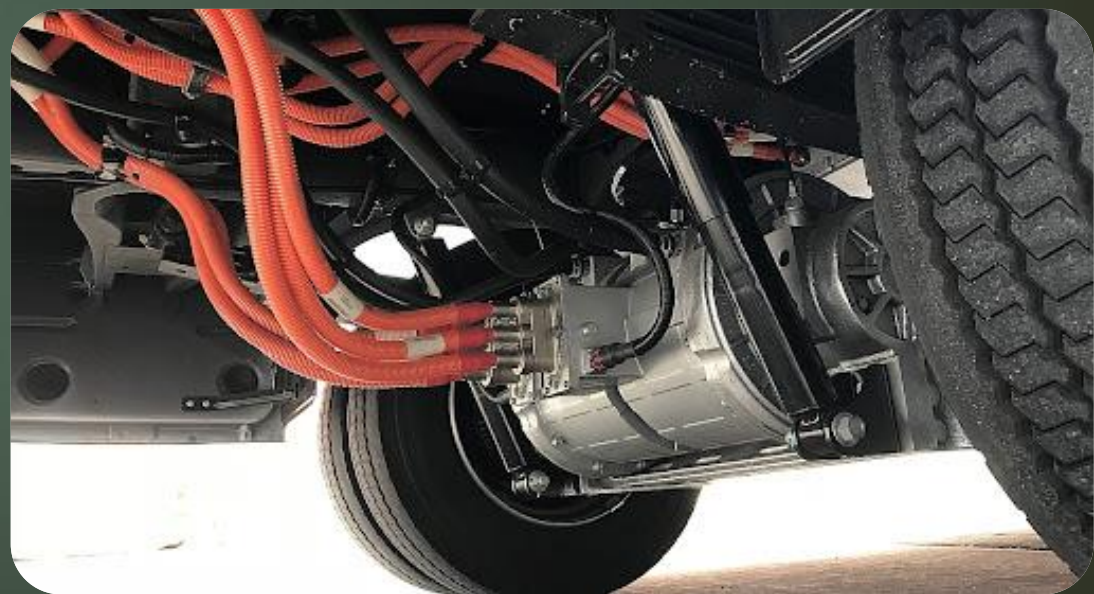


MASZYNY ELEKTRYCZNE W POJAZDACH HYBRYDOWYCH I ELEKTRYCZNYCH





PLAN PREZENTACJI

1. Pojazdy hybrydowe i elektryczne – najważniejsze definicje
2. Podstawy działania silników elektrycznych – zależności matematyczne
3. Wymagania dotyczące silników elektrycznych w pojazdach
4. Rodzaje silników elektrycznych stosowanych w układzie napędowym pojazdu – budowa, aspekty konstrukcyjne i eksploatacyjne
5. Charakterystyki silników napędowych pojazdu, spalinowego i elektrycznego
6. Silniki elektryczne do napędu pojazdów – przykładowe specyfikacje
7. Elementy i materiały stosowane do budowy silników elektrycznych w pojazdach
8. Sterowanie pracą silników elektrycznych stosowanych w napędzie pojazdu
9. Odzysk energii w pojazdach elektrycznych i hybrydowych
10. Wnioski
11. Literatura

POJAZDY HYBRYDOWE I ELEKTRYCZNE – NAJWAŻNIEJSZE DEFINICJE



Pojazd hybrydowy (PH, HV) wyposażony jest w co najmniej dwa różne przemienniki energii (silnik, ogniwo paliwowe) i dwa różne układy gromadzenia energii (zbiornik paliwa, akumulator, kondensator).

Hybrydowy pojazd elektryczny (HPE, HEV) w układzie napędowym przetwarza energię z obu wymienionych niżej źródeł, zainstalowanych w pojeździe:

- paliwa nieodnawialnego
- urządzenia gromadzącego energię elektryczną (akumulator, kondensator, prądnica)

Z powyższej definicji wynika, że tego rodzaju pojazd musi być wyposażony w silnik spalinowy i jeden lub kilka silników elektrycznych.

Pojazd elektryczny (PE, EV, BEV) jest napędzany wyłącznie silnikiem elektrycznym (jednym lub kilkoma).

POJAZDY HYBRYDOWE I ELEKTRYCZNE – NAJWAŻNIEJSZE DEFINICJE



Niepełny napęd hybrydowy oprócz zbiornika paliwa i silnika spalinowego, zawiera drugi zasobnik energii (akumulator wysokonapięciowy) oraz drugi przemiennik energii (maszyna elektryczna). Maszyna elektryczna pracująca jako silnik spełnia tylko funkcję wspomaganie silnika spalinowego.

Pełny napęd hybrydowy umożliwia nie tylko wspomaganie silnika spalinowego przez jednostkę elektryczną, ale także poruszanie się pojazdu wyłącznie z napędem elektrycznym.

Napęd hybrydowy ładowany z sieci elektrycznej (PHEV) spełnia kryteria pełnego napędu hybrydowego i posiada akumulator wysokonapięciowy, który może być ładowany z „gniazdka”.

Napęd z ogniwami paliwowymi (FCV) jest traktowany jako napęd pojazdów hybrydowych lub elektrycznych, jak również jako oddzielna kategoria.

POJAZDY HYBRYDOWE I ELEKTRYCZNE – NAJWAŻNIEJSZE DEFINICJE



Równoległy napęd hybrydowy charakteryzuje się tym, że zarówno silnik spalinowy jak i elektryczny są połączone mechanicznie z kołami za pośrednictwem skrzyni biegów i wałów napędowych. Umieszczenie silnika elektrycznego między skrzynią biegów a silnikiem spalinowym umożliwia w napędzie równoległym wykorzystanie maszyny elektrycznej również w roli rozrusznika (pojazd może mieć także konwencjonalny rozrusznik).

Zalety równoległego napędu hybrydowego:

- występuje tylko jedna maszyna elektryczna, pracująca na przemian jako silnik, generator i ewentualnie rozrusznik
- sprawność napędu w zakresie dużych prędkości jazdy jest znaczna dzięki bezpośredniemu połączeniu mechanicznemu silnika spalinowego z napędem kół

Wady równoległego napędu hybrydowego:

- większe zużycie paliwa lub emisja substancji toksycznych (silnik spalinowy nie zawsze pracuje w optymalnym zakresie prędkości obrotowej)

POJAZDY HYBRYDOWE I ELEKTRYCZNE – NAJWAŻNIEJSZE DEFINICJE



W równoległym napędzie hybrydowym może występować sprzęgło odłączające silnik spalinowy, które zwykle jest umieszczone między kołem zamachowym wału korbowego a maszyną elektryczną.

Odłączenie silnika spalinowego umożliwia nieobracanie się wału korbowego w trybie jazdy elektrycznej (moment bezwładności ruchomych elementów silnika spalinowego nie zwiększa strat energii).

W przypadku gdy silnik spalinowy w trybie jazdy elektrycznej nie jest odłączany, sterownik przerywa zapłon i wtrysk paliwa oraz wyłącza tłoki i cylindry silnika z pracy przez zamknięcie zaworów dolotowych i wylotowych.

POJAZDY HYBRYDOWE I ELEKTRYCZNE – NAJWAŻNIEJSZE DEFINICJE



Szeregowy napęd hybrydowy charakteryzuje się tym, że silnik spalinowy nie jest połączony mechanicznie z kołami pojazdu, a służy do napędu drugiej maszyny elektrycznej, pracującej jako generator ładujący akumulator wysokonapięciowy.

Zalety szeregowego napędu hybrydowego:

- duża pojemność akumulatora wysokonapięciowego umożliwia jazdę w trybie elektrycznym na znaczną odległość
- silnik spalinowy pracuje w optymalnym zakresie prędkości obrotowej

Wady szeregowego napędu hybrydowego:

- występują co najmniej dwie maszyny elektryczne
- wielokrotne przetwarzanie energii

Napęd hybrydowy o rozdzielonej mocy (szeregowo-równoległy) zawiera dwie maszyny elektryczne i silnik spalinowy (tak jak w napędzie szeregowym), który jest połączony mechanicznie z układem przeniesienia napędu (tak jak w napędzie równoległym).



PODSTAWY DZIAŁANIA SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH – ZALEŻNOŚCI MATEMATYCZNE

Siła działająca na ładunek elektryczny poruszający się w polu magnetycznym:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1)$$

gdzie:

q – ładunek elektryczny,

\mathbf{v} – wektor prędkości ładunku elektrycznego,

\mathbf{B} – wektor indukcji magnetycznej.



PODSTAWY DZIAŁANIA SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH – ZALEŻNOŚCI MATEMATYCZNE

Siła działająca na ładunek elementarny dq poruszający się z prędkością \mathbf{v} w przewodniku znajdującym się w polu magnetycznym jednorodnym o indukcji \mathbf{B} jest równa sile elektrodynamicznej działającej na element przewodnika $d\mathbf{l}$, przez który płynie prąd o natężeniu i :

$$d\mathbf{F} = dq(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = i dt \left(\frac{d\mathbf{l}}{dt} \times \mathbf{B} \right) = i(d\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \quad (2)$$

gdzie:

dt – czas, w którym nastąpiło przemieszczenie ładunku o długość drogi $d\mathbf{l}$.

Wartość siły elektrodynamicznej oblicza się według poniższej zależności:

$$F = i \cdot l \cdot B \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

gdzie:

α – kąt między przewodem o długości l , w którym płynie prąd i , a wektorem indukcji magnetycznej.



PODSTAWY DZIAŁANIA SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH – ZALEŻNOŚCI MATEMATYCZNE

Jeżeli umieści się ramkę, wykonaną z przewodnika i przewodzącą prąd stały I , pomiędzy biegunami magnetycznymi, równoległe do kierunku wektora indukcji magnetycznej, wtedy na dwa boki ramki o długości l , znajdujące się naprzeciw różnoimiennych biegunów magnetycznych i oddalonych od siebie o $2r$, będą działały siły powodujące powstanie momentu elektromagnetycznego o wartości:

$$M_e = 2F \cdot r = 2B \cdot I \cdot l \cdot r = 2 \frac{\phi}{S} \cdot I \cdot l \cdot r \quad (4)$$

gdzie:

ϕ – strumień magnetyczny przenikający powierzchnię wyznaczoną przez ramkę,

S – pole powierzchni wyznaczonej przez ramkę.

Gdy zamiast pojedynczej ramki zastosuje się cewkę o N zwojach, moment będzie większy i równy:

$$M_e = 2 \frac{\phi}{S} \cdot I \cdot l \cdot r \cdot N = c_m \cdot \phi \cdot I \quad (5)$$

gdzie:

c_m – stała zależna od wymiarów konstrukcyjnych cewki.

PODSTAWY DZIAŁANIA SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH – ZALEŻNOŚCI MATEMATYCZNE



Jeżeli przewodnik porusza się z prędkością v w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji B , to zaindukuje się w nim napięcie rotacji, które dla jednostki długości przewodnika $d/$ jest równe:

$$de_r = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} \quad (6)$$

Wartość napięcia rotacji oblicza się według poniższej zależności:

$$e_r = l \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha \quad (7)$$

gdzie:

α – najmniejszy kąt zawarty między wektorami \mathbf{v} i \mathbf{B} .

Przyczyną powstawania napięcia jest działanie siły i w efekcie przesunięcie elektronów w przewodniku. Jest to zjawisko działania siły na ruchomy ładunek elektryczny, który w tym przypadku porusza się wraz z przewodnikiem. Polaryzacja indukowanego napięcia jest taka, aby wymusić przepływ prądu, który spowoduje powstanie siły elektrodynamicznej o zwrocie przeciwnym do siły zewnętrznej.

PODSTAWY DZIAŁANIA SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH – ZALEŻNOŚCI MATEMATYCZNE



Jeżeli strumień magnetyczny ϕ , obejmujący swoim działaniem przewodnik elektryczny, zmienia się w czasie, to w przewodniku zaindukuje się napięcie transformacji:

$$e_t = - \frac{d\phi}{dt} \quad (8)$$

Nazwy "napięcie rotacji" i "napięcie transformacji" związane są ze sposobem uzyskania napięcia w wyniku zjawiska indukcji (ruch przewodnika lub zmiana pola magnetycznego). O wartości indukowanego napięcia decyduje względny ruch uzwojenia względem strumienia magnetycznego. Nie ma znaczenia, czy wiruje strumień magnetyczny czy uzwojenie, a więc równania 7 i 8 są równoważne.



PODSTAWY DZIAŁANIA SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH – ZALEŻNOŚCI MATEMATYCZNE

Napięcie zasilające uzwojenie twornika silnika elektrycznego (elektromechaniczny przetwornik energii) jest równe sumie napięć indukowanych w tym uzwojeniu (rotacji i transformacji) oraz spadku napięcia na rezystancji uzwojenia:

$$u = e_r + e_t + Ri = e_r + L \frac{di}{dt} + Ri \quad (9)$$

gdzie:

i – prąd płynący przez uzwojenie twornika,

L – indukcyjność uzwojenia twornika,

R – rezystancja uzwojenia twornika.



PODSTAWY DZIAŁANIA SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH – ZALEŻNOŚCI MATEMATYCZNE

Moment mechaniczny silnika elektrycznego oblicza się według zależności:

$$M_m = M_e - J \frac{d\omega}{dt} \quad (10)$$

gdzie:

M_e – moment elektromagnetyczny silnika,

J – moment bezwładności,

ω – prędkość kątowna wirnika.



WYMAGANIA DOTYCZĄCE SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH W POJAZDACH

- duża moc i jej gęstość
- duży moment obrotowy przy małej prędkości obrotowej (rozruch i przyspieszanie) oraz duża moc przy dużej prędkości
- duży zakres prędkości obrotowej, zapewniający pracę ze stałym momentem i stałą mocą
- szybka odpowiedź na zmianę obciążenia
- duża sprawność w szerokim zakresie prędkości i momentu obrotowego
- duża sprawność odzyskiwania energii w procesie hamowania
- mały koszt produkcji



RODZAJE SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH STOSOWANYCH W UKŁADZIE NAPĘDOWYM POJAZDU

- **Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi (PMSM – Permanent Magnet Synchronous Motor)**
- **Silnik bezszczotkowy wzbudzany magnesami trwałymi:**
 - BLDCM (Brush-Less Direct Current Motor)
 - BLSM (Brush-Less Synchronous Motor)
 - SM (Synchronous Motor)
- **Silnik indukcyjny (asynchroniczny)**

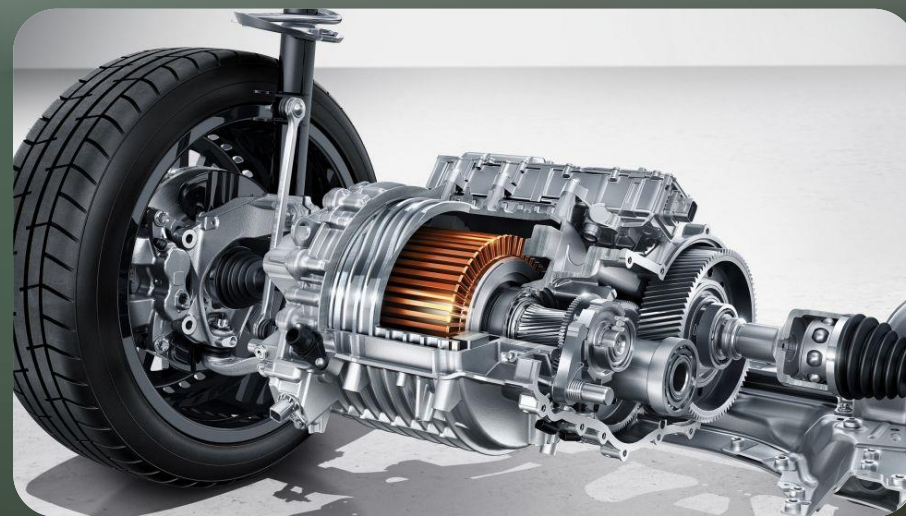
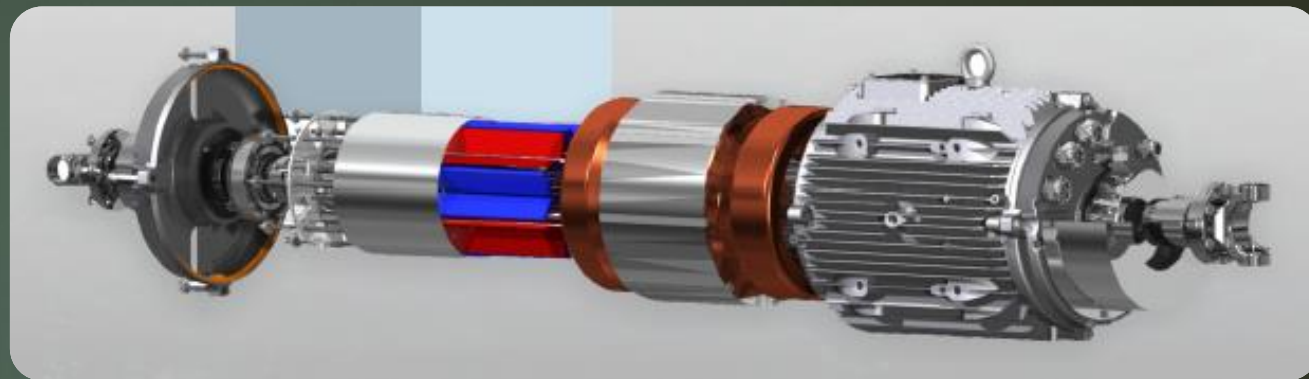


SILNIK SYNCHRONICZNY Z MAGNESAMI TRWAŁYMI – GŁÓWNE ASPEKTY KONSTRUKCYJNE I EKSPLOATACYJNE

- Trójfazowe uzwojenie twornika, umieszczone w jarzmie stojana maszyny i łączone ze źródłem zasilania za pośrednictwem sterownika
- Magnes trwały, umieszczony na wirniku jako źródło pola magnetycznego wzbudzenia
- Mniejsza masa i objętość w porównaniu z silnikami prądu stałego i indukcyjnymi
- Duża sprawność w całym zakresie prędkości obrotowej
- Efektywna regulacja prędkości obrotowej
- Duża przeciążalność



BUDOWA SILNIKA SYNCHRONICZNEGO Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

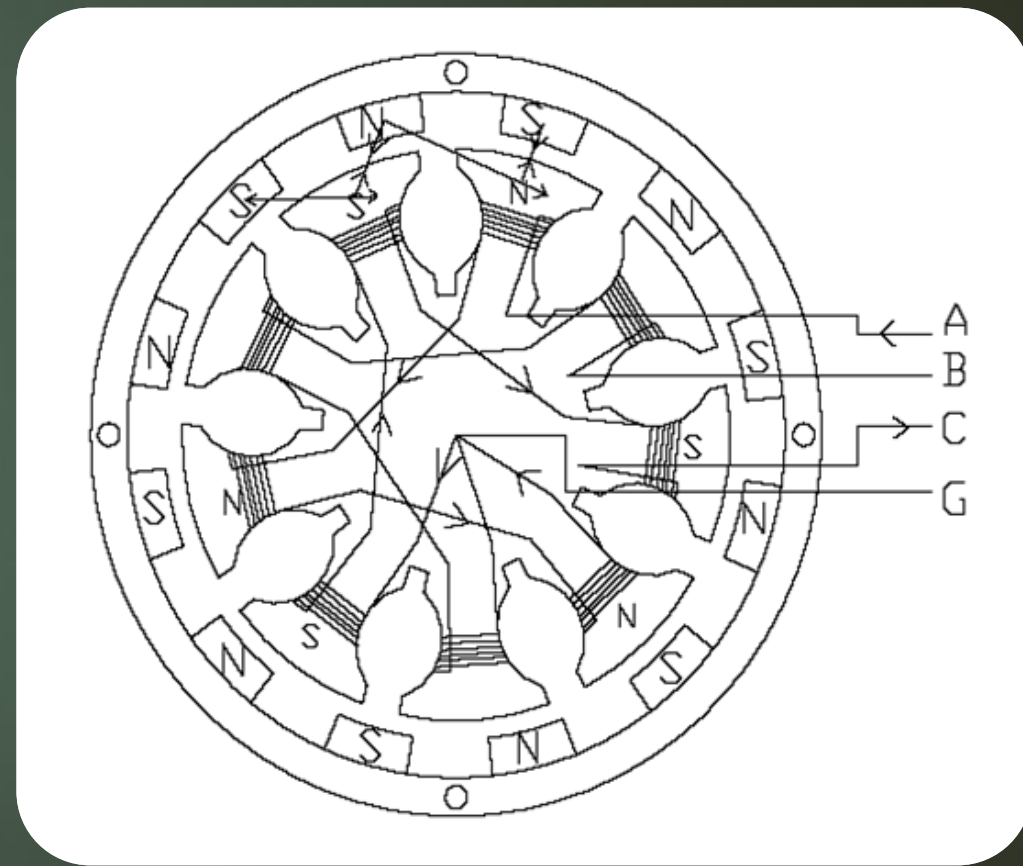
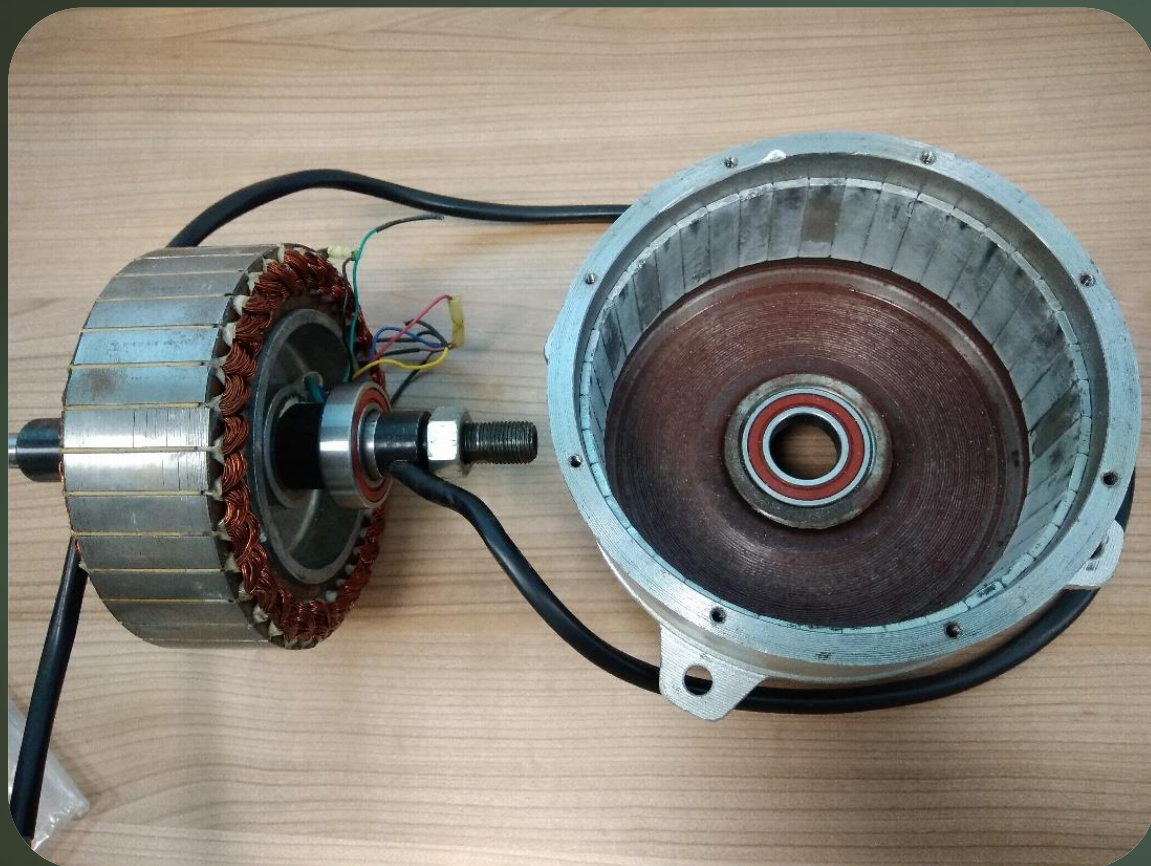




SILNIK WZBUDZANY MAGNESAMI TRWAŁYMI – GŁÓWNE ASPEKTY KONSTRUKCYJNE I EKSPLOATACYJNE

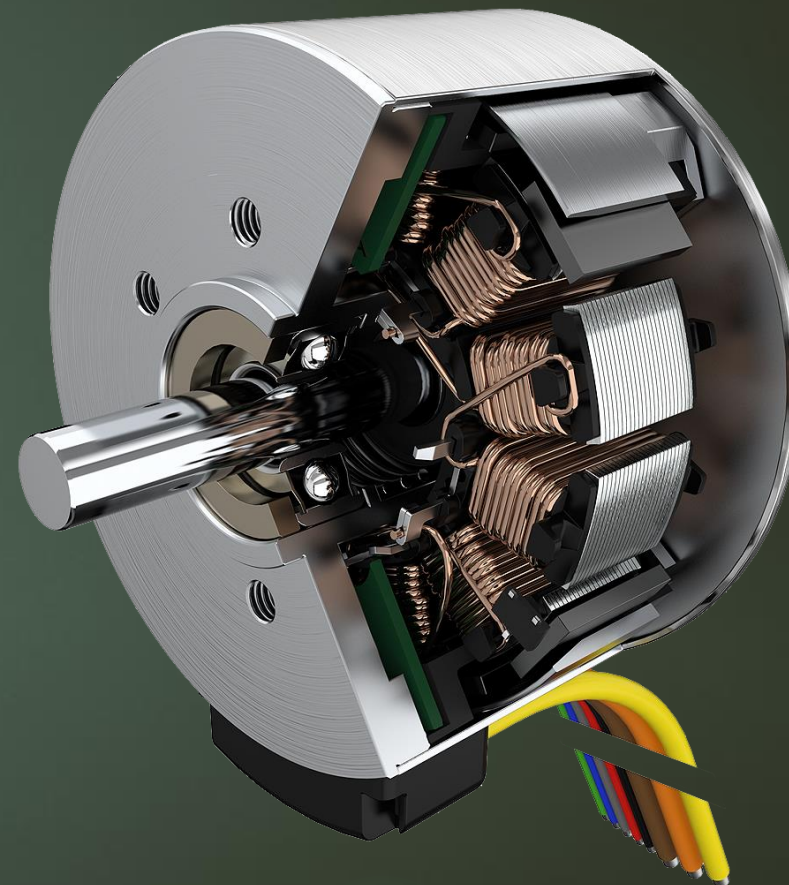
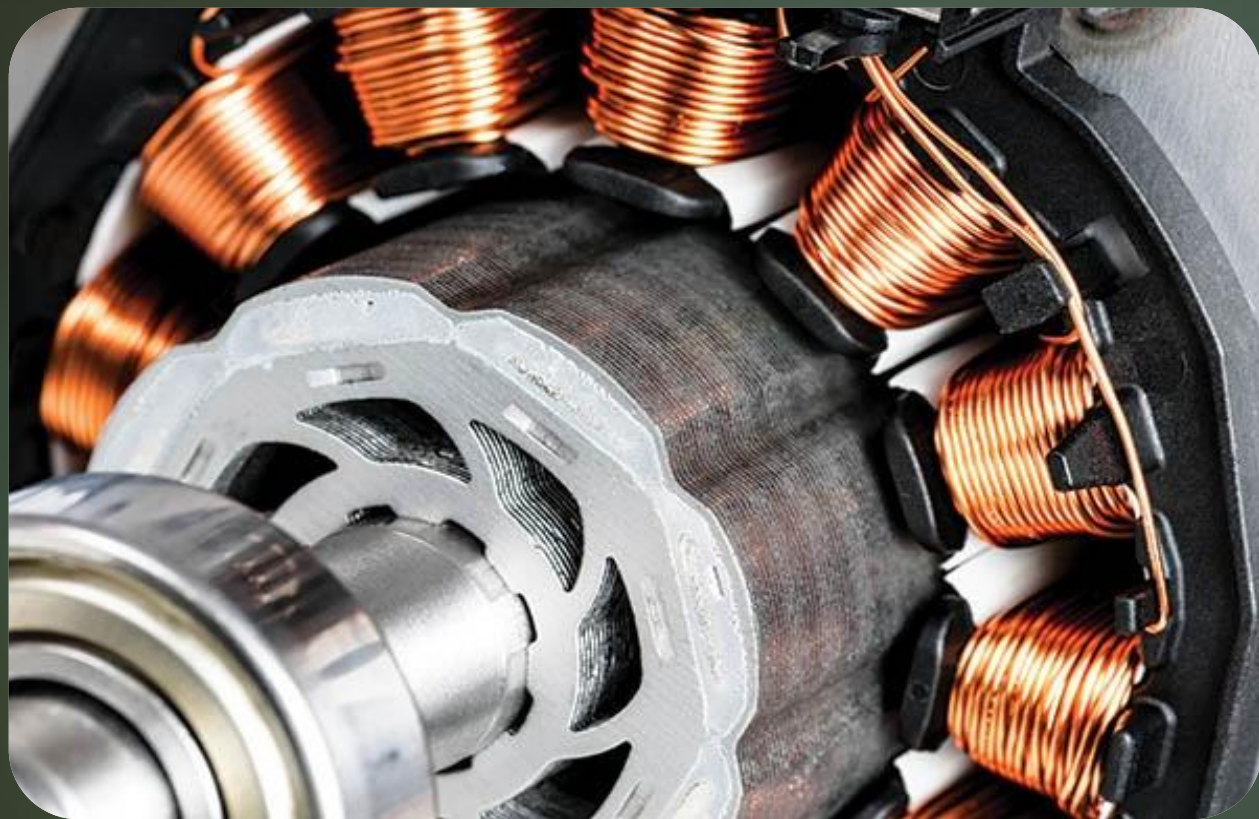
- Trójfazowe uzwojenie twornika, umieszczone w jarzmie stojana maszyny i łączone ze źródłem zasilania za pośrednictwem sterownika; liczba faz (pasm) może być inna, ale większa od jeden
- Magnesy trwałe, umieszczone na powierzchni jarzma wirnika lub wewnątrz jarzma wirnika
- Wirnik wewnętrzny lub zewnętrzny
- Silnik o dużej średnicy w stosunku do długości nazywany tarczowym (może być montowany w piaście koła pojazdu)
- Mniejsza masa i objętość w porównaniu z silnikami prądu stałego i indukcyjnymi
- Duża sprawność w całym zakresie prędkości obrotowej

BUDOWA I ZASADA DZIAŁANIA SILNIKA Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

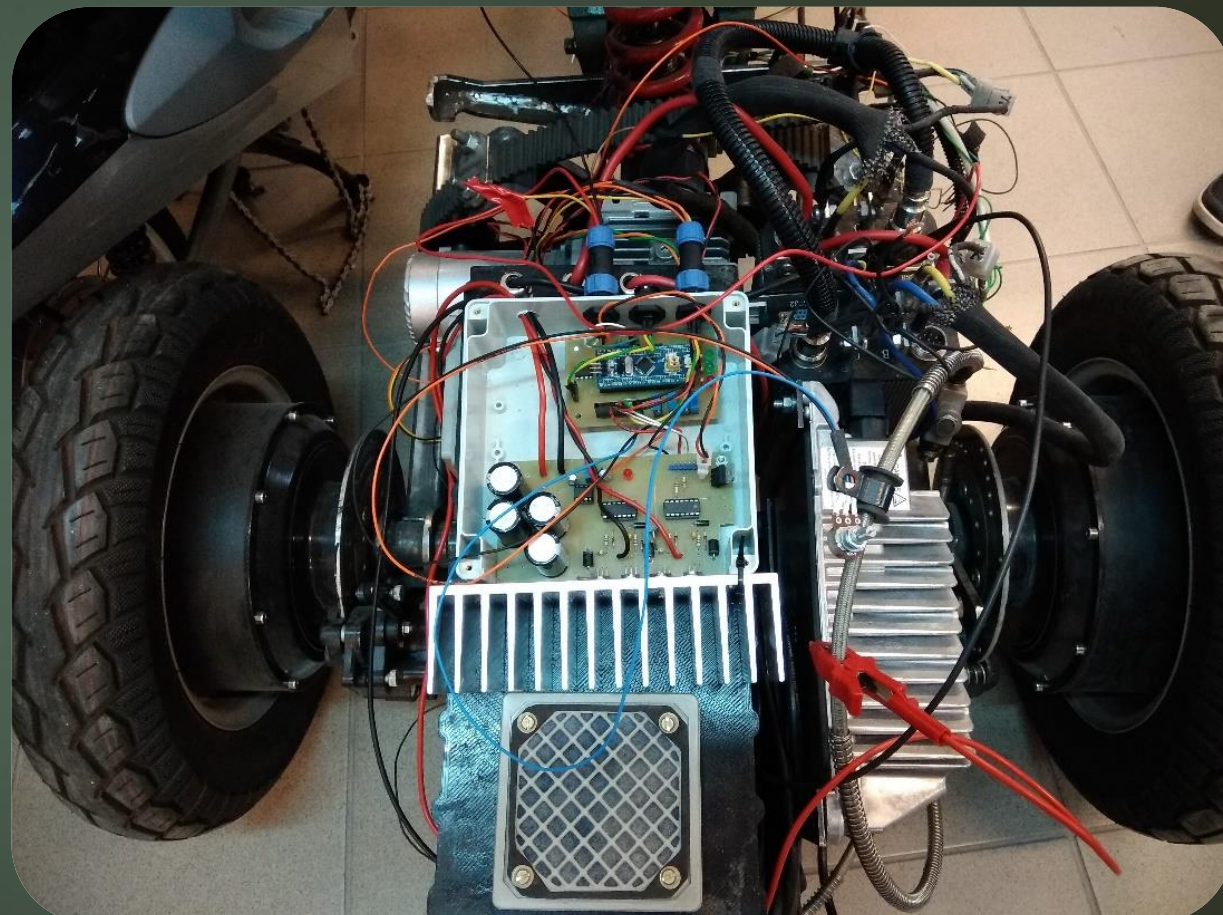




BUDOWA SILNIKA Z MAGNESAMI TRWAŁYMI Z WIRNIKIEM WEWNĘTRZNYM I ZEWNĘTRZNYM



SILNIK Z MAGNESAMI TRWAŁYMI ZAMONTOWANY W PIASTACH KÓŁ POJAZDU



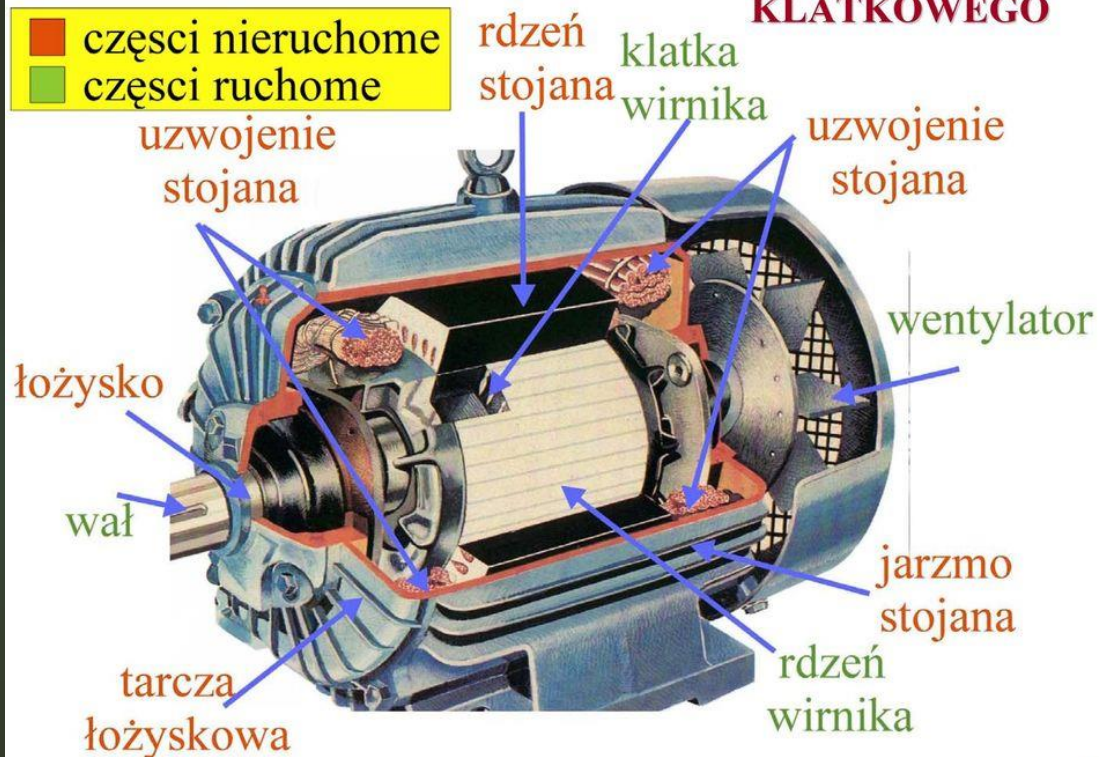


SILNIK INDUKCYJNY KLATKOWY – GŁÓWNE ASPEKTY KONSTRUKCYJNE I EKSPLOATACYJNE

- Trójfazowe uzwojenie twornika, umieszczone w jarzmie stojana maszyny i łączone ze źródłem zasilania za pośrednictwem sterownika
- Żłobki rdzenia wirnika wypełniają pręty przewodzące, zwarte ze sobą na stałe połączeniami czołowymi (tworzą tzw. klatkę wykonaną techniką odlewania)
- Uproszczona konstrukcja wirnika
- Duża przeciążalność
- Mały współczynnik mocy
- Niskie koszty produkcji
- Silnik jest stosowany tylko w niewielkich pojazdach transportowych i sportowo-wyczynowych

BUDOWA SILNIKA INDUKCYJNEGO KLATKOWEGO I JEGO ZASTOSOWANIE W POJEŹDZIE TYPU QUAD

BUDOWA SILNIKA INDUKCYJNEGO TRÓJFAZOWEGO KLATKOWEGO



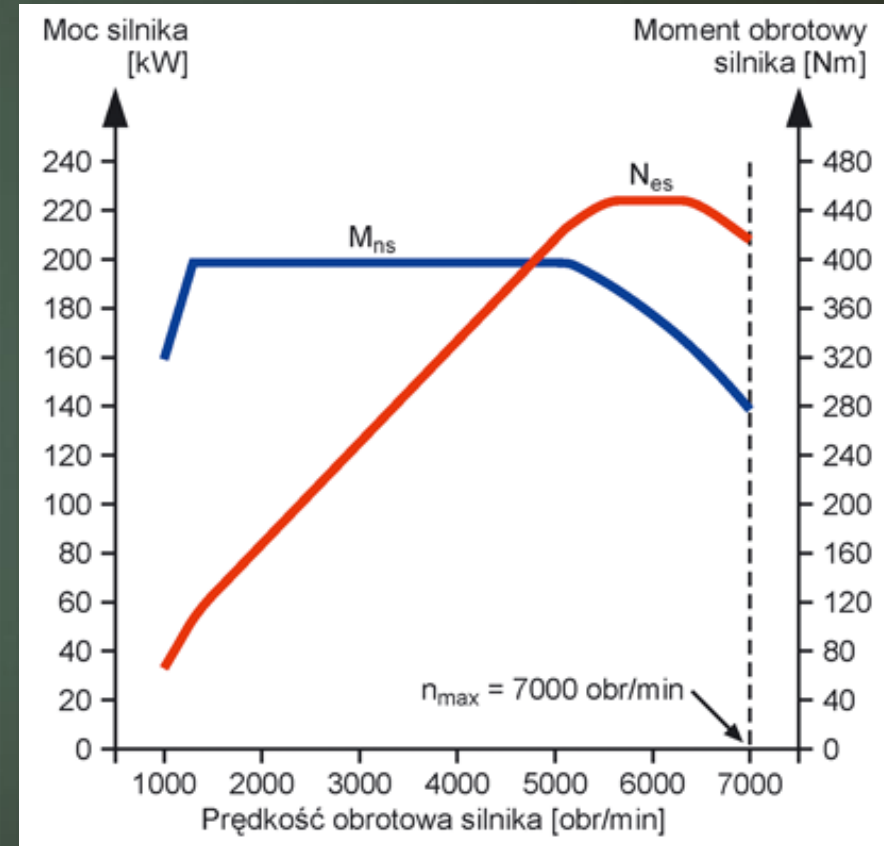
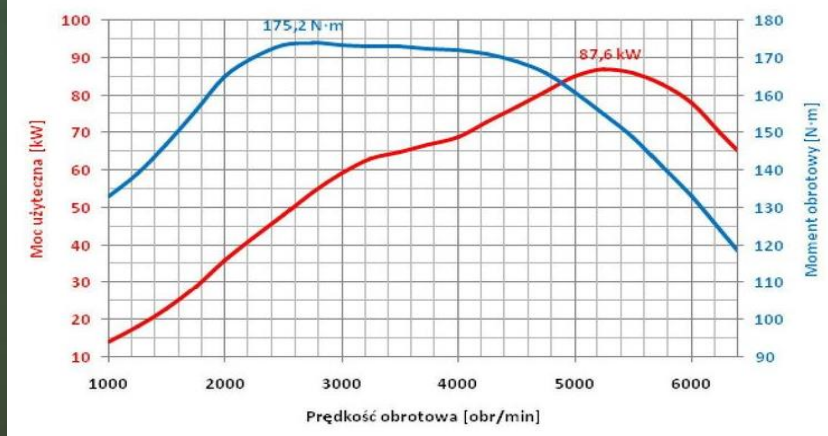
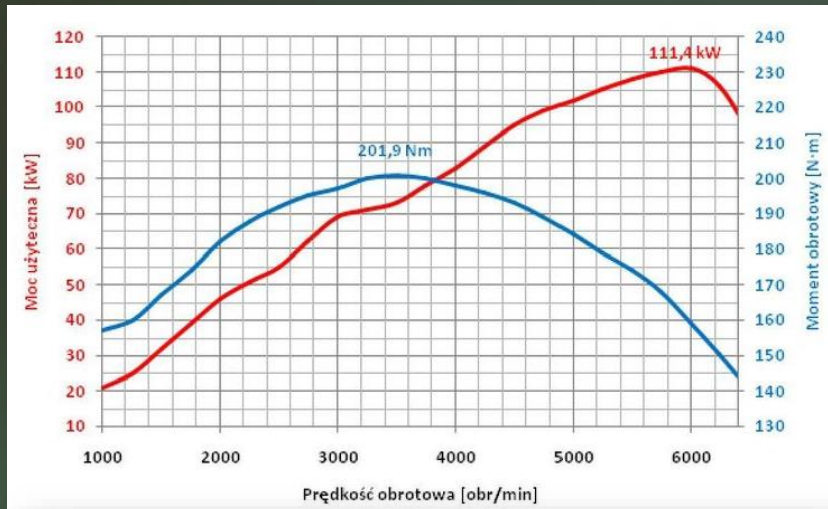
16



ELEKTRYCZNE SILNIKI Z PRZEKŁADNIĄ W UKŁADZIE NAPĘDOWYM POJAZDU



PORÓWNANIE CHARAKTERYSTYK SILNIKÓW NAPĘDOWYCH POJAZDÓW: SPALINOWYCH I ELEKTRYCZNEGO





SILNIKI ELEKTRYCZNE DO NAPĘDU POJAZDÓW – PRZYKŁADOWE SPECYFIKACJE

	U [V]	I _n [A]	I _{max} [A]	P _n [kW]	P _{max} [kW]	M _n [Nm]	M _{max} [Nm]	n _n [obr/min]	n _{max} [obr/min]	η [%]	m [kg]
Silnik synchroniczny	250-430	-	450	40	60	160	210	12000	-	-	-
Silnik synchroniczny	205	182	282	55	90	120	184	3300	6000	95	50
Silnik synchroniczny	215	150	300	45	75	270	560	1600	2600	95	105
Silnik z magnesami trwałymi (w piaście koła)	200-400	-	-	54	75	700	1000	-	-	-	31
Silnik indukcyjny	400	35,6	-	18	-	42	-	4040	-	90	45



ELEMENTY I MATERIAŁY STOSOWANE DO BUDOWY ELEKTRYCZNYCH SILNIKÓW NAPĘDOWYCH POJAZDÓW

1. ELEMENTY MAGNETYCZNE

a) magnesy trwałe (materiały magnetycznie twarde):

– ferryty baru ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) i ferryty strontu ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$)

– alnico (AlNiCo – aluminium-nikiel-kobalt)

– z pierwiastków ziem rzadkich (SmCo_5 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, MM14Co; MM14 – miszmetal, mieszanina pierwiastków ziem rzadkich: Ce, La, Nd, Fe i inne)

– trójskładnikowe neodymowo-żelazowo-borowe (np. $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$)

b) rdzenie ze stali ferromagnetycznej (materiały magnetycznie miękkie):

– rdzeń (jarzmo) pakietowany z blach przedzielanych materiałem izolacyjnym (gdy występuje zmienny w czasie strumień magnetyczny)

– rdzeń (jarzmo) lity (gdy strumień magnetyczny jest stały w czasie)



ELEMENTY I MATERIAŁY STOSOWANE DO BUDOWY ELEKTRYCZNYCH SILNIKÓW NAPEŁDOWYCH POJAZDÓW

2. ELEMENTY PRZEWODZĄCE PRĄD

- a) uzwojenia (miedź, aluminium)
- b) pręty (miedź, aluminium)
- c) styki, zaciski (miedź, aluminium, srebro)
- d) kondensatory przeciwzakłócenkowe

3. ELEMENTY KONSTRUKCYJNE

- a) obudowy, pokrywy (stal, żeliwo, aluminium)
- b) wałki (stal)
- c) łożyska (stal)
- d) wentylatory (metale, tworzywa sztuczne)
- e) śruby (stal)
- f) kanały przepływowe dla cieczy chłodzącej
- g) tabliczka znamionowa



ELEMENTY I MATERIAŁY STOSOWANE DO BUDOWY ELEKTRYCZNYCH SILNIKÓW NAPĘDOWYCH POJAZDÓW

4. ELEMENTY IZOLACYJNE UZWOJEŃ

- a) żłobkowe (preszpan, mikafolia, płótno szklane, nomeks)
- b) przewodowe (lakier na przewodach okrągłych i taśma szklana lub typu Nomex na przewodach profilowych)

5. MATERIAŁY IZOLACYJNE WEDŁUG KLAS TEMPERATUROWYCH:

- bawełna, papier ($T_{\max}=90\text{ °C}$)
- materiał Y nasycony olejem lub lakierem ($T_{\max}=105\text{ °C}$)
- smoła, masy plastyczne ($T_{\max}=120\text{ °C}$)
- szkło ($T_{\max}=130\text{ °C}$)
- mikanit ($T_{\max}=155\text{ °C}$)
- poliamidy typu Nomex ($T_{\max}=180\text{ °C}$)
- azbest, porcelana ($T_{\max}>180\text{ °C}$)



ELEMENTY I MATERIAŁY STOSOWANE DO BUDOWY ELEKTRYCZNYCH SILNIKÓW NAPEŁDOWYCH POJAZDÓW

SPOSOBY WYTWARZANIA (UZYSKIWANIA) MAGNESÓW TRWAŁYCH:

- Ze źródeł naturalnych, rudy (magnetyt, piryt) zawierające ferromagnetyki namagnesowane w polu magnetycznym Ziemi
- Wytwarzanie przez namagnesowanie ciał ferromagnetycznych, charakteryzujących się dużą remanencją B_r (stale magnetycznie twarde – z domieszkami wolframu, kobaltu, chromu) w specjalnych zwojnicach (magneśnicach) zasilanych prądem stałym o wymaganym natężeniu
- Wytwarzanie stopów odpowiednio dobranych czystych pierwiastków ziem rzadkich (neodym Nd, samar Sm, protaktyn Pr, kobalt Co lub bardziej tradycyjnych: nikiel Ni, platyna Pt, mangan Mn, aluminium Al) albo spieków sproszkowanych komponentów zawierających te pierwiastki, dokonywanych w podwyższonej temperaturze



STEROWANIE PRACĄ SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH STOSOWANYCH W NAPĘDZIE POJAZDU

Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi (PMSM lub SM) zasilane są napięciem przemiennym o zmiennej częstotliwości za pomocą układu sterującego (inne nazwy sterownika to falownik, komutator elektroniczny lub mikroprocesorowo sterowany przekształtnik energoelektroniczny). Nie wymagają czujnika do pomiaru kąta położenia wirnika w celu sterowania, ponieważ prędkość obrotowa silnika regulowana jest przez zmianę częstotliwości napięcia zasilającego.

Natomiast w silnikach BLDCM i BLSM częstotliwość prądu w uzwojeniu twornika jest wymuszona prędkością wirowania wirnika, a nie częstotliwością napięcia. Stosowane są czujniki kąta położenia wirnika, ponieważ w tych silnikach jest to wielkość sterowana. Prędkość regulowana jest przez zmianę wartości napięcia. Silniki zasilane są napięciem stałym za pośrednictwem układu sterującego, a kształt rozkładu indukcji magnetycznej w szczelinie maszyny może być trapezowy (w silnikach BLDCM) lub sinusoidalny (w silnikach BLSM).



STEROWANIE PRACĄ SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH STOSOWANYCH W NAPĘDZIE POJAZDU

Rozkład trapezowy indukcji uzyskuje się, jeżeli magnesy trwałe są umieszczone na powierzchni jarzma wirnika. W takim przypadku napięcie rotacji, indukowane w uzwojeniu twornika, ma także przebieg trapezowy. Dobre właściwości napędowe silnika z trapezowym rozkładem indukcji uzyskuje się wówczas, gdy przebieg prądu w pasmach uzwojenia jest także trapezowy. Taki przebieg prądu zapewniają klucze energoelektroniczne w sterowniku, złożone z tranzystorów i diod zabezpieczających.

Silnik, który jest **sterowany sinusoidalnie** powinien mieć zabudowane magnesy trwałe wewnątrz jarzma wirnika. Taka konstrukcja zabezpiecza magnesy przed rozmagnesowaniem siłą magnetomotoryczną twornika. Wadą tego rozwiązania jest większy strumień rozproszenia magnesów trwałych, gdyż magnes jest częściowo bocznikowany przez jarzmo wirnika. Sterowanie kluczami sterownika jest realizowane przez modulację szerokości impulsów.



STEROWANIE PRACĄ SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH STOSOWANYCH W NAPĘDZIE POJAZDU

Silnik sterowany trapezowo powinien pracować w zakresie prędkości obrotowej od zera do wartości znamionowej, wzrost prędkości jest realizowany przez zwiększanie napięcia zasilającego. Natomiast **silnik sterowany sinusoidalnie** może dodatkowo pracować w zakresie prędkości obrotowej od znamionowej do wartości maksymalnej. Odbywa się to przy stałym napięciu zasilania i przy osłabianiu głównego strumienia magnetycznego w szczelinie powietrznej maszyny (przez oddziaływanie siły magnetomotorycznej wytwarzanej za pomocą prądu twornika).

Nazywane jest to **procesem odwzbudzenia lub odmagnesowywania** i wymaga zastosowania składowej odmagnesowującej w wektorze prądu twornika o odpowiednio dobranej wartości, przeciwnie skierowanej do wektora strumienia magnesów trwałych (w czasie normalnej pracy silnika składowa ta jest równa zero).

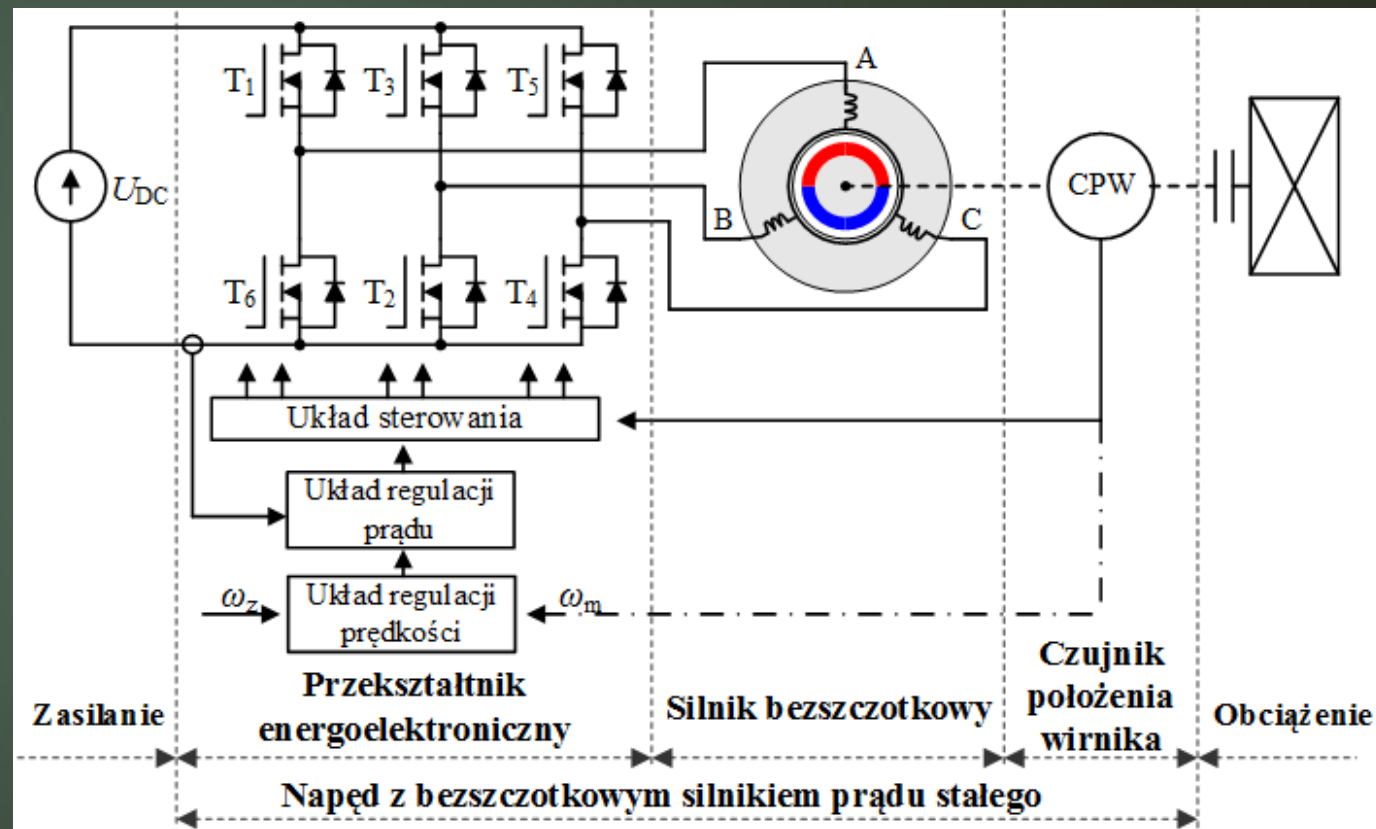
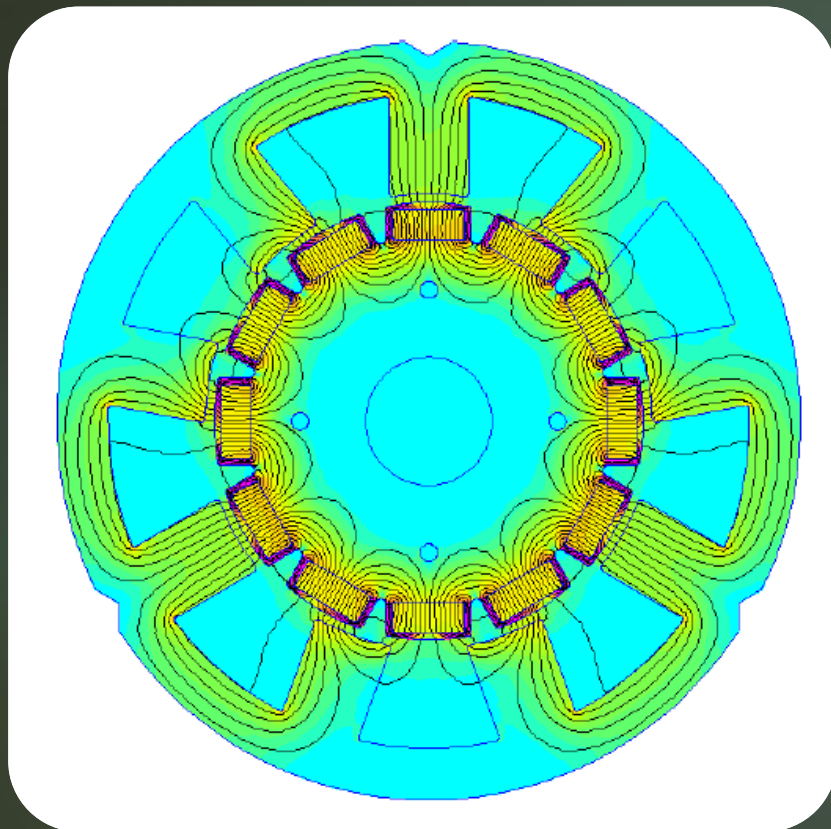


STEROWANIE PRACĄ SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH STOSOWANYCH W NAPĘDZIE POJAZDU

Odmagnesowywanie pozwala ograniczyć wartość siły elektromotorycznej SEM (napięcia), indukowanej w uzwojeniu twornika. Jednak przy gwałtownym zmniejszeniu osłabiania pola magnetycznego magnesów, może dojść do indukcji takiego napięcia w uzwojeniu twornika, które będzie niebezpieczne dla układu sterującego. Poza tym napięcie indukowane przez pole magnetyczne magnesów trwałych w uzwojeniu twornika jest przeciwnie skierowane do napięcia zasilającego i w efekcie może spowodować zmniejszenie prądu i momentu silnika.

Zakres prędkości wirnika od zera do wartości znamionowej odpowiada pracy silnika elektrycznego przy stałym momencie obrotowym, natomiast zakres prędkości wirnika od znamionowej do wartości maksymalnej odpowiada pracy silnika przy stałej mocy (zgodnie z charakterystyką silnika elektrycznego).

SILNIK Z MAGNESAMI TRWAŁYMI – ROZKŁAD POLA MAGNETYCZNEGO I OGÓLNY SCHEMAT UKŁADU STEROWANIA



ODZYSK ENERGII W POJAZDACH HYBRYDOWYCH I ELEKTRYCZNYCH



Podczas hamowania pojazdu silnikiem i za pomocą hamulców hydraulicznych energia mechaniczna może być przetworzona na energię elektryczną. W tej fazie jazdy silnik elektryczny pracuje w charakterze prądnicy i ładuje wysokonapięciowe akumulatory trakcyjne. W uzwojeniu twornika, odłączonym od zasilania, indukuje się napięcie, a prąd płynący przez to uzwojenie wytwarza pole magnetyczne przeciwdziałające polu magnetycznemu magnesów trwałych. W ten sposób powstaje moment hamujący wykorzystywany do zmniejszenia prędkości pojazdu.

Sterownik na podstawie sygnału z czujnika siły nacisku dźwigni hamulca oraz możliwości akumulatorów reguluje moc prądnicy i odzyskiwaną energię, a w przypadku intensywniejszego hamowania uruchamia także hamulce hydrauliczne pojazdu.



WNIOSKI

- W pojazdach hybrydowych i elektrycznych stosowane są głównie silniki napędowe synchroniczne i bezszczotkowe, w których źródłem pola magnetycznego są magnesy trwałe umieszczone w wirniku, a nieruchome wielofazowe uzwojenie twornika zasilane jest przez akumulator wysokonapięciowy, za pośrednictwem układu sterującego, który zapewnia odpowiedni moment, moc i prędkość obrotową silnika oraz rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie maszyny.
- Charakterystyka naturalna silnika elektrycznego pozwala na uzyskanie maksymalnego i stałego momentu w czasie rozpędzania pojazdu, a następnie maksymalnej i stałej mocy podczas jazdy z większymi prędkościami. Dlatego w tego rodzaju napędzie nie musi być stosowana skomplikowana i precyzyjna skrzynia biegów, co jest wymagane przy zastosowaniu silnika spalinowego.



WNIOSKI

- Silnik elektryczny stosowany w napędzie pojazdu charakteryzuje się większą sprawnością i trwałością w porównaniu z silnikiem spalinowym. Poza tym nie wytwarza substancji toksycznych, ma mniej skomplikowany system sterowania i może pracować w charakterze prądnicy z częściowym odzyskiem energii.
- Do budowy silników elektrycznych stosowanych w pojazdach używane są wysokiej klasy materiały i elementy, które są kosztowne w produkcji lub wydobyciu (szczególnie magnesy trwałe).
- Zasilanie silnika elektrycznego w pojeździe wymaga kosztownych wysokonapięciowych akumulatorów, które zwiększają znacznie masę pojazdu, muszą być doładowywane z sieci elektrycznej, a po utracie wymaganej sprawności poddawane recyklingowi.



LITERATURA

1. Będkowski B., Dukalski P. i inni: Badania prototypowego silnika elektrycznego do zabudowy w kołach samochodu. *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* nr 2/2019 (122).
2. Bogusz J.: Podstawy sterowania silnikiem BLDC. *Elektronika Praktyczna* nr 11/2015. Wydawnictwo AVT-Korporacja Sp. z o.o. Warszawa 2015.
3. Domoracki A., Krykowski K.: Silniki BLDC – klasyczne metody sterowania. *Elektronika Praktyczna* nr 11/2015. Wydawnictwo AVT-Korporacja Sp. z o.o. Warszawa 2015.
4. Glinka T.: *Maszyny elektryczne i transformatory*. Wydawnictwo Naukowe PWN SA. Warszawa 2018.
5. Glinka T.: *Maszyny elektryczne wzbudzane magnesami trwałymi*. Wydawnictwo Naukowe PWN SA. Warszawa 2018.
6. Król E., Wolnik T.: Silniki PMSM do zastosowań trakcyjnych – właściwości układu zasilania ograniczające parametry silnika. *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* nr 2/2021 (126).



LITERATURA

7. Krykowski K.: Silnik PMLBDC w napędzie elektrycznym – analiza, właściwości i modelowanie. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2011.
8. Schmidt T.: Pojazdy hybrydowe i elektryczne w praktyce warsztatowej: budowa, działanie, podstawy obsługi. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności. Warszawa 2020.
9. Zawirski K.: Sterowanie silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 2005.
10. Strona internetowa auto-elektryczne.pl
11. Strona internetowa emark.com.pl
12. Strona internetowa falowniki.edu.pl
13. Strona internetowa faulhaber.com/en/home/
14. Strona internetowa komel.com.pl

DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ !!!

Maszyny elektryczne w pojazdach hybrydowych i elektrycznych

POLITECHNIKA LUBELSKA
Katedra Pojazdów Samochodowych
dr inż. Marek Adamiec

Projekt „Politechnika Lubelska – Regionalna Inicjatywa Doskonałości”
– finansowany ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego



Ministerstwo
Nauki
i Szkolnictwa
Wyższego

