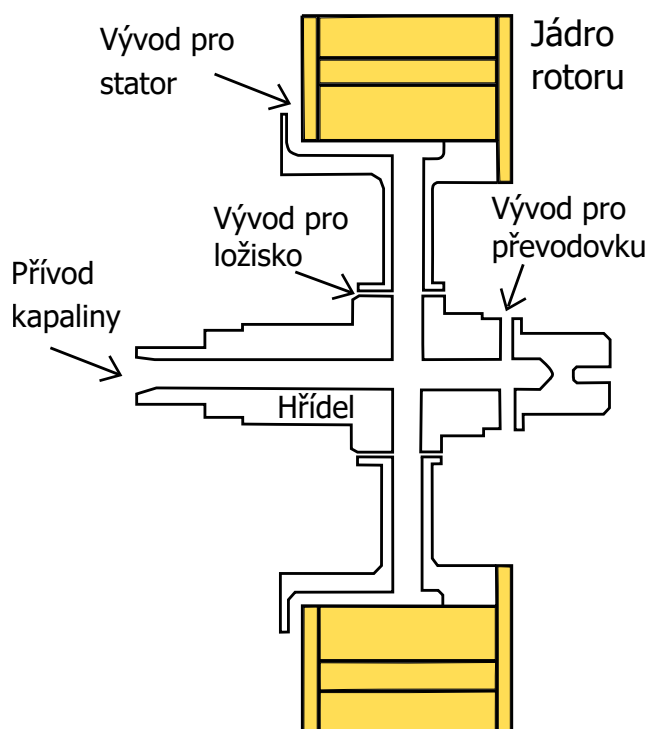
Tradiční chladicí mechanismus vyžaduje další čerpadlo pro rotor, aby protlačilo chladivo skrz hřídel. Místo toho Tesla zakomponovala do hřídele spirálové vzpěry, které podporují čerpadlo pohánějící chladivo jak do rotorové, tak i statorové části, viz obr. 8a) [18].

Tento typ rotorového chlazení lze použít jako čerpadlo pro chladicí kapalinu, viz obr. 8b), což poskytuje optimální využití pro elektromobil. Tato konstrukce je především určena k chlazení vodou.

2.4.3 Chlazení olejem

Olej lze použít v chlazení uvedených v kapitolách 2.4.1 a 2.4.2. Jeho jedinečné vlastnosti a neškodné účinky vytvářejí další možnosti chlazení, které může nabídnout jen málo chladících kapalin. Olej umožňuje jeho přímý kontakt s nejteplejšími částmi elektromotoru, jako jsou například čela statoru. Při chlazení olejem využíváme především dvou metod, rozprašování a ponoření [18].

Metoda rozprašování oleje se využívá hlavně pro motory umístěné v kole automobilu, funguje na principu odstředivé síly.



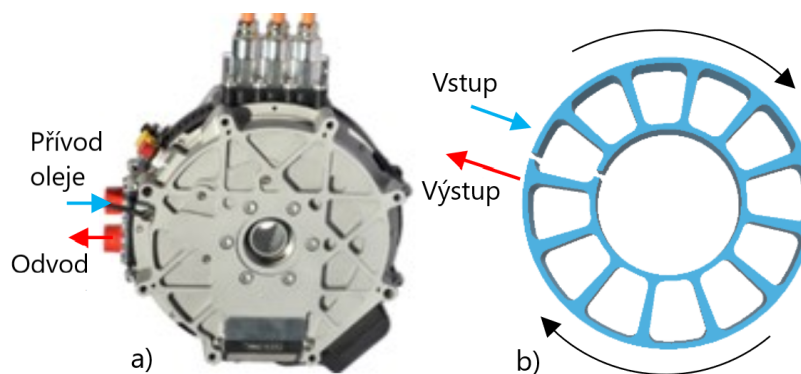
Obrázek 9: Chladicí kanál v duté hřídeli (převzato a překresleno z [17])

V hřídeli se nachází dutý průtokový kanál s více výstupy pro distribuci chladícího oleje do částí motoru, kde je vyžadováno mazání a chlazení. Rozstříkované médium absorbuje generované teplo z částí motoru a pokračuje v chladicím systému [18].

Příklad tvaru chladícího kanálu je znázorněn na obr. 9. Olej přiváděný do dutiny hřídele je rozprašován do příslušných výstupů pro jádro, cívky statoru, ložisko a převodovou skříň. Pro správný chod motoru by měl být zajištěn dostatečný průtok oleje do jádra cívky a statoru, což úzce souvisí s výkonem a životností motoru [17].

Metoda ponořením do oleje je považována za vylepšené chlazení odstraněním bariéry mezi vinutím a médiem. Navržení správného průměru hřídele a počtu chladících kanálů v obvodovém směru je důležité kvůli mechanickým silám působícím při vyšších otáčkách. Tyto konstrukční parametry mohou upravit pokles tlaku a distribuci tekutiny. V zimním období vznikají komplikace, viskozita chladícího oleje se se s nižující teplotou exponenciálně zvyšuje. Proto musí být průtok při extrémních podmínkách nastaven jako maximální možný s ohledem na výkonovou křivku čerpadla [17].

Namísto chlazení kolem spodní strany a zadní části statoru je motor ochlazován proudícím olejem skrz vnitřní části celého motoru. Tato metoda je velice účinná, avšak vznikají větší třecí ztráty, což vyžaduje silnější čerpadlo. Chladící kapalina nesmí narušovat magnetické pole pracujícího stroje. Motor, který v současné době používá tuto metodu chlazení, YASA P400R, použit ve voze Koenigsegg Regera, je znázorněn na obr. 10a). Obrázek 10b) nastiňuje pohyb oleje kolem pevného měděného vinutí [18].



Obrázek 10: a) YASA P400R, b) dráha chladícího média (převzato a upraveno z [18])

3 Akumulátory vhodné pro trakční pohon

K dosažení dlouhého dojezdu potřebujeme baterii s velkou kapacitou. Je navržena tak, aby pojala co nejvíce elektrické energie a poskytovala plný výkon i při hlubokém vybití. Pokud automobil nebo jiné zařízení využívá regenerativní brzdění, musí vyžadovat velmi vysoké opakující se pulzní nabíjecí proudy. Základní požadavky pro všechny aplikace jsou nízké náklady a samovybití (méně než 5 % za měsíc), dlouhá životnost (více než 1000 cyklů) a minimální údržba [19]. Baterie v elektromobilu se snaží zkombinovat co největší kapacitu s co nejnižší hmotností.

Pb - Elektrody olověného akumulátoru tvoří slitiny olova. Přidáním malých množství jiných kovů získají elektrody větší mechanickou pevnost a lepší elektrické vlastnosti. Nejčastěji používanými pomocnými látkami jsou antimon, vápník, cín a selen. Trakční baterie jsou určeny pro souvislý pohon invalidních, golfových, vysokozdvizných a jiných vozíků. Akumulátor je stavěn na maximální kapacitu a větší počet vybíjecích a nabíjecích cyklů. Této vlastnosti lze dosáhnout pomocí silné elektrody. Úplné vybití však baterii příliš zatěžuje, a tím snižuje její životnost. Výhody spočívají v příznivé ceně, snadné výrobě a nízkých nákladech [20].

Ni-Cd - Nikl-kadmiový akumulátor se skládá ze tří částí. Kladnou elektrodu tvoří hydroxid niklu, zápornou kadmium a třetí část elektrolyt (hydroxid draselný). Hlavní přednosti baterie jsou spolehlivost, možnost odběru velmi vysokých proudů, velké nabíjecí proudy a rozsah pracovních teplot pro vybíjení ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$). Nevýhodou akumulátoru je použití toxické látky (kadmia) a tzv. paměťový efekt. Tento jev vzniká při dobíjení malým proudem nebo nevybitím baterie. Důvodem je změna krystalové struktury záporné elektrody. Kovové krystalky se usazují na elektrodě, čímž dojde ke zvýšení vnitřního odporu. Akumulátor postižený paměťovým efektem lze obnovit opakovaným vybíjením a nabíjením [21].

Ni-MH - Nikl-metal hydridový akumulátor má podobnou konstrukci jako Ni-Cd baterie. Kladná elektroda se shoduje, zápornou elektrodu tvoří kovová slitina, která je schopna vázat vodík. Elektrolyt tvoří, stejně jako u Ni-Cd, hydroxid draselný. Rozdíl oproti Ni-Cd je v uskladnění téměř dvojnásobku energie při stejné hmotnosti, ale s mnohem menší proudovou zatížitelností [22].

Li-ion - Kladná elektroda lithium-iontové baterie je tvořena oxidem kovu, záporná uhlíkovým materiálem. Elektrolytem bývá nejčastěji lithium hexafluorofosfát (LiPF_6) v ne-

polárním organickým rozpouštědlem. Uvnitř každé běžně prodávané baterie se nachází čip, který hlídá stav a kontroluje průběh nabíjení. Výhody jsou větší energetická hustota, výroba v mnoha tvarech, delší životnost a absence paměťového efektu. Nevýhoda spočívá v použití lithia a jeho sloučenin, neboť při narušení těsnosti pláště existuje velké riziko požáru, zejména při zkratu či propíchnutí [23].

Tabulka 1: Porovnání akumulátorů [24]

Typ článku	Pb	Ni-MH	Ni-Cd	Li-ion
Doba nabíjení [hod.]	8-16	2-4	1-2	1-4
Hustota energie [Wh/kg]	30-50	60-120	45-80	90-250
Počet cyklů (hloubka vybití 80 %)	200-300	300-500	1000	500-1500
Nominální napětí článků [V]	2	1,2	1,2	3,2-3,7
Provozní teploty [°C]	-20 až 50	-20 až 65	-20 až 65	-20 až 60
Toxicita	Velká	Malá	Velká	Malá

4 Koncepty pohonů v elektromobilech

4.1 Tesla model S

Tesla model S je elektrický automobil vyráběný firmou Tesla Motors. Vůz byl poprvé představen jako prototyp v roce 2009 na Motor Show ve Frankfurtu. V červnu roku 2012 začal prodej ve Spojených státech amerických [25]. Pětidveřový liftback momentálně nabízený s pohonem na všechna čtyři kola je poháněn dvěma vodou chlazenými třífázovými asynchronními elektromotory [26]. Hmotnost 2 316 kg je z velké části zapříčiněna těžkými lithium-iontovými akumulátory.

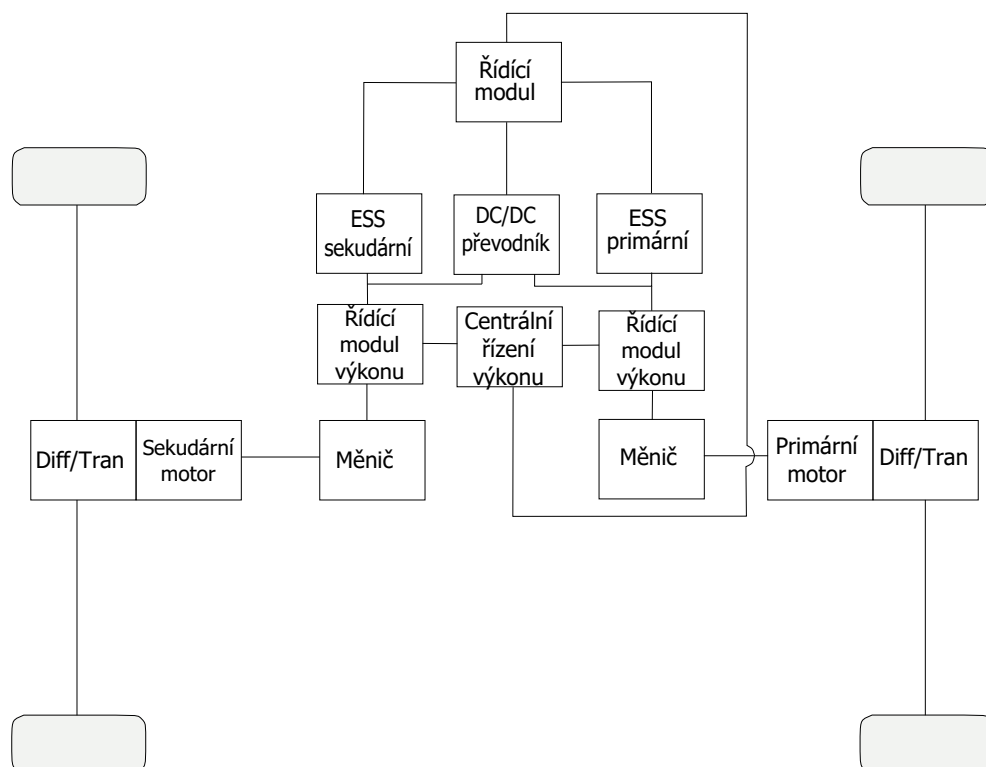
V patentu [26] je pomocí obr. 11 znázorněno základní schéma pohonného systému automobilu s dvěma motory, na každé nápravě jeden. Primární motor na zadní nápravě je označován za hnací, druhý se nazývá pomocný. Dvojice asynchronních motorů pracuje v motorickém stavu, v generatorickém pouze při brzdění. Sekundární motor je navržen tak, aby měl plochou křivku točivého momentu a pomáhal primárnímu ve vyšších otáčkách, kde ztrácí moment. Model Performance disponuje výkonem 585 kW a točivým momentem 967 Nm [27], typ Long Range 386 kW a 660 Nm [28]. Výkon na silnici převádí diferenciály s jednorychlostními převodovkami, které jsou výhodné, neboť při akceleraci neztrácí výkon kvůli přeřazování [26].

Na obrázku 11 je znázorněn primární motor, jež je připojen k primárnímu ESS (systém skladování elektrické energie) přes hlavní měnič a primární řídicí modul výkonu. Ten zajišťuje energii dodávanou do primárního motoru nebo regeneruje výkon získaný z motoru. Podobné provedení má i pomocný motor. Centrální řízení výkonu má pod kontrolou výkonové řídicí moduly. Každý měnič je spojen s vlastním ESS. Mezi výhody duálních ESS řadíme:

1. každý systém ESS může mít menší nabíjecí kapacitu, než jakou by vyžadoval jediný systém spojený se dvěma motory,
2. systémy mohou být umístěny samostatně ve vozidle, což napomáhá při rozložení hmotnosti,
3. jednotlivé ESS lze navrhnout tak, aby splňovaly specifické požadavky daného motoru.

Důležitou součástí je DC/DC převodník, poskytující přenos energie v obou směrech mezi dvěma pohonnými systémy. Převodník je připojen k řídicímu modulu pro přenos energie, je jím řízen a přidává do systému řadu výhod:

1. rezervní výkon - poskytuje možnost pro jeden pohonný systém, aby čerpal energetické zdroje druhého pohonného systému,
2. flexibilita nabíjení - během provozu vozidla se přednostně používá regenerativní



Obrázek 11: Schéma Tesly S (převzato a překresleno z [26])

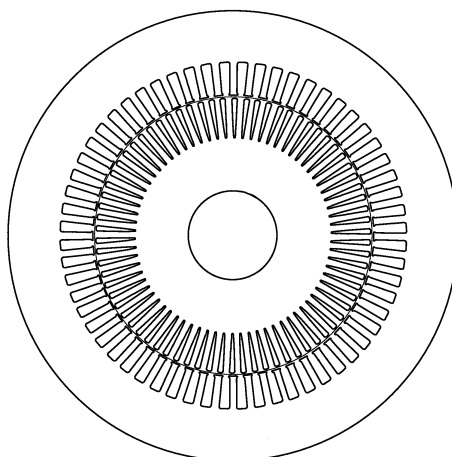
brzdění k výrobě energie, kterou lze použít k nabíjení jednoho nebo obou ESS.

Řídicí modul kontroluje stav každého systému ESS, například stav nabíjení. Ten také sleduje centrálu řízení výkonu, čímž monitoruje požadavky kladené na hnací systémy.

Zadní náprava Tesly je poháněna třífázovým čtyřpólovým motorem dosahujícím 18 700 otáček za minutu [29]. Z patentu [30] se dozvídáme, že velikost vzduchové mezery mezi statorom a rotorem je v rozmezí 0,5 až 0,8 milimetru. Stator tvoří plechy z izolované oceli, do nichž je vyraženo 60 drážek na měděné vinutí. Vnější průměr statoru je až 1,5krát větší než jeho délka. Na duté hřídeli je připevněn rotor se 74 drážkami vyplněnými měděnou klecí nakrátko.

Obrázek 12 poukazuje na užší statorové a rotorové drážky, jež usnadňují hlubší magnetické nasycení [30]. Díky tomu se sníží rozptylové indukčnosti, zvýší se tak točivý moment zejména při vyšších otáčkách, což má za následek nárůst maximálního točivého momentu [30].

Motor pracuje ve velkém rozsahu otáček, musí být schopen se uchladiť v jakémkoli jízdním režimu, pro nějž je navržen. V obrázku 13 je číslem 1 značen přívod chladicí kapaliny. Ta se rozděluje do dvou okruhů, kde do rotoru (obr.13-2) směřuje 20 % a do

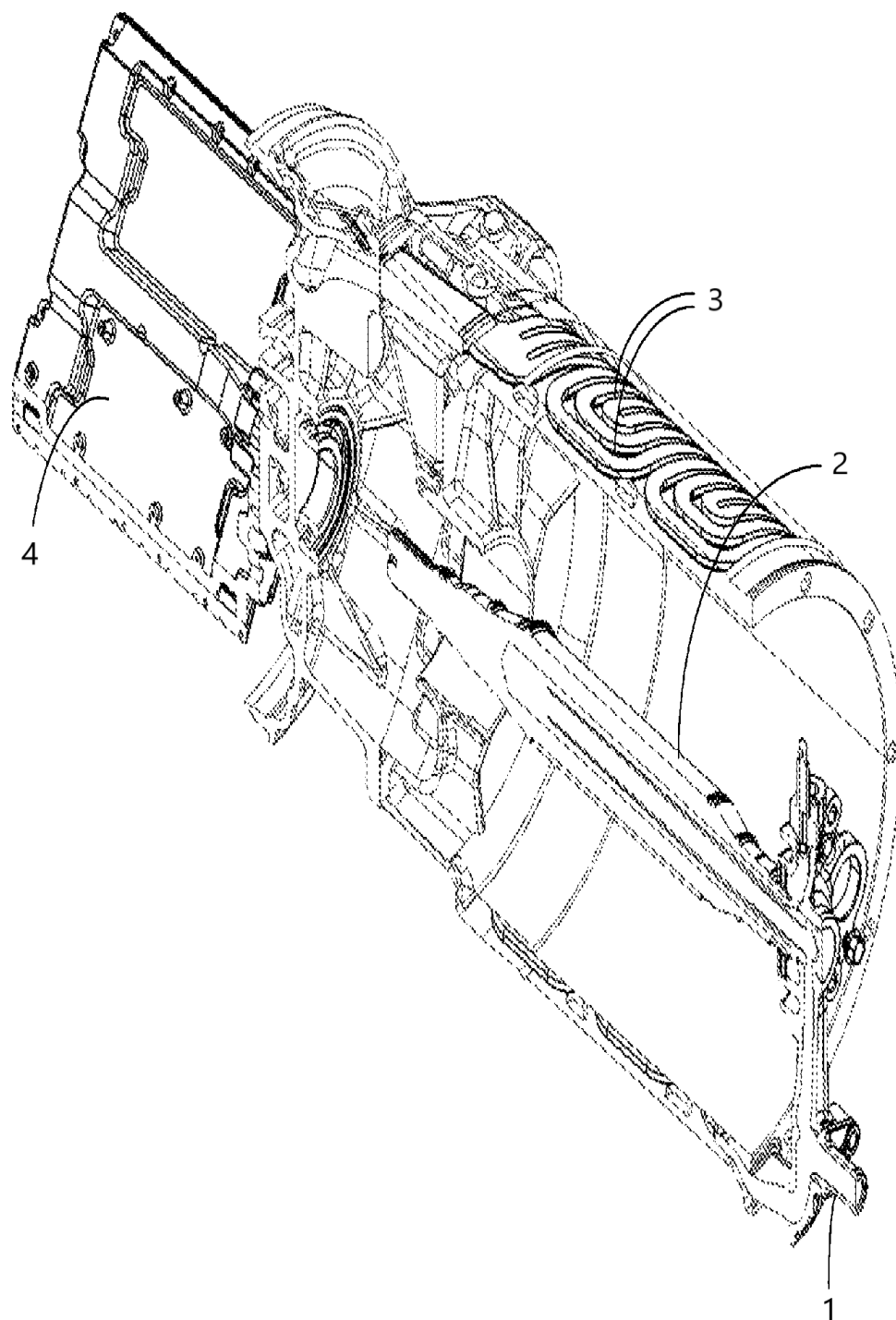


Obrázek 12: Průřez motoru (převzato a upraveno z [2])

statorového chlazení (obr.13-3) 80 % [31]. Kapalina ochladí dutý rotor, proteče chladicí deskou převodovky a připojí se na jediný výstup. V druhé cestě protéká množstvím kanálů statoru, pokračuje do měniče, kde chladí jeho výkonové desky (obr.13-4), a připojuje se na výstup chladicí sestavy [31].

Přední motor má obdobnou konstrukci, avšak je menší a dosahuje 18 200 otáček za minutu [29].

Baterie je uložena ve spodní části automobilu. Tento battery pack se skládá z 16 vzájemně propojených modulů [32], z nichž každý obsahuje 516 baterií typu NCR18650B od firmy Panasonic [33]. Celkem 8 256 článků dokáže uložit přes 100 kWh [32], na které model Performance ujede až 560 km [27]. Označení 18650 lithium-iontové baterie je odvozeno od jejich rozměrů, průměr 18 mm a výška 65 mm [32]. Jeden článek disponuje kapacitou 3,4 Ah, nominální hodnotou napětí 3,6 - 3,7 V a nabíjecím napětím až 4,2 V. Hmotnost činí 46 g, provozní teploty by se měly pohybovat při nabíjení mezi +10 °C až +45 °C a při jízdě od -20 °C do +60 °C [34]. Z toho vyplývá, že v teplých dnech musí být baterie chlazeny a v zimě zahřívány, což zajišťují chladicí kanály mezi bateriemi v každém modulu. V ideálním případě lze baterii dobít pomocí stejnosměrné nabíječky s výkonem 200 kW z 0 % na 100 % za 75 minut. Z jednofázové 16A zásuvky se baterie nabije za 30 hodin a z třífázové 32A zásuvky za 6 hodin a 45 minut, přičemž nabíječka má zde maximální střídavý výkon omezen na 16,5 kW [27].



Obrázek 13: Průřez hnací soustavy (převzato a upraveno z [31])

4.2 Koenigsegg Regera

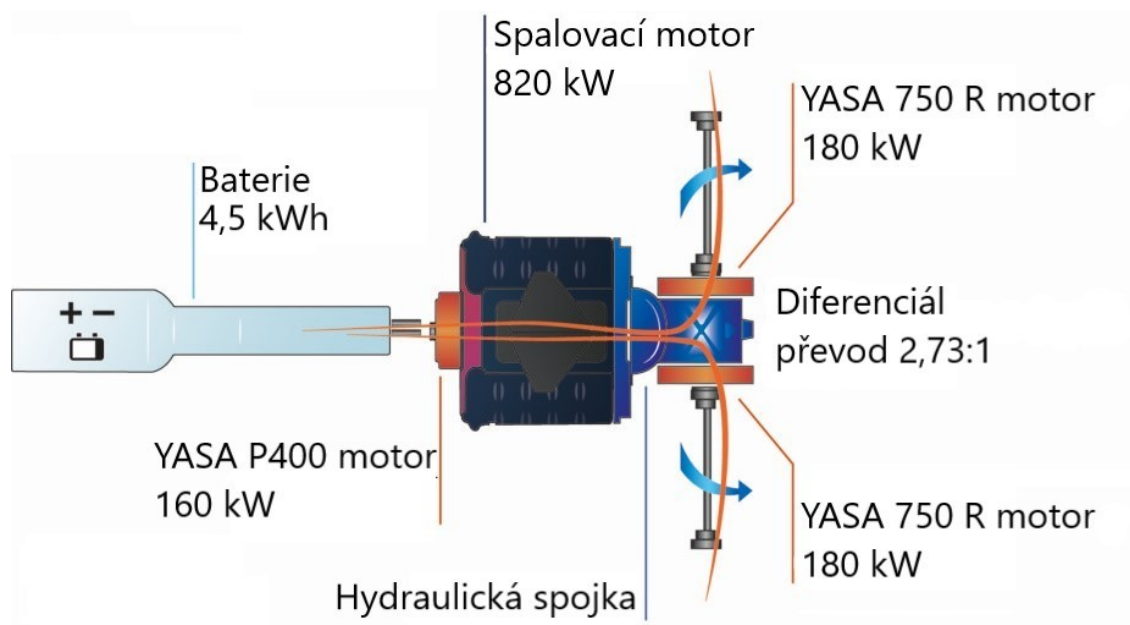
Koenigsegg Regera je plug-in hybrid, jež kombinuje výkonný spalovací motor se třemi elektrickými. Tyto jednotky pohánějí zadní nápravu, kterým dodává energii špičková baterie. S pomocí nové technologie hnacího ústrojí zvané Koenigsegg Direct Drive (KDD) dosahuje vůz extrémní akcelerace [35].



Obrázek 14: Koenigsegg Regera (převzato a upraveno z [35])

Motor tohoto vozu produkuje výkon 1 500 hp kombinací s elektrickým pohonem [35]. Patentovaná technologie KDD nahrazuje tradiční převodovku spalovacího motoru. Místo toho poskytuje přímý pohon zadní nápravy bez potřeby vícestupňových nebo proměnných převodů, z nichž všechny mají vysoké energetické ztráty [35].

Oficiální webové stránky výrobce [35] uvádí použití osvědčeného spalovacího motoru o objemu 5,0 litru V8, jež pomocí dvou turbodmychadel dosahuje výkonu 820 kW. Motor doplňují tři olejem chlazené elektrické motory vyvinuté společností YASA. Pro každé zadní kolo je k dispozici jeden motor, který obstarává přímý elektrický pohon. Další motor se nachází na klikové hřídeli a zajišťuje plnění točivého momentu, generování elektrické energie a funkci startéru. Tyto motory představují nejvýkonnější hybridní motor v historii výroby automobilů.



Obrázek 15: Pohonná jednotka (převzato a upraveno z [35])

Elektrické motory YASA 750R dodávají vozidlu 360 kW a 1 600 Nm v rozsahu 0 až 3 250 otáček za minutu s hmotností jednoho motoru pouhých 37 kg [36]. Synchronní motor má špičkovou účinnost 95 % [36].

YASA P400 zajišťuje startování spalovacího motoru, rekuperaci a dodávku točivého momentu hřídeli [35]. Disponuje výkonem 160 kW a točivým momentem 370 Nm s účinností 96 % [37].

Oba typy motorů mají rotory z permanentních magnetů. Stator je navinut na konstrukci nacházející se mezi dvěma rotory. Jedná se o tzv. synchronní stroje s axiálním tokem [38].

Akumulátor má dva paralelní řetězce o 192 článcích s kapacitou 4,5 kWh při napětí 800 V, což z Regery činí první 800V vůz na světě. Toto obrovské napájecí napětí umožňuje rychlé využití energie z baterie. [35]. Regera produkuje výkon 670 hp přímo z baterie, jež váží pouhých 66 kg s chladícími tekutinami, s dojezdem necelých 50 km.

Článek [39] popisuje princip technologie KDD. Při rozjezdu automobil pohání pouze dvojice motorů YASA 750R, které využívají energii z akumulátoru. V této fázi spalovací motor nepohání vozidlo, ale dobíjí baterii. Hydraulická spojka, sloužící i jako měnič točivého momentu, je otevřena. U spalovacího motoru se při překročení 48 km/h, což odpovídá přes 1 000 otáček za minutu, plynule podle rychlosti uzavírá spojka a začne dodávat točivý moment na zadní nápravu. YASA P400 pomáhá spalovacímu motoru zvýšit otáčky a točivý moment. Elektrické motory na nápravách se při dosažení jejich maximálních otáček vypnou. Při vysoké rychlosti pohání Regeru pouze spalovací motor, elektrický

na klikové hřídeli ve vysokých otáčkách má nižší moment, a proto pracuje jako alternátor. Pomocí tohoto systému dosáhl hybrid rekordu z 0 km/h na 400 km/h a zpět na nulovou rychlost za pouhých 31,49 sekundy [40].

4.3 BMW i3

BMW i3 využívá elektrický pohon zadních kol pomocí jednorychlostní převodovky a lithium-iontové baterie [41]. V nabídce je i sportovní verze se zvětšeným výkonem o 10 kW [41] a BMW i3 REX s 9-litrovou nádrží a benzínovým motorem [42], sloužící čistě jako generátor elektrické energie. Model i3 byl prvním sériově vyráběným vozidlem BMW s nulovými emisemi [42].

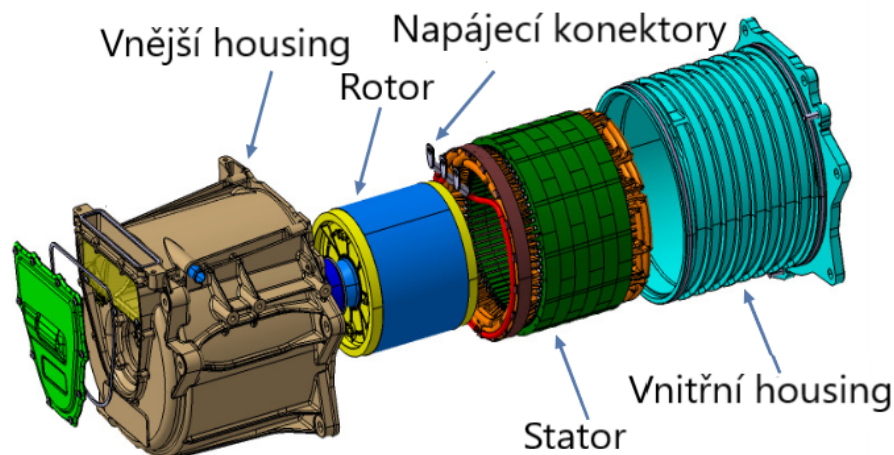


Obrázek 16: BMW i3 (převzato a upraveno z [42])

Karosérie automobilu je vyrobena z hliníku a plastů vyztužených uhlíkovými vlákny (CFRP). Celková hmotnost vozidla činí 1 320 kg s dojezdem 235 - 255 km dle metodiky WLTP na 42,2kWh baterii [41].

PMSM motor ve voze s výkonem 125 kW, točivým momentem 250 Nm a maximálními otáčkami 11 400 za minutu má pracovní napětí 250 - 400 V [43]. Dvanáctipólový motor chlazený kapalinou má celkovou hmotnost přibližně 65 kg a obsahuje 72 drážek

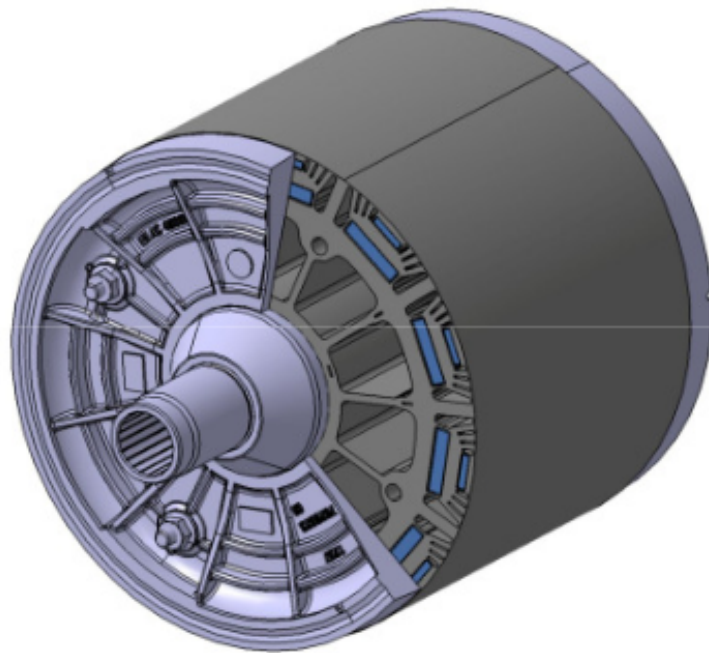
ve statoru. Samotný stator má hmotnost 20,8 kg a je složen ze 6 jednotlivých kusů za účelem snížení výrobního odpadu [44]. Je vložen do tzv. vnitřního housingu (obr. 17), jež zajišťuje chlazení statorového vinutí.



Obrázek 17: Sestava motoru (převzato a upraveno z [43])

Rotor o hmotnosti 14,2 kg [44] je vyroben ze 6 ocelových částí [44], do nichž jsou vloženy permanentní magnety ze slitiny NdFeB (neodym-železo-bor) [15]. Jeden pól tvoří dvojice magnetů, jež jsou na obr. 18 vyznačeny modře [45]. Rotor obsahuje štěrbinu, které snižují jeho váhu a nemají žádný negativní dopad na magnetický tok. Naopak umožňují potlačení nebo alespoň omezení fluktuace magnetického toku v zubech statoru. V důsledku toho jsou ztráty v železe výrazně sníženy, což má za následek zvýšení účinnosti elektromotoru zejména při vysokých rychlostech.

Akumulátor je uložen v podlaze vozu, tvořen osmi moduly po 12-ti článcích [46]. Parametry baterie jsou 42,2 kWh neboli 120 Ah pracující na napětí 352 V [46]. Celý battery pack váží 278 kg o rozměrech 1 660 x 964 x 174 mm. Akumulátor lze dobít na 80 % pomocí stejnosměrné nabíječky za necelých 42 minut a v domácím prostředí střídavou nabíječkou o výkonu 11 kWh za 3 hodiny a 30 minut [41].

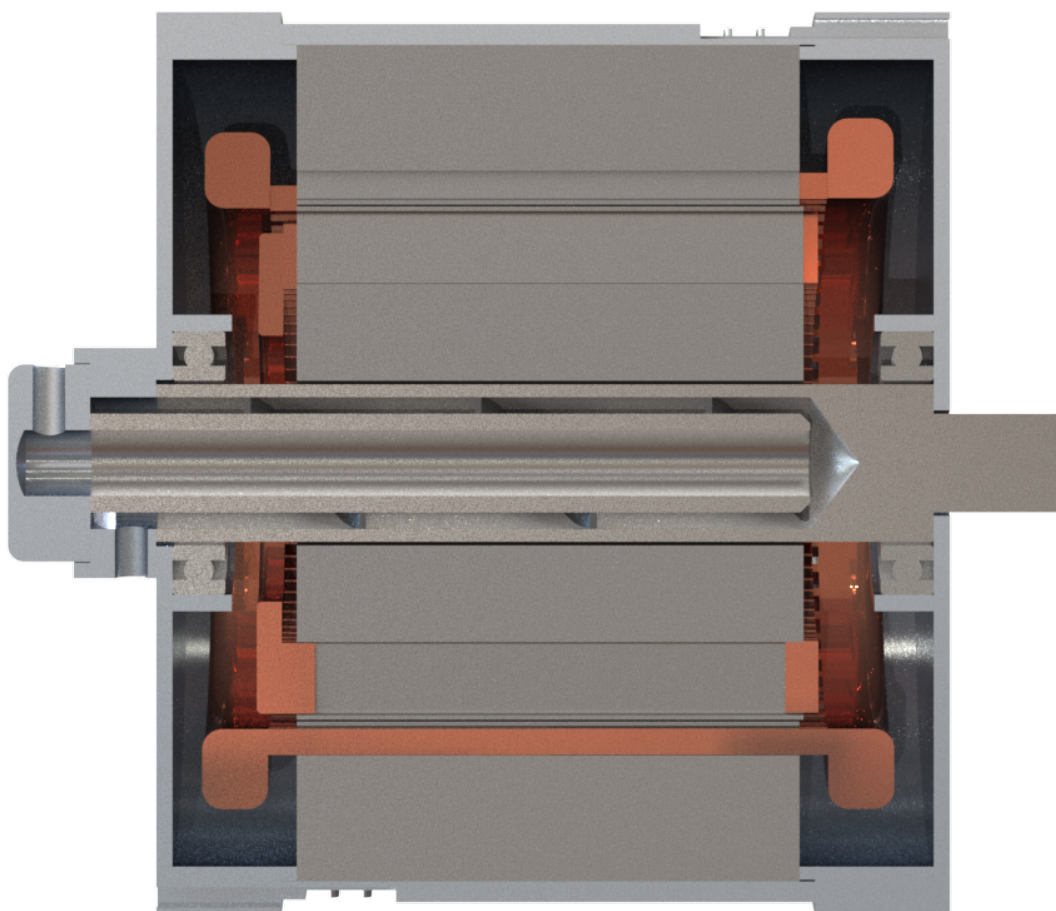


Obrázek 18: Rotor BMW i3 (převzato a upraveno z [43])

5 Výukový model

Pro výukový model byl zvolen motor od nejznámějšího výrobce elektromobilů. Jedná se o zadní asynchronní motor z vozu Tesla modelu S nebo X. Konstrukce modelu není identická a nelze podle ní zhotovit přesnou pohonnou jednotku použitou ve voze. Poukazuje na ukázkově vyřešené statorové a rotorové chlazení a tvary vinutí.

Pro zhotovení modelu se využilo moderních technologií. V programu Solidworks vznikl 3D návrh, přičemž rozměry motoru byly získány ze zdroje [15]. Model byl vyroben pomocí technologie 3D tisku a zmenšen v měřítku 0,655, neboť použitá 3D tiskárna Anycubic i3 nedosahuje požadovaných rozměrů.



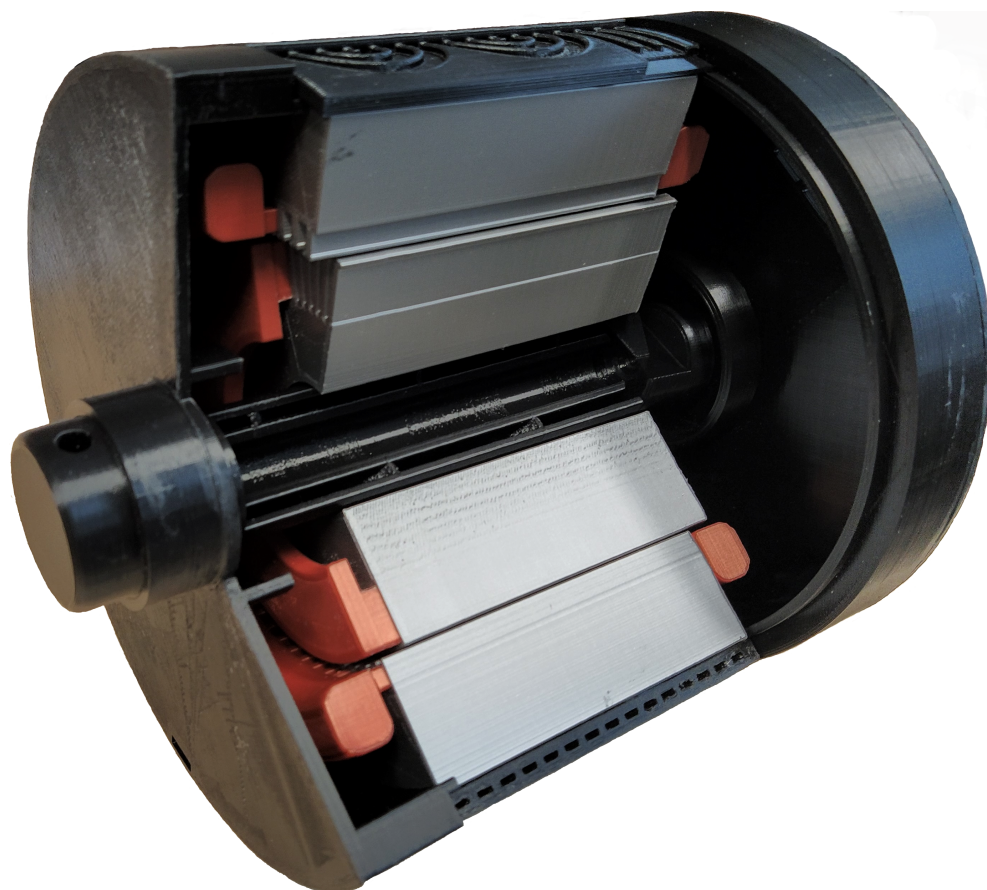
Obrázek 19: Řez modelu motoru

Řez modelu, obr. 19, poukazuje na rotorové chlazení. Kapalina proudí skrz ložiskový štít do hřídele, průtok způsobí vytlačení vody do její vnější části. Spirálové podpěry zapříčiňují delší trajektorii média, lepší využití tepelné kapacity vody a pomáhají čerpadlu odvést vodu z rotorové části skrz stejný ložiskový štít.



Obrázek 20: Statorové chlazení

Chlazení statorového vinutí, obr. 20, zařizují chladicí kanály v pouzdru motoru. Jedná se o šroubovitě chlazení, kde se proudící kapalina rovnoměrně rozdělí do kanálů. Na měděnou přípojnicí, vyrobenou z pevného kusu, by navazoval měnič.



Obrázek 21: Vytištěný model

Tisk modelu trval přibližně 70 hodin, poté probíhalo začišťování dílů od podpěrných konstrukcí a složení do finální podoby. Technická dokumentace se nachází v příloze práce.

6 Závěr

V teoretické části práci jsou nejprve podrobně rozepsány typy motorů využívané v elektromobilovém průmyslu. Druhá kapitola pojednává o principu a konstrukci asynchronních, synchronních a BLDC motorů. Dále se soustředí na druhy chlazení trakčních motorů s malými rozměry a velkými výkony. Třetí kapitola se věnuje akumulátorům používaným v dopravní technice. Popisuje jejich složení, pracovní podmínky, výhody a nevýhody. Čtvrtá kapitola se zabývá vozy poháněné elektromotory nebo kombinující elektromotor se spalovacím motorem, tzv. hybridy. Je zde popsána konstrukce, vlastnosti a princip fungování pohonných systémů ve vozech Tesla model S, Koenigsegg Regera a BMW i3.

V práci byl zrealizován návrh a model výukového motoru, který čerpá inspiraci z pohonné jednotky elektromobilu a používá se například ve vozech Tesla model S nebo X. Zhotovený model obsahuje pouzdro motoru prezentující chlazení statorové části, stator s vinutím a rotor s dutou spirálovitou hřídelí. Z důvodu konkurenčního boje mezi výrobci automobilů není možné získat přesné technické údaje o motoru. Přiložená technická dokumentace popisující rozměry jednotlivých částí modelu (viz příloha) není dostatečná pro výrobu funkčního prototypu. Model motoru splňuje požadavky pro výukové účely, což bylo cílem této práce.

Reference

- [1] LIU, Huijuan, Yihuang ZHANG, Qionglin ZHENG, Dong WANG a Sizhou GUO. Design and Simulation of An Inverter-fed Induction motor for Electric Vehicles. 2007 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference [online]. IEEE, 2007, 2007, , 112-115 [cit. 2020-05-09]. DOI: 10.1109/VPPC.2007.4544109. ISBN 978-0-7803-9760-6. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4544109/>
- [2] TANG, Yifan. TESLA INC. Induction Motor Lamination Design. US20110198962A1.
- [3] VAGATI, A., G. PELLEGRINO a P. GUGLIELMI. Comparison between SPM and IPM motor drives for EV application. The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010 [online]. IEEE, 2010, 2010, , 1-6 [cit. 2020-05-09]. DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.5607911. ISBN 978-1-4244-4174-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5607911/>
- [4] Ing. Stanislav Kocman, Ing. Ctirad Koudelka, Asynchronní stroje [online]. 2004 [cit. 13.2.2020]. Dostupné z: <http://fe1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske/prednasky/Asynchronni%20stroje-FAST.pdf>
- [5] BARTOŠ, Václav. Elektrické stroje. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004. ISBN 80-704-3332-9.
- [6] MRAVEC, Rudolf. Elektrické stroje a přístroje: 1. Elektrické stroje. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1979.
- [7] DUDEK, Jan a Vítězslav STÝSKALA. Elektrické stroje Úvod – Asynchronní motory [online]. 2007 [cit. 2020-02-26]. Dostupné z: http://fe1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/1_AM_FS.pdf. VŠB.
- [8] ZHU, Z. Q. a David HOWE. Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles. In: Proceedings of the IEEE [online]. 2007, 95(4), s. 746-765 [cit. 2020-05-09]. DOI: 10.1109/JPROC.2006.892482. ISSN 0018-9219. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4168032/>
- [9] SEDEF, Kanber, Alireza MAHERI, Mustafa YILMAZ a Ali DAADBİN. Performances of AC induction motors with different number of poles in urban electric cars. In: 3rd International Symposium on Environmental Friendly Energies and Applications (EFEA) [online]. IEEE, 2014, 2014, s. 1-5 [cit. 2020-

- 05-09]. DOI: 10.1109/EFEA.2014.7059946. ISBN 978-1-4799-7517-4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7059946/>
- [10] GIERAS, Jacek. Permanentmagnet motor technology: design and applications. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. ISBN 978-1-4200-6440-7.
- [11] YU, D., X.Y. HUANG, Y.T. FANG a J ZHANG. Design and comparison of interior permanent magnet synchronous traction motors for high speed railway applications. In: 2017 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD) [online]. IEEE, 2017, 2017, s. 58-62 [cit. 2020-05-09]. DOI: 10.1109/WEMDCD.2017.7947724. ISBN 978-1-5090-5853-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7947724/>
- [12] Elektro. ELEKTRO [online]. 2006, 2006(06) [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/uplatneni-synchronnich-stroju-v-dopravni-technice-1-cast--13092>
- [13] BLDC aneb DC motor s nulovými náklady na údržbu. Elektro [online]. 2011, 2011(10), 13-14 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/bldc-aneb-dc-motor-s-nulovymi-naklady-na-udrzbu--10016>
- [14] The Brushless DC Motor and Its Use in Electric Cars. Buldipedia [online]. 2013 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <http://buildipedia.com/aec-pros/design-news/the-brushless-dc-motor-and-its-use-in-electric-cars>
- [15] Open Source Electric Motor Models for Commercial EV & Hybrid Traction Motors [online]. In: . Berlin, 2017, s. 89 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://docplayer.net/64747945-Open-source-electric-motor-models-for-commercial-ev-hybrid-traction-motors-dr-david-staton-dr-james-goss.html>
- [16] Numerical investigation and optimization of the thermal performance of a brushless DC motor. In: International Journal of Heat and Mass Transfer [online]. 2009, s. 1589-1599 [cit. 2020-05-09]. ISSN 0017-9310. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931008004821>
- [17] Lim, D. H., & Kim, S. C. (2014). Thermal performance of oil spray cooling system for in-wheel motor in electric vehicles. Applied Thermal Engineering, 63(2), 577–587. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.11.057> [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431113008612?via%3Dihub>

- [18] BOURGAULT, Alexandre J., Pratik ROY, Eshaan GHOSH a Narayan C. KAR. A Survey of Different Cooling Methods for Traction Motor Application. In: 2019 IEEE Canadian Conference of Electrical and Computer Engineering (CCECE) [online]. IEEE, 2019, 2019-5-5, s. 1-4 [cit. 2020-05-10]. DOI: 10.1109/CCECE.2019.8861611. ISBN 978-1-7281-0319-8. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8861611/>
- [19] Traction Batteries for EV and HEV Applications. Mpoweruk [online]. [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://www.mpoweruk.com/traction.htm>
- [20] Jak funguje olověný akumulátor? [online]. 2017 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/16090-jak-funguje-oloveny-akumulator>
- [21] NiCd akumulátory [online]. battex [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <http://www.battex.info/?id=38>
- [22] NiMH akumulátory [online]. battex [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nimh-akumulatory/princip>
- [23] Lithiové akumulátory Přehled základních typů a jejich vlastností [online]. tzbinfo [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory>
- [24] Comparison Table of Secondary Batteries [online]. Battery university, 2019 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries
- [25] Tesla Rises After Model S Sales in 2013 Exceed Forecast [online]. Bloomberg, [cit. 23.3.2020] Dostupné z: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2014-01-14/tesla-delivered-6-900-cars-in-fourth-quarter-executive-says>
- [26] TANG, Yifan. TESLA INC. All wheel drive electric vehicle power assist drive system. US20100187024A1.
- [27] Tesla Model S performance. Evcompare.io [online]. [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: <https://evcompare.io/cars/tesla/tesla-model-s-performance/>
- [28] Tesla Model S Long Range. Evcompare.io [online]. [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: <https://evcompare.io/cars/tesla/tesla-model-s-long-range/>
- [29] Undocumented. TeslaTab [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://teslatap.com/undocumented/>

- [30] TANG, Yifan. TESLA INC. Induction motor with improved torque density. US7741750B1.
- [31] TESLA INC. Integrated electric motor assembly. US9692277B2.
- [32] Understanding Tesla's lithium ion batteries. Evannex [online]. 2017 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://evannex.com/blogs/news/understanding-teslas-lithium-ion-batteries>
- [33] Let's talk about the Panasonic NCR18650B. Evandmore [online]. 2016 [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://blog.evandmore.com/lets-talk-about-the-panasonic-ncr18650b/>
- [34] Panasonic [online katalogový list]. NCR18650B. [cit. 9.4.2020]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/3e0170a1e089819f286f7066e69035b4/NCR18650B.pdf>
- [35] Koenigsegg Regera [online]. 2016 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.koenigsegg.com/car/regera/>
- [36] YASA [online katalogový list]. 750R. [cit. 9.4.2020]. Dostupné z: <https://www.yasa.com/wp-content/uploads/2018/01/YASA-750-Product-Sheet.pdf>
- [37] YASA [online katalogový list]. P400. [cit. 9.4.2020]. Dostupné z: https://www.yasa.com/wp-content/uploads/2018/01/YASA_P400_Product_Sheet.pdf
- [38] Electric machine—over-moulding construction. US9287755B2. Dostupné také z: <https://patents.google.com/patent/US9287755B2/en?assignee=Yasa+Motors+Limited>
- [39] Koenigsegg Regera: Podívejte se, jak funguje 1700 koní bez převodovky. Www.auto.cz [online]. 2016 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/koenigsegg-regera-podivejte-se-jak-funguje-1700-koni-bez-prevodovky-100553>
- [40] Koenigsegg Regera stanovil nový rekord 0-400-0 km/h. Www.garaz.cz [online]. 2019 [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.garaz.cz/clanek/koenigsegg-regera-stanovil-novy-rekord-0-400-0-km-h-21002654>
- [41] BMW i3 [online]. BMW [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://www.bmw.cz/cs/all-models/bmw-i/i3/2017/technicke-udaje.html#tab-0>

- [42] BMW introduces the i3 electric car with optional range-extending engine [online]. 2013 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://newatlas.com/bmw-i3-electric-car/28503/>
- [43] THE HYBRID-SYNCHRONOUS MACHINE OF THE NEW BMW i3 & i8 [online]. In: . München, 2014, s. 9 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: http://hybridfordonscentrum.se/wp-content/uploads/2014/05/20140404_BMW.pdf
- [44] ORNL is managed by UT-Battelle for the US Department of Energy Benchmarking EV and HEV Technologies [online]. In: . 2016, s. 31 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f32/edt006_burress_2016_o_web.pdf
- [45] Electrical Drive Motor for a Vehicle. US20120267977A1. Dostupné také z: <https://patents.google.com/patent/US20120267977A1/en?q=N%C2%BA+2012%2f0267977>
- [46] 2019 BMW i3 - all the numbers in one tidy post. [online]. 2019 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://insideevs.com/news/339970/2019-bmw-i3-i3-rex-i3s-amp-i3s-rex-full-specs/>

7 Přílohy

Seznam použitých příloh:

Příloha č. 1 : Nákres statoru

Příloha č. 2 : Nákres rotoru

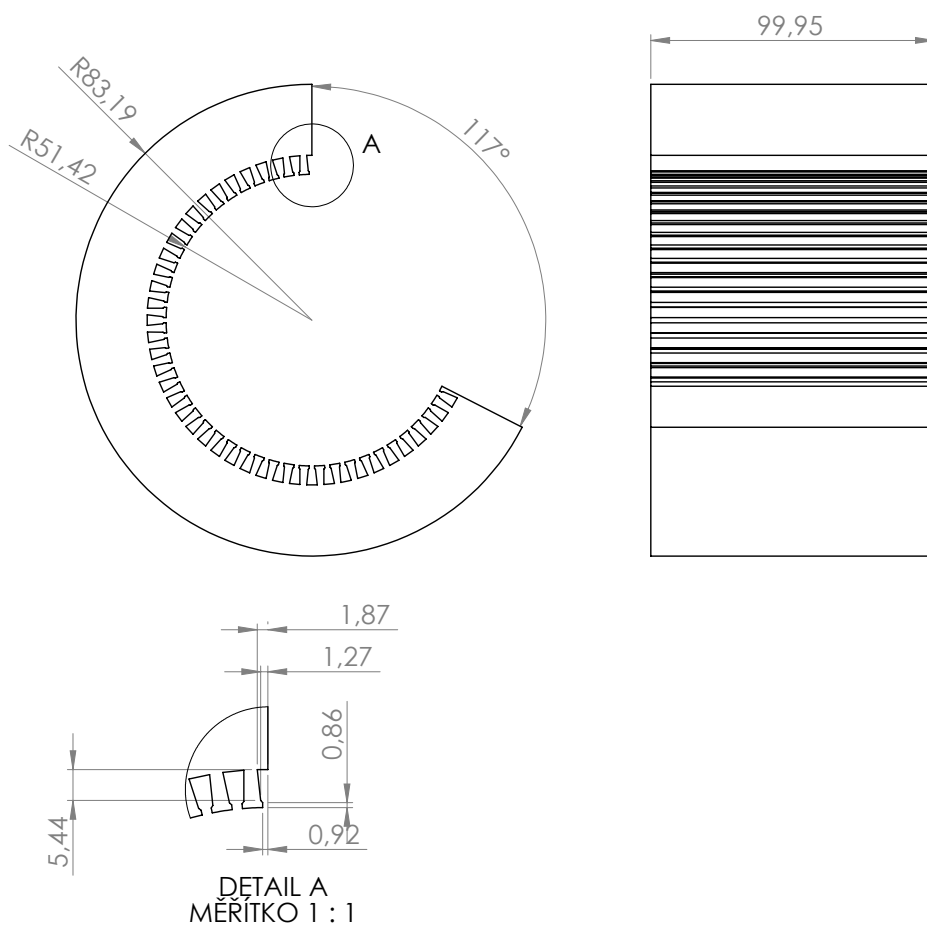
Příloha č. 3 : Nákres statorového chlazení

Příloha č. 4 : Nákres hřídele

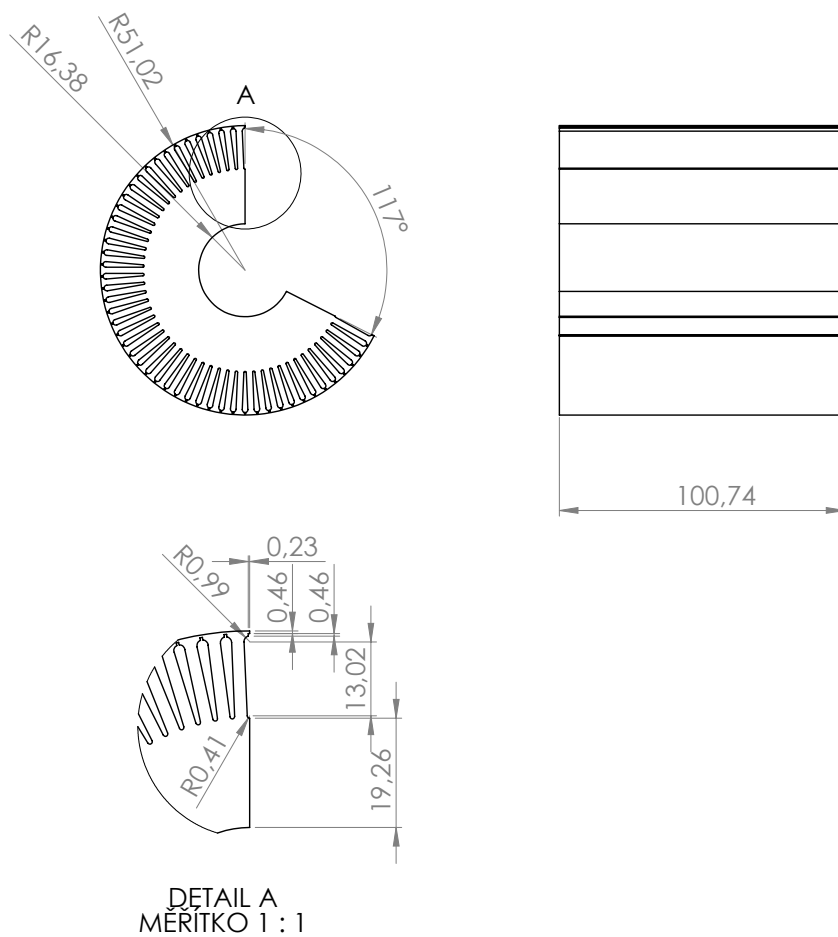
Příloha č. 5 : Nákres levého ložiskového štítu

Příloha č. 6 : Nákres pravého ložiskového štítu

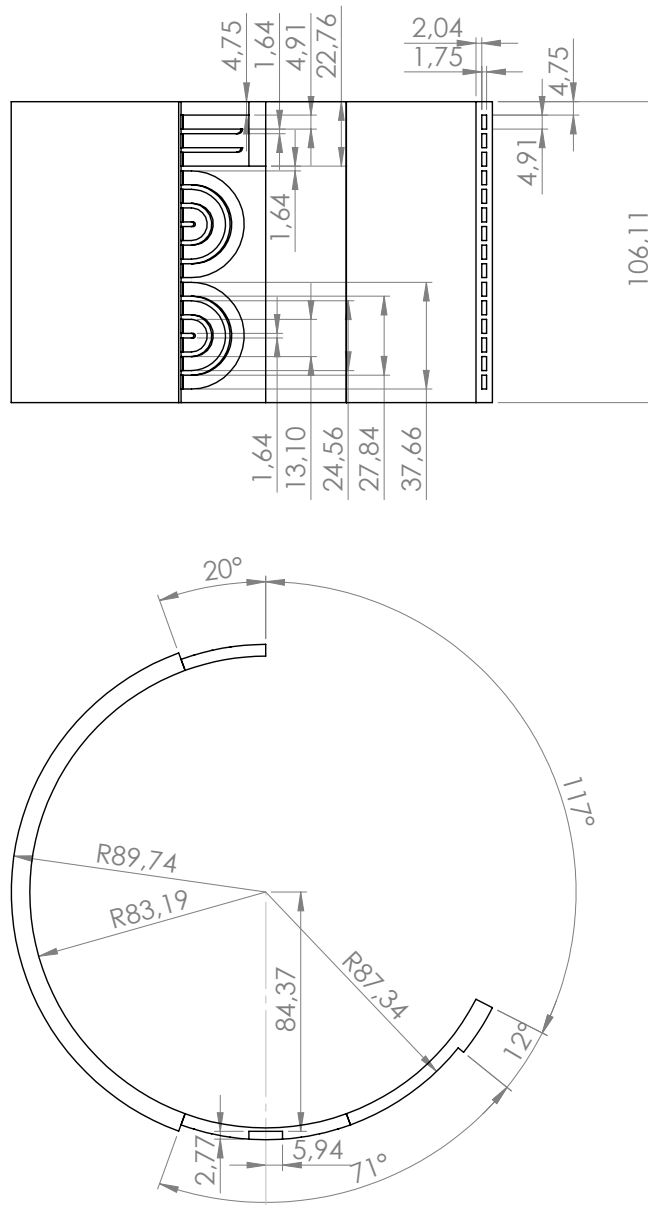
Příloha č. 1



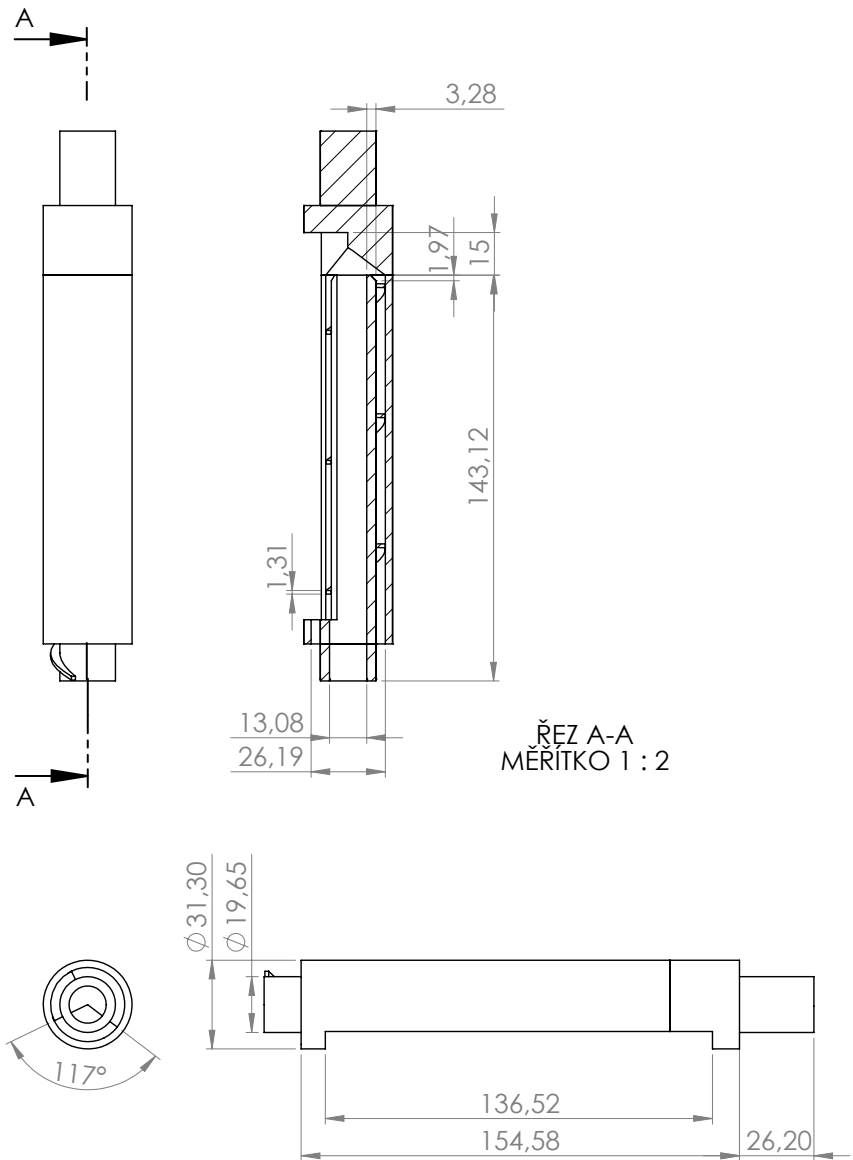
Příloha č. 2



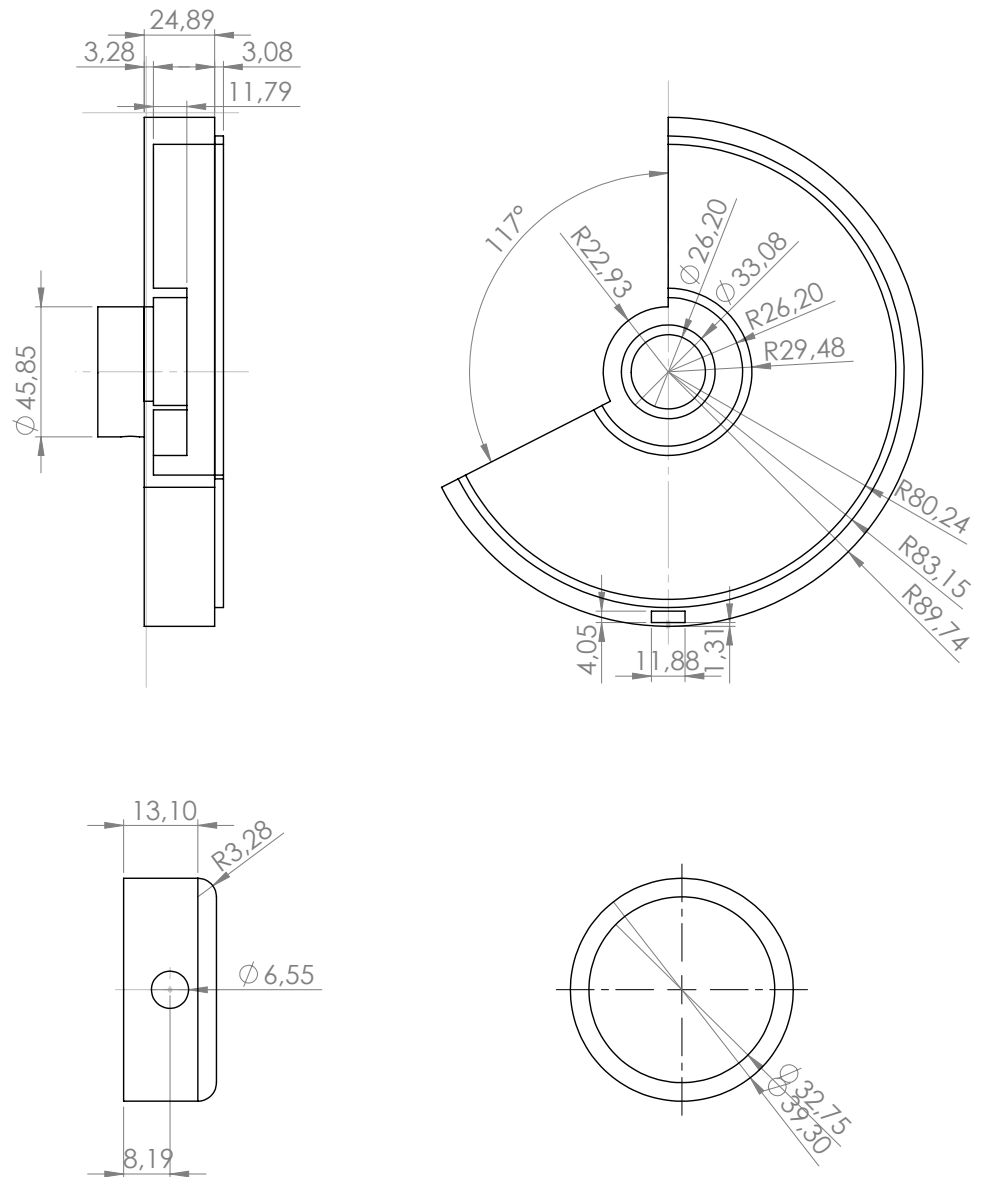
Příloha č. 3



Příloha č. 4



Příloha č. 5



Příloha č. 6

