



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

ELEKTRICKÉ STROJE PRO ELEKTROMOBILY

ELECTRIC MACHINES FOR ELECTRIC CARS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Samuel Greňa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Mach, Ph.D.

BRNO 2025



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Samuel Greňa

ID: 230949

Ročník: 3

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

Elektrické stroje pro elektromobily

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- Zpracujte podrobný přehled v současnosti používaných konstrukčních řešení elektrických strojů pro elektromobily.
- Zhodnoťte výhody a nevýhody jednotlivých konstrukčních řešení.
- Popište předpokládaný budoucí vývoj v této oblasti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] J. Larminie, J. Lowry, Electric Vehicle Technology Explained, second edition, John Wiley & Sons Ltd, 2012, ISBN: 978-1-119-94273-3.
- [2] Odborné články např. z databáze IEEE.
- [3] Materiály publikované výrobcí automobilů.

Termín zadání: 10.2.2025

Termín odevzdání: 28.5.2025

Vedoucí práce: Ing. Martin Mach, Ph.D.

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá prehľadom elektrických strojov používaných v elektromobiloch. Prvá časť tejto práce zachytáva všeobecný prehľad o rôznych druhov elektrických strojov ako sú jednosmerné, asynchrónne a synchronónne motory . Druhá časť semestrálnej práce pojednáva o konkrétnych elektromotoroch používaných v elektromobiloch, ich konštrukcií. Záver práce pojednáva o hlavných výhodách a nevýhodách použitia daných elektromotorov a budúcom vývoji v tejto oblasti. Porovnanie parametrov je dostupné v prílohe.

Klíčová slova

Asynchrónny motor, synchronónny motor s permanentnými magnetmi, synchronónny motor s vinutým rotorom, spínaný reluktančný motor, vinutie, stator, rotor, magnety

Abstract

This bachelor's thesis deals with an overview of electric machines used in electric vehicles. The first part of this thesis provides a general overview of different types of electric machines, such as DC, asynchronous, and synchronous motors. The second part of the term paper discusses specific electric motors used in electric vehicles and their construction. The conclusion addresses the main advantages and disadvantages of using these electric motors and the future development in this field. A comparison of parameters is available in the appendix.

Keywords

Asynchronous motor, synchronous motor with permanent magnets, synchronous motor with wound rotor, switched reluctance motor, winding, stator, rotor, magnets

Bibliografická citace

GREŇA, Samuel. Elektrické stroje pro elektromobily . Online, bakalářská práce. Martin MACH (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/168410>.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Samuel Greňa*

VUT ID studenta: *230949*

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: *2024/25*

Téma závěrečné práce: *Elektrické stroje pro elektromobily*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 28. května 2025

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Martinovi Machovi, Ph.D. za odbornú pomoc, ochotu a trpezlivosť pri procese tvorby mojej bakalárskej práce. Zároveň si veľmi vážim jeho cenné rady a konštruktívne pripomienky, ktoré výrazne prispeli k zlepšeniu výslednej podoby mojej bakalárskej práce.

Obsah

TOČIVÉ ELEKTRICKÉ STROJE	10
JEDNOSMERNÉ STROJE	10
ASYNCHRÓNNE STROJE.....	11
SYNCHRÓNNE STROJE	12
ELEKTRICKÉ MOTORY V AUTOMOBILOCH.....	13
JEDNOSMERNÝ MOTOR	13
ASYNCHRÓNNY MOTOR S KOTVOU NAKRÁTKO	14
SYNCHRÓNNY MOTOR S PERMANENTNÝMI MAGNETMI	14
TESLA MODEL S	15
AUDI E TRON.....	19
TOYOTA PRIUS 2003, 2004.....	23
TOYOTA PRIUS 2017	26
LEXUS LS 600H	28
TOYOTA CAMRY	30
CHEVROLET BOLT EV	32
RENAULT ZOE	36
VÝHODY A NEVÝHODY JEDNOTLIVÝCH KONŠTRUKČNÝCH RIEŠENÍ	38
PREDPOKLADANÝ VÝVOJ	41
ZÁVER	44

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1: Konštrukcia jednosmerného motora [1].....	11
Obrázok 2: Pohľad v reze a z čela na elektromotor [11].....	15
Obrázok 3: Tesla S stator [12].	16
Obrázok 4: Tesla S rotor [12].....	16
Obrázok 5: a) silikon nitridové ložisko rotoru b) detail na guľičky ložiska [12].	17
Obrázok 6: a) Trubica vo vnútri hriadeľa [12], b) Systém chladenia motoru [3]	18
Obrázok 7: a) Rozloženie fáz statora v drážkach b) uloženie vodičov v drážke [11].	18
Obrázok 8: Dimenzie statorových a rotorových drážok [11].	19
Obrázok 9: a) APA250 b) AKA320.....	19
Obrázok 10: a) rozloženie Fáz e-tron [4] b) vinutie e-tronu [4].....	20
Obrázok 11: ATA 250 [13].....	21
Obrázok 12: Prúdenie chladiva v audi e tron [13].....	22
Obrázok 13: Rozloženie teploty v motore AKA 320 [13].	22
Obrázok 14: Rozloženie teploty v motore APA 250 [4].	23
Obrázok 15: Prius 2003 [6].....	24
Obrázok 16: Prius 2004 [6].....	24
Obrázok 17: Vinutie statora Prius 2004 [6]	24
Obrázok 18: Stator Prius 2004 [6]	24
Obrázok 19: a) Statorový plech Prius 2003 b) Statorový plech Prius 2004 [6].	25
Obrázok 20: Uloženie magnetov Prius 2003 [6].....	25
Obrázok 21: Uloženie magnetov Prius 2004 [7].....	25
Obrázok 22: Obrys motora Prius 2004 [8].....	26

Obrázok 23: Vlásokovité vinutie statora [9]	27
Obrázok 24: Spôsob uloženia magnetov v 4 generácii modelu Prius [9]	27
Obrázok 25: Priečny rez 4 generácie Toyoty prius 2017 [9].	28
Obrázok 26: Stator Lexus LS 600h [10].	28
Obrázok 27: Schématické zapojenie jednej fáze statora [10].	29
Obrázok 28: Spôsob uloženia magnetu v drážkách a jeho rozmery [10].	29
Obrázok 29: Rotor Lexus LS 600h [10].	30
Obrázok 30: a) Základná zostava hybridného pohonu b) režim elektro pohonu [18].	30
Obrázok 31: a) Elektromotor Camry 2007 [17] b) rotorové plechy Camry a lexus [10].	31
Obrázok 32: Camry a) stator b) statorový plech [19].	32
Obrázok 33: Kompletná zostava rotujúcich častí Chevrolet Bolt EV [14].	32
Obrázok 34: a) stator b) rotor Chevrolet Bolt EV [14].	33
Obrázok 35: Porovnanie izolácii drážok – a) Spark b) Bolt [15].	34
Obrázok 36: Počet vodičov v drážke – a) Chevrolet Spark b) Chevrolet Bolt EV [15].	34
Obrázok 37: Pripojovací krúžok [15].	35
Obrázok 38: Uloženie magnetov v rotore [15].	35
Obrázok 39: Renault Zoe a) stator b) rotor [21].	36
Obrázok 40: Renault Zoe a) napájacie krúžky b) uloženie krúžkov v rotore [21].	37
Obrázok 41: Synchronný motor s vinutým rotorom s bezkontaktným budičom.	37
Obrázok 42: Porovnanie motorov s axiálnym a radiálnym tokom [26].	42

ZOZNAM TABULIEK

Tabulka 1. Straty motora pri nominálnych otáčkach [4].....	20
Tabulka 2: Porovnanie výhod a nevýhod jednotlivých elektromotorov [16].....	38
Tabulka 3: Špecifický výkon v modeloch Prius [25].....	41

ÚVOD

V dnešnom svete neustále sa zvyšujúcich požiadaviek na znižovanie emisií vozidiel je elektromobilita neoddeliteľnou súčasťou automobilového priemyslu pretože predstavuje veľmi efektívny a ekologicky udržateľný spôsob dopravy. Elektromobily využívajú pre svoj pohon elektrické stroje, ktoré sa neustále vyvíjajú. Celý tento vývoj v oblastiach výkonu, účinnosti, a životnosti zohľadňuje potreby na dopravu modernej spoločnosti.

Táto bakalárska práca sa zaoberá prehľadom v súčasnosti používaných konštrukčných riešení elektrických strojov pre elektromobily. Prvá časť tejto práce je zameraná na krátky všeobecný prehľad elektrických strojov a princíp ich práce. Druhá časť práce pojednáva o konkrétnych modeloch elektromobilov a v nich použitých strojov. Najčastejšie sa jedná o asynchrónne motory s kotvou nakrátko a synchrónne motory s permanentnými magnetmi ktoré majú v dnešnom svete elektromobilov a hybridných pohonov najväčšie zastúpenie. V závere tejto práce budú zhodnotené výhody a nevýhody jednotlivých konštrukčných riešení a predpokladaný vývoj v tejto oblasti.

Cieľom tejto práce je poskytnúť prehľad najčastejšie používaných konštrukčných riešení elektromotorov v elektromobiloch a informácie o ich technických parametroch.

TOČIVÉ ELEKTRICKÉ STROJE

Točivé elektrické stroje sú zariadenia ktoré slúžia na premenu elektrickej energie na mechanickú energiu ale aj naopak napríklad ako generátor. Otáčavý pohyb elektromotora je umožnený vďaka vzájomnému pôsobeniu magnetického poľa statora a rotora. Toto magnetické pole je vytvárané prechodom prúdu cievkami. V závislosti od typu elektrického motora môžu byť tieto cievky umiestnené na statore alebo rotore. Magnetické pole vytvorené prechodom prúdu cievkami statora reaguje s magnetickým poľom rotora a vzniká moment. [1]

Jednosmerné stroje sa využívajú hlavne ako spotrebiče elektrickej energie a menej ako dynamá keďže v dnešnej dobe sú jednosmerné dynamá nahrádzané striedavými motormi s usmerňovačmi. Najčastejšie sa používajú v rôznych domácich spotrebičoch napríklad vysávače, mixéry, brúsky, hračky ale aj na pohon elektromobilov [1]

Jednosmerné stroje

Jednosmerné stroje sa využívajú hlavne ako spotrebiče elektrickej energie a menej ako dynamá keďže v dnešnej dobe sú jednosmerné dynamá nahrádzané striedavými motormi s usmerňovačmi. Najčastejšie sa používajú v rôznych domácich spotrebičoch napríklad vysávače, mixéry, brúsky, hračky ale aj na pohon elektromobilov [1].

Jednosmerný motor sa skladá zo statora a rotora, ktoré sú vzájomne oddelené vzduchovou medzerou. Stator je zložený z jarma statora, pólov a pólových nadstavcov. Rotor sa skladá z kotvy a komutátora. Povrch rotora teda kotvy sa skladá z dynamo plechov naskladaných vedľa seba. Tieto dynamo plechy obsahujú drážky v ktorých je uložené vinutie. Tomuto vinutiu hovoríme vinutie kotvy[1].

Magnetický obvod vzniká za pomoci budiaceho vinutia ktoré je umiestnené v drážkach statora [1].

Týmto budiacim vinutím prechádza jednosmerný prúd a vytvára tak budiace magnetické napätie ktoré umožní prechod magnetického toku. Magnetický tok prechádza vzduchovou medzerou do statora kde pozdĺž jarma rotora pokračuje cez vzduchovú medzeru, polový nadstavec a pól opačnej polaroty do jarma statora. Vinutie rotora je zložené z cievok ktoré majú definovaný presný počet závitov. Tieto cievky sú pripojené jedným koncom na lamelu komutátora odkiaľ prechádzajú drážkou cez stator a vracajú sa opäť drážkou ale posunutou o pólový rozostup a druhým koncom sa

Zo vzťahu pre otáčky tohto magnetického poľa vyplýva že zmenou napájacej frekvencie a počtu pólov sa bude meniť aj rýchlosť tohto poľa

$$n_{syn} = \frac{60f_s}{p} \text{ (min}^{-1}\text{) [1].}$$

Toto magnetické pole indukuje napätie vo vodičoch rotoru a vytvára prúd týmito vodičmi čo má za následok vytvorenie magnetického poľa rotora a vzniká točivý moment. Magnetické pole statora sa otáča so sklzom ku magnetickému poľu statora, to znamená že magnetické pole rotora sa snaží dobehnúť magnetické pole statora.

Sklz je definovaný ako sklzová rýchlosť ku synchronným otáčkam

$$s = \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}} \text{ [1].}$$

Rotor sa teda otáča nižšími otáčkami tzv. asynchronnými. Otáčky rotora vieme vypočítať zo vzťahu:

$$n = n_{syn}(1 - s) = \frac{60f_s}{p}(1 - s) \text{ [1].}$$

Synchronne stroje

Synchronne stroje sú najčastejšie využívané na výrobu elektrickej energie ako generátory. Ich využitie sa však začína rozširovať vďaka postupnému vývoju polovodičovej techniky.

Stator synchronného motoru je zložený z plechov ktoré majú na vnútorných stranách drážky. V týchto drážkach sa nachádza najčastejšie trojfázové vinutie. Rotor môže byť hladký, válcový alebo s vyčnievajúcimi pólmi. Synchronne stroje delíme podľa zdroja budiaceho poľa na stroje s vinutým rotorom alebo stroje s permanentnými magnetmi. Pri stroji s permanentnými magnetmi sú práve tieto magnety zdrojom budiaceho napätia avšak pri stroji s vinutým rotorom sú v rotore cievky ktorými preteká jednosmerný prúd a ten vytvára budiace magnetické pole.

Hlavnou výhodou synchronného stroja je že pracuje pri frekvencií napájacej siete .

Synchronne otáčky motora vieme získať zo vzťahu

$$n_{syn} = \frac{60f_s}{p} \text{ [1].}$$

Toto vybudené magnetické pole sa otáča rovnakým otáčkami ako statorové magnetické pole [1].

ELEKTRICKÉ MOTORY V AUTOMOBILOCH

V súčasnej dobe sa aj vďaka téme ochrany životného prostredia a nedostatku fosílnych palív čoraz viac kladie dôraz na vývoj a výrobu elektromotorov pre elektromobily. S tým sú však spojené aj väčšie nároky kladené na tieto elektromotory [2].

Hlavné rozdiely medzi priemyselnými motormi a elektromotormi sú:

- Vyššia teplota okolia ktorá sa pohybuje od -40°C do 140°C
- Nepriaznivé prevádzkové prostredie
- Vyššia teploty vinutia: pre porovnanie bežná teplota vinutia priemyselných motorov sa pohybuje od 75°C až 130°C , elektromotory musia spĺňať 160°C až 200°C
- Nízka hladina hluku vytváraného motorom a veľmi malý inštalčný priestor takže tieto elektromotory musia byť čo najkompaktnejšie vzhľadom k danej inštalácii.
- Vysoký rozsah otáčok 0 až 150 000 [2].

Tieto motory musia taktiež spĺňať vysoké požiadavky ktoré sú na nich kladené:

- Vysoký výkon a krútiaci moment
- Možnosť vysokého preťaženia pri predbiehaní
- Veľký rozsah otáčok
- Vysoká účinnosť
- Nízka hlučnosť
- Cena [2].

Najčastejšími typmi motorov používaných pre pohon automobilov sú:

- Jednosmerné motory
- Asynchrónne motory s kotvou nakrátko,
- Synchronne motory s permanentnými magnetmi [2].

Jednosmerný motor

Tieto motory sú vďaka veľkému záberovému momentu najviac rozšírené v trakcii. Vyznačujú sa veľmi mäkkou momentovou charakteristikou, to znamená že s rastúcimi otáčkami rýchlo klesá moment. Tento motor sa nemôže rozbehnúť bez záťaže pretože by mohlo dôjsť k prudkému zvýšeniu otáčok a poškodeniu motora. Táto vlastnosť je však pri elektromobilite výhodná. Hlavnou výhodou použitia týchto motorov v elektro-

mobiloch je možnosť napájania priamo z batérie bez použitia meniča. Podľa typu budenia ich delíme na motory s cudzím budením, sériové, derivačné alebo kompaudné [2].

Motor s cudzím budením má veľmi plynulý prechod z motorického do generatorického režimu a dobrú regulovateľnosť otáčok v širokom rozsahu [2].

Derivačný motor má proti cudzobudenému motoru väčšiu momentovú charakteristiku a dobre riadenie otáčok ale na menšom rozsahu. Budiace vinutie je pripojené paralelne k vinutiu kotvy [2].

Kompaudný jednosmerný motor má taktiež dobrú momentovú charakteristiku a jedno-ducké riadenie ale vyžadujú častejšiu údržbu, majú pri rovnakých rozmeroch nižší výkon a sú drahšie. Vinutie je zapojené z časti do série a z časti paralelne s vinutím rotoru [2].

Nevýhodou týchto motorov v porovnaní so striedavými motormi je menšia účinnosť a hustota výkonu, obmedzené maximálne otáčky [2].

Taktiež použitie komutátora a kief so sebou prináša zvýšené riziko opotrebenia týchto častí a častá údržba. S vývojom meničov a polovodičovej techniky použitie jednosmerných komutátorových motorov prudko klesá. V dnešnej sa tento typ motorov vyskytuje v automobiloch prevažne na ovládanie komponentov, na pohon elektromobilov sa už prakticky nepoužíva [2].

Asynchrónny motor s kotvou nakrátko

Výhodou použitia týchto motorov v elektromobiloch je ich jednoduchá konštrukcia, minimálna údržba a možnosť vysokého preťaženia. Tieto motory oproti jednosmerným motorom majú pri rovnakej veľkosti vyšší výkon. Príkladom použitia tohto motora je Tesla model s [2].

Synchrónny motor s permanentnými magnetmi

Najviac používaným synchrónnym motorom v elektromobiloch je synchrónny motor s permanentnými magnetmi. Rotor je tvorený týmito permanentnými magnetmi ktoré sú vyrobené z najmodernejších materiálov. Medzi najčastejšie materiály patria zliatiny

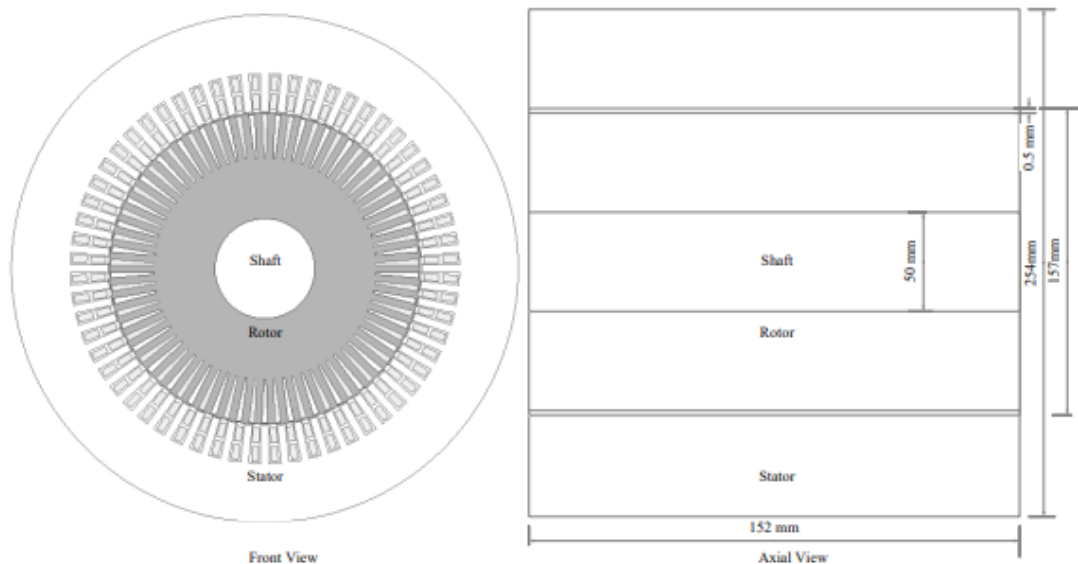
NdFeB (neodym-železo-bór), SmCo (samarium-cobalt). Tieto magnety v porovnaní s bežne používanými feritovými magnetmi dosahujú až trojnásobnú magnetickú indukčnosť. Prevádzka pri teplote presahujúcej 80°C znižuje ich životnosť ale maximálna krátkodobá teplota môže dosahovať až 200°C.

Výhodou tohto motora je že neodoberá magnetizačný prúd zo zdroja a vo vinutí rotora nevznikajú straty, tým pádom dosahuje vyššiu účinnosť a menšie rozmery ako klasický asynchrónny motor. Tento motor je použitý aj v elektromobile Tesla model 3 [2].

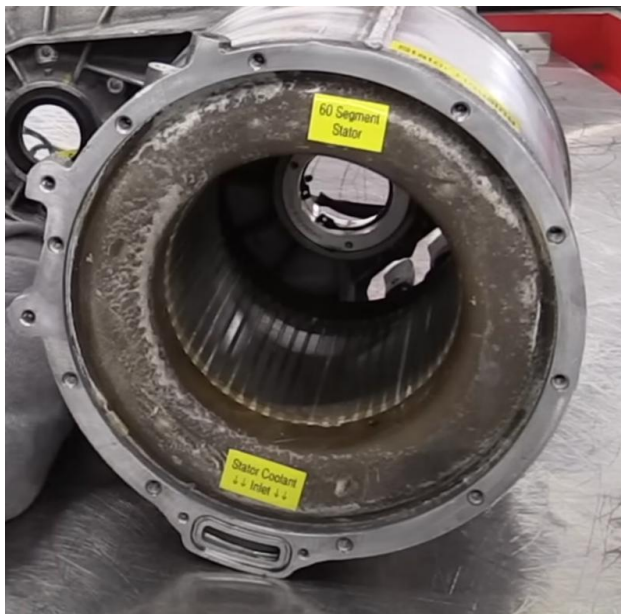
Tesla model s

Tento model bol v rokoch 2015 až 2016 najpredávanejším elektrickým automobilom na svete. Zaujímavý je nielen svojím výkonom a technológiami ale z technologického hľadiska najmä použitým elektromotorom pre svoj pohon. Tesla zvolila použitie asynchrónneho motora s kotvou nakrátko [3].

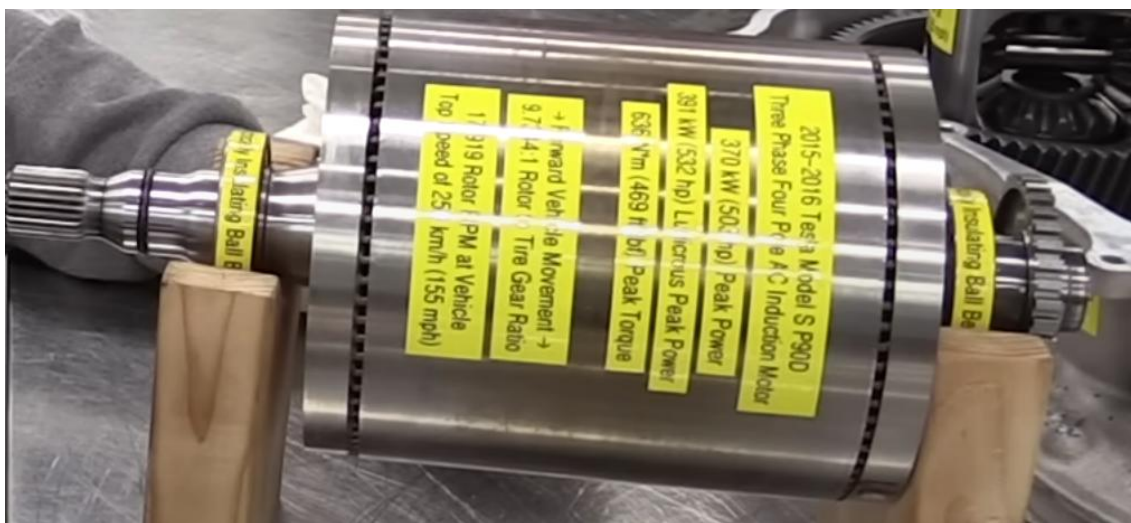
Jedná sa o 4 pólový asynchrónny motor s kotvou nakrátko ktorý poskytuje výkon 225 Kw, moment 430 Nm a 15 000 ot/min [3]. Verzia S performance s označením P90D z roku 2016 poskytuje výkon až 370 kW, krútiaci moment až 636 Nm a 17919 ot/min pri 250 km/h. Stator sa skladá zo statorových plechov ktoré majú 60 drážok a je znázornený na obrázku.



Obrázok 2: Pohľad v reze a z čela na elektromotor [11].



Obrázek 3: Tesla S stator [12].



Obrázek 4: Tesla S rotor [12].

Jadro rotora je zložené zo 74 medených rotorových tyčí[3]. Hmotnosť rotora je 27,5 kg. Pomer otáčok rotora k otáčkam kolesa je 9,7734:1.

Keďže práve model S performance dosahuje až 17,919 ot/min pri rýchlosti 250 km/h bolo dôležité navrhnuť dostatočne odolné ložiská. Tesla preto použila špeciálne silicon nitridové ložiská ktoré majú oproti bežne používaným kovovým ložiskám nasledujúce výhody:

- sú nevodivé,
- majú nižšiu hmotnosť,
- majú nižšiu tepelnú rozťažnosť,
- zvládajú vysoké otáčky [12].

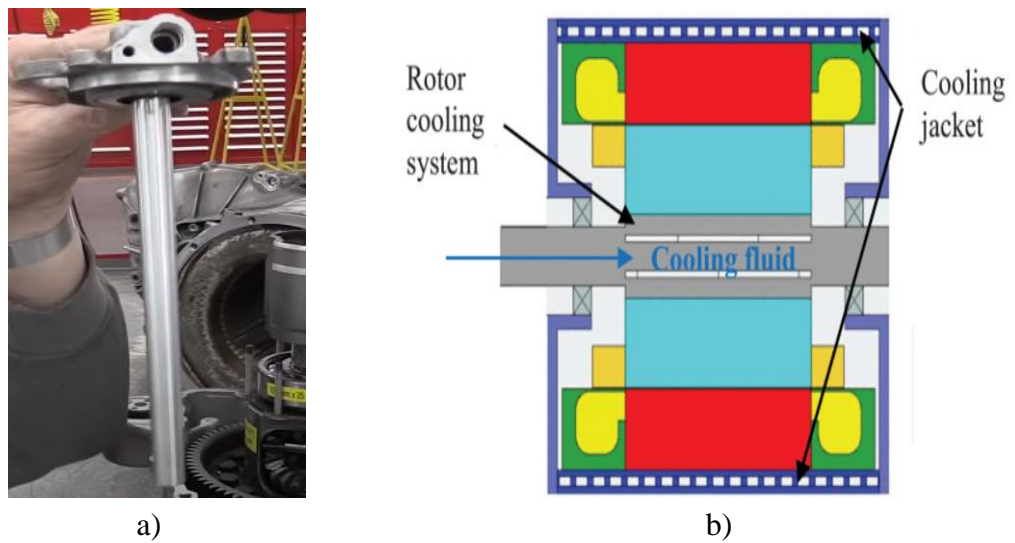


Obrázok 5: a) silikon nitridové ložisko rotora b) detail na guličky ložiska [12].

Indukčné motory vo všeobecnosti pracujú pri vyššej teplote než synchronne motory s permanentnými magnetmi pretože rotorom indukčného motoru prechádza prúd. Chladienie tohto motora zabezpečuje špeciálna chladiaca kvapalina ktorá vchádza do vnútra rotorového hriadeľa v trubici ktorá je znázornená na obrázku nižšie. Na konci hriadeľa rotora sa vracia po vonkajšej strane tejto trubice naspäť a vchádza do spodnej časti kanála statorového obalu [12].

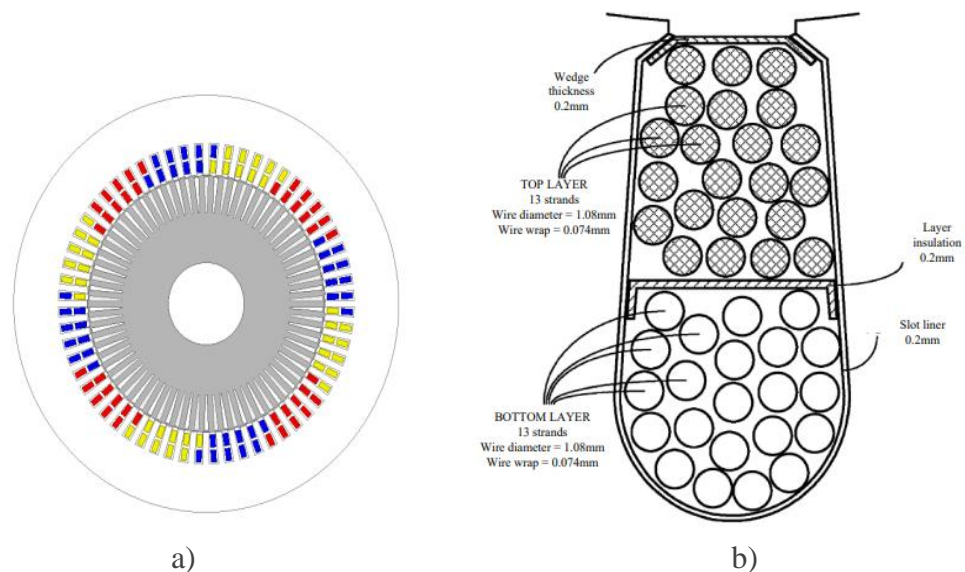
Potom sa chladiaca kvapalina rozteká po celom obale statora takže teplo zo statora je odvádzané zo všetkých jeho strán. Na druhej strane statorového obalu chladiaca kvapalina pokračuje do obalu prevodovky a ďalej nižšie kde chladí inverter IGBT tranzistorov. Po tejto ceste vystupuje von z celkového obalu statora a pokračuje v externom potrubí tesne

popri obale statoru tenkým kanálikom do druhej časti prevodovky kde chladí 3 IGBT tranzistory [12].

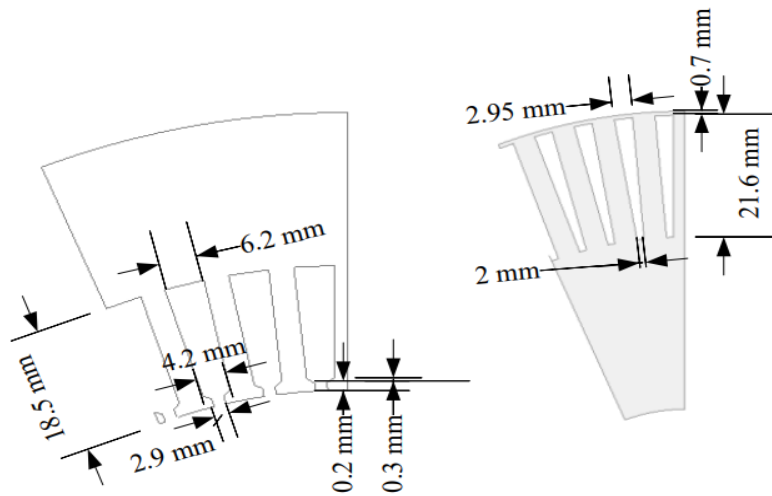


Obrázok 6: a) Trubica vo vnútri hriadeľa [12], b) Systém chladenia motoru [3]

V statore je použité dvojvrstvé koncentrované vinutie s 3 cievkami na pol a fázu s krokom cievok 10-12-14 a počtom zatočení cievky 1-2-2. Počet drážok na pól a fázu je 5. V jednej drážke sa nachádza 26 medených guľatých drôtov s priemerom 1,08 mm a s izoláciou o hrúbke 0,074 mm. Na jednu vrstvu drážky pripadá 13 vodičov. Vrstvy sú od seba oddelené izoláciou o hrúbke 0,2 mm. Každá fáza je rozdelená na dve časti ktoré sú spojené paralelne. Výhodou je možnosť 6 fázového zapojenia [11].



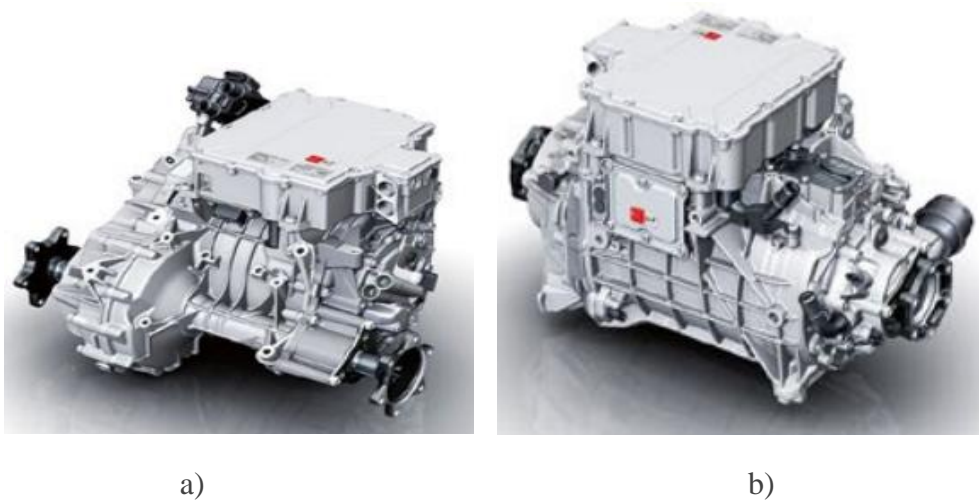
Obrázok 7: a) Rozloženie fáz statora v drážkach b) uloženie vodičov v drážke [11].



Obrázek 8: Dimenzie statorových a rotorových drážok [11].

Audi e tron

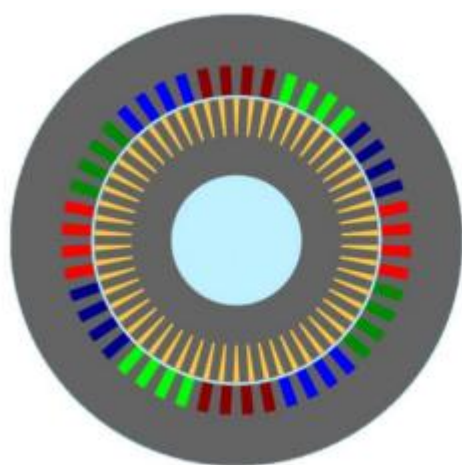
Audi e tron pre svoj pohon využíva dva elektromotory, jeden je umiestnený na prednej náprave a dva koaxiálne na zadnej náprave. Elektromotor ktorý poháňa prednú nápravu má označenie APA250 a dva koaxiálne konštruované motory na zadnej náprave nesú označenie AKA320. Tieto dva typy motorov sa vyskytujú v modeloch Audi E-tron 50 quattro a 55 quattro. V prémiovejšom modeli E-tron S sa využíva rovnaké rozloženie motorov na nápravy avšak elektromotor na prednej náprave má označenie APA320 a elektromotory na zadnej ATA250. Ako príklad konštrukčného riešenia je použitý typ APA250 ktorý poháňa prednú nápravu.



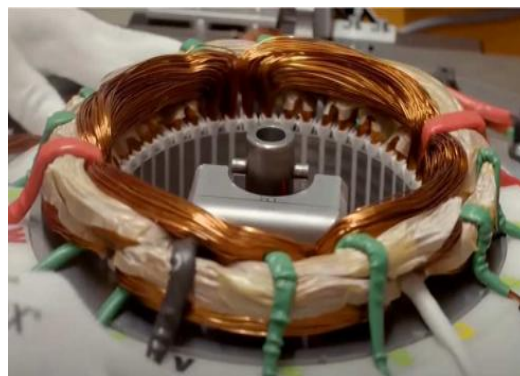
Obrázok 9: a) APA250 b) AKA320

Jedná sa o asynchrónny 4 pólový motor s kotvou nakrátko. Stator obsahuje 48 drážok a rotor obsahuje 58 tyčí. Motor poskytuje maximálny výkon 125 kW, krútiaci moment 247 Nm a maximálne otáčky 15 000 ot/min [4].

Stator je zložený z plechov s označením M235_35A. Hrúbka laminácie je 0,35 mm. Má 4 drážky na pól a fázu a medené vinutie s hrúbkou 0,75 mm je rozložené a je zapojené do hviezdy, paralelne bez spojenia cez neutrálny bod. Rozostup medzi cievkami je 10 a počet závitov na cievku je 6 [4].



a)



b)

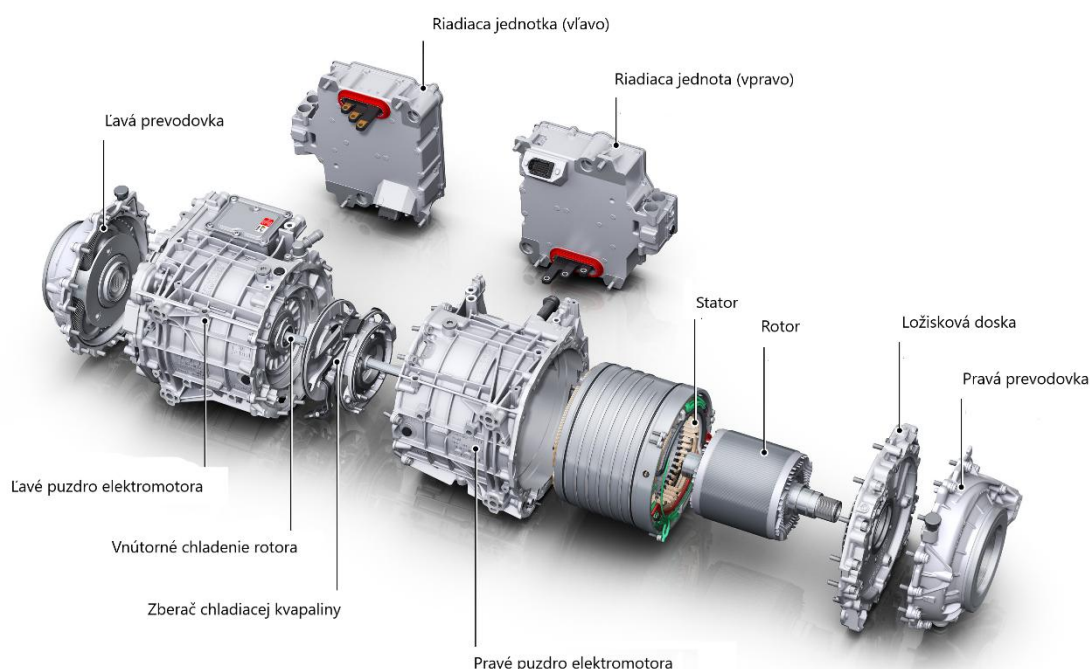
Obrázok 10: a) rozloženie Fáz e-tron [4] b) vinutie e-tronu [4].

Tabulka 1. Straty motora pri nominálnych otáčkach [4].

Parameter	Hodnota
Joulove straty v statore	6304 W
Joulove straty v rotore	6160 W
straty v železe statora	230 W
Straty v železe rotora	4 W
Účinnosť	90,70 %

Keďže v tomto elektromotore dochádza k vzniku veľkého tepla, bolo nevyhnutné vyvinúť chladiaci systém ktorý je dôležitý pre dosiahnutie vysokej výkonovej hustoty a zároveň spĺňa požiadavky pre inštalačný priestor a hmotnosť aby bola zachovaná celková dĺžka a hmotnosť nápravy [13].

Ako príklad funkcie chladiaceho okruhu bude použitý pohon zadnej nápravy v modeli E-tron S s dvomi koaxiálne uloženými motormi s označením ATA250 [13].

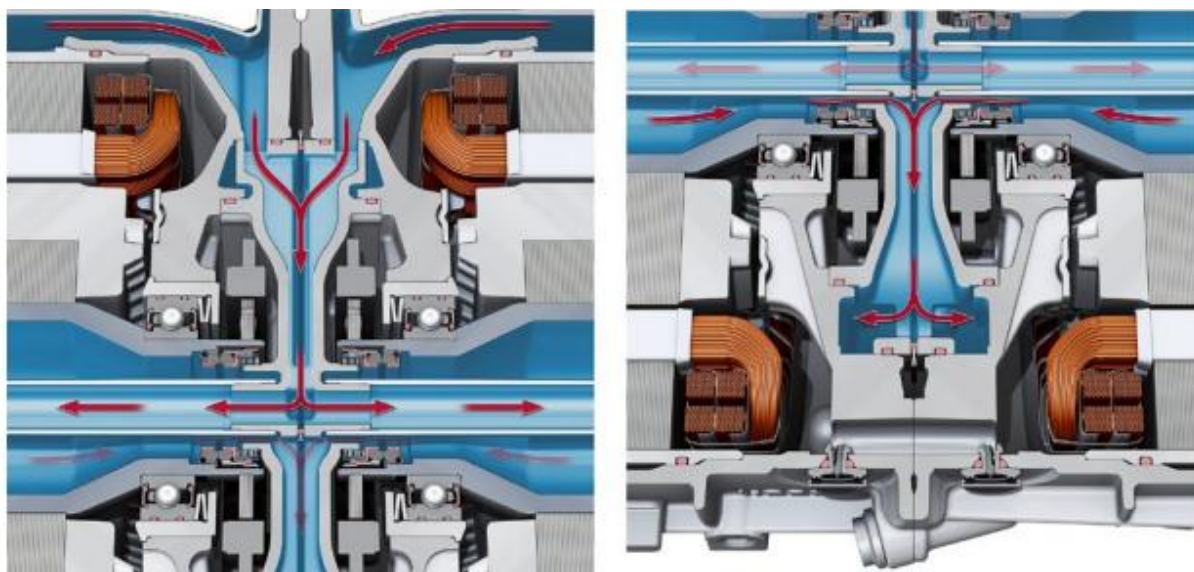


Obrázok 11: ATA 250 [13].

Tento chladiaci systém obsahuje chladič statora, ložiskovú dosku a vnútorné chladenie rotora pre oba elektromotory. Chladiaca kvapalina vstupuje do motora paralelne cez dva výkonové jednotky ktoré vyžadujú najnižšiu teplotu chladiacej kvapaliny. Za týmito modulmi sa kvapalina dostáva do oboch motorov kde je najprv vedená cez ložiskovú dosku na strane prevodovky a následne cez chladiaci obal statora. Pri chladení rotora dochádza najprv k zlúčeniu dvoch vodných okruhov pred vstupom do rotora aby sa zabránilo rôznemu zahrievaniu kvapaliny ktoré môže byť spôsobené

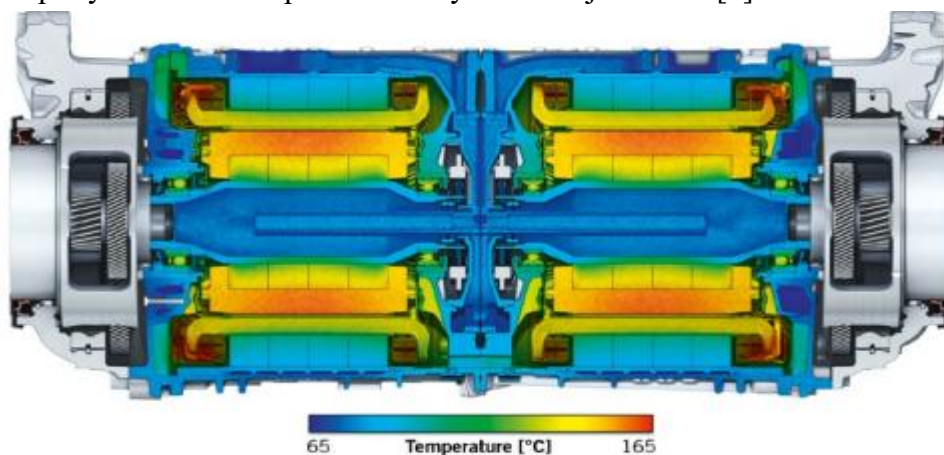
zmenou krútiaceho momentu. Cez tento kolektor prúdi ďalej chladiaca kvapalina cez úzky kanálik hlboko do rotora. V rotore sa vďaka strihovému efektu kvapalina uvedie do rotácie a ďalej prúdi cez hriadeľ rotora smerom k výstupu medzi elektrickými motormi. Po tomto procese chladenia rotora sa kvapalina zasa spojí v inej časti kolektora a následne opúšťa elektrickú nápravu [13].

Chladienie prebieha aj pomocou ventilátorových lopatiek na predných plochách rotorov ktoré využívajú prúd vzduchu nasmerovaný na ložiskové kryty. Vďaka tomu dochádza k účinnému odvodu tepla z kliečky rotora a hláv vinutí satora [13].

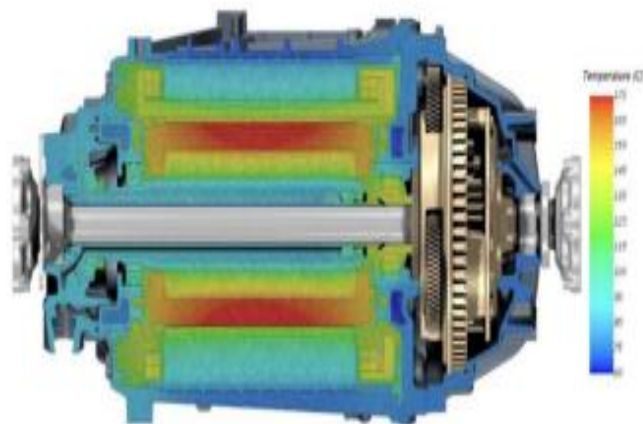


Obrázek 12: Prúdenie chladiva v audi e tron [13].

Chladienie rotora v Audi e tron je na pokročilejšej úrovni než pri Tesle model s a to z dôvodu že pri Audi e tron v rotore vzniká viac tepla než v Tesle model s. Tyče rotora dosahujú teploty až 175°C a teplota koncových vinutí je 145°C. [4].



Obrázek 13: Rozloženie teploty v motore AKA 320 [13].



Obrázek 14: Rozloženie teploty v motore APA 250 [4].

Toyota Prius 2003, 2004

Na rozdiel od predchádzajúcich dvoch modelov elektromobilov, ide v tomto prípade o hybridné vozidlo Toyota Prius ktoré pre svoj pohon okrem spaľovacieho motora využíva aj 8 pólový synchronný motor s permanentnými magnetmi. Benzínový motor poskytuje výkon 57 kW a elektromotor 50 kW. Kombinácia týchto dvoch typov pohonov poskytuje isté výhody:

- Zlepšenie efektivity vďaka automatickému zastaveniu motora pri voľnobehu
- Zlepšená akcelerácia pri rozbehu kedy je účinnosť spaľovacieho motora nízka
- Využitie energie pri brzdení ktorá by inak bola premárnená ako teplo
- Premena mechanickej energie na elektrickú energiu a následné dobíjanie akumulátora
- Úspora paliva [5]

Pri nízkych rýchlostiach pohon automobilu zabezpečuje elektromotor ktorý je napájaný z batérie. Pri jazde je účinnosť optimalizovaná a to tak že časť výkonu motora sa používa na poháňanie generátora ktorý poskytuje napájanie pre elektromotor a zvyšok výkonu je využitý na pohon kolies [5].

V roku 2004 priniesla automobilka toyota určité zmeny v konštrukcii synchronného motora s permanentnými magnetmi oproti modelu v roku 2003. Celková dĺžka motora bola o niečo menšia a výkon sa zvýšil z pôvodných 33 kW na 50 kW. Najväčšou zmenou bola zmena zapojení vinutia. Model z roku 2003 mal vinutia zapojené paralelne a ročník 2004 sériovo [6].



Obrázok 15: Prius 2003 [6].



Obrázok 16: Prius 2004 [6]

Pri danej hodnote prúdu zdvojnásobenie závitov ktoré interagujú s magnetickým tokom permanentných magnetov zdvojnásobí krútiaci moment. Oproti paralelnému vinutiu však sériové vinutie vyžaduje dvojnásobné napätie [6].



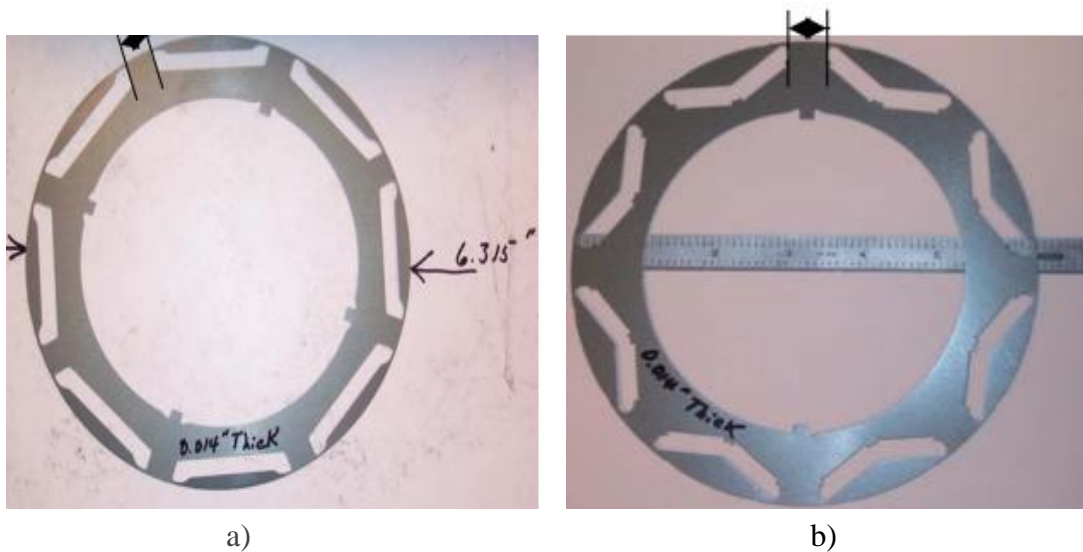
Obrázok 17: Vinutie statora Prius 2004 [6]



Obrázok 18: Stator Prius 2004 [6]

Ďalšou zmenou bol spôsob uloženia permanentných magnetov v rotore. Na nasledujúcich obrázkoch sú znázornené laminované plechy použité pri konštrukcii rotora. Z obrázkov je zrejme že v Priuse 2003 boli magnety boli uložené radiálne zatiaľ čo v Priuse 2004 konštruktéri zvolili uloženie do tvaru V [6].

Na nasledujúcich obrázku sú zobrazené použité plechy oboch Priusov 2003, 2004 a spôsob uloženia magnetov v Priuse 2003 [6].

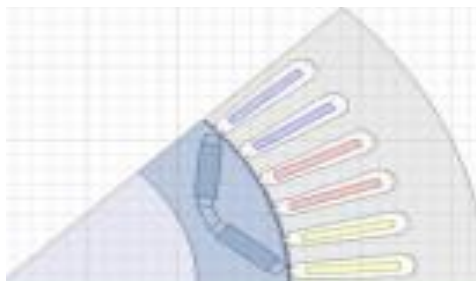


Obrázek 19: a) Statorový plech Prius 2003 b) Statorový plech Prius 2004 [6].



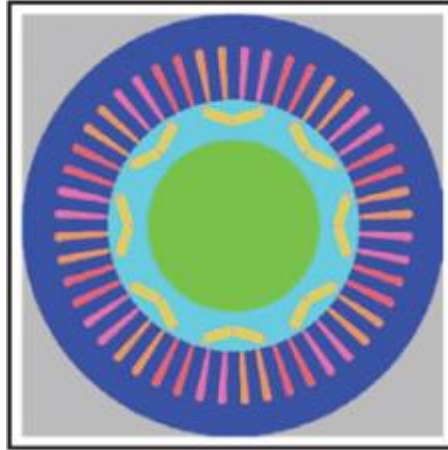
Obrázok 20: Uloženie magnetov Prius 2003 [6]

Každý pól rotora obsahuje dva magnety ktoré navzájom zvierajú uhol v tvare písmena „V“ preto sa toto uloženie magnetov označuje ako uloženie do tvaru V [7].



Obrázek 21: Uloženie magnetov Prius 2004 [7]

Dôvodom takéhoto usporiadania magnetov v rotore je zvýšenie reaktancie v bočnej zložke magnetického poľa (X_q) a tým zlepšenie výkonu motora. Vzduchové výbežky na vrcholoch výrezu magnetov slúžia na zúženie magnetického mostu čím sa dosiahne ešte väčšie zvýšenie X_q [8].



Obrázok 22: Obrys motora Prius 2004 [8]

Toyota prius 2017

Tento model pre svoj pohon využíva taktiež kombináciu spaľovacieho motora a 8 pólového synchronného motora s permanentnými magnetmi. Tento elektromotor poskytuje výkon 53 kW, maximálny krútiaci moment 163 Nm a maximálne otáčky 17 000 ot/min.

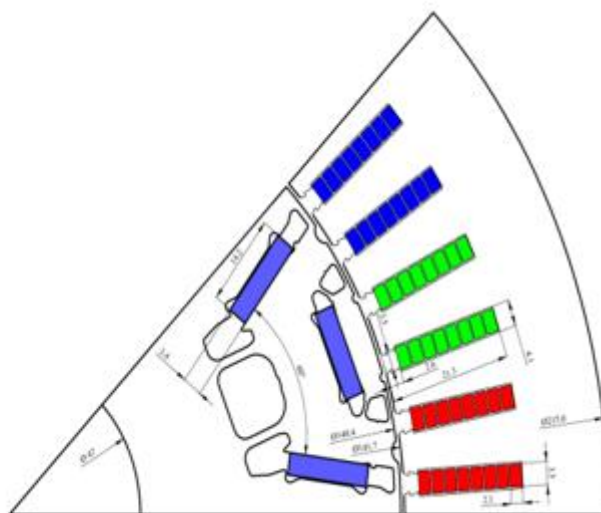
Ide o 4 generáciu modelu Toyota Prius hybrid ktorá oproti predchádzajúcej generácii má nový spôsob distribuovaného vinutia a to tzv. vlásenkovité vinutie. Pri tomto type vinutia sú namiesto klasických vodičov použité vodiče ploché ktoré umožňujú efektívnejšie využitie priestoru v drážkach. Stator má 48 drážok [9]. Vinutie každej fázy je rozdelené do 8 skupín po 8 závitov a je zapojené do série. Počet drážok na pól a fázu je 2 a drážková rozteč je 6. [9]



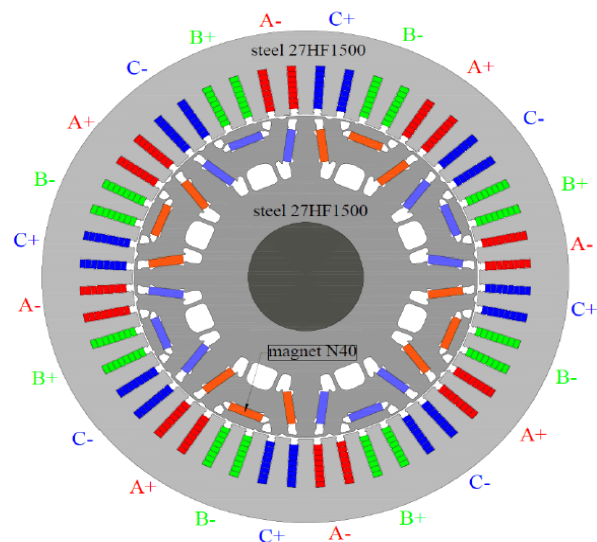
Obrázok 23: Vlásokovité vinutie statora [9]

Jadro rotoru a statoru je zložené z plechov o hrúbke 0,27 mm s označením MOTOR-MAX 27HF1500 [9].

Rovnako ako v predošlej generácii aj tu sú magnety uložené do tvaru písmena V avšak bol pridaný ďalší magnet ktorý je uložený radiálne medzi nimi ako je ukázané na obrázku číslo 15. Pridanie tohto magnetu má za následok lepšie rozloženie magnetického toku a zlepšenie efektivity a účinnosti motoru [9].



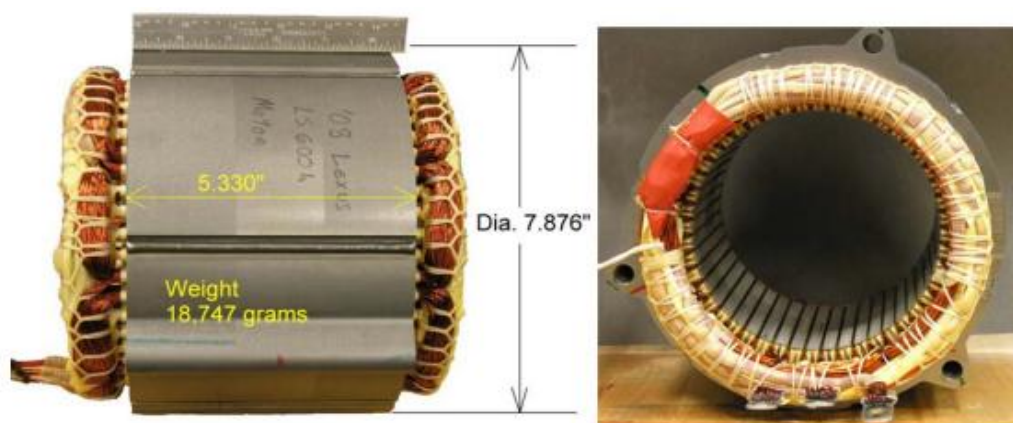
Obrázok 24: Spôsob uloženia magnetov v 4 generácii modelu Prius [9]



Obrázok 25: Priechy rez 4 generácie Toyota prius 2017 [9].

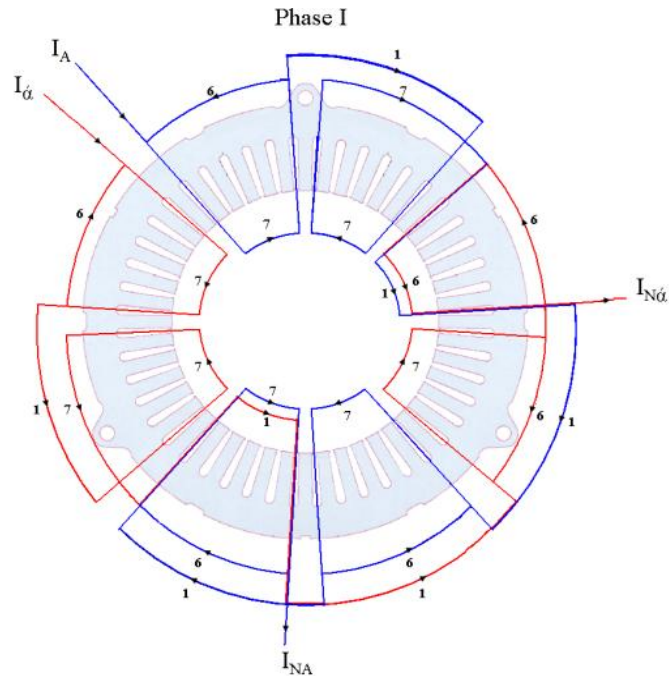
Lexus LS 600h

Lexus LS 600h patrí medzi luxusnú triedu automobilov značky toyota a pre svoj hybridný pohon využíva kombináciu 5 litrového 8 valcového spaľovacieho motora a trojfázového synchronného motora s permanentnými magnetmi. Celkový výkon tohto automobilu je viac ako 330 kW pričom elektromotor poskytuje výkon až 165 kW a dokáže vyprodukovať moment 300 Nm až do 5250 ot/min. Maximálne otáčky sú 10230 ot/min [10].



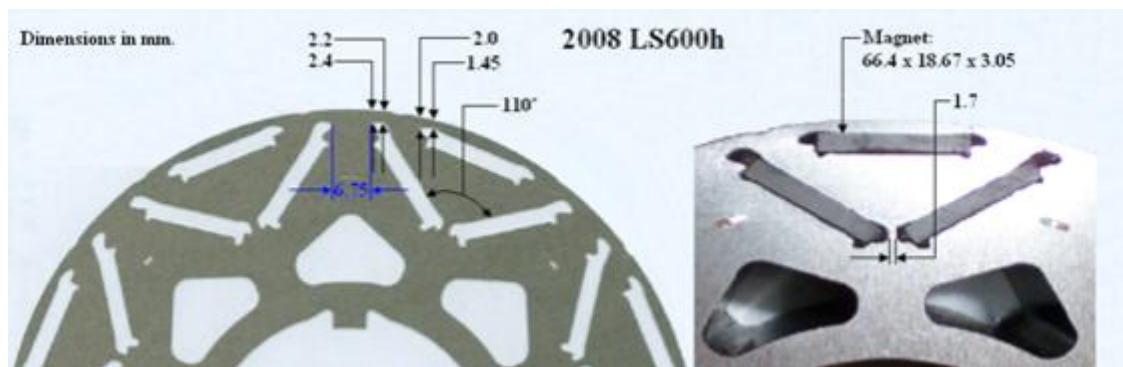
Obrázok 26: Stator Lexus LS 600h [10].

Vinutie každej fázy statora je rozdelené na dve vetvy ktoré obsahujú 4 cievky každá po 7 závitov a sú zapojené sériovo. Na obrázku je názorné zapojenie vinutia jednej fázy statoru [10].



Obrázok 27: Schématické zapojenie jednej fázy statora [10].

Rotor je zložený z rotorových plechov ktoré obsahujú permanentné magnety. Materiál magnetov je NdFeB teda neodým železo bór. Spôsob uloženia magnetu a jeho rozmery sú uvedené na obrázku [10].



Obrázok 28: Spôsob uloženia magnetu v drážkách a jeho rozmery [10].

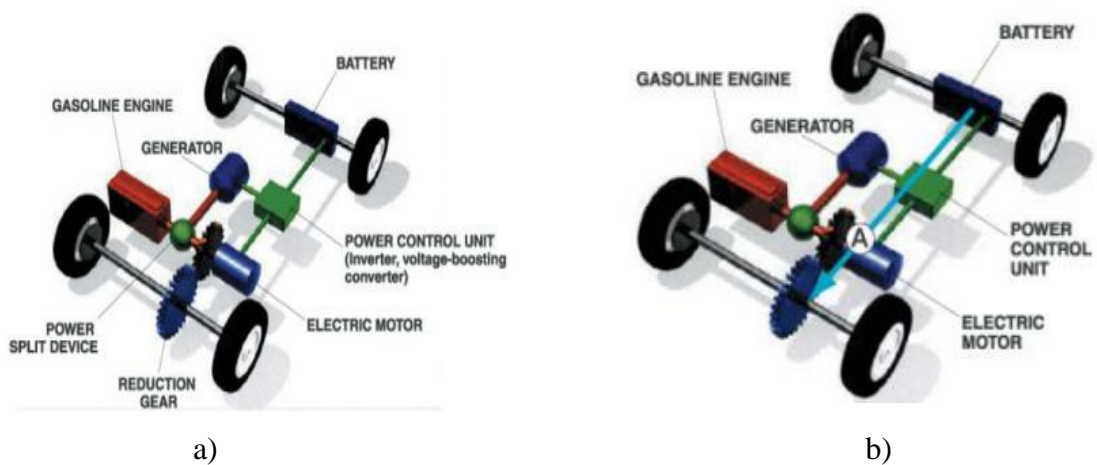


Obrázok 29: Rotor Lexus LS 600h [10].

Toyota camry

Elektrický motor použitý v tomto elektromobile je taktiež synchronný motor s permanentnými magnetmi ktorý pracuje ako súčasť hybridného pohonu ale aj samostatne do rýchlosti 45 km/h. Pri vyššej rýchlosti riadiaca jednotka zapojí do pohonu aj spaľovací motor a vozidlo prejde do režimu plného hybridu.

Na obrázku číslo 1 je uvedená štruktúra komponentov použitá pre hybridný pohon a obrázok 2 znázorňuje ako tento hybridný pohon funguje pri štarte a nízkych až stredných rýchlostiach [18].



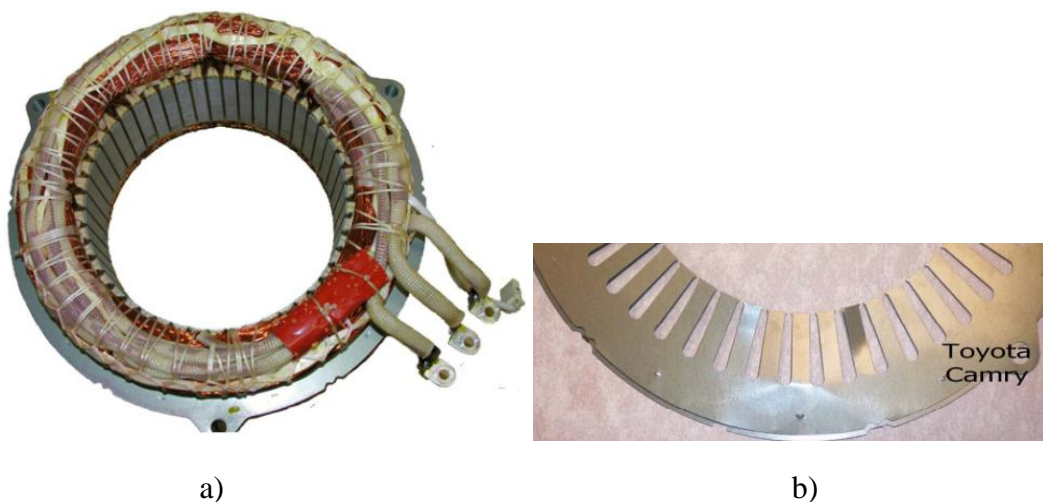
Obrázok 30: a) Základná zostava hybridného pohonu b) režim elektro pohonu [18].

Stator váži 18 kg z čoho 5,7 kg tvorí meď. Vinutie statora je zložené z 9 medených vodičov so 14 závitmi na pól pričom sú vodiče zapojené paralelne – 18 vodičov v každom napájacom kábli je rozdelených na dve skupiny po 9 vodičov. Do vinutia je zabudovaný termistor, ktorý slúži na meranie teploty. Hrúbka vrstvy statorových lamiel je 60,7 mm a sú znázornené na obrázku č. 33 spolu so statorom [19].

Rotor elektromotora Camry obsahuje neodýmovo-železo-bórové (NdFeB) permanentné magnety s vnútorným usporiadaním do tvaru „V“. Medzi magnetmi je umiestnený úzky podporný pás, ktorý zvyšuje mechanickú pevnosť a umožňuje vyššie otáčky rotora. Dĺžka magnetov je kratšia než pri predchádzajúcich modeloch, no ich šírka a hrúbka je podobná. Rotorové plechy sú znázornené na obrázku č. 33 [19].



Obrázok 31: a) Elektromotor Camry 2007 [17] b) rotorové plechy Camry a lexus [10].



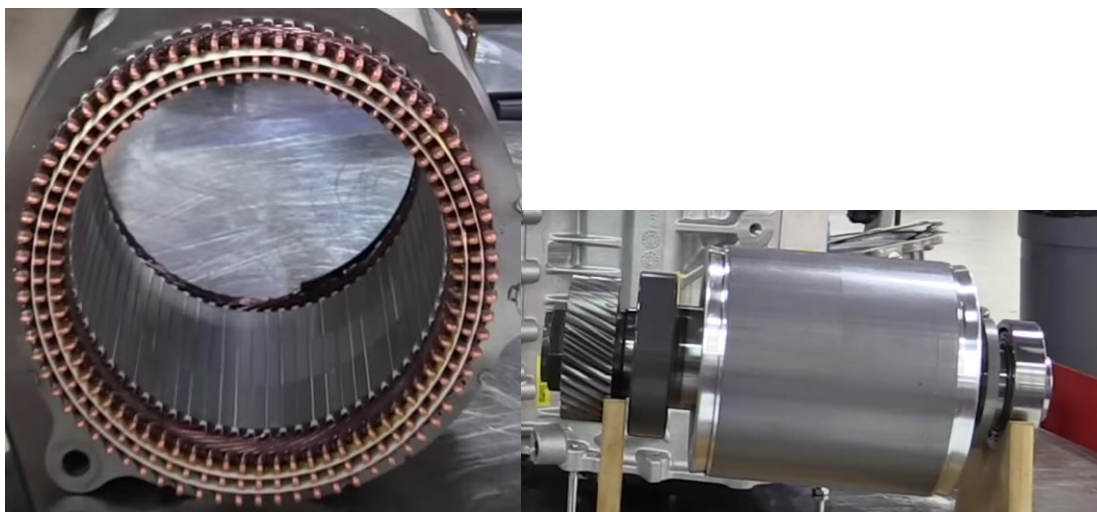
Obrázek 32: Camry a) stator b) statorový plech [19].

Chevrolet Bolt EV

Tento model Chevrolet Bolt EV ročník 2017 od General Motors nesie označenie 1ET25 a pres svoj pohon využíva synchronný motor s permanentnými magnetmi ktorý poskytuje výkon 150 kW, krútiaci moment rotor 350 Nm a 8810 ot/min. Skutočný krútiaci moment na kolesá je vďaka prevodovému pomeru až 2500 Nm. Váha celej jednotky je 77,4 kg [14].



Obrázok 33: Kompletná zostava rotujúcich častí Chevrolet Bolt EV [14].



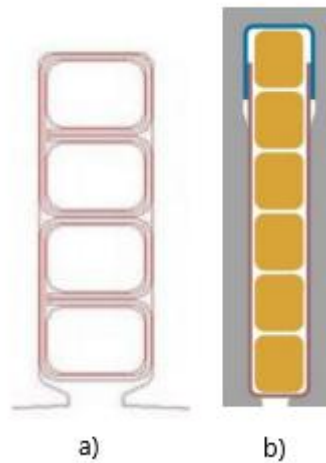
a)

b)

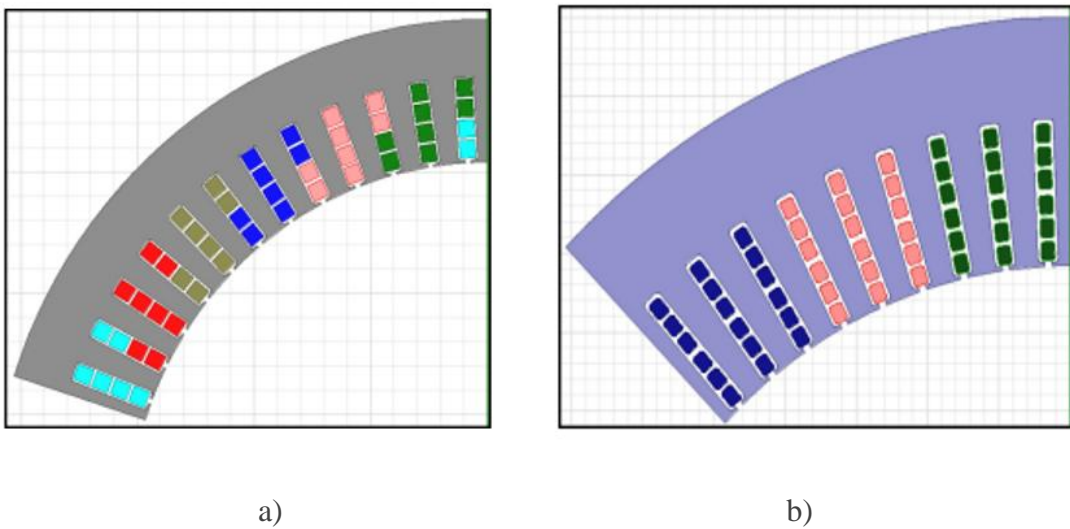
Obrázok 34: a) stator b) rotor Chevrolet Bolt EV [14].

V statore je použitý vlásenkovitý typ vinutia ktorý má za následok zmenšenie celkovej veľkosti motoru pri zachovaní požiadaviek na výkon. Každá drážka statora obsahuje 6 vodičov ktoré sú usporiadané tak aby sa zamedzilo vzájomnému napät'ovému namáhaniu medzi vodičmi. Vďaka tejto optimalizácii je izolačný papier umiestnený len v okolí drážky ale nie na samotných vodičoch [15].

Avšak použitie vlásenkovitého vinutia z plochých vodičov prináša aj isté nevýhody pri vyšších otáčkach kedy môže dochádzať k zníženiu účinnosti motora. Práve preto sa konštruktéri rozhodli zvýšiť počet vodičov v drážke oproti predchádzajúcemu modelu Chevrolet spark zo 4 na 6 vodičov ako je zobrazené na obrázku č. 42. Zväčšenie počtu vodičov v drážke vedie k zmenšeniu prierezu jednotlivých vodičov a to znižuje tzv. AC efekt vinutia a straty spôsobené prúdom pri vysokých otáčkach motora. Drážka je izolovaná dvojdielnou izoláciou ktorá oddeľuje vinutia od laminačnej oceli a zabraňuje skratu. Toto vylepšenie izolácie oproti verzií Chevrolet spark je zobrazené na obrázku č. 41 [15].

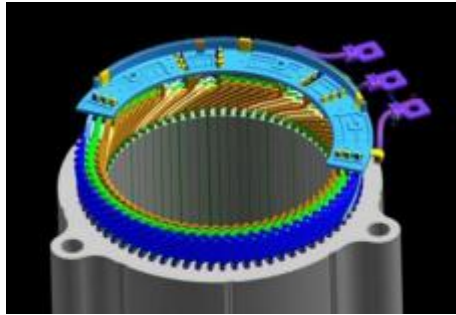


Obrázok 35: Porovnanie izolácii drážok – a) Spark b) Bolt [15].



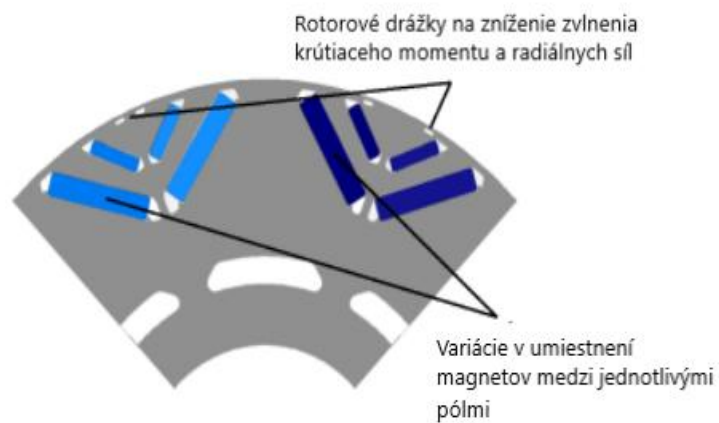
Obrázok 36: Počet vodičov v drážke – a) Chevrolet Spark b) Chevrolet Bolt EV [15].

Stator obsahuje aj pripojovací krúžok ktorý slúži na zakončenie fázových vývodov a je zobrazený na obrázku č. 43. Obsahom tohto krúžku je aj neutrálna lišta pre zapojenie neutrálov vinutia a konektorové výstupky pre pripojenie vývodových vodičov [15]



Obrázok 37: Pripojovací krúžok [15].

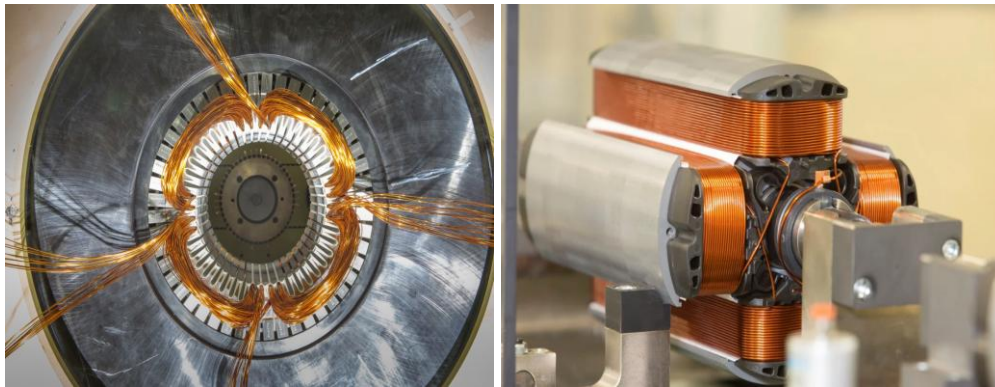
Rotor je zložený z plechov a drážok v ktorých sú dvojvrstvovo do tvaru V uložené neodým-železo-bór (NdFeB) magnety. Oproti predchádzajúcemu modelu bola v rotore pridaná tzv. jemná variácia uhlovej polohy magnetov medzi pólmi ktorá pozitívne vplýva na zníženie zvlnenia krútiaceho momentu a radiálnych síl [15].



Obrázok 38: Uloženie magnetov v rotore [15].

Renault Zoe

Renault Zoe je špecifický tým že pre svoj pohon využíva synchronný motor s vinutým rotorom. Skladá sa zo statora a rotora ktoré sú zobrazené na obrázku č. 40. Stator obsahuje 48 drážok a klasické vlásenkovité vinutie. Rotor taktiež obsahuje vinutie.



a)

b)

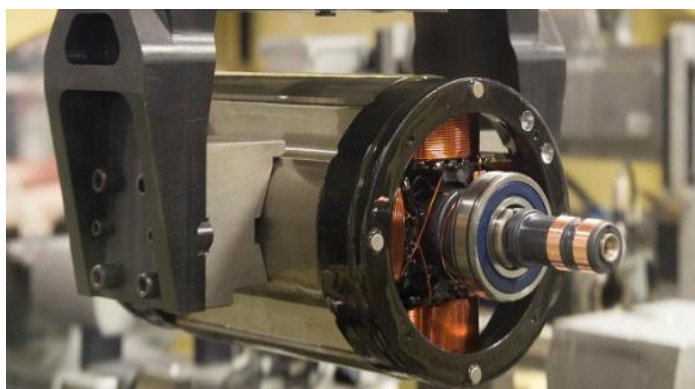
Obrázok 39: Renault Zoe a) stator b) rotor [21].

Vinutie statoru je napájané trojfázovým striedavým napätím ktoré vytvára točivé magnetické pole. Rýchlosť otáčania tohto magnetického poľa je úmerná frekvencií napájacieho napätia [20].

Rotor je budený jednosmerným prúdom pomocou krúžkov v dôsledku čoho okolo neho vzniká konštantné magnetické pole. Vytvára stabilné magnetické pole podobne ako je to pri rotore s permanentnými magnetmi. Rotor sa počiatočne začne otáčať v smere otáčania magnetického poľa statoru a keďže opačné magnetické póly sa navzájom priťahujú rotor sa zachytí v magnetickom poli statora. Výsledkom je že rotor začne rotovať rovnakou rýchlosťou ako rotuje magnetické pole statoru teda dosiahne synchronne otáčky [20].



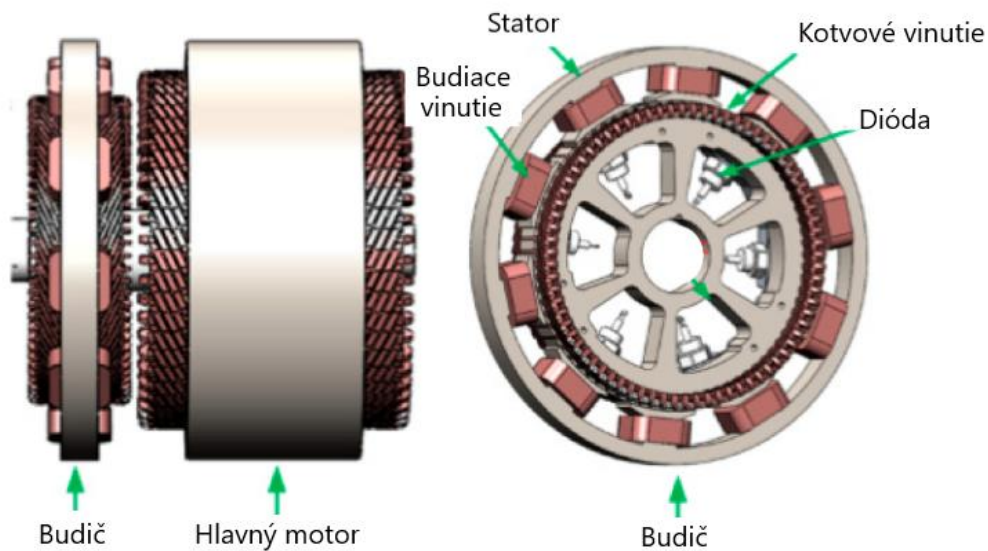
a)



b)

Obrázok 40: Renault Zoe a) napájacie krúžky b) uloženie krúžkov v rotore [21].

Jedným s problémov tohto motora je že jednosmerné budenie ktoré je zabezpečené pomocou kief a krúžkov vytvára prach, vyžaduje pravidelnú údržbu a trenie počas nepretržitej prevádzky znižuje účinnosť. Riešením tohto problému je napájanie rotorového vinutia bezkontaktné pomocou rotačného transformátora. Pole je prenášané cez vzduchovú medzeru bez mechanického kontaktu a je usmerňované otočným usmerňovačom.



Obrázok 41: Synchronný motor s vinutým rotorom s bezkontaktným budičom.

VÝHODY A NEVÝHODY JEDNOTLIVÝCH KONŠTRUKČNÝCH RIEŠENÍ

V súčasnosti patria k najviac používaným elektromotorom v elektromobiloch a hybridoch práve synchronne motory s permanentnými magnetmi a asynchronne motory s kotvou nakrátko.

Asynchronný motor s kotvou nakrátko	Synchronný motor s permanentnými magnetmi
Výhody	
nižšia cena	vyššia hustota krútiaceho momentu
robustnosť (odolnosť)	vyššia účinnosť
nízka strata pri dobehu	
Nevýhody	
nižšia hustota krútiaceho momentu	vyššia strata pri dobehu
nižšia účinnosť	nedostupnosť vzácnych zemín

Tabulka 2: Porovnanie výhod a nevýhod jednotlivých elektromotorov [16].

Výhodou asynchronných motorov je ich nižšia cena avšak ak by sme chceli dosiahnuť rovnaký výkon ako synchronný motor s permanentnými magnetmi tak konštrukčne bude asynchronný motor o niečo väčší takže vo výsledku to nebude tá najhlavnejšia výhoda [16].

Hlavnou výhodou asynchronných motorov je že má nižšie straty pri dobehu. Ide o straty ktoré vznikajú keď sa vozidlo pohybuje zotrvačnosťou bez zrýchľovania čiže motor práve nieje napájaný – vodič nestláča plynový pedál. Samozrejme k určitým stratám dochádza, pretože rotor obsahuje ložiská ktoré nie sú dokonale bez trenia a zároveň rotor svojim pohybom víri vzduch vo vnútri motora čo tiež spôsobuje nejaké straty [16].

Naopak synchronne motory s permanentnými magnetmi v tomto trpia nevýhodou pretože rotor vytvára rotujúce magnetické pole aj keď je vozidlo v stave bez napájania ale pohybuje sa. Toto rotujúce magnetické pole sa snaží vytvoriť napätie v satorovom vinutí. Avšak vinutia sú odpojené prúd nemôže tiecť a tak vznikajú straty vírivými prúdmi ktoré majú za následok vyššie straty pri dobehu. Samozrejme tento jav je výhodou v prípade brzdenia vozidla kedy motor poskytuje vyšší odpor [16].

Nevýhodou synchronných motorov je aj dostupnosť vzácnych zemín používaných na výrobu permanentných magnetov a ich cena [16].

Výhody synchronných motorov s permanentnými magnetmi sú hlavne vo vyššej hustote krútiaceho momentu a vyššej účinnosti vďaka čomu dosahujú kompaktných rozmerov a nižšej hmotnosti. Vyššia účinnosť je veľmi výhodná pri dosiahnutí čo najlepšieho dojazdu s čo najmenšou batériou [16].

Ďalším typom elektromotora ktorý nie je tak často používaný ako vyššie spomenuté je synchronný motor s vinutým rotorom. Hlavnou výhodou tohto motoru oproti synchronnému motoru s permanentnými magnetmi je práve absencia permanentných magnetov v rotore ktoré sú nahradené vinutím. Toto vinutie je napájané jednosmerným napätím ktoré vytvára v rotore rotujúce magnetické pole [22].

Výhody pri porovnaní so synchronným motorom s permanentnými magnetmi:

- Flexibilné riadenie magnetického toku – rotorový tok je možné plynule regulovať zmenou budenia,
- bez potreby permanentným magnetov,
- konštantný výkon pri vysokých otáčkach – počas oslabovania poľa si motor udržuje takmer konštantný výkon [24].

Nevýhody pri porovnaní so synchronným motorom s permanentnými magnetmi:

- Nižšia hustota momentu,
- vyššie zvlnenie momentu – môže spôsobovať vibrácie,
- nižšia účinnosť – hlavne pri vyššom zaťažení,
- Vyššie nároky na chladenie rotora – vinutia rotora sú zdrojom strát čo vyžaduje účinné chladenie [24].

Napájanie rotorového vinutia je namiesto krúžkov a kief možné zabezpečiť pomocou rotačného budiča [22].

Výhody tohto konštrukčného riešenia:

- Odstránenie trenia, iskrenia a nutnosti údržby,
- zníženie vplyvu rotácie na výkon – symetrické usporiadanie cievok, nedeformuje sa vzájomná indukčnosť,
- nevyžaduje dodatočné meniče a teda znižuje komplexnosť a náklady [22].

Je dôležité spomenúť aj spínaný reluktančný motor ktorý sa vyznačuje tzv. dvojito výbežkovou konštrukciou a sekvenčným budením fáz čo mu umožňuje využívať reluktančný princíp tvorby momentu [23].

Tento typ pohonu je vhodný pre aplikácie vyžadujúce nízke náklady, vysokú účinnosť a spoľahlivosť. Konštrukcia tohto elektromotoru nevyžaduje použitie permanentných magnetov čo eliminuje závislosť na vzácnych zeminách. Významnou výhodou je aj jeho znížená citlivosť na poruchy [23].

Napriek týmto prednostiam má zásadný problém – momentové pulzovania. Vznikajú najmä počas komutačného prechodu medzi fázami. Tento jav je spôsobený závislosťou momentu od polohy rotora a nelineárnych charakteristík magnetických obvodov vrátane lokálne saturácie pólových špičiek. Tieto pulzovania sú najvýraznejšie pri nízkych otáčkach čo negatívne ovplyvňuje plynulosť jazdy a komfort [23].

Zníženie týchto momentových pulzácií je možné pomocou zmeny tvaru pólov statora a rotora. Táto úprava síce zníži pulzovanie ale môže zhoršiť celkový výkon. Ďalšou možnosťou je optimalizácia komutačného uhla tak aby pri prechode medzi fázami bol výsledný moment čo najstabilnejší [23].

Napriek rôznym pokrokom v riadení minimalizácia pulzov často vedie k zníženiu priemerného momentu a teda maximalizácia výkonu a minimalizácia pulzov sa nedá dosiahnuť súčasne [23].

PREDPOKLADANÝ VÝVOJ

Posledných 10 rokov majú najväčšie zastúpenie v elektromobiloch synchronne motory s permanentnými magnetmi. Dostupnosť vzácnych zemín je problematická a z veľkej časti závisí na Číne ktorá je hlavným dodávateľom týchto surovín. Práve permanentné magnety sú dôvodom prečo automobilky neustále pracujú na vývoji nového typu elektromotora alebo preferujú elektromotory bez použitia permanentným magnetov. Automobilka Tesla v roku 2023 oznámila že v budúcnosti plánuje používanie a vývoj motorov bez obsahu vzácnych zemín v permanentných magnetoch ako sú napríklad feritové magnety. To však so sebou prinesie nové výzvy, keďže feritové magnety sú oproti magnetom obsahujúcim vzácne zeminy podstatne magneticky slabšie [17].

Avšak očakáva sa aj ďalšie zlepšovanie parametrov synchronných motorov s permanentnými magnetmi prostredníctvom inovácií v konštrukcii rotorov napríklad viacnásobné V alebo U tvary magnetov a vinutí napríklad hairpin winding, teda tyčové vinutie s lepšou výplňou drážok a lepším chladením. Tento pokrok je viditeľný pri modeloch Toyota prius najmä čo sa týka špecifického výkonu ktorý je zobrazený v tabuľke č. 3 [25].

Tabuľka 3: Špecifický výkon v modeloch Prius [25].

	Špecifický výkon (kW/kg)
Prius 2004	1,1
Prius 2010	1,6
Prius 2017	1,7

Je zrejmé že synchronne motory s permanentnými magnetmi zostanú ešte nejakú dobu dominantou v automobilovom priemysle, avšak očakávané je postupné znižovanie obsahu magnetov v týchto motoroch a používanie iných magnetických materiálov [17].

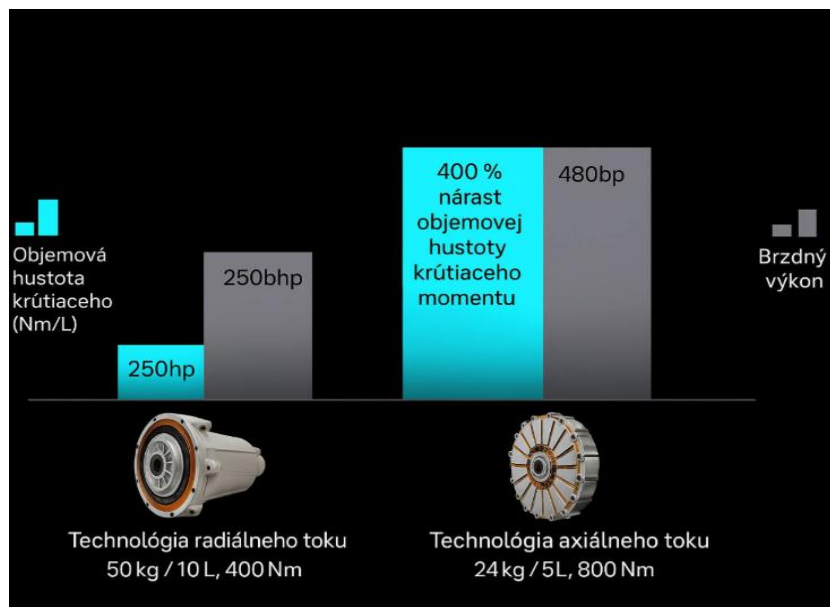
Súčasne rastie záujem o alternatívy bez vzácnych zemín, ktoré znižujú náklady a závislosť od kritických surovín. Tu sa črtajú dve hlavné vetvy vývoja: synchronné reluktančné motory a spínané reluktančné motory. Synchronne reluktančné motory ponúkajú jednoduchú konštrukciu, vysokú spoľahlivosť a nízku cenu, no trpia nižším účinníkom. Výskum sa preto sústreďuje na zvyšovanie salienčného pomeru (pomer medzi osovými indukčnosťami), prípadne na asistenciu permanentnými magnetmi (PMaSynRM) pre zlepšenie výkonu. Spínané reluktančné motory sú robustné, ale vyžadujú náročné riadenie a trpia vysokým krútiacim pulzom a hlučnosťou, čo vývoj postupne zmierňuje novými riadiacimi stratégiami [25].

Ďalším významným trendom je integrácia motorov, výkonovej elektroniky a chladiacich systémov do jedného kompaktného celku, čo prináša úsporu priestoru, zníženie nákladov a zlepšenie účinnosti [25].

Moderné vozidlá sa čoraz viac spoliehajú na spoločné chladiace systémy pre batérie, výkonovú elektroniku aj motory, pričom sa presadzuje aktívne kvapalinové chladenie (napr. vodno-glykolové alebo olejové) [25].

Novinkou v konštrukcii elektromotorov pre vozidlá sú motory s axiálnym tokom a motory v kolesách. Tieto motory poskytujú vyššiu hustotu výkonu a krútiaceho momentu a majú plochý tvar ktorý má výhodu v rôznych aplikáciach. Spoločnosť YASA vyvíja unikátnu konštrukciu toroidného motora s axiálnym tokom. Ten odstraňuje klasické statorové jadro a rozdeľuje ho na segmenty. Tento prístup umožňuje priame olejové chladenie a veľmi rýchlu reakciu na zahrievanie. Chladenie bude v tomto prípade oveľa rýchlejšie. Okrem trvalo dostupného výkonu patria medzi ďalšie výhody:

- Nižšia hmotnosť
- zlepšený krútiaci moment
- hustota výkonu
- účinnosť a výrobná jednoduchosť [26].



Obrázek 42: Porovnanie motorov s axiálnym a radiálnym tokom [26].

Spoločnosť YASA tvrdí že motory ktoré vyrába dosahujú až štvornásobok výkonu bežných motorov na trhu a sú o polovicu menšie a ľahšie. Tieto motory boli doteraz dodávané hlavne pre výkonné superšporty ako napríklad McLaren, Ferrari, Lamborghini, Koenigsegg a športovú líniu Mercedes AMG [26].

Táto technológia sa postupne dostáva na trh ale nepredpokladá sa žeby v dohľadnej dobe úplne vytlačila klasické motory s radiálnym tokom [17].

ZÁVER

V tejto práci som sa venoval prehľadu v súčasnosti používaných konštrukčných riešení elektromotorov v elektromobiloch. Zameral som sa na najviac rozšírené motory používané v automobiloch a to asynchrónnemu motoru s kotvou nakrátko a synchrónnemu motoru s permanentnými magnetmi.

Z práce vyplýva že synchrónne motory s permanentnými magnetmi majú vyššiu účinnosť a zároveň sú pri rovnakom výkone kompaktnějšíe než asynchrónne motory s kotvou nakrátko avšak ich výroba je náročnejšia, drahšia a dostupnosť magnetov býva problematická. Asynchrónne motory sú oveľa lacnejšie na výrobu, sú zvyčajne robustnejšie a vďaka jednoduchšej konštrukcii nevyžadujú takú údržbu a majú dlhšiu životnosť. Na rozdiel od synchrónnych motorov s permanentnými magnetmi nedosahujú takú účinnosť najmä pri nízkych a stredných otáčkach a majú vyššie straty. Očakáva sa aj vývoj v oblasti reluktančných motorov a synchrónnych motorov s vinutým rotorom. Najväčším pokrokom však budú pravdepodobne axiálne motory.

Výstupom tejto práce sú parametre týchto motorov uvedené v tabuľkách v prílohe pre porovnanie. Nie všetky parametre sa podarilo dohľadať vzhľadom na nie veľmi podrobnú publikáciu týchto informácií samotnými výrobcami motorov.

Vzhľadom na rastúci dopyt po ekologickejších spôsoboch dopravy je zrejmé že vývoj elektromotorov bude mať rozhodujúci vplyv na ich efektivitu a dostupnosť elektromobilov v budúcnosti.

LITERATÚRA

- [1] HRABOVCOVÁ, Valéria a Pavol RAFAJDUS. *Elektrické stroje*. Druhé nezmenené vydanie. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2015. ISBN 978-80-554-0998-6.
- [2] ŽILKOVÁ, Jaroslava a Ján KAŇUCH. Elektrické motory pre elektromobily. *Elektrotechnické listy* [online]. Košice, 2019, **4**(1), 4 [cit. 2024-12-06]. ISSN 2453-8981. Dostupné z: http://elektrotechnickelisty.eu/casopis/rocnik_IV/clanky/EL_2_2019.pdf
- [3] THOMAS, Robin, Lauric GARBUIO, Laurent GERBAUT a Hervé CHAZAL. *Modeling and design analysis of the Tesla Model S induction motor* [online]. Gothenburg: ICEM, 2020 [cit. 2024-12-07]. ISBN 978-1-7281-9945-0. Dostupné z: doi:10.1109/ICEM49940.2020.9270646
- [4] HUSSON, Hugo, Robin THOMAS a Lauric GARBUIO. *2D finite element model of the Audi e-Tron induction motor* [online]. Gijon: VPPC, 2021 [cit. 2024-12-07]. ISBN 978-1-6654-0528-7. Dostupné z: doi:10.1109/VPPC53923.2021.9699149
- [5] AYERS, C.W. et al. *Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System Interim Report* [Online, PDF]. 2004. Dostupné také z: <https://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub57399.pdf>
- [6] HSU, J.S., C.W. AYERS a C.L. COOM. *REPORT ON TOYOTA/PRIUS MOTOR DESIGN AND MANUFACTURING ASSESSMENT*. 2004. Dostupné také z: <https://myprius.co.za/120761.pdf>
- [7] DAS, Arindam et al. Investigation of PMSM motor performance with different magnet configurations and rotor surface profiling. *IEEE International Transportation Electrification Conference (ITEC)* [online]. 2015, **2015**(1), 7 [cit. 2025-01-12]. Dostupné z: doi:10.1109/ITEC-India.2015.7386906
- [8] KACZMAREK, Robert. Simulating the Toyota Prius Electric Motor. *MAGNETICS BUSINESS & TECHNOLOGY* [online]. 6 March [cit. 2025-01-12]. Dostupné z: <https://magneticmag.com/simulating-the-toyota-prius-electric-motor/>
- [9] GRIECZYNSKI, Michal et al. *Modeling of the 4th Generation Toyota Prius Traction Machine as the Reference for Future Designs* [online]. 2024. 10.20944/preprints202408.1110.v1. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/384568470_Modeling_of_the_4th_Generation_Toyota_Prius_Traction_Machine_as_the_Reference_for_Future_Designs

- [10] BURRESS, T.A. et al. *EVALUATION OF THE 2008 LEXUS LS 600H HYBRID SYNERGY DRIVE SYSTEM*. Online. 2009. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/236349747_Evaluation_of_the_2008_Lexus_LS_600H_Hybrid_Synergy_Drive_System.
- [11] KOKE, Hannah. *COMPARATIVE STUDY OF STRANDED AND BAR WINDINGS IN AN INDUCTION MOTOR FOR AUTOMOTIVE PROPULSION APPLICATIONS*. Master Thesis. Hamilton, Ontario, Canada: McMaster University, 2017.
- [12] KELLY, John D. *Understanding the Tesla Model S Performance Motor*. Online. 2021. Dostupné z: YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=MQV3D8F6gvw&list=PLIn3FrDiB1lzJk6Ax1io02y8Gs01IO&index=3>. [cit. 2025-05-21].
- [13] DOERR, Joachim; FRÖHLICH, Gerhard; STROH, Arthur a BAUR, Marc. The Electric Drivetrain with Three-motor Layout of the Audi E-tron S. Online. 2020, roč. 2020, s. 10. Dostupné z: <https://sci-hub.se/downloads/2020-06-26//3e/10.1007@s38313-020-0254-2.pdf>. [cit. 2025-05-21].
- [14] KELLY, John D. *Chevrolet Bolt EV Traction Motor - Deep Dive*. Online. 2019. Dostupné z: YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=APhRPSdmdmk>. [cit. 2025-05-21].
- [15] MOMEN, Faizul; RAHMAN, Khwaja M.; SON, Yochan a SAVAGIAN, Peter. *Electric Motor Design of General Motors' Chevrolet Bolt Electric Vehicle*. Online. 2016, roč. 5, č. 2. 2016. Dostupné z: <https://www.jstor.org/stable/pdf/26169133.pdf>. [cit. 2025-05-25].
- [16] TURNBULL, Paul. *EV Motor Mania: The Strengths & Weaknesses of Induction vs Permanent Magnet*. Online. 2024. Dostupné z: YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=FHufjrP0xDI&t=402s>. [cit. 2025-05-25].
- [17] EDMONDSON, James; SIDDIQI, Shazan a TAKAHASHI, Mika. *Electric Motors for Electric Vehicles 2025-2035: Technologies, Materials, Markets, and Forecasts*. Online. Dostupné z: <https://www.idtechex.com/en/research-report/electric-motors/1031>. [cit. 2025-05-25].
- [18] PANGARIBUAN, Ken Abraham a PURWADI, Agus. *Performance Analysis on EV Mode of the 2012 Toyota Hybrid*. Online. Amsterdam, Holandsko: Elsevier, 2013. ISSN 2212-0173. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.295>. [cit. 2025-05-25].
- [19] COOMER, C. L.; CAMPBELL, S. L.; SEIBER, L. E.; MARLINO, L. D.; STAUNTON, R. H. et al. *EVALUATION OF THE 2007 TOYOTA CAMRY HYBRID SYNERGY DRIVE SYSTEM*. U.S. Department of Energy, 2008. Dostupné také z: <https://www.osti.gov/servlets/purl/928684>.

- [20] *Wound-rotor synchronous motor*. Online. About motors. 2023. Dostupné z: <https://about-motors.com/motorcontrol/wrsm/>. [cit. 2025-05-27].
- [21] TAN, Jonathan James. *Renault Zoe's new electric motor to be built at Cléon*. Online. Paultan. 2015. Dostupné z: <https://paultan.org/2015/06/19/renault-zoe-new-electric-motor-cleon-plant/>. [cit. 2025-05-27].
- [22] RAIÁ, Maria Raluca et al. Modelling and Virtual Testing of a Wound Rotor Synchronous Machine for Electrical Vehicles Propulsion System. Online. 2021, s. 6. ISSN 1842-0133. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/OPTIM-ACEMP50812.2021.9590075>. [cit. 2025-05-27].
- [23] BHATTACHARJEE, Rajat. Switched reluctance motor applications to EV and HEV: Torque control issues. Online. 2014, s. 5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICONCE.2014.6808735>. [cit. 2025-05-27].
- [24] CINTI, Luca; CONTÒ, Chiara a BIANCHI, Nicola. A Comparison between Hybrid Excited Permanent Magnet and Wound Rotor Motor. Online. 2022, s. 6. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM53979.2022.9842232>. [cit. 2025-05-27].
- [25] AGAMLOH, E.B; VON JOUANNE, Annette a YOKOCHI, Alexandre. An Overview of Electric Machine Trends in Modern Electric Vehicles. Online. 2020, s. 16. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/machines8020020>. [cit. 2025-05-27].
- [26] LAMPINEN, Megan. *Axial flux motors: the future of performance in an EV era*. Online. Automotive World. 2024. Dostupné z: <https://www.automotiveworld.com/articles/axial-flux-motors-the-future-of-performance-in-an-ev-era/>. [cit. 2025-05-28].

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
PMaSynRM	Synchronní reluktanční motor s podporou permanentních magnetů

Symboly:

n_{syn}	synchrónne otáčky	ot/min
n	otáčky rotora	ot/min
s	sklz	
p	počet pólů	
f_s	frekvencia	Hz

ZOZNAM PRÍLOH

<u>PRÍLOHA A -</u>	52
---------------------------------	-----------