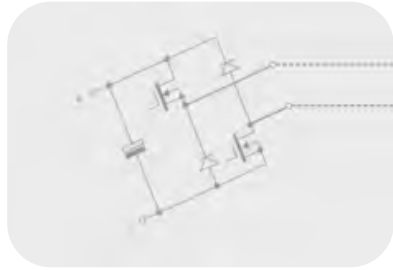


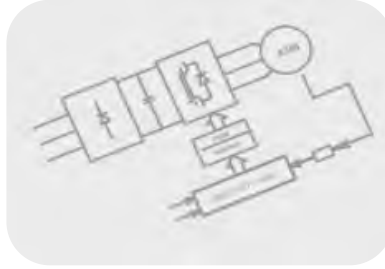
# Elektromotory a pohony pro e-mobilitu

Figure: Audi

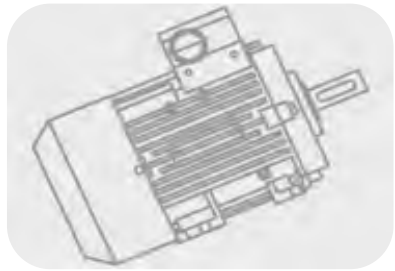
# Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky



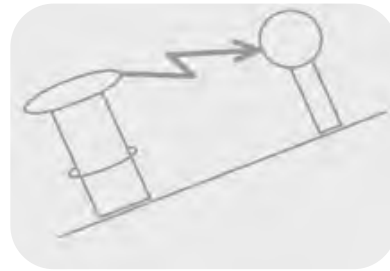
**Výkonová elektronika**



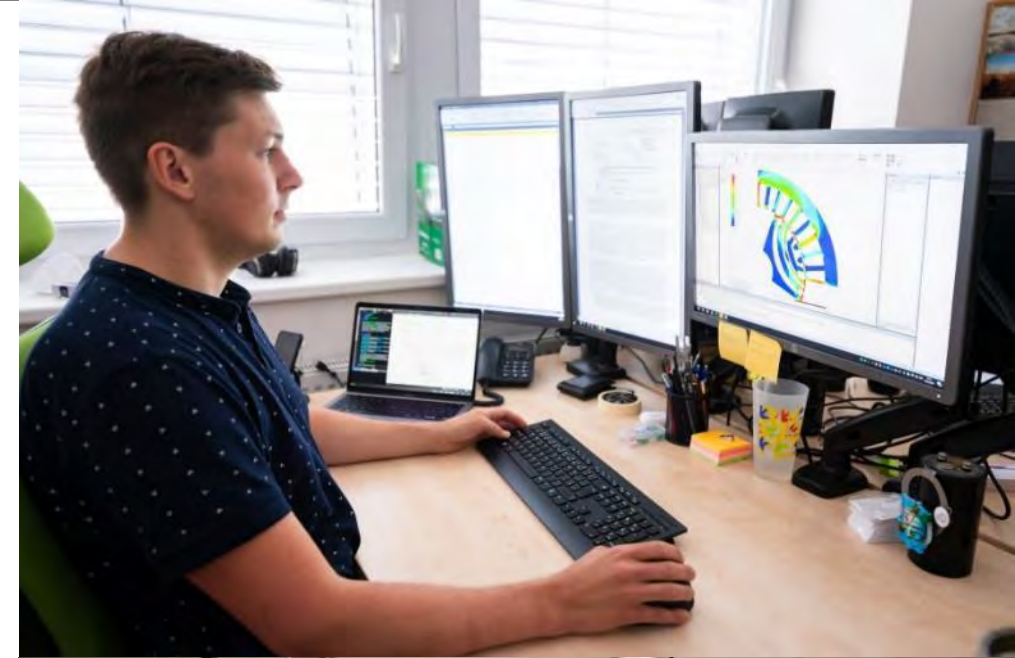
**Elektrické pohony**



**Elektrické stroje**



**Elektrické přístroje**



# FEKT UVEE a Elektrifikace dopravy



Automobil s vodíkovým pohonem



Rychlonabíječ pro elektromobil VUT superb



Rychlonabíječka pro trakční akumulátor elektrického letadla VUT 051 RAY



Měnič pro elektrickou lokomotivu 4x1MW



Elektrifikace pracovních strojů



Elektromotory s vysokou hustotou výkonu bez magnetů ze vzácných zemin pro hlavní pohon elektromobilů



Baterie a elektropohon pro VUT RAY



Elektromotory pro ovládání primárních letových ploch prostředků Urban Air Mobility a letadel kategorie CS23

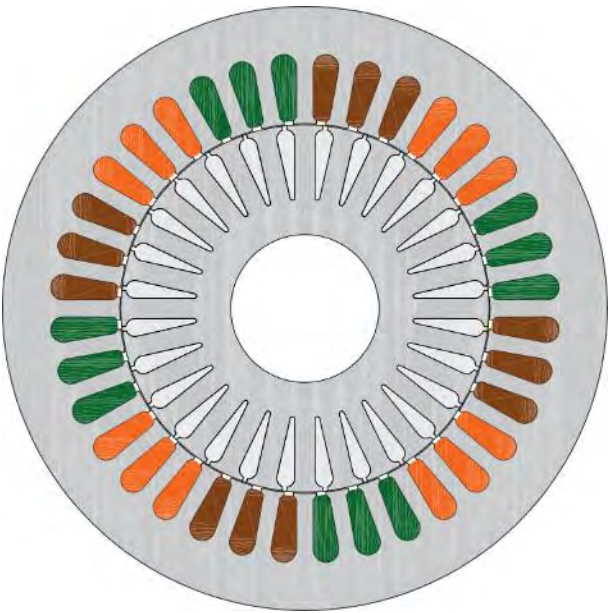


Testování elektromotoru pro pohon letadla

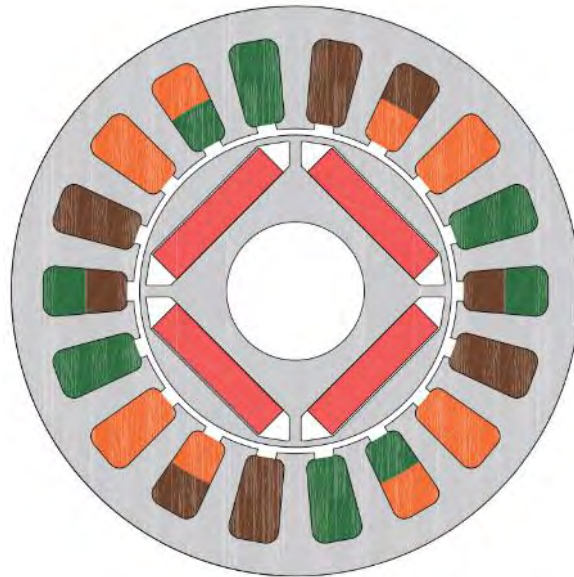


Turbo kompresory

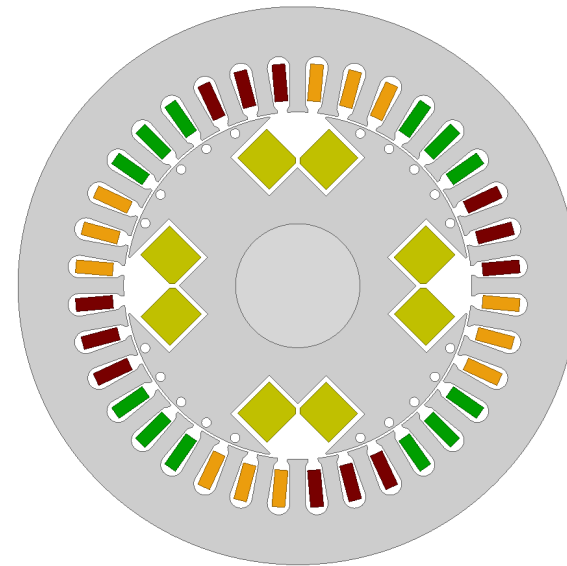
# Přehled elektrických strojů



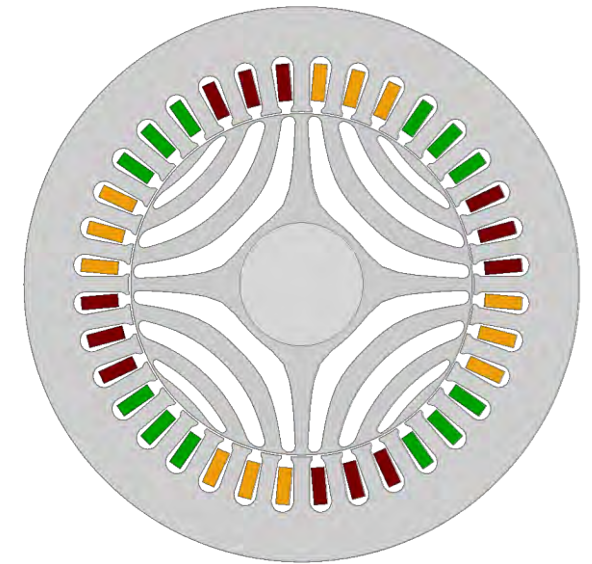
Asynchronní  
(Indukční) stroj



Synchronní stroj s  
permanentními  
magnety

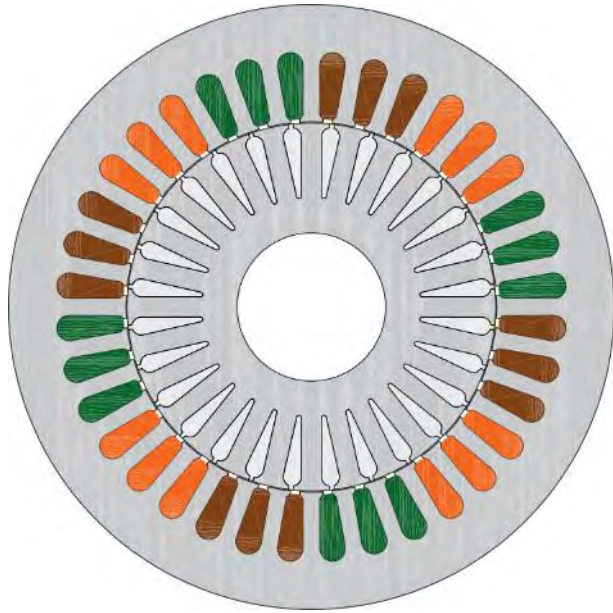


Synchronní stroj s  
vinutým rotorem

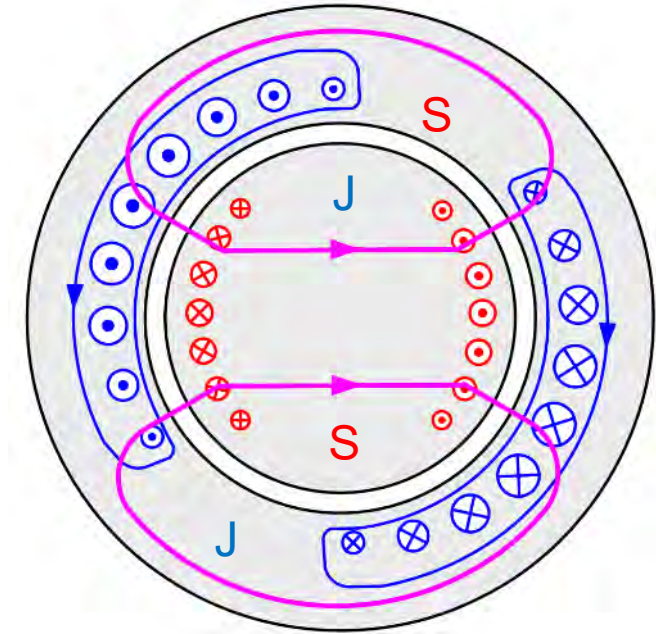


Synchronní stroj  
reluktanční

# Princip činnosti asynchronního stroje



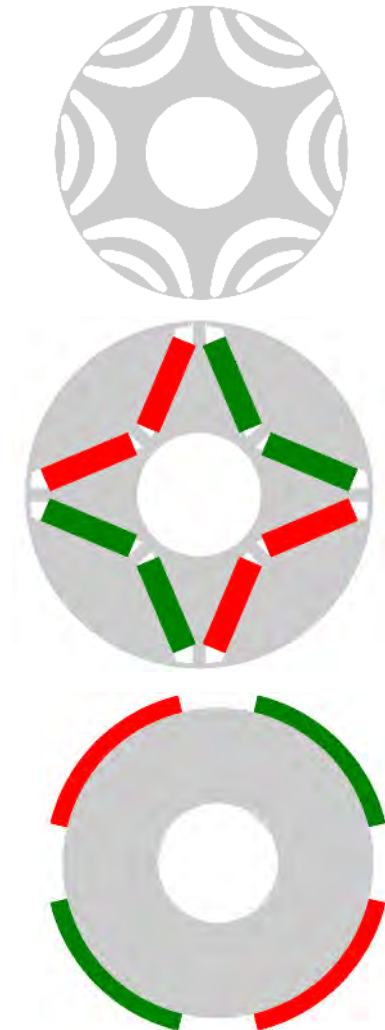
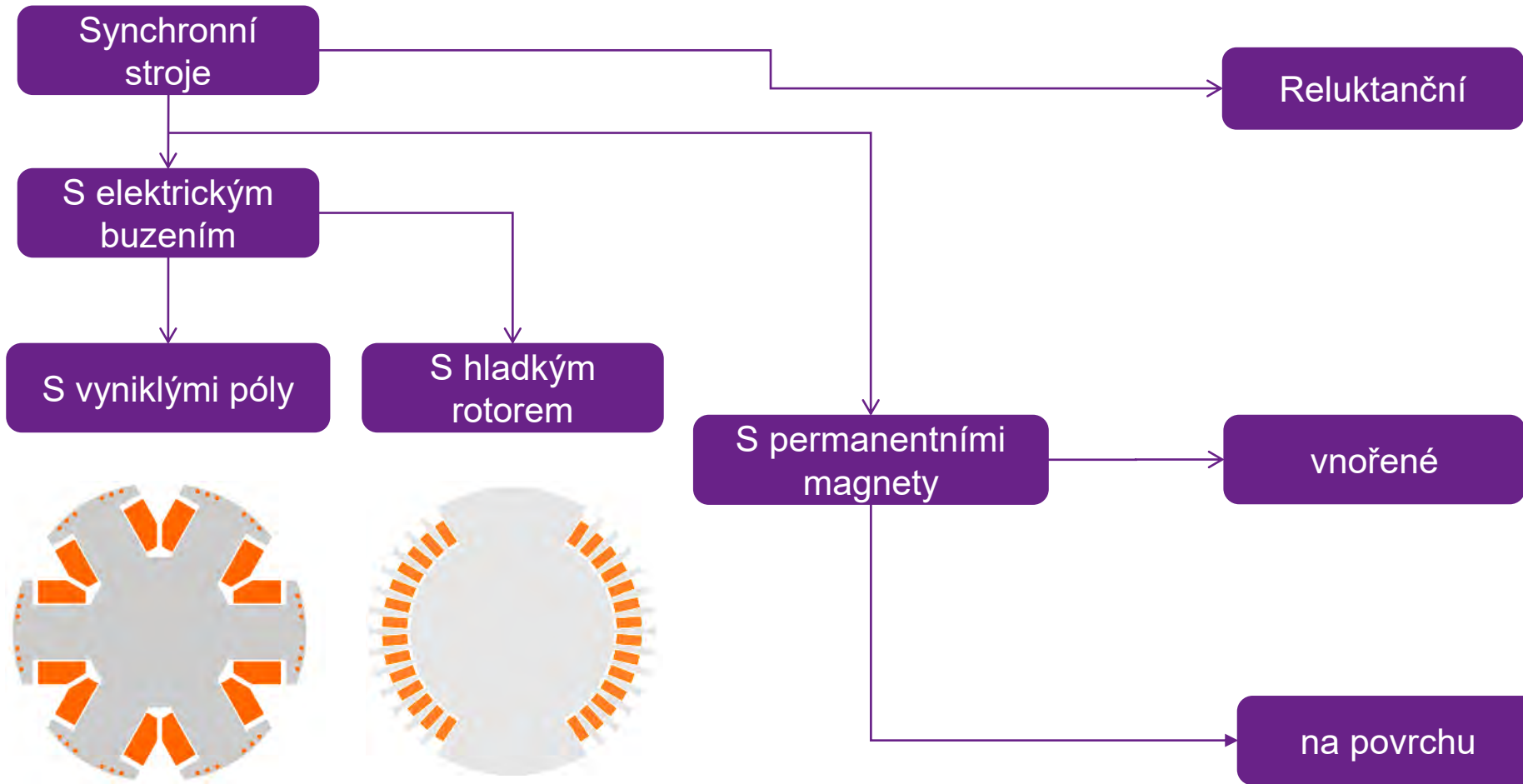
$$\begin{aligned} u &= Blv \\ i &= u/R \\ f &= Bli \\ M &= Fr \end{aligned}$$



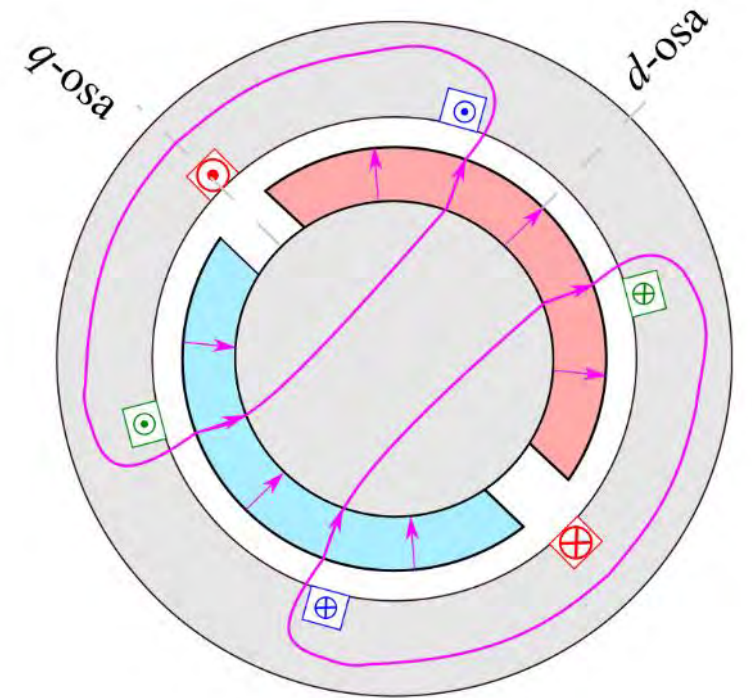
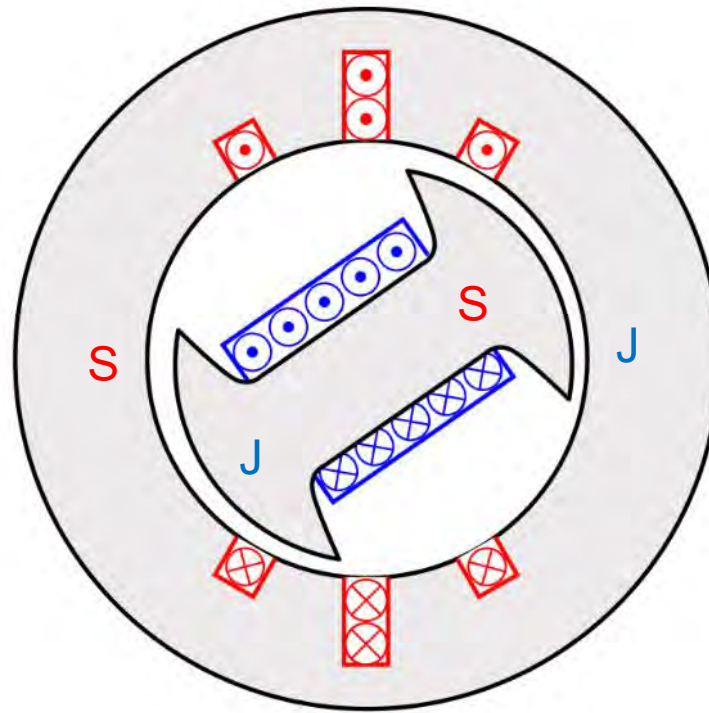
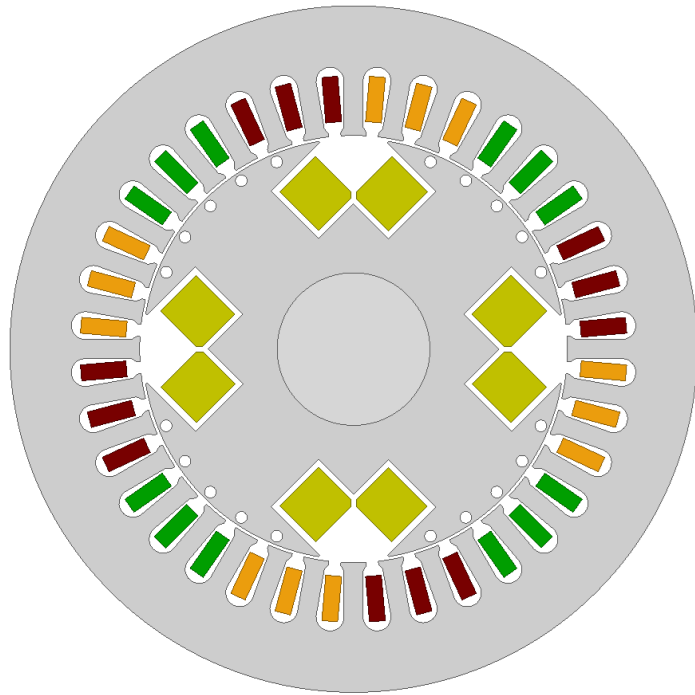
V rotoru je indukováno napětí, které vytvoří proud jenž díky svému průchodu magnetickým polem vytvoří moment.

Opačné póly se přitahují

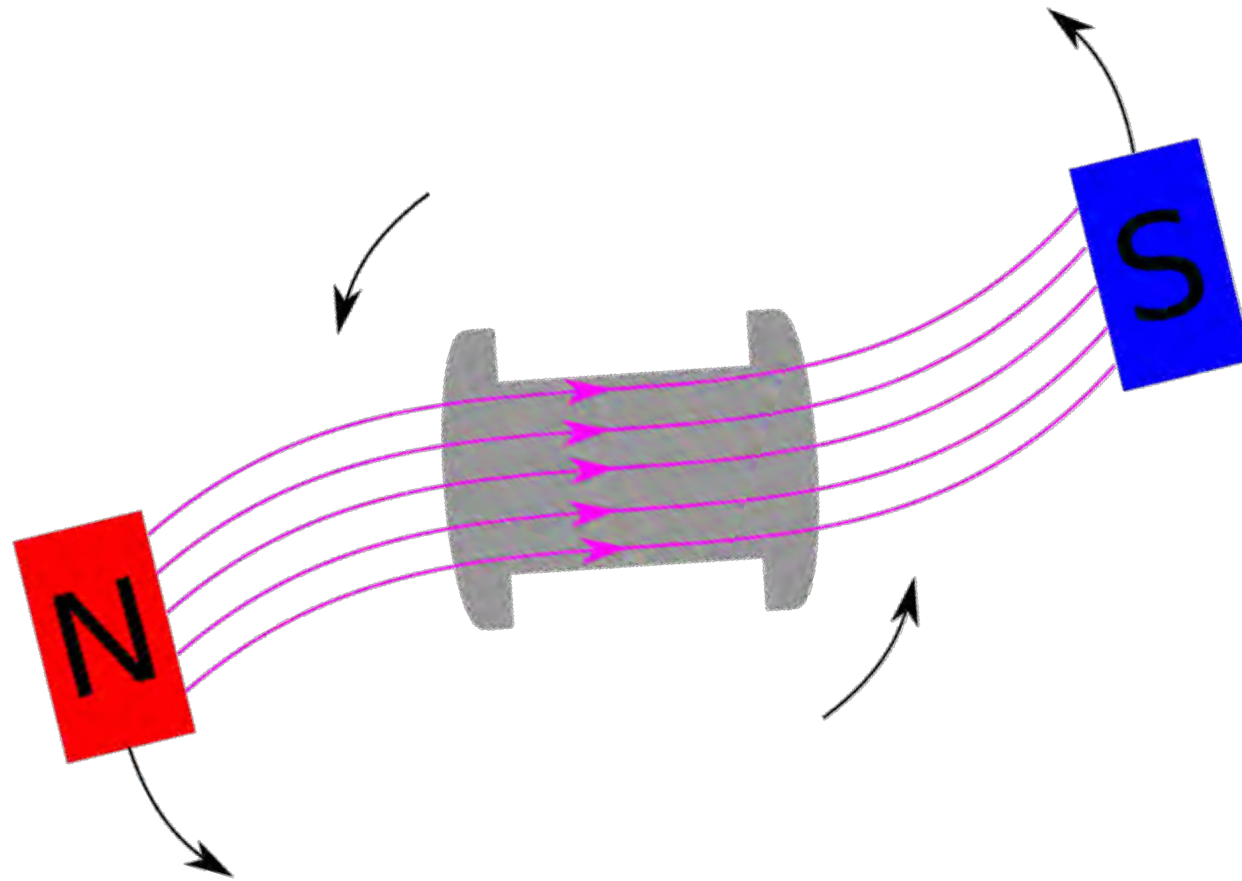
# Přehled synchronních strojů



# Princip činnosti synchronních strojů

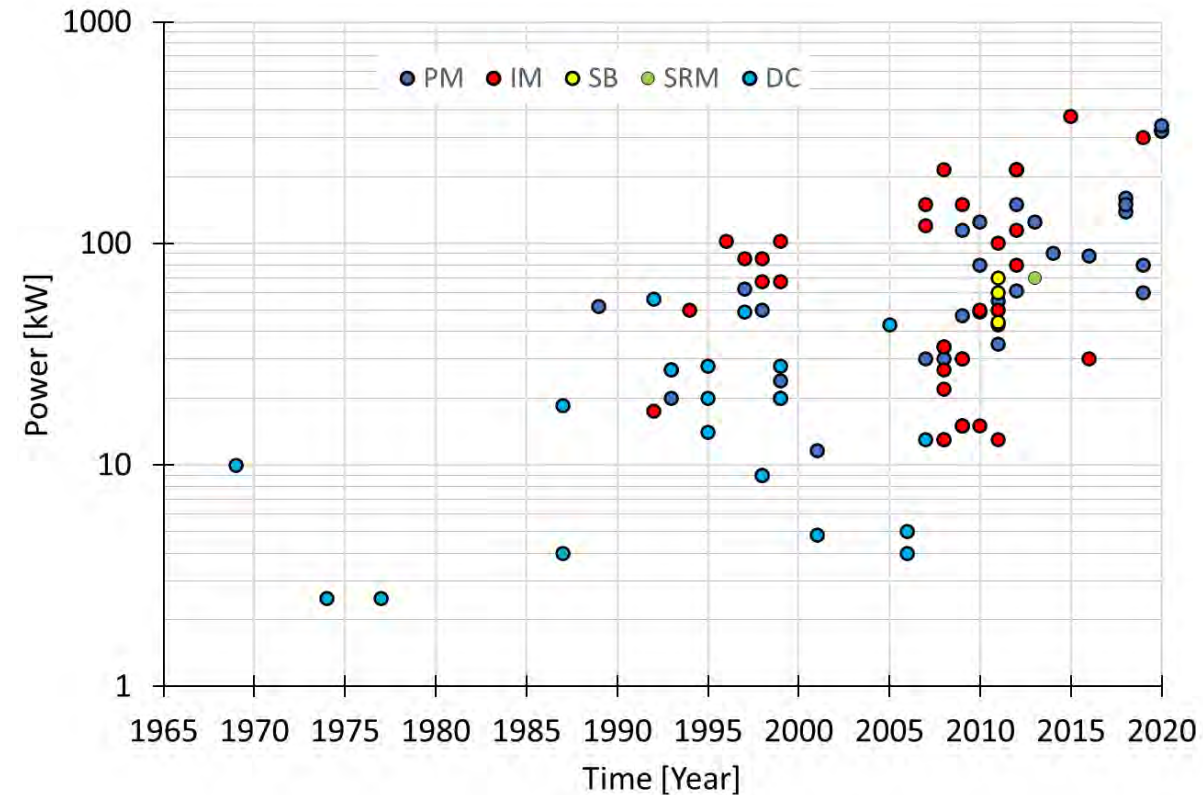


# Princip činnosti reluktančního stroje

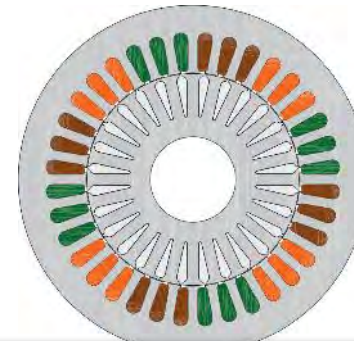




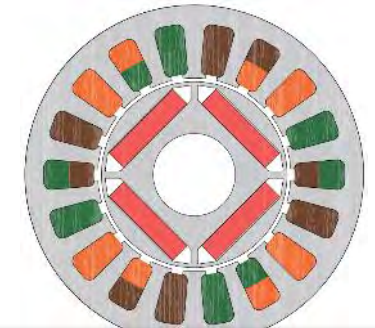
# Přehled elektrických strojů pro elektromobily



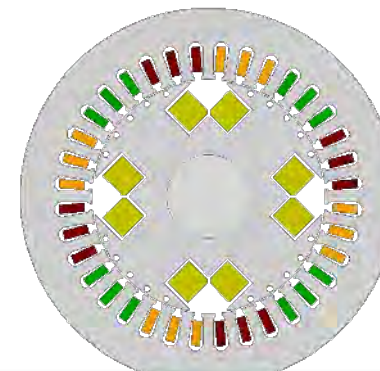
Source: LAŠTOVIČKA, Josef. The optimum supply of a wound-rotor synchronous machine with respect to maximum efficiency. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Power Electrical and Electronic Engineering, 2022, 78 p. Master's Thesis. Supervised by Ing. Jan Bárta, Ph.D.



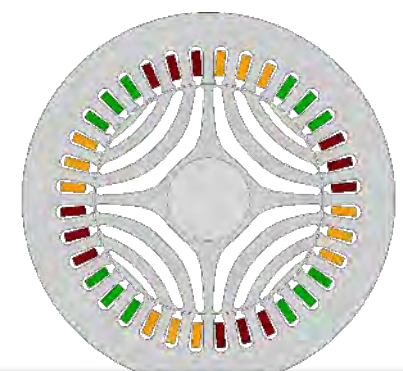
Asynchronní (Indukční) stroj



Synchronní stroj s permanentními magnety



Synchronní stroj s vinutým rotorem



Synchronní stroj reluktanční

# Výzvy při návrhu elektromotorů pro e-mobilitu

- **Cena vývoje** – prototypování a testy jsou finančně nákladné
- **Komplexnost** – multidisciplinární návrh (elektromag., teplo a mechanika)
- **Účinnost** – každé % se počítá
- **Hustota výkonu** – vyšší hustota = menší hmotnost
- **Spolehlivost** – odolnost elektromotoru vůči poruše
- **Certifikace** – bezpečnost, EMC...



# Cíle momentové a výkonové hustoty

Požadavky na výkonovou a momentovou hustotu neustále rostou.

Vysoké výkonové hustoty může být dosaženo i vysokými otáčkami

## Výkonová a momentová hustota vyžaduje:

- Silné magnety
- Magnetický obvod schopný dosáhnout vysokých hodnot magnetické indukce
- Vysokou proudovou hustotu ve vinutí statoru a proto i velmi účinné chlazení

	2020	2025	2035
Cena (\$/kW)	6	4,8	3,3
Výkonová hustota (kW/kg)	4	8	10
WLPT průměrná účinnost	93 %	95 %	97 %

# Inovace v oblasti elektrických strojů – vysoké otáčky

Zvýšení rychlosti je nejvíce přímým opatřením pro zvýšení maximální hustoty výkonu

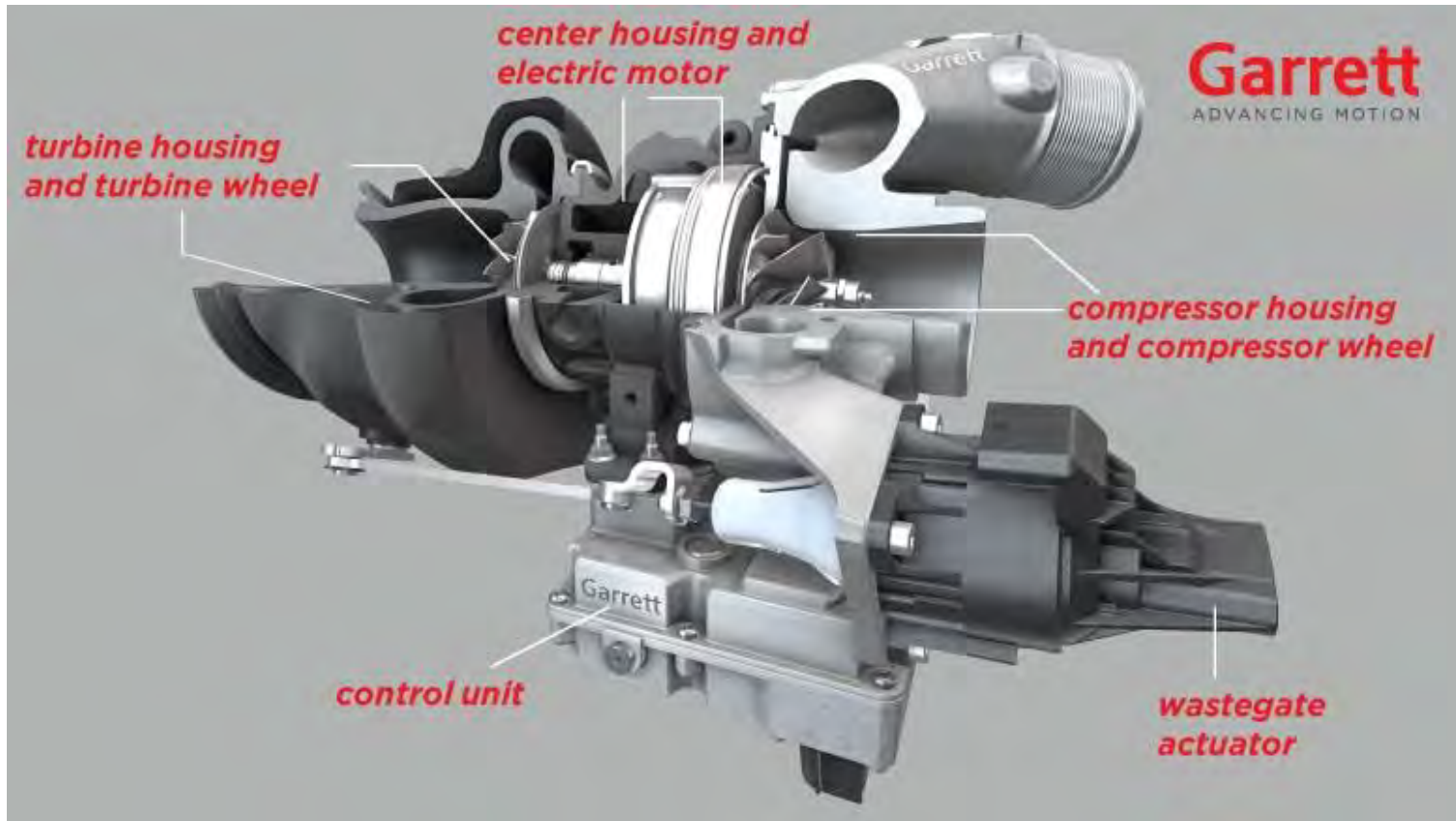
Současný rozsah provozních otáček je až 20 000 otáček za minutu a 30 000 otáček za minutu je nový cíl.

Rotor s uhlíkovými rukávy modelu Tesla S Plaid dokáže udržet maximální otáčky 23 300 otáček za minutu (zdroj insideevs).

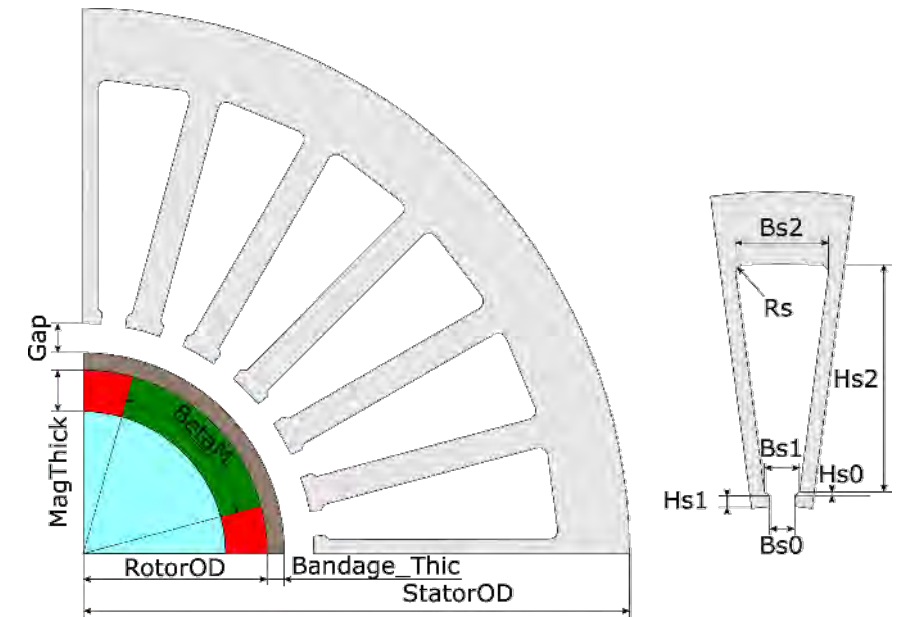
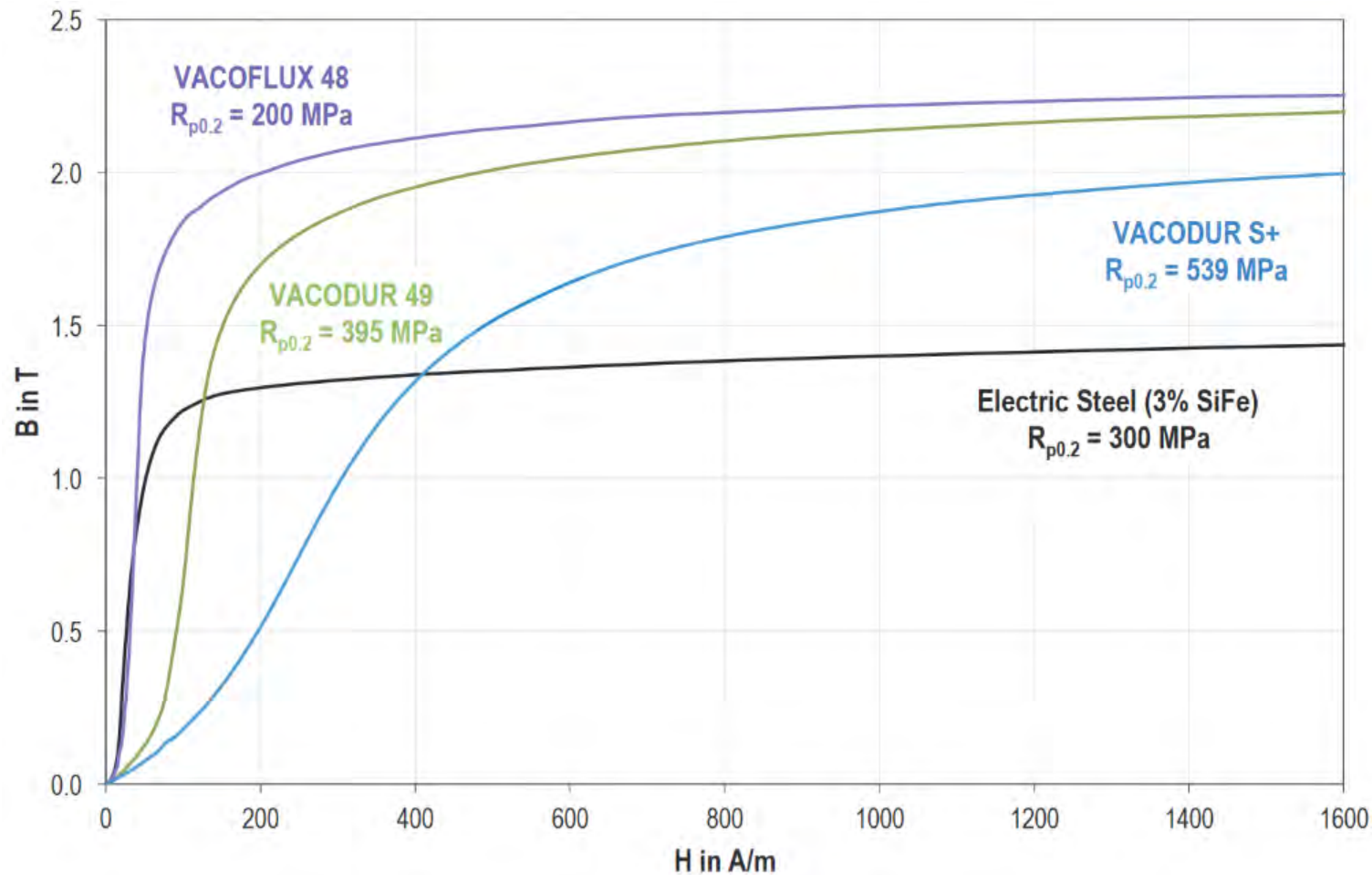


Rotor elektromotoru Tesla model S Plaid s bandáží z uhlíkového vlákna

# Typické aplikace vysokootáčkových elektrických strojů v e-mobilitě



# Inovace v oblasti elektrických strojů – Materiály pro mag. obvody



$$M_e \sim I_q B_{PM} l_{Fe} r$$

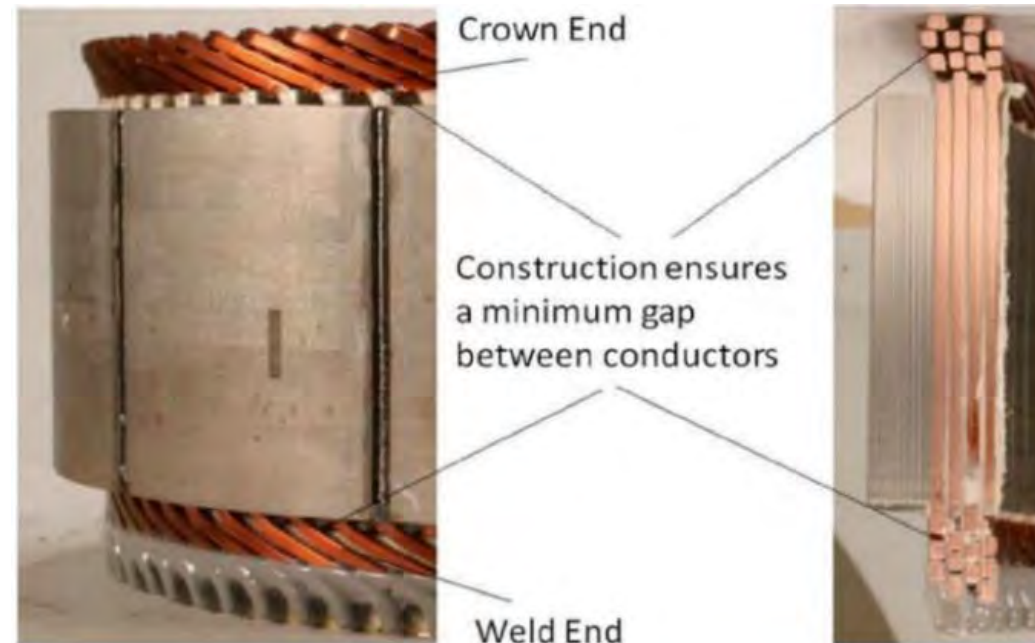
# Inovace v oblasti elektrických strojů - Hairpin vinutí

## Maximalizace reluktačního momentu vyžaduje rozložené vinutí

Hairpin vinutí je dnešním standardem pro stroje v Automotive s vnořenými magnety a rozloženým vinutím ve statoru.

Existují i řešení s lisovanými dráty, jak pro rozložené tak i zubové vinutí, nicméně ale vykazují horší kompromis mezi minimalizací ztrát a odvodem tepla

Výroba hairpin vinutí je již zavedená i pro velké objemy.



Fill factor 85%  
(source: Mitsubishi)



Fill factor 40%  
(source: Brusa)

# Inovace v oblasti elektrických strojů - Pokročilé metody chlazení

Standardním řešením je vodný roztok glykolu s chladicím pláštěm a zalitým vinutím Pokročilá řešení se prosazují:

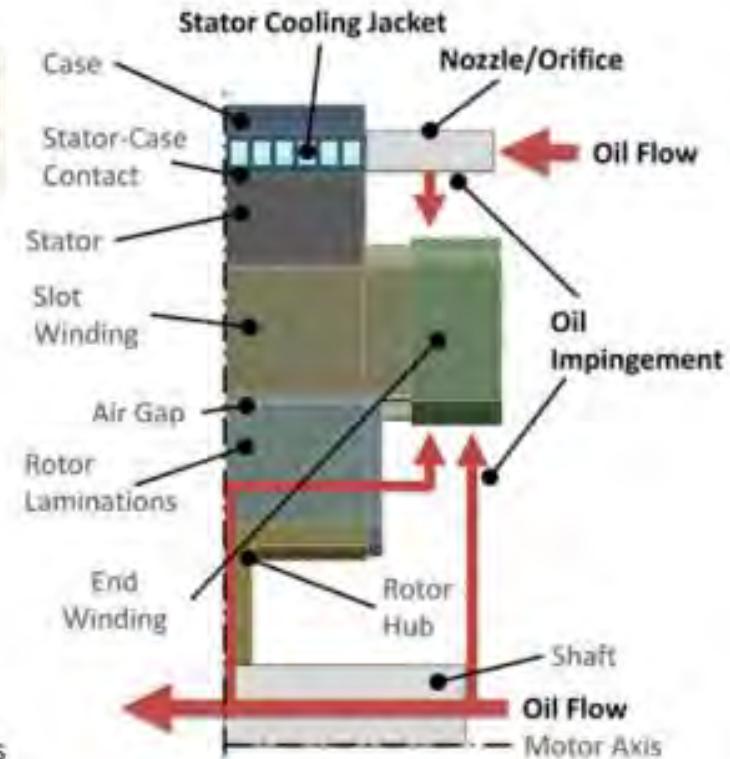
- Chlazení koncového vinutí olejovým postřikem
- přímé chlazení statoru
- Chlazení rotoru

Chlazení olejem postupně nahrazuje vodní chlazení.

[4] K. Bennion, G. Moreno, "Convective Heat Transfer Coefficients of Automatic Transmission Fluid Jets with implications for Electric Machine Thermal Management", International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems, San Francisco, 2015



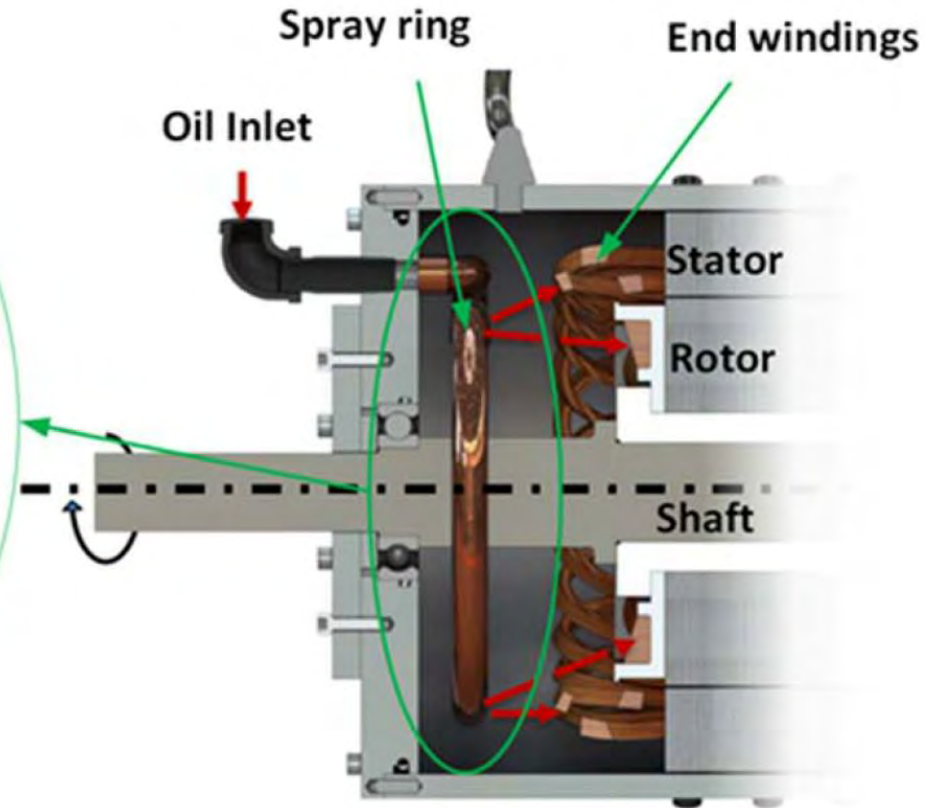
Tesla Model 3 stator oil channels



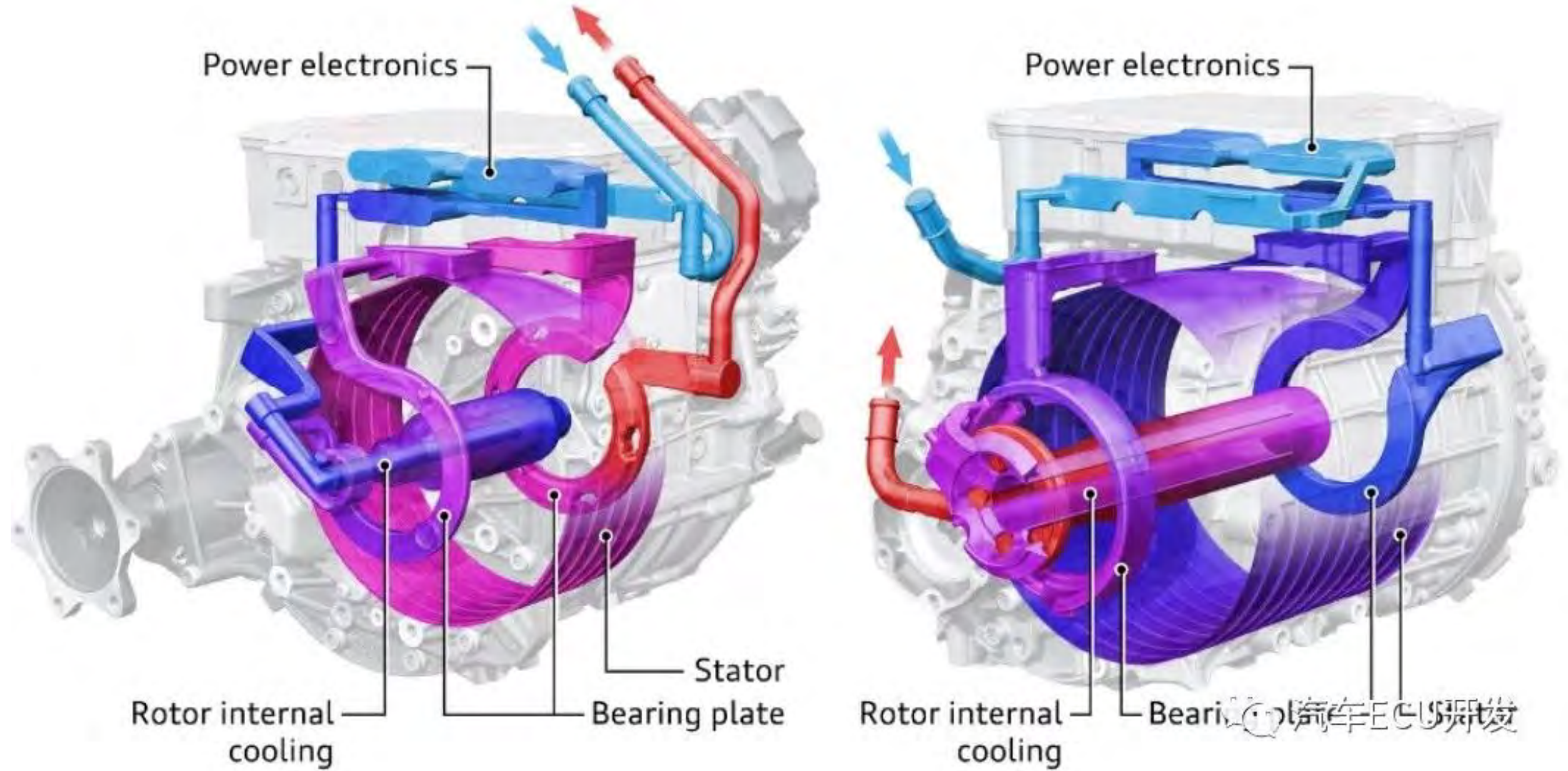
Oil spray cooling principle [4]



# Inovace v oblasti elektrických strojů - Pokročilé metody chlazení

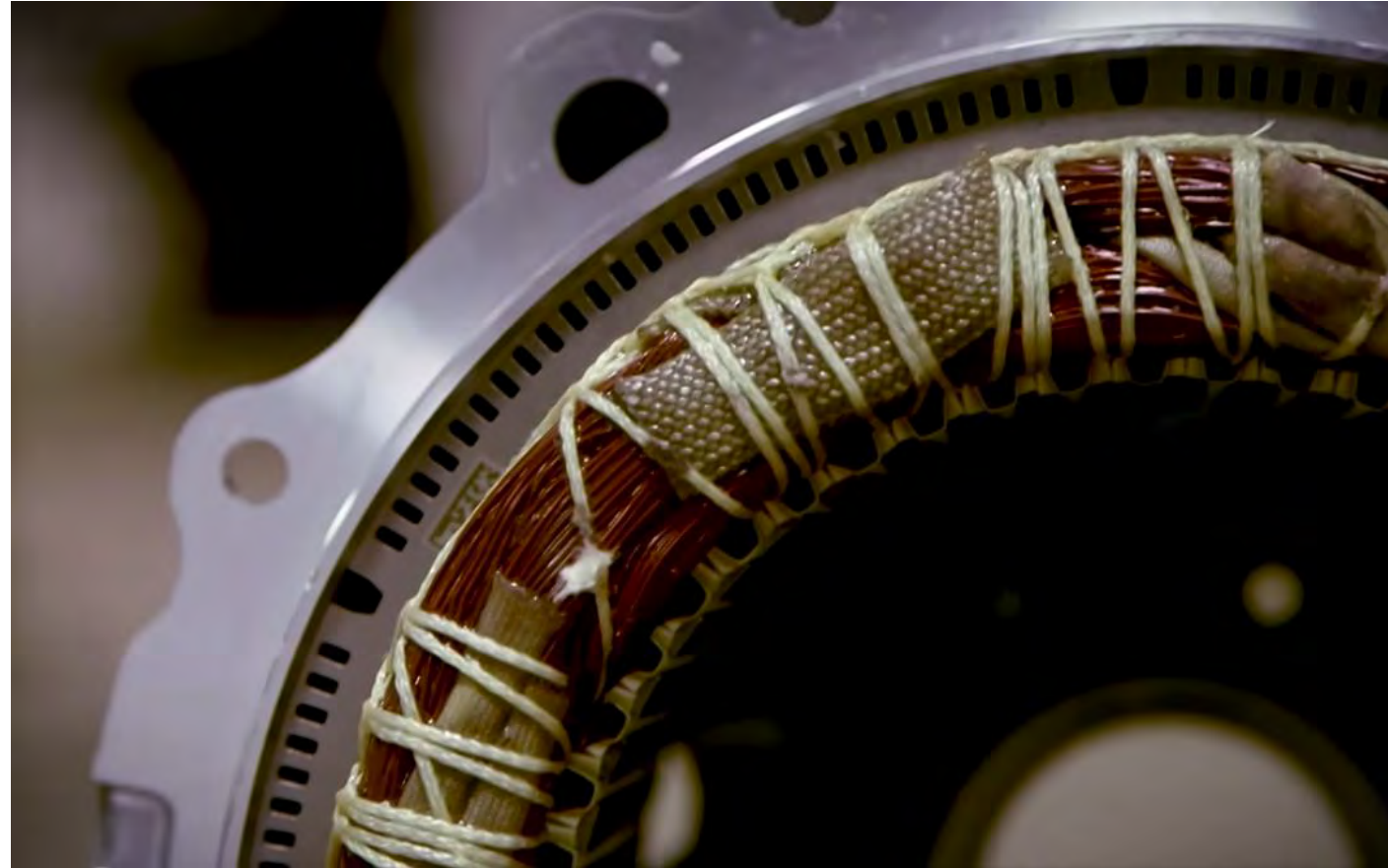
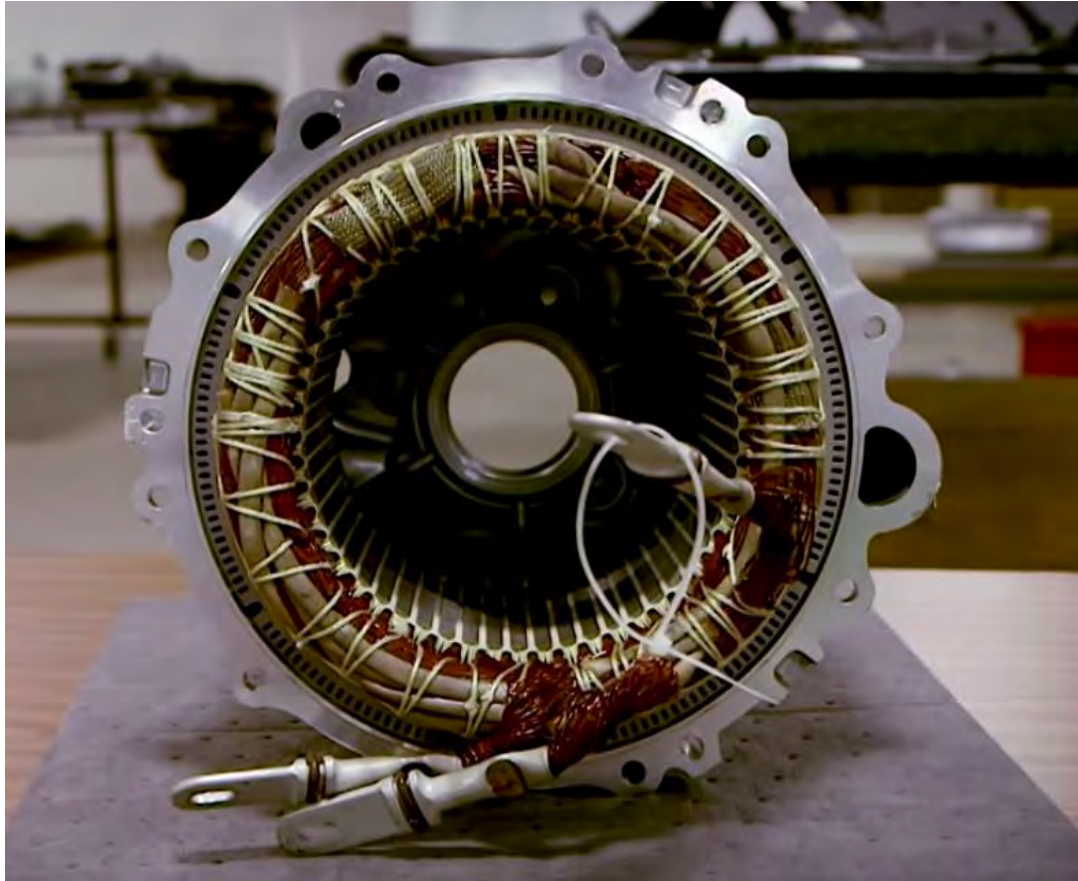


# Inovace v oblasti elektrických strojů – chlazení rotoru



# Inovace v oblasti elektrických strojů - Pokročilé metody chlazení

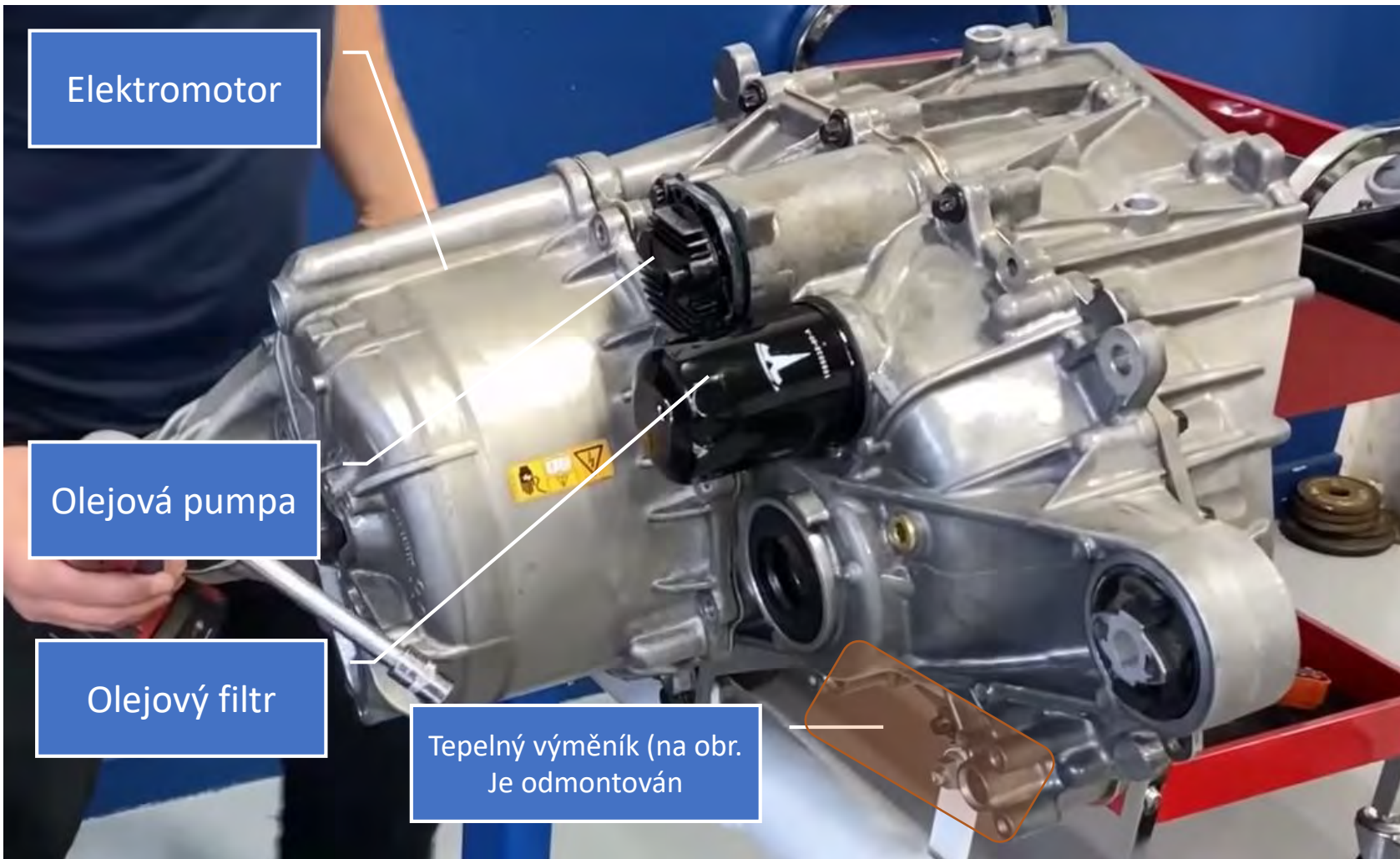
Source: <https://www.youtube.com/watch?v=oVge8I6kxPY>



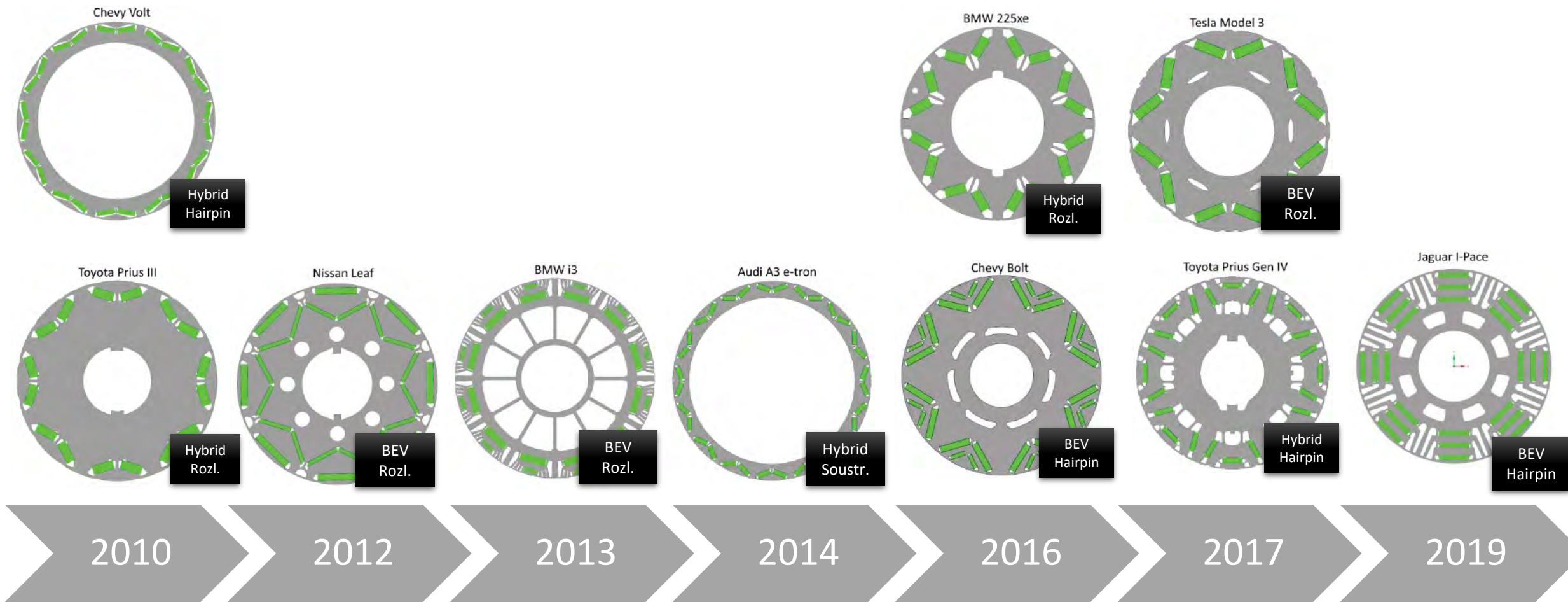
Stator elektromotoru Tesla model 3

# Inovace v oblasti elektrických strojů - Pokročilé metody chlazení

Source: <https://www.youtube.com/watch?v=oVge8I6kxPY>



# Časová osa elektrických motorů pro automobily



Figures: A. Krings and C. Monissen, "Review and Trends in Electric Traction Motors for Battery Electric and Hybrid Vehicles," 2020 *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2020, pp. 1807-1813, doi: 10.1109/ICEM49940.2020.9270946.

# Evoluce elektromotoru Toyoty Prius



~6.37" Rotor O.D. and ~10.6" Stator O.D.

~5.53" Rotor O.D.  
~8.47" Stator O.D.

2002 Prius - 3.5" stack  
33 kW, 274VDC, 6000 RPM

2004 Prius - 3.3" stack  
50kW, 500VDC, 6000 RPM

2010 Prius - 2" stack  
60kW, 650VDC, 13000 RPM

2017 Prius - 2.4" stack  
53kW, 600VDC, 17000 RPM



'02, '04, and '10 stator laminations have very similar OD/ID with 48 slots



Note: speed reducer required for '10 speed level

Increase of voltage, speed, and design quality yielded significant power density (kW/L) and specific power (kW/kg) improvements.



# BMW i3



Parametr	Hodnota	Jednotka
Uvedení na trh	2013	Rok
Typ automobilu	hybrid	-
Špičkový výkon	127	kW
Špičkový moment	250	Nm
Maximální otáčky	11 400	ot/min
Počet pólů	8	-
Počet drážek statoru	48	-
Max. napájecí frekvence	1140	Hz
Natočení	Natočení rotoru	-
Typ vinutí	Rozložené vinutí	-

# Tesla model 3

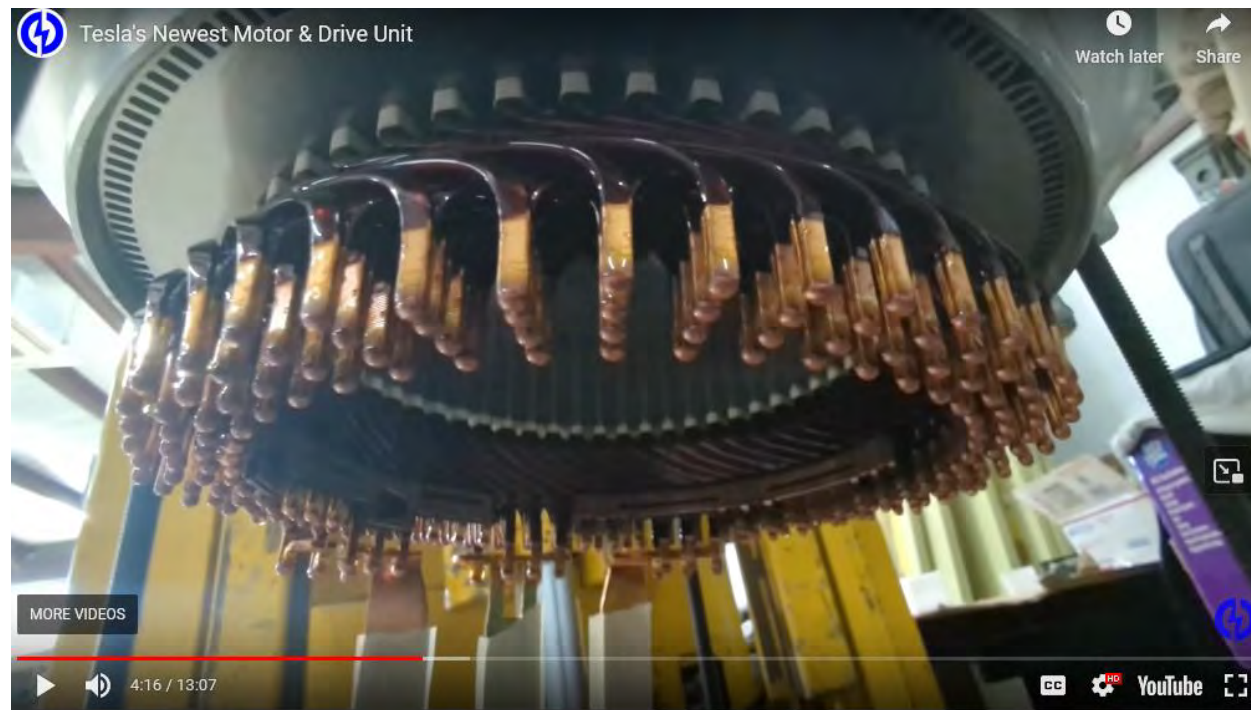
<https://www.youtube.com/watch?v=oVge8I6kxPY>



Parametr	Hodnota	Jednotka
Uvedení na trh	2017	Rok
Typ automobilu	BEV	-
Špičkový výkon	202	kW
Špičkový moment	416	Nm
Maximální otáčky	18 100	ot/min
Počet pólů	6	-
Počet drážek statoru	54	-
Max. napájecí frekvence	905	Hz
Natočení	Natočení rotoru	-
Typ vinutí	Rozložené vinutí	-



# Nejnovější motor Tesla



# Renault R240 Motor – ZOE



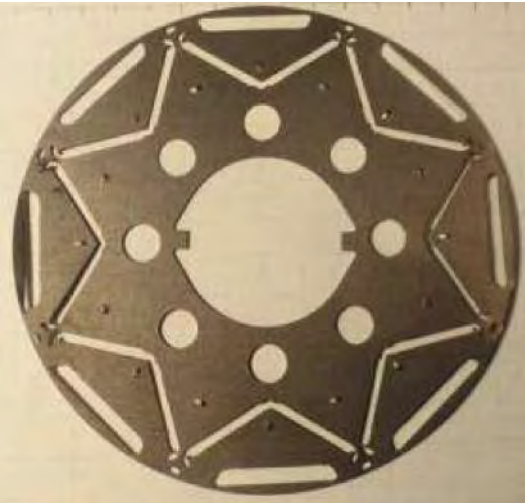
Parametr	Hodnota	Jednotka
Uvedení na trh	2015	Rok
Typ automobilu	BEV	-
Výkon	68	kW
Špičkový moment	220	Nm
Maximální otáčky	11 300	ot/min
Počet pólů	4	-
Počet drážek statoru	48	-
Max. napájecí frekvence	376	Hz
Natočení	Ne	-
Typ vinutí	Rozložené	-

# Toyota Prius IV



Parametr	Hodnota	Jednotka
Uvedení na trh	2017	Rok
Typ automobilu	Hybrid	-
Maximální výkon	53	kW
Špičkový moment	163	Nm
Maximální otáčky	17 000	ot/min
Počet pólů	8	-
Počet drážek statoru	48	-
Max. napájecí frekvence	1133	Hz
Natočení	Ne	-
Typ vinutí	Hairpin	-

# Nissan Leaf Motor



Parametr	Hodnota	Jednotka
Uvedení na trh	2010	Rok
Typ automobilu	BEV	-
Maximální výkon	80	kW
Špičkový moment	280	Nm
Maximální otáčky	10 400	ot/min
Počet pólů	8	-
Počet drážek statoru	48	-
Max. napájecí frekvence	693	Hz
Natočení	Ne	-
Typ vinutí	Rozložené	-

# Chevrolet VOLT

## GEN2 VOLT ELECTRIC MOTOR DRIVE UNIT

**Motor A**

- 12 Pole Ferrite IPM
- 50 kW
- 11000 RPM

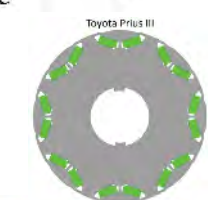
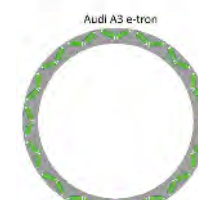
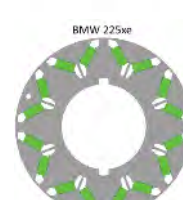
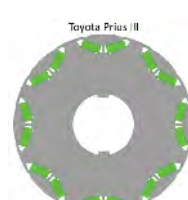
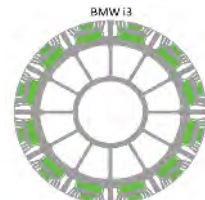
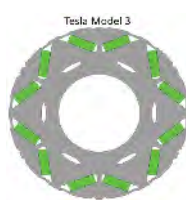
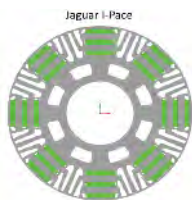
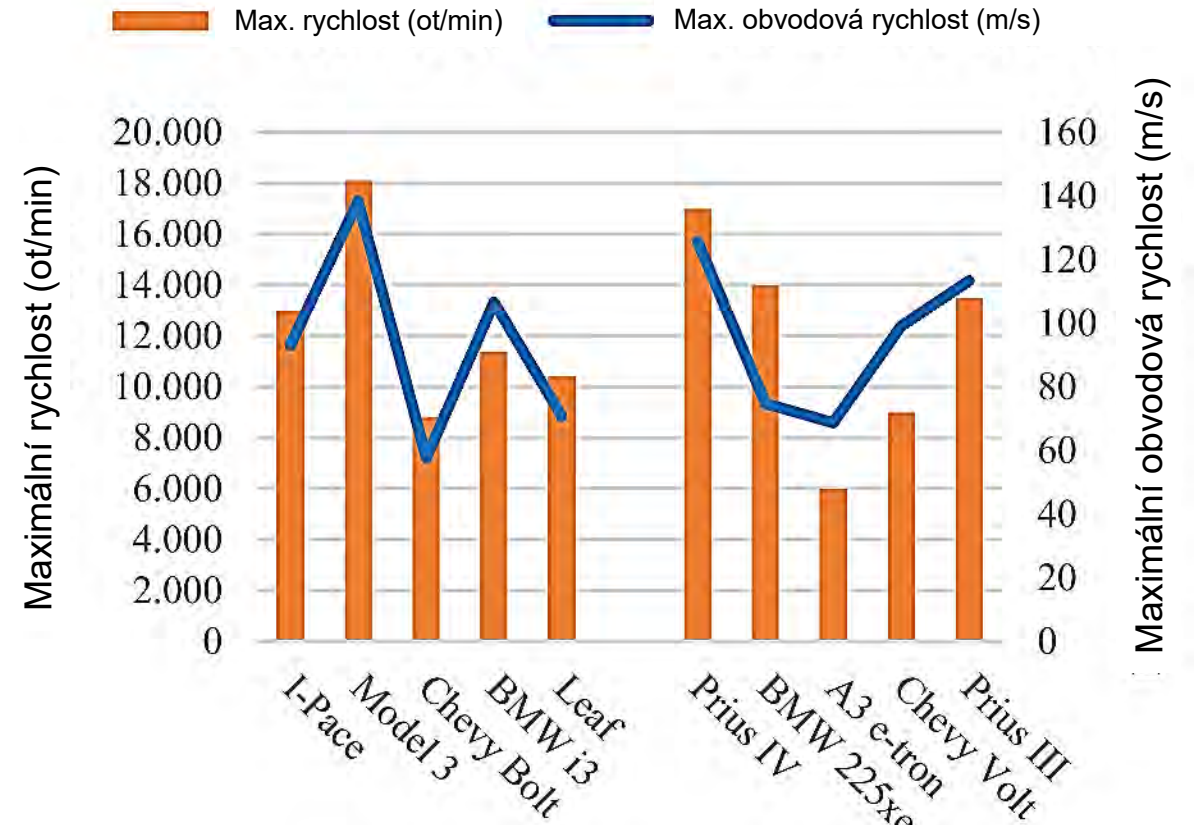
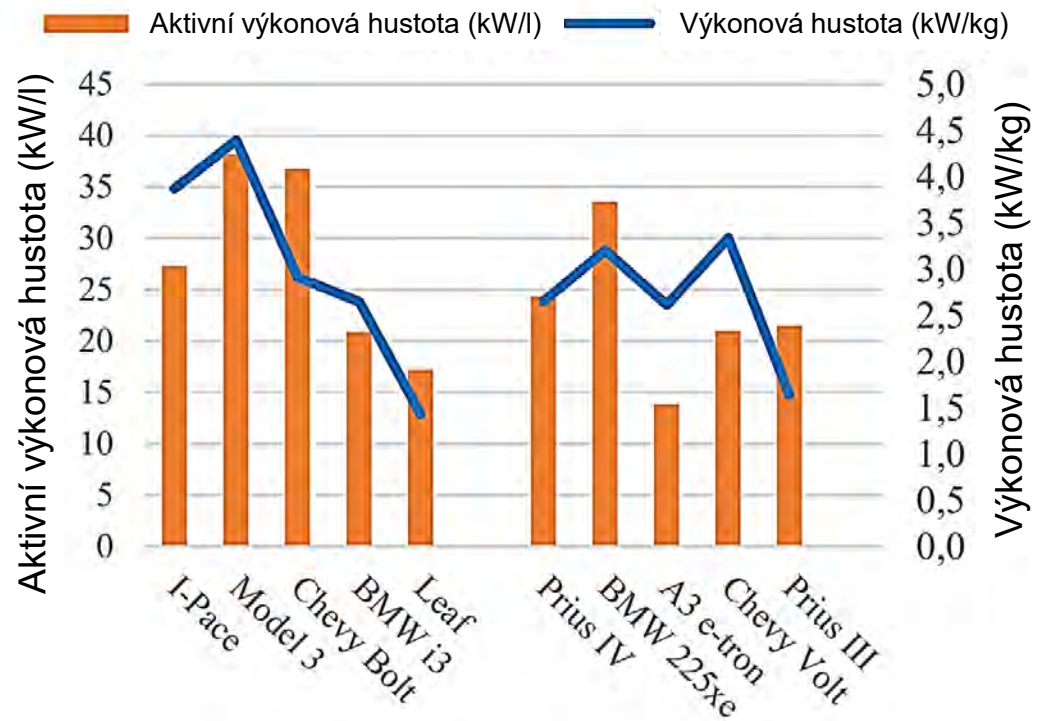
**Motor B**

- 12 Pole Dysprosium Diffused NdFeB IPM
- 100 kW +
- 12000 RPM

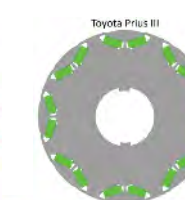
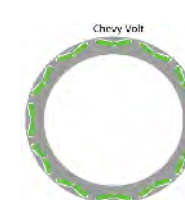
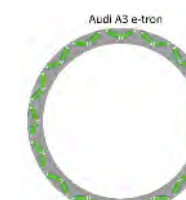
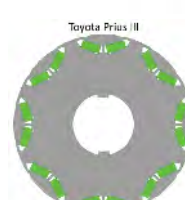
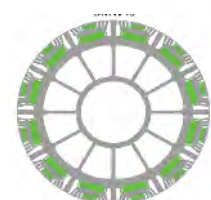
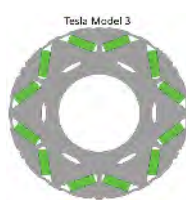
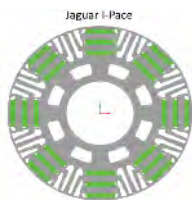
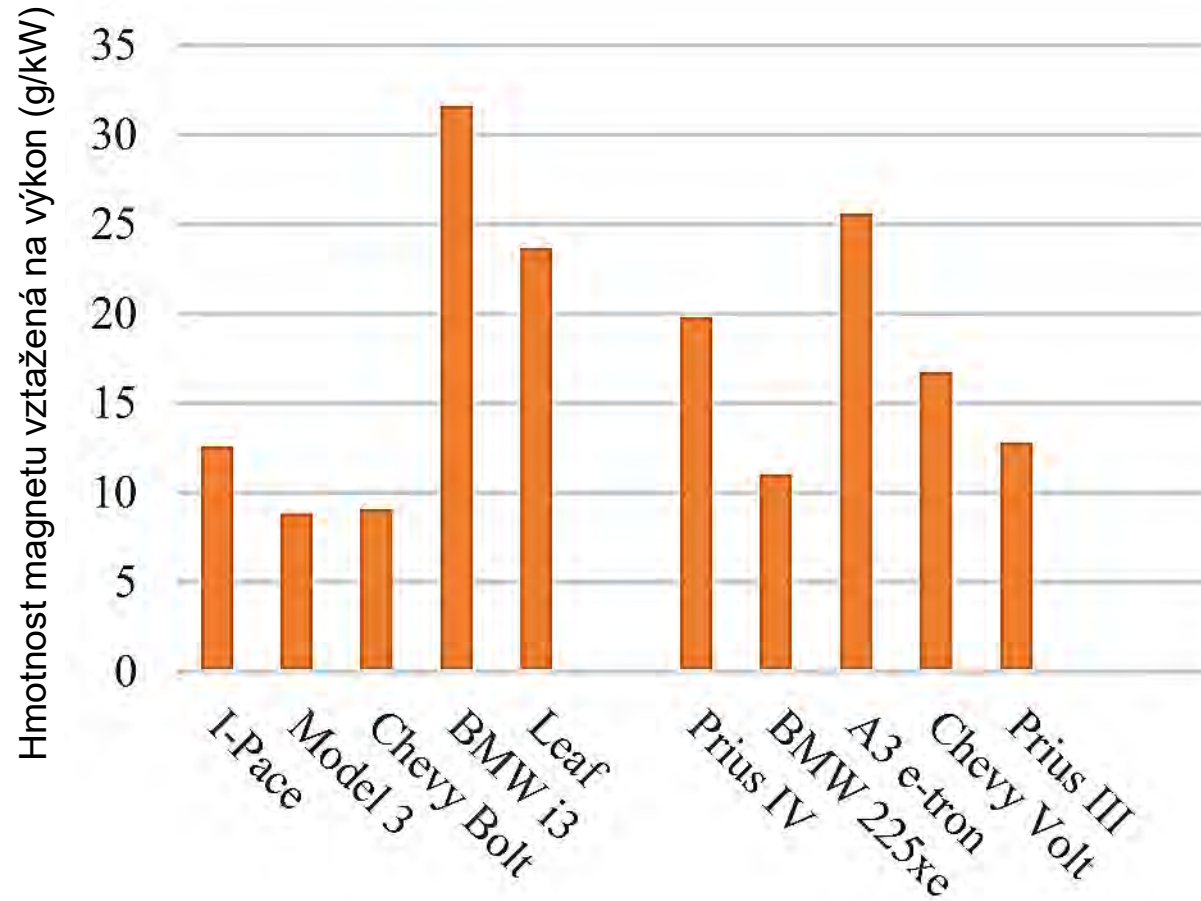


Parametr	Hodnota	Jednotka
Uvedení na trh	2010	Rok
Typ automobilu	Hybrid	-
Maximální výkon	110	kW
Špičkový moment	390	Nm
Maximální otáčky	9000	ot/min
Počet pólů	12	-
Počet drážek statoru	72	-
Max. napájecí frekvence	900	Hz
Natočení	Ano	-
Typ vinutí	Hairpin	-

# Srovnání elektrických strojů pro elektromobily



# Srovnání elektrických strojů pro elektromobily



# FEKT

ÚSTAV  
VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY  
A ELEKTRONIKY



# VÝKONOVKA

## DĚKUJI ZA POZORNOST

**doc. Ing. Jan Bárta, Ph.D.**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky  
**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií**  
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Technická 3058/10, Brno, 616 00

T: +420 541 146 705

M: +420 778 723 482

[bartaj@vutbr.cz](mailto:bartaj@vutbr.cz)

[www.vutbr.cz](http://www.vutbr.cz)