

18.2

Silniki prądu stałego

ZAGADNIENIA

- Budowa silnika prądu stałego
- Parametry na tabliczce znamionowej
- Siła elektromotoryczna indukowana w tworniku
- Moment elektromagnetyczny silnika prądu stałego
- Rodzaje silników prądu stałego
- Zastosowanie silników prądu stałego

Budowa maszyny prądu stałego (rys. 18.13)

W maszynach prądu stałego obowiązuje zasada odwracalności, tzn. mogą pracować jako silnik i prądnica. Obecnie powszechnie stosowane są silniki prądu stałego. Związane jest to z możliwością płynnej regulacji prędkości obrotowej oraz wytwarzaniem dużego momentu rozruchowego (szczególnie w silnikach szeregowych). Silniki prądu stałego produkowane są w szerokim zakresie mocy (od kilku watów do kilkunastu megawatów) i znajdują zastosowanie m.in. w napędach lokomotyw, maszyn wyciągowych oraz w automatyce. Z kolei prądnice prądu stałego są obecnie coraz rzadziej stosowane ze względu na większe wykorzystanie bardziej niezawodnych przekształtników energoelektronicznych DC/DC. W budowie silnika prądu stałego można wyróżnić kilka podstawowych części (rys. 18.13).

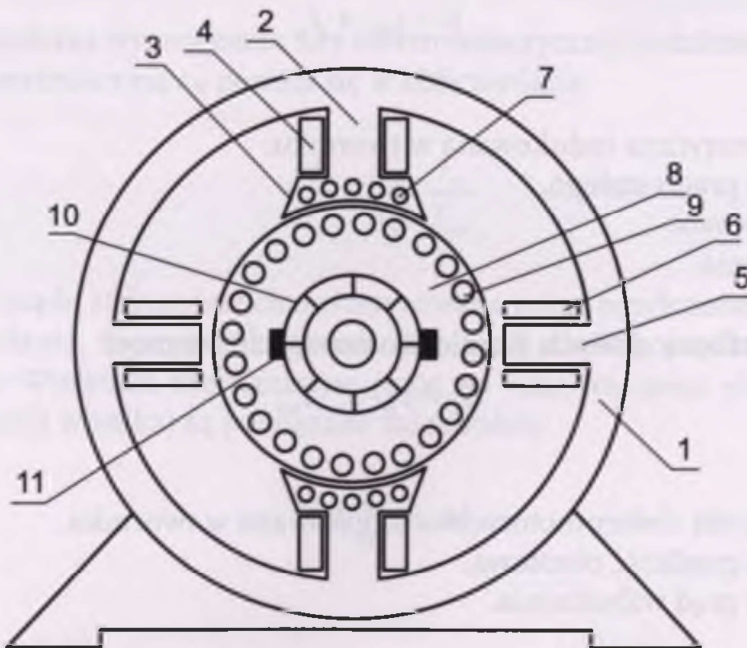
- 1. Rdzeń magnetyczny** składa się z dwóch głównych części: stojana i wirnika. Stojan to zwykle lite jarzmo oraz przymocowane do niego bieguny główne i komutacyjne. Bieguny główne wraz z nabiegunnikami są wykonane z blach, co zmniejsza straty mocy z powodu prądów wirowych. Bieguny komutacyjne wraz z uzwojeniami komutacyjnymi tworzą elektromagnes, których zadaniem jest poprawa komutacji w osi szczotek. Rdzeń wirnika (twornika) ze względu na prądy wirowe wykonuje się z blach.
- 2. Uzwojenia** można podzielić na: wzbudzenia, twornika, komutacyjne i kompensacyjne. Znajomość oznaczeń początków i końców uzwojeń silników prądu stałego umożliwia właściwe podłączenie maszyny do sieci zasilającej oraz zminimalizowanie niekorzystnych zjawisk, zwłaszcza oddziaływania twornika i komutacji. Podstawowe uzwojenia silników prądu stałego to uzwojenia twornika (wirnika) oraz uzwojenie wzbudzenia (stojana). W silnikach mniejszych mocy uzwojenie wzbudzenia może być zastąpione magnesami trwałymi. Ważną rolę odgrywają (szczególnie w maszynach dużych mocy) uzwojenie komutacyjne – obniżające indukcję magnetyczną w osi szczotek, co umożliwia zmniejszenie iskrzenia pod szczotkami, oraz uzwojenie kompensacyjne minimalizujące oddziaływanie twornika polegające na obniżeniu strumienia głównego w maszynie. Końcówki uzwojeń są wyprowadzone do tabliczki zaciskowej i opisane zgodnie

z oznaczeniami podanymi w tabeli 18.2. Niektóre uzwojenia są połączone wewnątrz maszyny, więc na tabliczce zaciskowej może znajdować się tylko po jednym zacisku uzwojeń, np. twornika i komutacyjnego (A1–B2).

Tabela 18.2. Oznaczenia zacisków maszyny prądu stałego

Rodzaj uzwojenia	Oznaczenie zacisków
uzwojenie twornika	A1–A2
uzwojenie komutacyjne	B1–B2
uzwojenie kompensacyjne	C1–C2
uzwojenie wzbudzenia szeregowo	D1–D2
uzwojenie wzbudzenia bocznikowe	E1–E2
uzwojenie wzbudzenia obce	F1–F2
uzwojenie pomocnicze w osi wzdłużnej	H1–H2
uzwojenie pomocnicze w osi poprzecznej	I1–I2

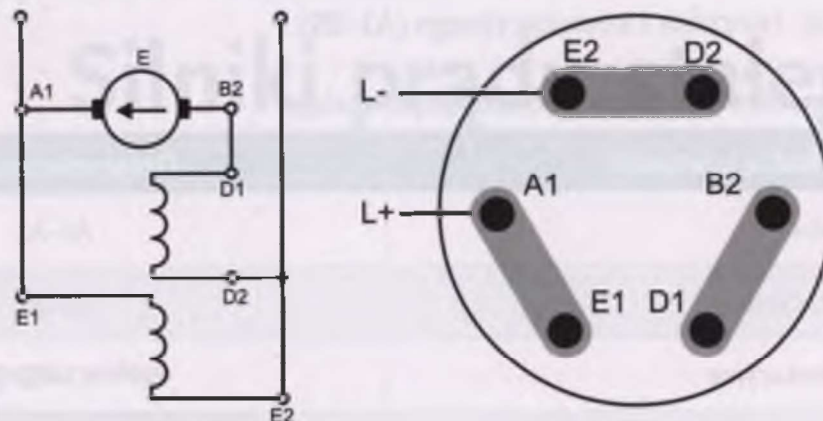
3. Komutator składa się z wycinków miedzianych, przedzielonych warstwami izolacyjnymi. Do każdego wycinka jest doprowadzony punkt uzwojenia twornika zasilanego ze źródła dzięki szczotkom grafitowym umieszczonym na komutatorze.



Rys. 18.13. Przekrój maszyny prądu stałego:

1 – jarzmo stojana, 2 – biegun główny, 3 – nabiegunniki, 4 – uzwojenie wzbudzenia, 5 – biegun komutacyjny, 6 – uzwojenie biegunów komutacyjnych, 7 – uzwojenie kompensacyjne, 8 – twornik, 9 – uzwojenie twornika, 10 – komutator, 11 – szczotki

PRZYKŁAD 5.



Rys. 18.14. Schemat połączeń oraz przykładowy widok tabliczki zaciskowej maszyny prądu stałego

Właściwości silników prądu stałego

Przepływ prądu wzbudzenia powoduje powstanie w maszynie prądu stałego pola magnetycznego. Jeżeli uzwojenie twornika (wirnika) umieszczone w tym polu obraca się, to w jego bokach indukuje się siła elektromotoryczna. Pojawienie się siły elektromotorycznej związane jest z występowaniem zjawiska indukcji elektromagnetycznej rotacji, czyli indukowania się napięcia w poruszającym się obwodzie umieszczonym w stałym polu magnetycznym. Wartość indukowanej siły elektromotorycznej zależy od prędkości obrotowej i strumienia magnetycznego, lecz przy założeniu liniowej charakterystyki magnesowania przyjmuje się, że jest zależna od prędkości obrotowej i prądu wzbudzenia:

$$E = c_E \cdot n \cdot I_w \quad (18.14),$$

gdzie:

E – siła elektromotoryczna indukowana w tworniku,

c_E – stała maszyny prądu stałego,

n – prędkość obrotowa,

I_w – prąd wzbudzenia.

Dla warunków znamionowych siła elektromotoryczna wynosi:

$$E_n = c_E \cdot n_n \cdot I_{wn} \quad (18.15),$$

gdzie:

E_n – znamionowa siła elektromotoryczna indukowana w tworniku,

n_n – znamionowa prędkość obrotowa,

I_{wn} – znamionowy prąd wzbudzenia.

Stała c_E jest stałą konstrukcyjną zależną m.in. od wymiarów maszyny. Znamionową siłę elektromotoryczną wyznacza się z równań Kirchhoffa dla warunków znamionowych (na podstawie schematów zastępczych), a przy prędkości i prądzie wzbudzenia różnych od wartości znamionowych siłę elektromotoryczną wyznacza się z zależności:

$$\frac{E}{E_n} = \frac{n}{n_n} \cdot \frac{I_w}{I_{wn}} \quad (18.16).$$

Moment elektromagnetyczny wytwarzany w silnikach prądu stałego powstaje w wyniku oddziaływania dynamicznego pola magnetycznego na przewodnik, przez który płynie prąd. W tym przypadku oddziaływaniu jest poddane uzwojenie twornika. Przy założeniu liniowej charakterystyki magnesowania moment elektromagnetyczny zależy od prądu twornika i prądu wzbudzenia maszyny:

$$M = c_M \cdot I_t \cdot I_w \quad (18.17),$$

gdzie:

- M – moment elektromagnetyczny,
- c_M – stała silnika prądu stałego,
- I_t – prąd twornika,
- I_w – prąd wzbudzenia.

Dla warunków znamionowych moment elektromagnetyczny wynosi:

$$M_n = c_M \cdot I_{tn} \cdot I_{wn} \quad (18.18),$$

gdzie:

- M_n – znamionowy moment elektromagnetyczny,
- I_{tn} – znamionowy prąd twornika,
- I_{wn} – znamionowy prąd wzbudzenia.

Podobnie jak podczas wyznaczania siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu twornika, stałą konstrukcyjną c_M pomija się w obliczeniach:

$$\frac{M}{M_n} = \frac{I_t}{I_{tn}} \cdot \frac{I_w}{I_{wn}} \quad (18.19).$$

Praca silników prądu stałego jest charakteryzowana przez przyłożone do zacisków twornika napięcie zasilania, moment obciążenia (lub prąd silnika), prędkość obrotową oraz prąd wzbudzenia. Wielkości mechaniczne (moc na wale, moment elektromagnetyczny i prędkość wirowania wirnika) są powiązane zależnością:

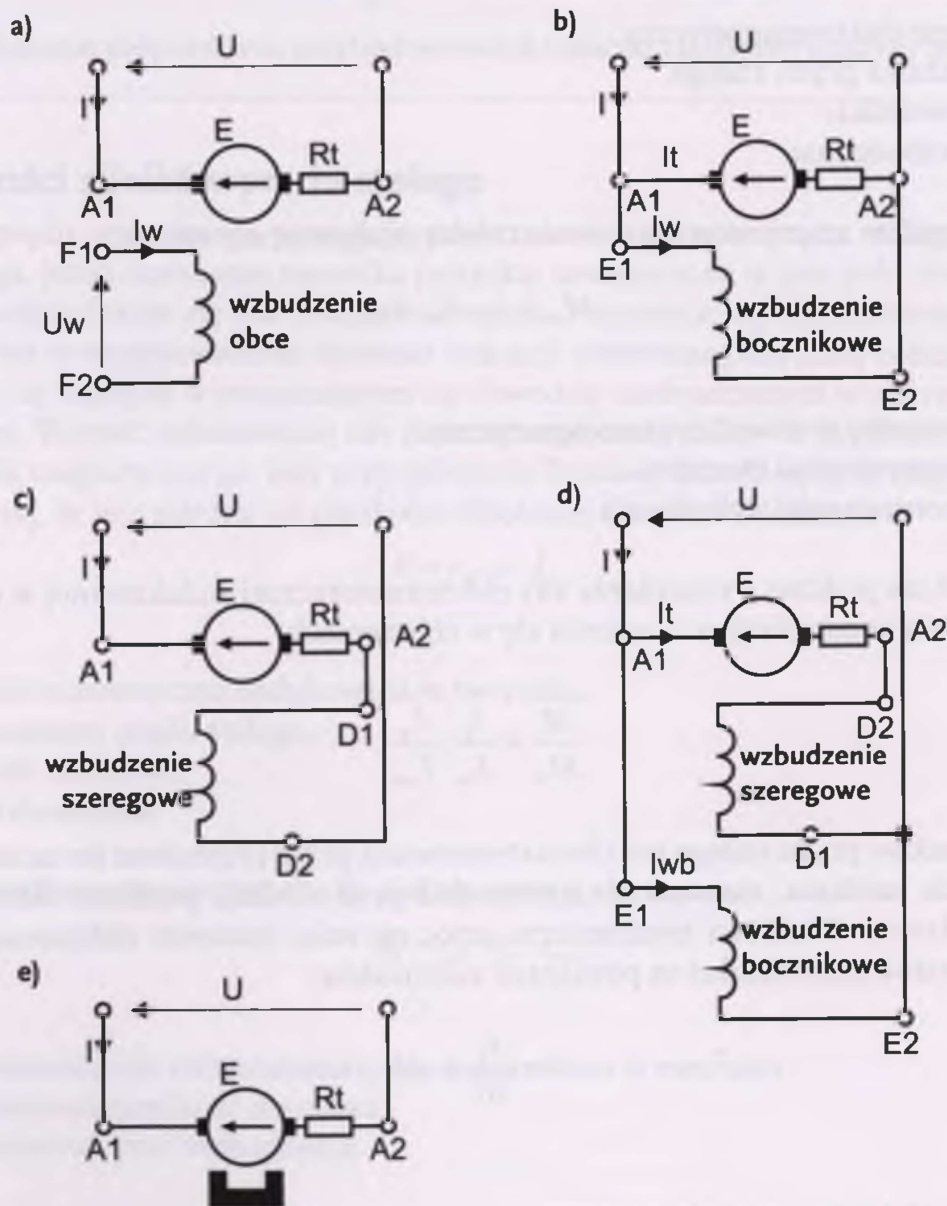
$$P = \frac{\pi}{30} \cdot n \cdot M \quad (18.20),$$

gdzie:

- P – moc mechaniczna na wale maszyny,
- n – prędkość obrotowa,
- M – moment elektromagnetyczny.

Ze względu na połączenie uzwojeń twornika i wzbudzenia oraz sposób wytwarzania pola magnetycznego wyróżnia się następujące silniki prądu stałego:

- silniki obcowzbudne (rys. 18.15a) wykorzystywane w napędach o dużym zakresie nastawiania prędkości obrotowej;
- silniki bocznikowe (rys. 18.15b) wykorzystywane w napędach o małym zakresie nastawiania prędkości obrotowej;
- silniki szeregowy (rys. 18.15c) wykorzystywane w napędach pojazdów, dźwignic oraz urządzeń wymagających dużego momentu rozruchowego (trakcja elektryczna);
- silniki szeregowo-bocznikowe (rys. 18.15d) wykorzystywane w napędach urządzeń o dużym momencie bezwładności i dużych obciążeniach uderowych wymagających dużego momentu rozruchowego oraz dużego zakresu regulacji prędkości obrotowej.



Rys. 18.15. Schematy połączeń silników prądu stałego: a) obcowzbudny, b) bocznikowy, c) szeregowy, d) szeregowo-bocznikowy, e) z magnesami trwałymi

Ponadto w wielu urządzeniach mechatronicznych stosuje się silniki z magnesami trwałymi (rys. 18.15e). Silniki te są budowane na zakresy mniejszych mocy (do około 1 kW). Jako elementy wykonawcze w automatyce przemysłowej wykorzystuje się zarówno silniki wirujące, jak i liniowe z magnesami trwałymi.

PRZYKŁAD 6.

W celu zapewnienia stałego strumienia magnetycznego oraz zasilania tylko uzwojenia twornika w maszynach małych mocy uzwojenie wzbudzenia jest zastąpione magnesami trwałymi.



Rys. 18.16. Silnik prądu stałego z magnesami trwałymi

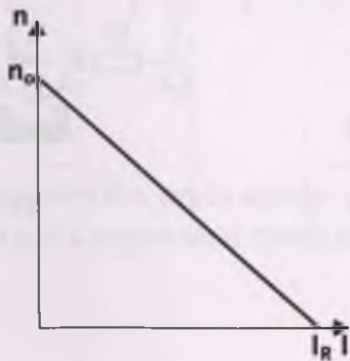
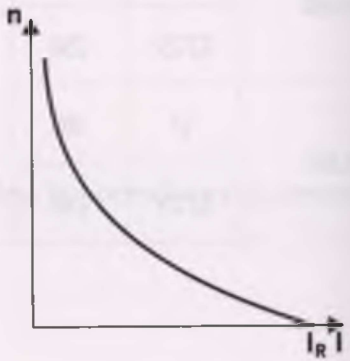
Type	S	P _n [W]	V [V]	I [A]	IC	FF	M _n [Nm]	n _m [min ⁻¹]	IP	Kg											
EC180.120	S1	180	12	21,5	F	1	0,57	3000	IP44	3,4											
	S2 25'	250		30			0,8														
EC180.240	S1	180	24	10,8			F				1	0,57	3000	IP44	3,4						
	S2 25'	250		15								0,8									
EC180.24E	S1	180		24								10,8				F	1	0,57	3000	IP44	3,4
	S2 25'	250										15						0,8			

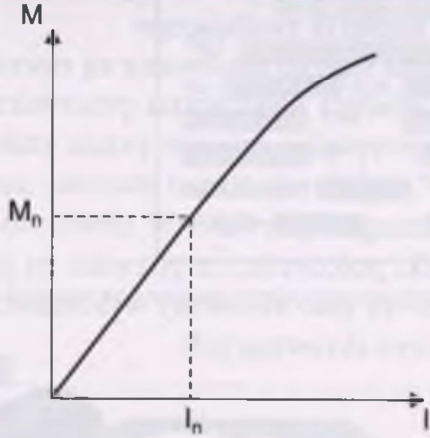
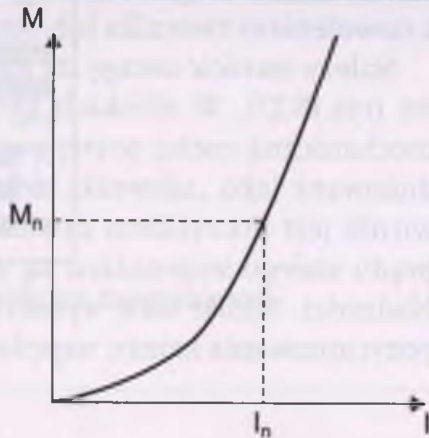
Z poszczególnych kolumn karty katalogowej dla silnika EC180.240 odczytano następujące parametry:

- typ EC180.240;
- napięcie zasilania $U_n = 24 \text{ V}$;
- moc znamionowa $P_n = 180 \text{ W}$ dla pracy ciągłej S1 oraz $P_n = 250 \text{ W}$ dla pracy dorywczej S2;
- prąd znamionowy $I_n = 10,8 \text{ A}$ dla pracy ciągłej S1 oraz $I_n = 15 \text{ A}$ dla pracy dorywczej S2;
- moment znamionowy $M_n = 0,57 \text{ Nm}$ dla pracy ciągłej S1 oraz $M_n = 0,8 \text{ Nm}$ dla pracy dorywczej S2;
- prędkość znamionowa $n_n = 3000 \text{ obr/min}$;
- klasa izolacji F;
- sposób zasilania – FF 1 (oznacza źródło napięcia stałego, producent dopuszcza również zasilanie z przekształtników energoelektronicznych);
- stopień ochrony obudowy IP44 (ochrona przed przedostaniem się ciał stałych o średnicy 1 mm i większych oraz rozbryzgiwaniem się wody na obudowę z dowolnego kierunku);
- masa 3,4 kg.

Właściwości silników prądu stałego w stanie ustalonym są określone przez ich charakterystyki mechaniczne $n = f(I)$ lub $n = f(M)$. Na podstawie schematów połączeń silników obcowzbudnego i szeregowego, można wyznaczyć charakterystyki mechaniczne tych silników. Równania opisujące charakterystyki oraz ich kształt przedstawiono w tabeli 18.3.

Tabela 18.3. Charakterystyki mechaniczne silników obcowzbudnego i szeregowego prądu stałego

	Silnik obcowzbudny	Silnik szeregowy
równania Kirchhoffa	$U = E + R_t \cdot I$ $I_t = I$	$U = E + (R_t + R_w) \cdot I$ $I_t = I_w = I$
siła elektromotoryczna	$E = c_E \cdot n \cdot I_w$	$E = c_E \cdot n \cdot I_w$
moment elektromagnetyczny	$M = c_M \cdot I_t \cdot I_w$	$M = c_M \cdot I^2$
równania opisujące charakterystykę mechaniczną	$n = \frac{U - R_t \cdot I}{c_E \cdot I_w}$	$n = \frac{U - (R_t + R_w) \cdot I}{c_E \cdot I}$
charakterystyka mechaniczna		

	Silnik obcowzbudny	Silnik szeregowy
charakterystyka momentu		
prąd rozruchowy	$I_R = \frac{U}{R_t}$	$I_R = \frac{U}{R_t + R_w}$
prędkość idealnego biegu jałowego	$n_0 = \frac{U}{c_E \cdot I_w}$	$n_0 \rightarrow \infty$

Z przedstawionych charakterystyk mechanicznych silników prądu stałego oraz zależności z tabeli 18.3 można wyciągnąć następujące wnioski:

- Charakterystyka silnika obcowzbudnego jest tzw. charakterystyką sztywną, tzn. w zakresie zmian prądu od zera do prądu znamionowego silnik dąży do utrzymania stałej prędkości przy zmianach obciążenia. Zmiana zwrotu momentu elektromagnetycznego, a tym samym zmiana kierunku wirowania wirnika, jest możliwa przez zmianę zwrotu prądu twornika, a więc przez zmianę biegunowości napięcia zasilającego uzwojenie twornika.
- Charakterystyka silnika szeregowego jest tzw. charakterystyką miękką, tzn. prędkość wirnika zmienia się przy zmianach obciążenia, a silnik nie może pracować bez obciążenia. Zmiana biegunowości napięcia zasilającego nie powoduje zmiany zwrotu momentu elektromagnetycznego. Aby zmienić kierunek wirowania wirnika, należy zmienić podłączenie zacisków jednego z uzwojeń – twornika lub wzbudzenia.

Silniki prądu stałego charakteryzują się dużymi prądami rozruchowymi przy zasilaniu napięciem znamionowym (prądy rozruchowe mogą być nawet kilkadziesiąt razy większe niż prądy znamionowe). Dąży się do ograniczania prądów rozruchowych w silnikach obcowzbudnych i bocznikowych przez włączenie szeregowo z uzwojeniem twornika dodatkowych rezystorów lub obniżenie napięcia zasilania. Silniki szeregowe są tak projektowane, aby mogły przewodzić duże prądy rozruchowe. Ma to na celu wytworzenie dużego momentu rozruchowego.

Regulacja prędkości obrotowej wirnika silnika prądu stałego polega na zmniejszaniu lub zwiększaniu prędkości w stosunku do prędkości znamionowej. Zwiększanie prędkości odbywa się przez odwzbudzenie maszyny (zmniejszanie prądu wzbudzenia), przy czym dla silników obcowzbudnych stosuje się kontrolowane zmniejszanie napięcia wzbudzenia, a dla silników szeregowych bocznikowanie uzwojenia wzbudzenia rezystancją zewnętrzną. Należy również pamiętać o tym, że obwód wzbudzenia silników obcowzbudnych nie może być zabezpieczony bezpiecznikami topikowymi, gdyż przerwanie obwodu wzbudzenia spowodowałoby silne odwzbudzenie i tzw. rozbieganie się maszyny (szybkie

przyśpieszenie wirnika prowadzące do uszkodzenia silnika). Zmniejszanie prędkości wirnika w silnikach prądu stałego przeprowadza się przez włączenie rezystancji szeregowo z uzwojeniem twornika lub obniżenie napięcia zasilającego.

Należy zwrócić uwagę, że silniki prądu stałego stosowane są również jako silniki liniowe (rys.18.17). W silnikach liniowych energia elektryczna przetwarzana jest na energię mechaniczną ruchu postępowego. W przypadku maszyn prądu stałego silniki te są produkowane jako „siłowniki elektryczne”, w których stojan stanowi uzwojony cylinder, zaś wirnik jest tłoczyskiem zawierającym magnesy trwałe. W chwili obecnej silniki liniowe prądu stałego wyposażane są w czujniki położenia, co pozwala na osiągnięcie dużej dokładności. Silniki takie wykorzystywane są jako elementy wykonawcze m.in. w układach pozycjonowania kamer, napędach maszyn skrawających.



Rys. 18.17. Przekrój silnika liniowego prądu stałego

Osobną grupę silników stanowią silniki uniwersalne. Pod względem budowy są zbliżone do silników prądu stałego, przy czym zasilane są ze źródła napięcia przemiennego (sieć 230V, 50Hz). Silniki uniwersalne mają uzwojenie wzbudzenia i uzwojenie twornika połączone szeregowo, a więc tak jak silniki szeregowo prądu stałego rozwijają duży moment rozruchowy. Silniki uniwersalne charakteryzują się małą masą w stosunku do jego mocy, co sprawiło, że znalazły powszechne zastosowanie w sprzęcie AGD i elektronarzędziach.

Zgodnie z normą PN-EN 60617-6:2004 – *Symbole graficzne stosowane w schematach* w tabeli 18.4 zamieszczono przykładowe symbole silników prądu stałego na schematach elektrycznych.

Tabliczka znamionowa maszyn prądu stałego (rys. 18.18, rys. 18.19)

Tabliczka znamionowa silników prądu stałego zawiera następujące dane:

- moc znamionową (dla silnika jest to moc mechaniczna na wale maszyny),
- napięcie znamionowe twornika,
- prąd znamionowy twornika,
- napięcie znamionowe wzbudzenia,
- prąd znamionowy wzbudzenia,
- prędkość znamionową,
- klasę izolacji,
- nazwę producenta, serię i rok produkcji.

PRZYKŁAD 7.

Silnik prądu stałego	
Typ	_____
Nr _____	Rok _____ IP _____
_____ kW	_____ rpm
_____ V	_____ A
wzbudzenie _____ V	_____ A
izolacja _____	_____ kg

Rys. 18.18. Przykładowe rozmieszczenie parametrów na tabliczce znamionowej

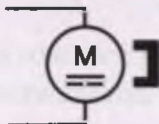
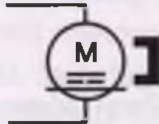
PRZYKŁAD 8.



Rys. 18.19. Silnik prądu stałego z magnesami trwałymi oraz tabliczka znamionowa

Tabela 18.4. Symbole silników prądu stałego

Rodzaj silnika	Symbol
silnik obcowzbudny	
silnik bocznikowy	
silnik szeregowy	
silnik szeregowo-bocznikowy	

Rodzaj silnika	Symbol
silnik z magnesami trwałymi	
silnik liniowy z magnesami trwałymi	

Typowe uszkodzenia silników prądu stałego pojawiające się w wyniku eksploatacji to:

a) mechaniczne:

- nadmierne iskrzenie wynikające ze złego stanu szczotek, zanieczyszczenia komutatora,
- nadmierne zużycie szczotek spowodowane zbyt dużym dociskiem, nierównomierną powierzchnią komutatora,
- luzy w łożyskach,

b) elektryczne:

- nadmierne iskrzenie wynikające z niewłaściwego ustawienia szczotek, zwarcie między zwojami uzwojenia twornika,
- nadmierne nagrzewanie się maszyny spowodowane zbyt dużym obciążeniem, nieodpowiednim chłodzeniem, zwarciami między zwojami w uzwojeniach twornika lub wzbudzenia, zwarciami między wycinkami komutatora,

c) izolacji:

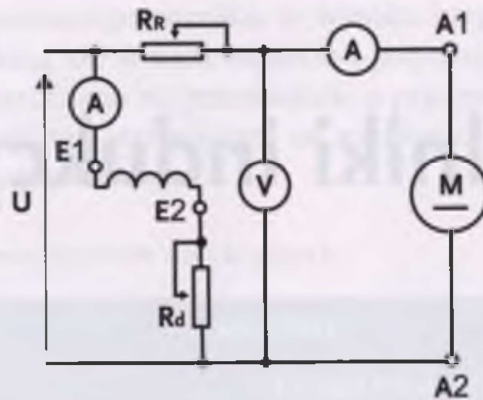
- przebicia izolacji uzwojeń wzbudzenia, twornika lub innych uzwojeń wynikające z procesu starzenia izolacji,
- uszkodzenie komutatora w wyniku zwarcie wycinków spowodowanych przebicciem izolacji między wycinkami.

SPRAWDŹ SWOJĄ WIEDZĘ

1. Z jakich podstawowych elementów składają się silniki prądu stałego?
2. Jak oznacza się poszczególne uzwojenia?
3. Jakie parametry można odczytać z tabliczki znamionowej?
4. Od czego zależy moment elektromagnetyczny silnika prądu stałego?
5. Jakimi wyróżniamy rodzaje silników prądu stałego?

SPRAWDŹ SWOJE UMIEJĘTNOŚCI

1. Odczytaj oznaczenia zacisków i określ schemat połączenia uzwojeń dostępnej w pracowni maszyny prądu stałego.
2. Znajdź informacje na temat przebiegu procesu komutacji w uzwojeniach twornika silników prądu stałego.
3. Narysuj układ sterowania stycznikowo-przełącznikowego silnika szeregowego umożliwiającą zmianę kierunku wirowania wirnika.
4. Na rys. 18.20 przedstawiono schemat połączeń silnika bocznikowego prądu stałego do wyznaczenia charakterystyk biegu jałowego.



Rys. 18.20. Schemat pomiarowy do zadania 4

5. Wykonaj następujące czynności (wszystkie działania podejmuj za zgodą i pod nadzorem nauczyciela):
- dla dostępnego w pracowni mechatronicznej silnika odczytaj parametry znamionowe,
 - wykonaj miernikiem uniwersalnym pomiar rezystancji uzwojeń twornika i wzbudzenia,
 - zmontuj układ zgodnie ze schematem,
 - dokonaj rozruchu silnika,
 - zmień kierunek wirowania wirnika.