

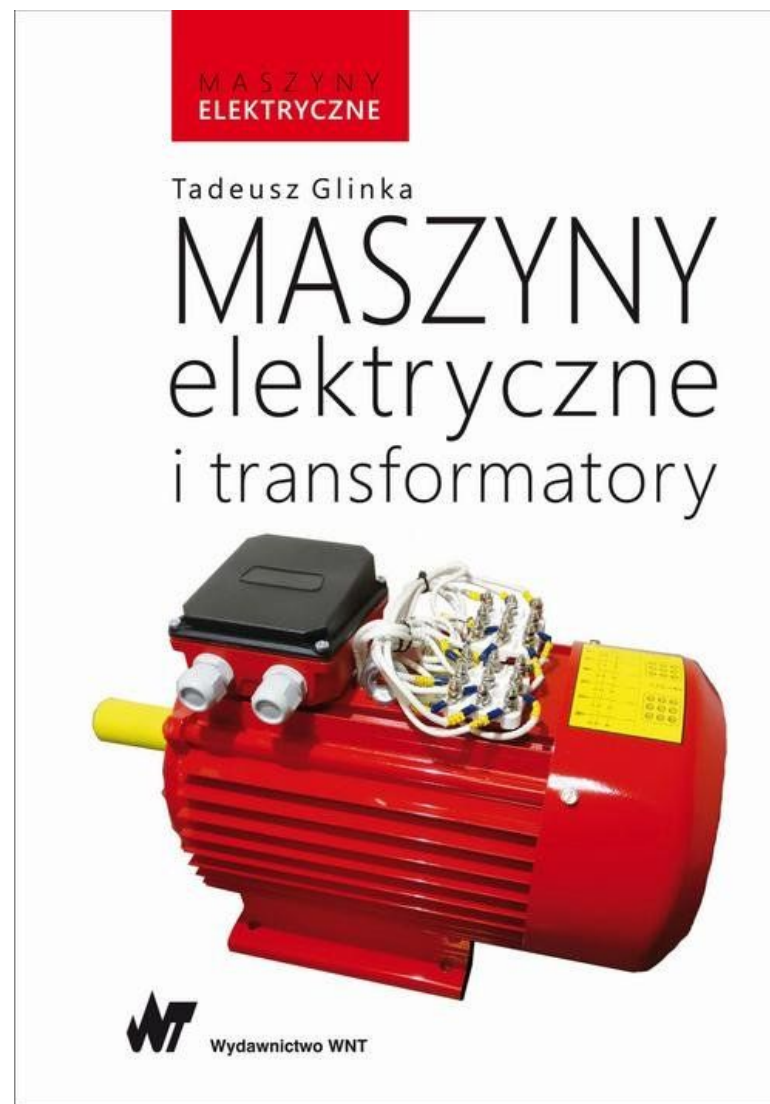
---

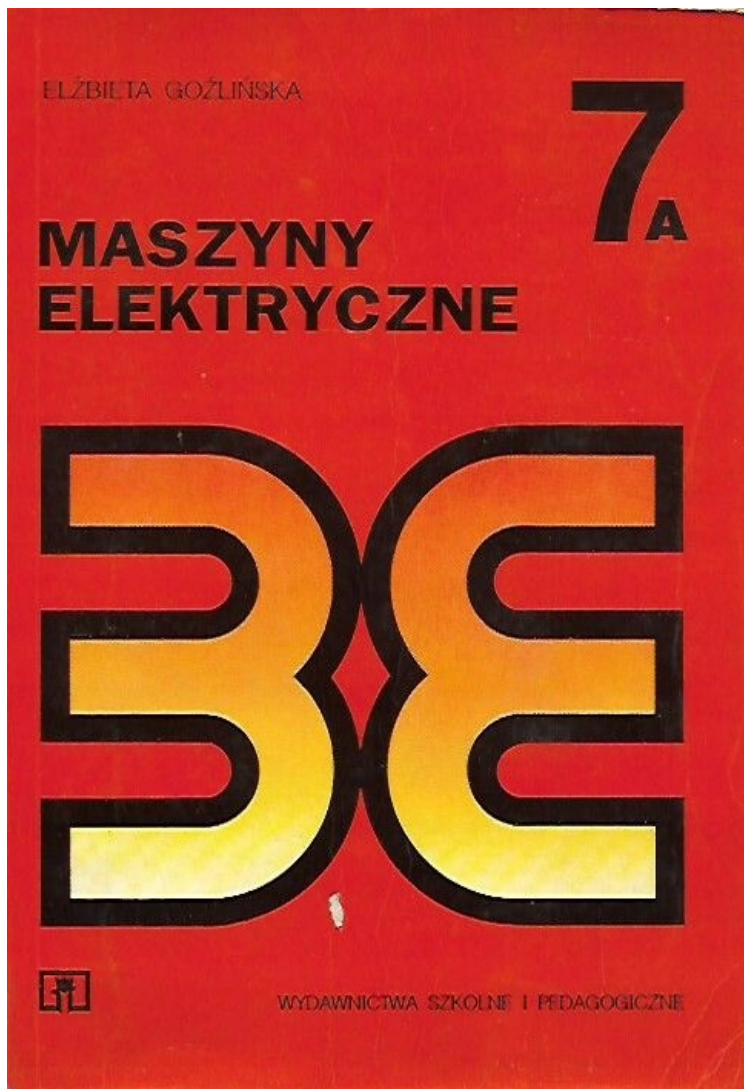
# **MASZYNY ELEKTRYCZNE MASZYNY INDUKCYJNE**

## **część 1**

# ZAKRES WYKŁADU

1. Literatura
2. Podstawowe parametry maszyn elektrycznych
3. Rodzaje pracy maszyn elektrycznych
4. Stopnie ochrony zapewnianej przez obudowy maszyn elektrycznych
5. Warunki doboru silników elektrycznych
6. Nagrzewanie się maszyn elektrycznych
7. Chłodzenie maszyn elektrycznych
8. Podział maszyn indukcyjnych
9. Budowa maszyn indukcyjnych
10. Zasada działania silnika indukcyjnego
11. Rodzaje pracy maszyny indukcyjnej
12. Zastosowanie maszyn indukcyjnych





MASZYNY  
ELEKTRYCZNE

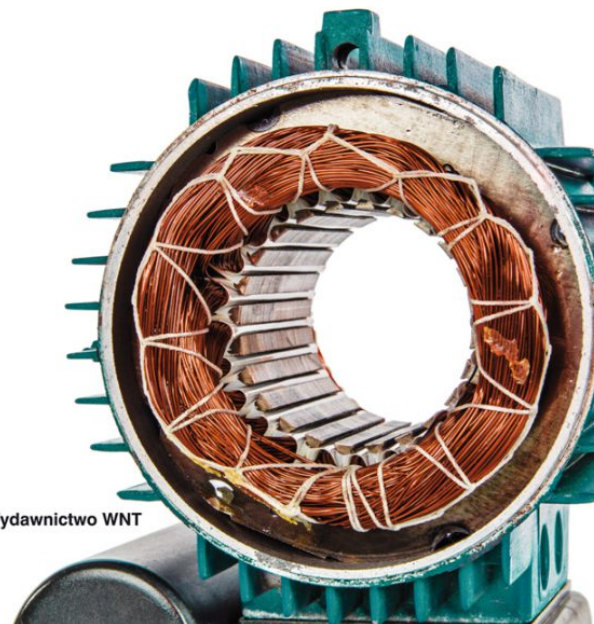
Tadeusz Glinka

# MASZYNY elektryczne

WZBUDZANE MAGNESAMI TRWAŁYMI



Wydawnictwo WNT





W 1831 r. **M. Faraday** oraz **Joseph Henry**, niezależnie od siebie, odkryli że przesuwanie magnesu w pobliżu spiralnego przewodu z prądem powoduje przepływ prądu w przewodzie. Ich prace dały początek zastosowaniu zjawisk indukcji elektromagnetycznej. Na tej podstawie skonstruowano generator elektryczny oraz silnik elektryczny (**H. Lenz**). **Faraday** wprowadził pojęcia pola elektrycznego i magnetycznego.

Od 1888 r. **Michał Doliwo – Dobrowolski**, twórca systemu elektrycznego trójfazowego prądu przemiennego, pracował nad zagadnieniami wirującego pola magnetycznego. Był konstruktorem pierwszej w świecie trójfazowej prądnicy prądu przemiennego, trójfazowego silnika indukcyjnego z wirnikiem klatkowym oraz trójfazowego transformatora.

Ten czas pionierskich odkryć i pierwszych konstrukcji urządzeń, uznano za początek rozwoju budowy maszyn elektrycznych.

**Maszyna elektryczna jest urządzeniem elektromechanicznym przetwarzającym, za pośrednictwem pola magnetycznego, energię elektryczną w energię mechaniczną lub odwrotnie, z udziałem ruchu.**

Przemiany energii elektrycznej na energię elektryczną o innych parametrach, bez udziału ruchu, zachodzą np. w transformatorach i przetwornicach elektrycznych. W transformatorach jak i w maszynach elektrycznych zachodzą zjawiska wspólne, związane z indukcją elektromagnetyczną.

Najliczniejszą grupę maszyn elektrycznych stanowią silniki elektryczne, szeroko stosowane w przemyśle, komunikacji i transporcie, rolnictwie, a także w napędach urządzeń gospodarstwa domowego. Silniki elektryczne prądu przemiennego są obecnie największą grupą odbiorników energii elektrycznej w świecie.

Ze względu na rodzaj prądu i zasadę działania maszyny elektryczne dzieli się na:

1. maszyny prądu przemiennego:
  - a) maszyny synchroniczne,
  - b) maszyny indukcyjne (asynchroniczne);
    - jednofazowe,
    - trójfazowe,
  - c) maszyny komutatorowe prądu przemiennego:
    - jednofazowe,
    - wielofazowe.
2. maszyny prądu stałego.

W zależności od rodzaju energii przetwarzanej, każda maszyna elektryczna może pracować jako prądnica lub silnik (bez zasadniczych zmian konstrukcyjnych).

Z tego względu rozróżnia się:

1. **Prądnice** – przetwarzające energię mechaniczną na elektryczną;
2. **Silniki** – przetwarzające energię elektryczną na mechaniczną;
3. **Przetwornice** – przetwarzają energię elektryczną na taką samą energię lecz o innych parametrach, np. przetwornice: prądu, napięcia, częstotliwości.

## Podstawowe parametry maszyn elektrycznych

Każdą maszynę elektryczną charakteryzują znamionowe wartości wielkości elektrycznych i mechanicznych, do których należą: moc, napięcie, prąd, prędkość obrotowa i inne. Ustalone przez wytwórcę dane znamionowe odnoszą do pracy maszyny w określonych warunkach klimatycznych, tj. w miejscu zainstalowania położonym na powierzchni ziemi na wysokości do 1000 m n.p.m., gdzie temperatura otoczenia nie przekracza 40 °C.

Jeżeli maszyna pracuje w temperaturze wyższej niż 40 °C, to obciążenie maszyny powinno być odpowiednio mniejsze niż moc znamionowa. W maszynach przeznaczonych do pracy na wysokości ponad 1000 m n.p.m. dopuszczalne przyrosty temperatury powinny być przyjmowane zgodnie z PN-EN 60034-1:2011 Maszyny elektryczne wirujące — Część 1: Dane znamionowe i parametry.

Do znamionowych wielkości elektrycznych charakteryzujących każdą maszynę elektryczną należą:

**1) Napięcie znamionowe  $U_N$ , w V, jest to:**

- a) wartość skuteczna napięcia przemiennego międzyfazowego dla maszyn trójfazowych
- b) wartość napięcia stałego, dla maszyn prądu stałego.

Napięcia znamionowe  $U_N$  maszyn elektrycznych zostały określone w PN-EN 60038-2012 Napięcia znormalizowane.

Zalecane napięcia znamionowe maszyn i urządzeń elektrycznych:

- a) maszyn i urządzeń prądu stałego: 6, 12, 24, 36, 48, 60, 72, 96, 110, 220, 440 V.
- b) maszyn i urządzeń prądu przemiennego: 6, 12, 24, 48, 110, 120, 230, 400, 690, 1000, 3000, 6000.

Napięcia znamionowe prądnic są wyższe o około 5%;

**2) Prąd znamionowy ( $I_N$ )**, w A, jest to wartość skuteczna prądu przemiennego lub wartość prądu stałego pobieranego z sieci elektroenergetycznej przy obciążeniu maszyny mocą znamionową w stanie nagrzanym (w przypadku prądnic i kompensatorów jego wartość wynika z wartości mocy i napięcia znamionowego).

**3) Moc znamionowa silnika ( $P_N$ )** – jest to moc mechaniczna oddawana przez silnik.

$$P_N = P_{in} \eta_N$$

Podstawowy wzór na moc znamionową silnika ma postać:

a) dla trójfazowych silników prądu przemiennego:

$$P_N = \sqrt{3} U_N I_N \cos\varphi_N \eta_N$$

b) dla jednofazowych silników prądu przemiennego:

$$P_N = U_N I_N \cos\varphi_N \eta_N$$

c) dla silników prądu stałego:

$$P_N = U_N I_N \eta_N$$

przy czym:

$P_N$  – moc znamionowa silnika, w W;

$P_{in}$  – moc pobierana przez silnik, w W;

$U_N$  – napięcie znamionowe, w V;

$I_N$  – prąd znamionowy, w A;

$\eta_N$  – znamionowa sprawność;

$\cos\varphi_N$  – znamionowy współczynnik mocy.

Moc znamionowa silnika jest to moc, którą maszyna może dostarczyć bez przekroczenia dopuszczalnej temperatury nagrzania. Jeżeli została podana moc znamionowa  $P_N$  przy określonej prędkości obrotowej  $n_N$ , to jest ona obowiązująca również przy określonym rodzaju pracy: ciągłej, dorywczej lub nieokreślonej.

#### 4) Moc znamionowa i prędkość obrotowa silników elektrycznych małej mocy:

a) moc znamionowa, w W:

1; 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40; 60; 90; 120; 180; 250; 370; 550; 750; 1100; 1500; 2200; 3000,

b) prędkość obrotowa, w obr/min.:

– silniki prądu przemiennego i uniwersalne:

375; 500; 600; 750; 1000; 1500; 3000; 4000; 6000; 10 000; 12 000; 15 000; 18 000; 20 000; 24 000,

– silniki prądu stałego:

400; 500; 600; 750; 1000; 2000; 3000; 4000; 5000; 6 000; 8 000; 10 000; 12 000; 15 000; 20 000; 22 000; 30 000; 40 000; 60 000,

Dla silników indukcyjnych podano prędkość obrotową synchroniczną.

**5) Moment znamionowy silnika ( $M_N$ ), w Nm (niutonometry). Jeżeli  $P_N$  jest w kW, a  $n_N$  w obr/min, to:**

$$M_N = 9550 \frac{P_N}{n_N}$$

## Rodzaje pracy maszyn elektrycznych

Zgodnie z PN-EN 60034-1:2009 Maszyny elektryczne wirujące — Część 1: Dane znamionowe i parametry, znamionowy rodzaj pracy maszyny jest określany w postaci symbolu składającego się z litery S i cyfr od 1 do 10.

Wyróżnia się następujące rodzaje pracy maszyn elektrycznych:

**S1 - praca ciągła;** praca ze stałym obciążeniem, trwającym do osiągnięcia stanu równowagi cieplnej. Przyrosty temperatury czynnych części maszyny nie większe niż 2°C w ciągu godziny);

**S2 - praca dorywcza;** praca ze stałym obciążeniem trwającym krócej niż czas potrzebny do osiągnięcia równowagi cieplnej oraz następującym później postojem trwającym tak długo, aż maszyna stanie się praktycznie zimna. Znormalizowany czas pracy wynosi: 10, 30, 60 i 90 minut;

**S3 - praca okresowa przerywana;** praca z następującymi po sobie identycznymi okresami pracy. Każdy z tych okresów obejmuje czas pracy ze stałym obciążeniem i czas postoju. Dla tego rodzaju pracy względny czas pracy wynosi: 15, 25, 40 i 60 minut;

**S4 - praca okresowa przerywana z rozruchem;** praca z następującymi po sobie identycznymi okresami pracy, z których każdy obejmuje znaczący (ze względów cieplnych) czas rozruchu, czas pracy z obciążeniem stałym i czas postoju;

**S5 - praca okresowa przerywana z hamowaniem elektrycznym;** praca z następującymi po sobie identycznymi okresami pracy, z których każdy obejmuje czas rozruchu, czas pracy z obciążeniem stałym, czas hamowania elektrycznego i czas postoju,

**S6 - praca okresowa długotrwała z przerywanym obciążeniem;** praca z następującymi po sobie identycznymi okresami pracy, z których każdy obejmuje czas pracy z obciążeniem stałym i czas pracy przy biegu jałowym. W tym przebiegu nie występuje czas postoju;

**S7 - praca okresowa długotrwała z hamowaniem elektrycznym;** praca z następującymi po sobie identycznymi okresami pracy, z których każdy obejmuje czas rozruchu, czas pracy z obciążeniem stałym i czas hamowania elektrycznego. W tym przebiegu nie występuje czas postoju,

**S8 - praca okresowa długotrwała ze zmianami prędkości obrotowej;** praca z następującymi po sobie identycznymi okresami pracy, z których każdy obejmuje czas z obciążeniem stałym odpowiadającym określonej uprzednio prędkości obrotowej i jednego lub kilku czasów pracy z innymi obciążeniami odpowiadającym innym prędkościom obrotowym. Jest to praca z następującymi po sobie identycznymi okresami pracy, z których każdy obejmuje czas rozruchu, czas pracy z obciążeniem stałym;

**S9 - praca z nieokresowymi zmianami obciążenia i prędkości obrotowej;** praca, przy której obciążenie i prędkość obrotowa zmieniają się na ogół nieokresowo w dopuszczalnym zakresie pracy. Ten przebieg pracy obejmuje często przeciążenia, które mogą znacznie przekraczać obciążenie odniesienia;

**S10 - praca z określonymi obciążeniami stałymi;** praca obejmująca nie więcej niż cztery określone wartości obciążenia (lub obciążenia równoważnego), z których przy każdej wartości obciążenia trwającego dostatecznie długo maszyna może osiągnąć równowagę cieplną. Minimalne obciążenie w pewnym okresie pracy może mieć wartość równą zero.

## **Stopnie ochrony zapewnianej przez obudowy maszyn elektrycznych**

Obudowa maszyny elektrycznej chroni obsługę przed dotknięciem zarówno części będących pod napięciem, jak i części ruchomych znajdujących się we wnętrzu maszyny lub osłony. Chroni również maszynę przed przedostaniem się do jej wnętrza obcych ciał stałych i wody.

Wymagania stawiane obudowom maszyn elektrycznych są określone w następujących normach:

PN-EN 60529:2003 Stopnie ochrony zapewnianej przez obudowy (Kod IP);

PN-EN 60529:2003/A2:2014-07 Stopnie ochrony zapewnianej przez obudowy (Kod IP);

PN-EN 60034-5:2004 Maszyny elektryczne wirujące – Część 5: Stopnie ochrony zapewniane przez rozwiązania konstrukcyjne maszyn elektrycznych wirujących (kod IP) - Klasyfikacja oraz

PN-EN 60034-5:2004/A1:2009, Maszyny elektryczne wirujące – Część 5: Stopnie ochrony zapewniane przez rozwiązania konstrukcyjne maszyn elektrycznych wirujących (kod IP) – Klasyfikacja.

**Stopnie ochrony** zapewnianej przez obudowy maszyn elektrycznych oznacza się symbolem IP (ang. international protection) oraz dwoma cyframi, które określają cechy obudowy odpowiadające stopniom ochrony, przy czym:

- a) przed dotknięciem części pod napięciem lub części ruchomych oraz przed dostaniem się ciał stałych (pierwsza cyfra oznaczenia);
- b) przed przedostaniem się wody do wnętrza maszyny (druga cyfra).

- 1) Kod IP oznaczony czerwonym drukiem – osłony do pomieszczeń wilgotnych;
- 2) Kod IP napisany kursywą – osłony do pomieszczeń mokrych

Brak ochrony	Ochrona przed dotknięciem zarówno części będących pod napięciem, jak i części ruchomych znajdujących się we wnętrzu maszyny lub osłony, a także ochrona maszyny przed przedostawaniem się do jej wnętrza: obcych ciał stałych większych niż:						Ochrona przed przedostawaniem się wody	
	50 mm	12,5 mm	2,5 mm	1 mm	pyłoodporna	pyłoszczelna		
IP0X	IP1X	IP2X	IP3X	IP4X	IP5X	IP6X		
IP00	IP10	IP20	IP30	IP40	IP50	IP60	IPX0	brak ochrony
IP01	IP11	IP21	IP31	IP41			IPX1	spadające krople
IP02	IP12	IP22	IP32	IP42			IPX2	spagające strugi wody
IP03		IP23	IP33	IP43			IPX3	deszcz
			IP34	IP44	IP54		IPX4	rozbryzgi
					IP55	IP65	IPX5	strumienie
						IP66	IPX6	fale
					IP57	IP67	IPX7	zanurzenie ≤ 1m
						IP68	IPX8	zanurzenie > 1m
-- pierwsza cyfra --							-- druga cyfra --	

## Warunki doboru silników elektrycznych

W celu zapewnienia odpowiedniej niezawodności i trwałości pracy silników w całym okresie eksploatacji należy silnik dobrać do przewidywanych warunków pracy. Należy przy tym uwzględnić zarówno warunki środowiskowe, jak i warunki jakie wymusza praca układu napędowego.

Przy doborze silnika elektrycznego należy również uwzględnić:

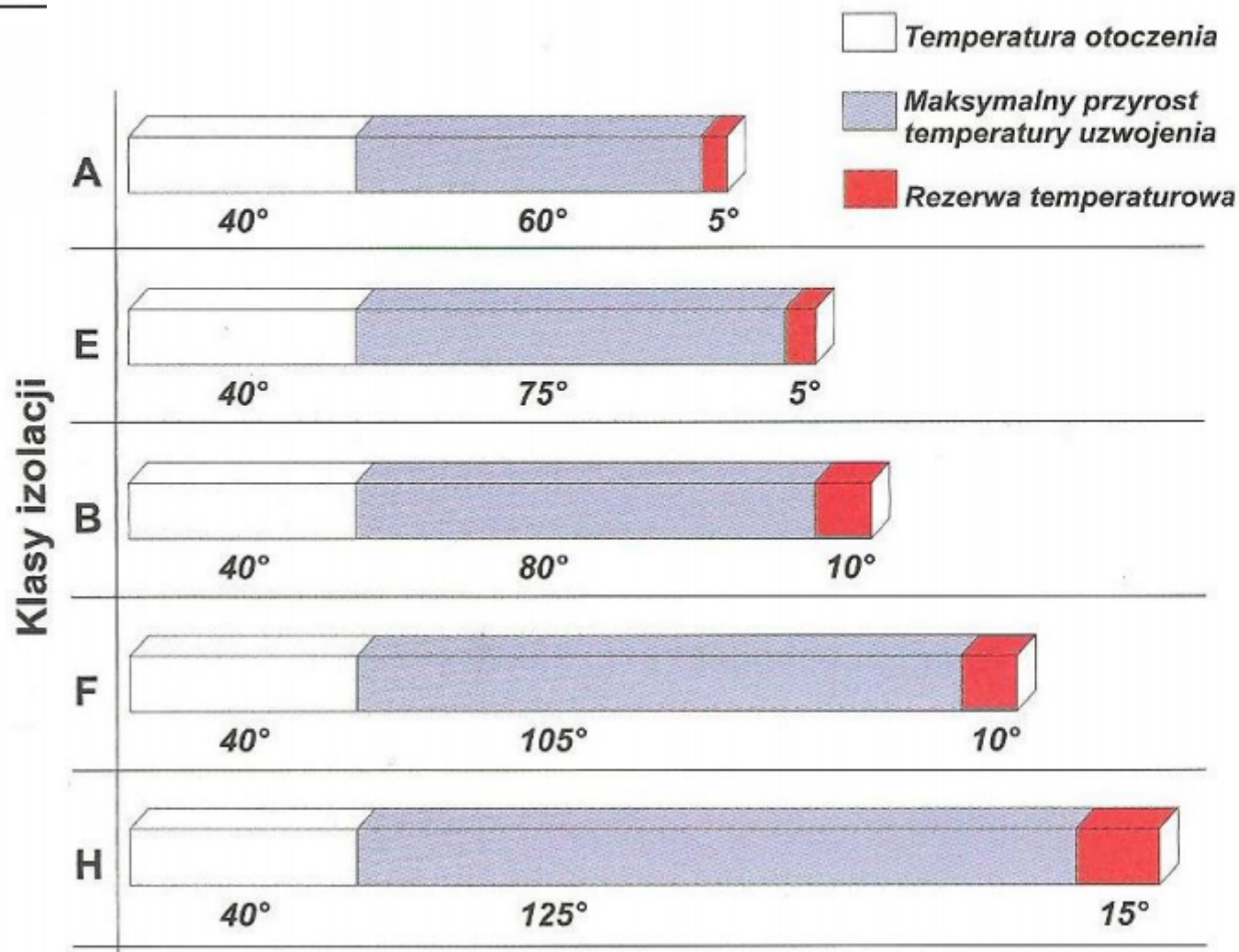
- warunki pracy maszyny roboczej w stanach statycznych i dynamicznych,
- cykl pracy silnika napędowego,
- tolerancję zmian warunków zasilania,
- wymagany moment rozruchowy i przeciążalność momentem,
- rodzaj konstrukcji silnika (sposób mocowania i układ pracy).

Bardzo istotnym kryterium przy doborze silników elektrycznych jest kryterium nieprzekroczenia dopuszczalnego przyrostu temperatury uzwojeń silnika dla zastosowanej klasy izolacji.

W silnikach elektrycznych stosowane są **materiały izolacyjne klasy A, E, B, F i H**. Do wyznaczania temperatury lub jej przyrostu drogą pomiarów stosowane są metody: rezystancyjna (oporowa), wbudowanych czujników temperatury, termometrowa oraz superpozycji.

Symbole klas ciepłoodporności  
(dopuszczalne temperatury izolacji  
dla temperatury otoczenia 40°C)

Symbol	Temperatura [°C]
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180



Każdy rodzaj obudowy maszyny charakteryzuje określony stopień ochrony.

Stosowane rodzaje obudowy maszyn elektrycznych (oznaczone literami w nawiasach) i odpowiadające im stopnie ochrony są następujące:

- obudowa otwarta           **(A)** – IP00, IP10,
- obudowa chroniona       **(B)** – IP12, IP22,
- obudowa okapturzona     **(C)** – IP23, IP33,
- obudowa zamknięta       **(Z)** – IP55, IP56, IP44,
- obudowa wodoszczelna   **(W)** – IP57, IP58,
- obudowa głębinowa       **(G)** – IP67, IP68.

Stopień ochrony tabliczki zaciskowej często jest wyższy niż stopień ochrony całej maszyny. Z podwyższonym stopniem ochrony są standardowo wykonywane silniki o przeznaczeniu specjalnym, np. silniki wysokiego napięcia dla energetyki.

Do napędu pomp głębinowych stosuje się specjalne konstrukcje silników przystosowanych do pracy przy trwałym zanurzeniu w wodzie.

Odrębną grupę maszyn stanowią silniki budowy okapturzonej o stopniu ochrony:

- a) wnętrza IP23,
- b) skrzynki zaciskowej IP55, przeznaczone do pracy w pomieszczeniach zamkniętych o stosunkowo niewielkim zapyleniu:  $2\text{mg}/\text{m}^3$ .

Maszyny przeznaczone do pracy w środowisku zagrożonym wybuchem mają specjalne konstrukcje obudów.

Rozróżnia się trzy zasadnicze rodzaje konstrukcji:

- a) z osłoną ognioszczelną – oznaczenie Exd,
- b) o budowie wzmocnionej – Exe,
- c) z osłoną gazową z nadciśnieniem – Exp.



## Nagrzewanie się maszyn elektrycznych

Praca maszyny elektrycznej związana jest zwykle z nagrzewaniem się jej poszczególnych części i odpowiednim sposobem chłodzenia. Ogólnie przyjęto, że normalne warunki chłodzenia maszyny elektrycznej zainstalowanej na wysokości do 1000 m n.p.m. występują, gdy czynnik chłodzący nie przekracza temperatury 40 °C, a w przypadku chłodzenia wodą z zastosowaniem chłodziw – temperatura wody na wlocie nie przekracza 25 °C.

Graniczne wartości przyrostów temperatury poszczególnych części maszyn elektrycznych chłodzonych powietrzem określa norma PN-EN 60034-1:2009 Maszyny elektryczne wirujące — Część 1: Dane znamionowe i parametry.

## Chłodzenie maszyn elektrycznych

Chłodzenie maszyn elektrycznych stosuje się w celu ograniczenia nagrzewania się maszyny w czasie pracy ponad dopuszczalny przyrosty temperatury. Jako czynnik chłodzący wykorzystuje się najczęściej: powietrze, wodór, wodę i olej. Intensywność chłodzenia poprawia się np. przez zastosowanie kanałów wentylacyjnych lub przez zwiększenie powierzchni, przez którą będzie oddawane ciepło wytworzone w maszynie (przez żebrowanie obudowy, stosowanie radiatorów, itp.).

Ze względu na obieg czynnika chłodzącego rozróżnia się chłodzenie:

- naturalne** – czynnik chłodzący jest wprowadzany przez wirujące części wirnika,
- wymuszone własne** – czynnik chłodzący jest wprowadzany przez wentylator(y) osadzone na wale maszyny,
- wymuszone obce** – czynnik chłodzący jest wprowadzany przez obcy wentylator lub pompę.

Chłodzenie maszyny może być stosowane:

**w obiegu otwartym** – gdy czynnik chłodzący jest pobierany i po ochłodzeniu maszyny oddawany do otoczenia; występuje ciągła wymiana czynnika chłodzącego,

**w obiegu zamkniętym** – jeżeli czynnik chłodzący krąży pomiędzy maszyną a chłodnicą; w procesie chłodzenia bierze udział stale ta sama ilość czynnika chłodzącego.

Sposób chłodzenia maszyn elektrycznych określa norma PN-EN 60034-6:1999 Maszyny elektryczne wirujące — Sposoby chłodzenia (kod IC).

Do oznaczania sposobów chłodzenia stosuje się symbole składające się z liter **IC** i następującej po nich litery oznaczającej czynnik chłodzący:

**A** – powietrze,

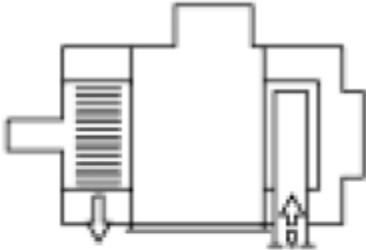
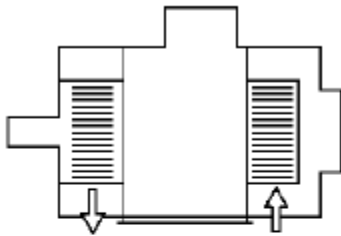
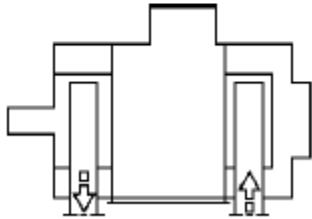
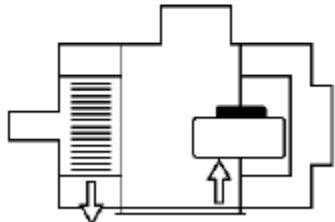
**H** – wodór,

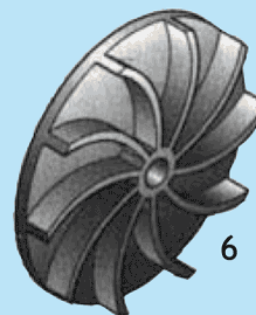
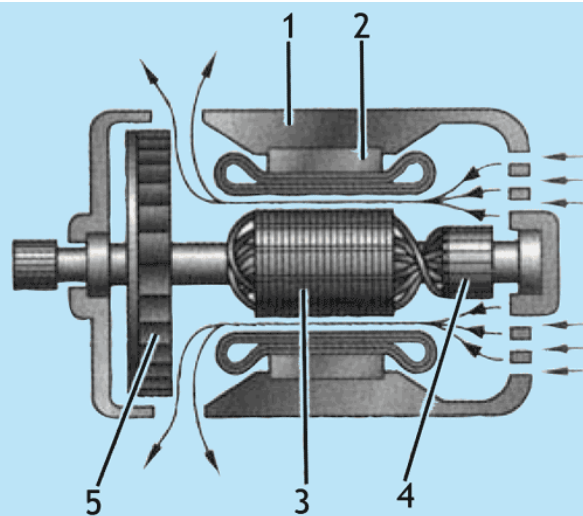
**W** – woda,

**U** – olej, oraz

dwóch cyfr, z których:

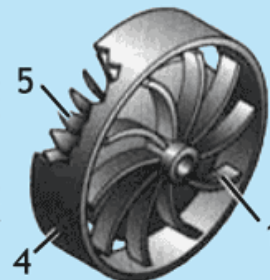
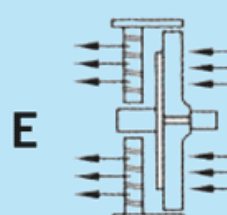
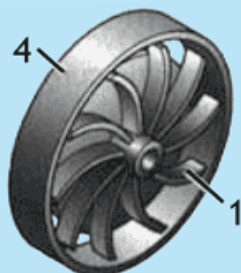
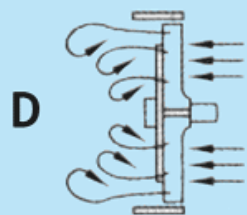
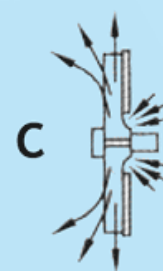
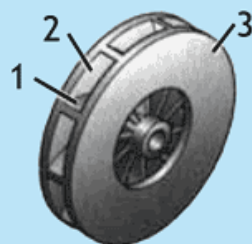
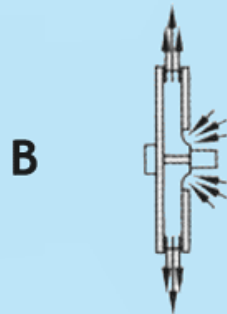
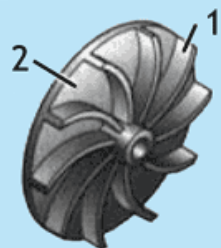
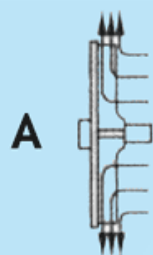
- pierwsza oznacza układ obwodu wentylacyjnego,
- druga – sposób wprowadzenia go w ruch.

<p>IC01</p> <p>Wentylacja własna, wewnątrz silnika jest chłodzone bezpośrednio przepływającym przez jego wnętrze powietrzem otoczenia zewnętrznego</p>		<p>IC17</p> <p>Chłodzenie zewnętrzne Silnik z wbudowanym wentylem dochłodzenia powietrzem</p>	
<p>IC06</p> <p>Chłodzenie zewnętrzne silnik chłodzony zewnątrz obcym strumieniem powietrza</p>		<p>IC37</p> <p>Chłodzenie zewnętrzne silnik do oddzielnego chłodzenia i oddzielnym wlotem i wylotem powietrza</p>	



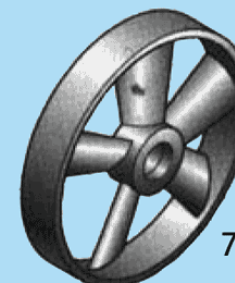
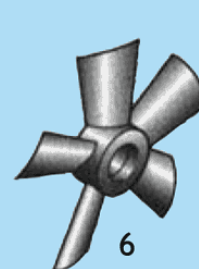
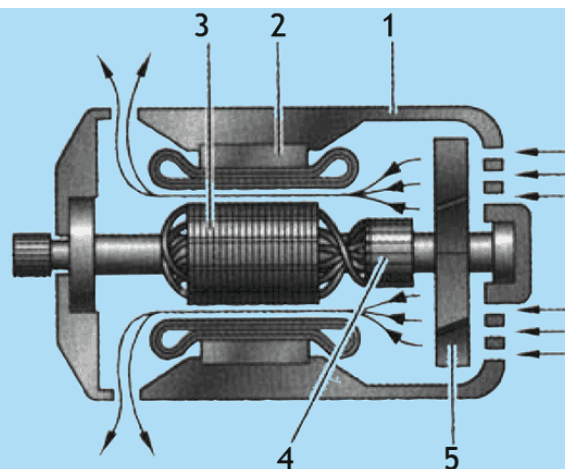
1. Obudowa maszyny, 2. Stojan, 3. Wirnik, 4. Komutator, 5. Wentylator, 6. Koło wentylatora

Źródło: BOSCH



A. z zakończeniem dyskowym, B. z zakończeniem dyskowym i dyskiem przewodzącym, C. z dyskiem przewodzącym, D. z tuleją przewodzącą, E. z tuleją przewodzącą i śmigłem przewodzącym

1. Śmigło wentylatora, 2. Zakończenie dyskowe, 3. Dysk przewodzący, 4. Tuleja przewodząca, 5. Śmigło przewodzące



Źródło: BOSCH

1. Obudowa maszyny, 2. Stojan, 3. Wirnik, 4. Komutator, 5. Wentylator, 6. Otwarte koło wentylatora, 7. Koło wentylatora z tuleją przewodzącą

# MASZYNY INDUKCYJNE

Maszyny indukcyjne charakteryzują się prostą budową, dobrymi właściwościami ruchowymi i łatwością obsługi. Te cechy, oraz stosunkowo niewysoka cena, decydują o ich szerokim zastosowaniu w energetyce, budownictwie, rolnictwie, transporcie, gospodarce komunalnej oraz w przemysłowych procesach technologicznych.

Jednofazowe silniki indukcyjne są powszechnie stosowane w urządzeniach gospodarstwa domowego, urządzeniach technologicznych małej mocy, rzemiośle oraz rolnictwie, a także w pomocniczych napędach przemysłowych.

Wykorzystywanie elementów półprzewodnikowych mocy w sterowaniu pracą silników prądu przemiennego pozwala na łagodne włączanie i hamowanie silników indukcyjnych, natomiast możliwość współpracy z systemami komputerowymi przyczynia się do stosowania nowoczesnych rozwiązań układów sterowania silnikami w układach napędowych o regulowanej i nieregulowanej prędkości obrotowej.

Każda maszyna indukcyjna może pracować jako silnik lub jako prądnica. Znacznie szersze zastosowanie w gospodarce mają silniki indukcyjne stosowane najczęściej w energetyce, małych elektrowniach (wodnych) lub w agregatach prądotwórczych.

## Podział maszyn indukcyjnych

Maszyny indukcyjne (asynchroniczne) wirujące dzieli się:

### 1) ze względu na sposób wykonania obwodów elektrycznych wirnika, na maszyny o wirniku:

- a) Pierścieniowym – z uzwojeniem symetrycznym wielofazowym, połączonym za pomocą pierścieni ślizgowych, np. z rozrusznikiem lub ze źródłem zasilania,
- b) klatkowym – w którym obwody elektryczne wielofazowe wykonane są z połączonych prętów oraz pierścieni odlewanych lub spawanych,
- c) pierścieniowo – klatkowym – z uzwojeniem fazowym przyłączonym do pierścieni ślizgowych oraz uzwojeniem klatkowym (stosowane jako silniki o mocy większej niż 1 MW);

### 2) ze względu na zakres parametrów znamionowych, na maszyny indukcyjne:

- a) niskiego napięcia – o mocy nie większej niż 300 kW,
- b) wysokiego napięcia – o mocy nie mniejszej niż 160 kW,
- c) o częstotliwości 50 – 60 Hz, lub o częstotliwości zwiększonej np. 150 albo 400 Hz
- d) o częstotliwości do 3500 Hz – silniki do technologii wysokoobrotowej;

### **3) ze względu na sposób zasilania, na maszyny indukcyjne:**

- a) jednofazowe – o mocy do 2 kW,
- b) dwufazowe – stosowane jako silniki wykonawcze w grupie maszynowych elementów automatyki,
- c) trójfazowe – najpowszechniej stosowane,
- d) o liczbie faz większej niż 3, stosowane w wielofazowych układach przekształtnikowych;

### **4) ze względu na rodzaj ruchu, na maszyny indukcyjne:**

- a) wirujące,
- b) liniowe;

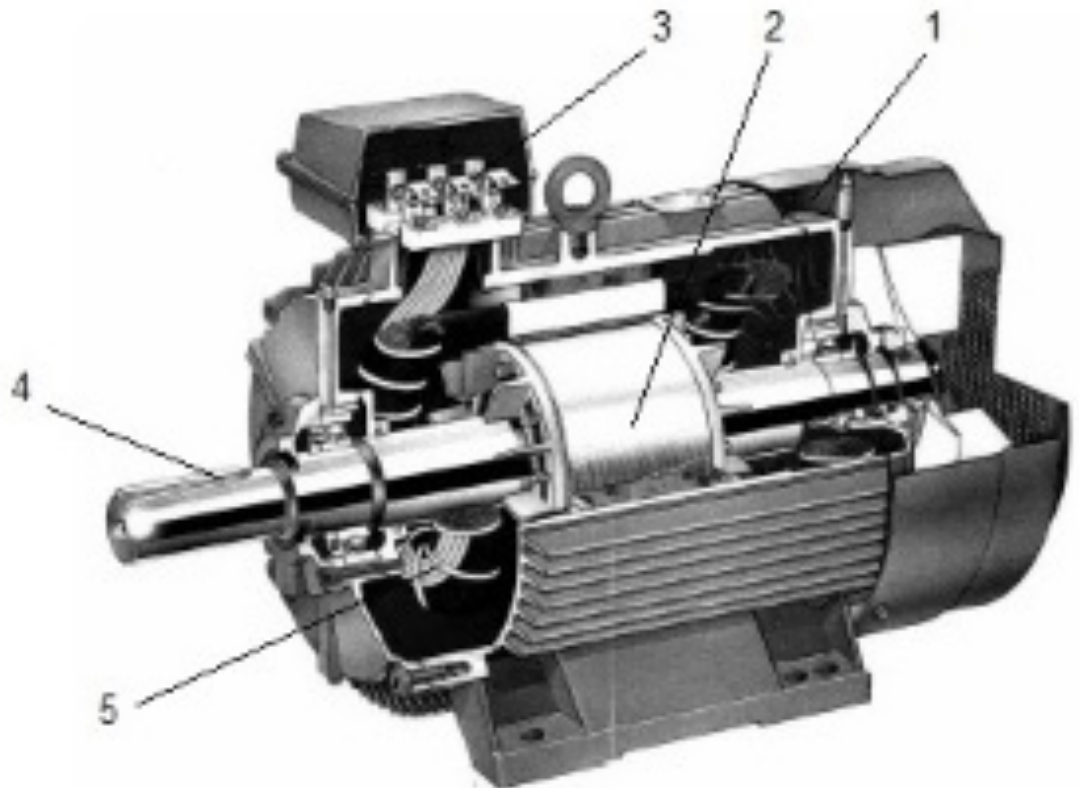
### **5) ze względu na sposób przystosowania do warunków środowiskowych i napędowych, o określonym:**

- a) stopniu ochrony,
- b) rodzaju wykonania,
- c) układzie chłodzenia.

Silniki indukcyjne o ruchu innym niż obrotowy stosowane są jako silniki: liniowe, oscylacyjne, wahadłowe, lub o stojanie innym niż cylindryczny, np. łukowym, do napędu pieców obrotowych w cementowniach.

## Budowa maszyn indukcyjnych

Silnik indukcyjny składa się z części nieruchomej w kształcie walca, zwanej **stojanem**, i części ruchomej zwanej **wirnikiem**, także w kształcie walca



Oznaczenia:

- 1 – stojan,
- 2 – wirnik,
- 3 – tabliczka zaciskowa,
- 4 – wał silnika,
- 5 – uzwojenie stojana.

**Obwód magnetyczny** – tworzą rdzenie stojana i wirnika, wykonane w formie pakietu z blach odizolowanych od siebie o ok.0,5 mm. Stojan i wirnik są oddzielone od siebie szczeliną powietrzną o grubości rzędu kilku dziesiątych mm w małych maszynach i od 1 do 3 mm w dużych (pow. 20 kW). Na całym obwodzie rdzenia stojana i wirnika wycina się rowki o specjalnym kształcie, zwane żłobkami, w których umieszcza się uzwojenia. Rdzeń stojana umieszcza się w kadłubie maszyny, natomiast rdzeń wirnika – w maszynach małej mocy na wale, natomiast w maszynach o dużych mocach na piaście.

**Obwód elektryczny stojana silnika trójfazowego** – składa się z trzech oddzielnych uzwojeń zwanych fazami, które w czasie pracy są połączone w gwiazdę lub w trójkąt. W małych silnikach stosuje się w stojanie uzwojenia jednofazowe lub dwufazowe. Uzwojenia stojanów wykonuje się z izolowanego drutu nawojowego, dodatkowo impregnowanego i usztywnionego. Uzwojenia są odizolowane od rdzenia izolacją żłobkową, zabezpieczone przed wypadaniem ze żłobka za pomocą klinów.

## Rodzaje budowy wirników silników indukcyjnych

W praktyce maszyny asynchroniczne stosowane są jako silniki indukcyjne, które ze względu na rodzaj wirnika dzieli się na:

- klatkowe,
- pierścieniowe.

**Uzwojenie wirnika klatkowego** jest wykonane z nieizolowanych prętów (miedzianych, aluminiowych, mosiężnych lub brązowych) o dużym przekroju, całkowicie wypełniających żłobek, połączonych po obu stronach wirnika pierścieniami zwierającymi

Obwód magnetyczny wirnika wykonany jest w postaci pakietu blach stalowych z dodatkiem krzemu, wzajemnie od siebie odizolowanych, złożonych w pakiet jedna na drugą. Obwód elektryczny wirnika jest zawsze zwarty (stąd nazwa silnika). Klatka stanowi uzwojenie wielofazowe o liczbie faz równej liczbie prętów, z których jest wykonana.

## Wirnik z uzwojeniem klatkowym silnika indukcyjnego

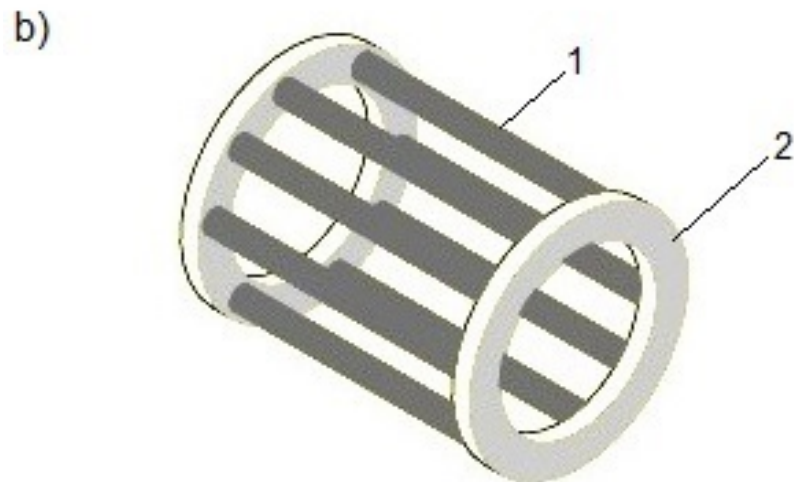
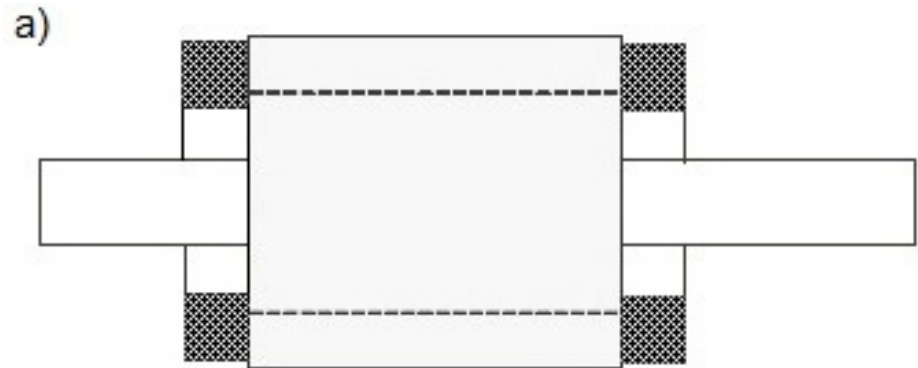
a) przekrój wirnika klatkowego,

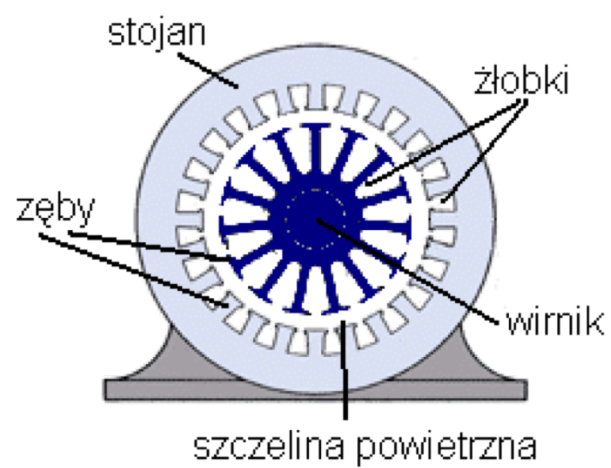
b) uzwojenie klatkowe, wirnika

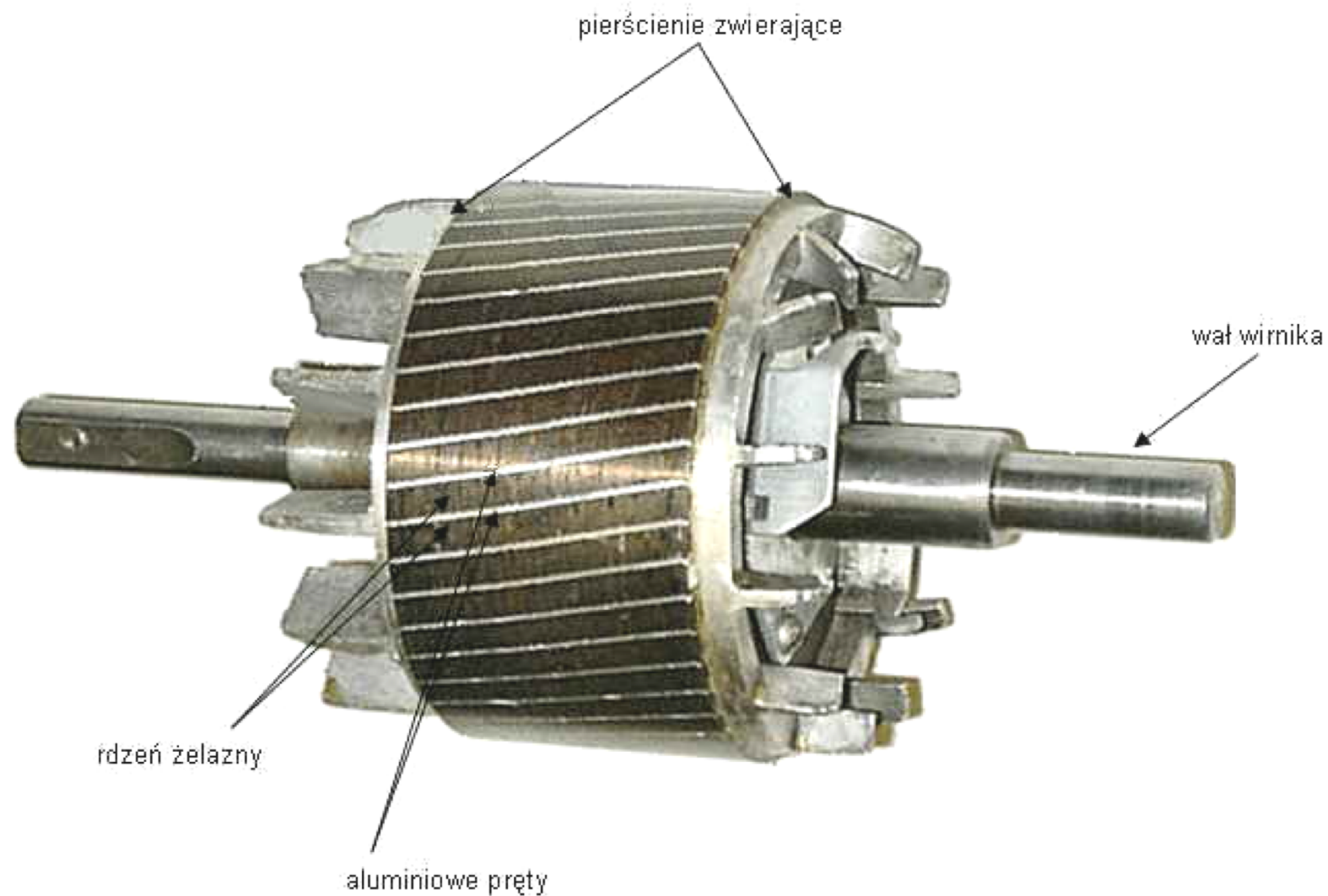
Oznaczenia:

1- pręty,

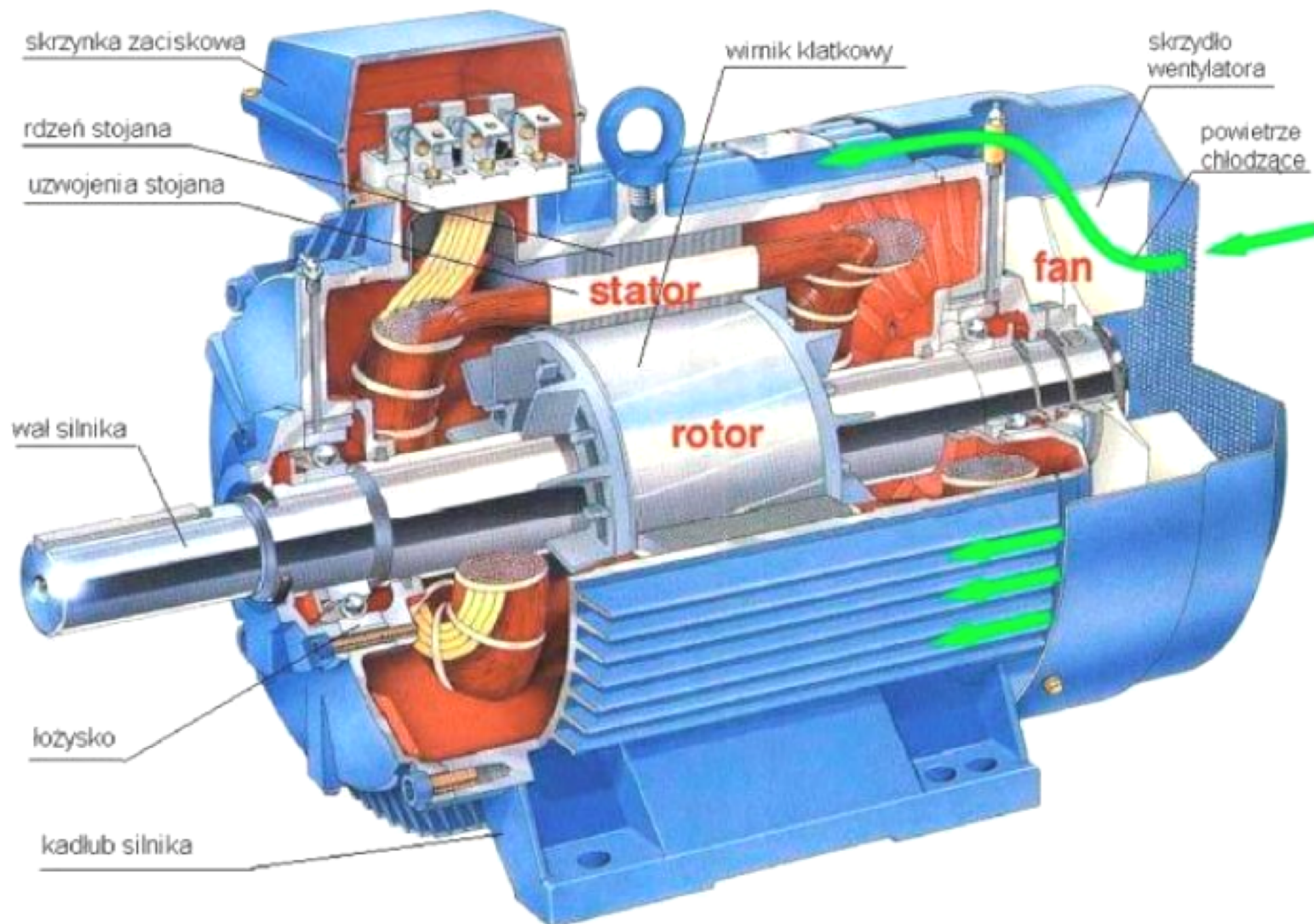
2 – pierścień zwierający czołowy

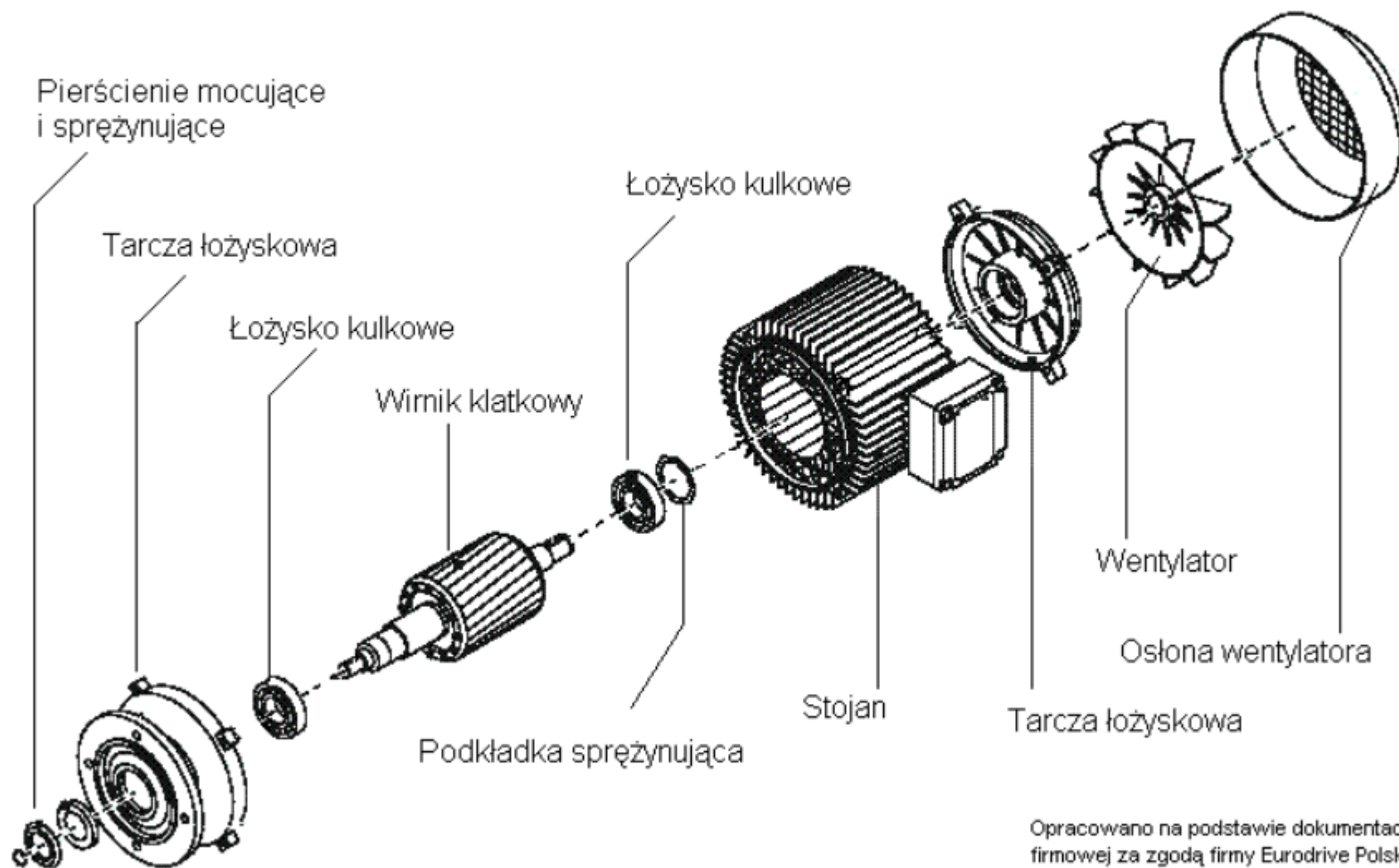






## Budowa wewnętrzna silnika klatkowego

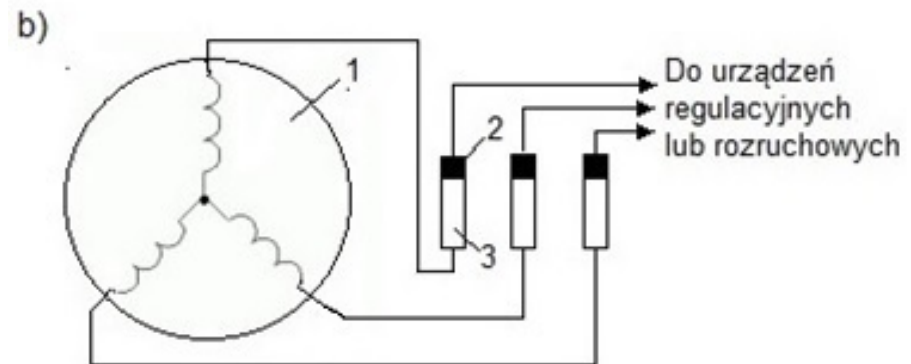
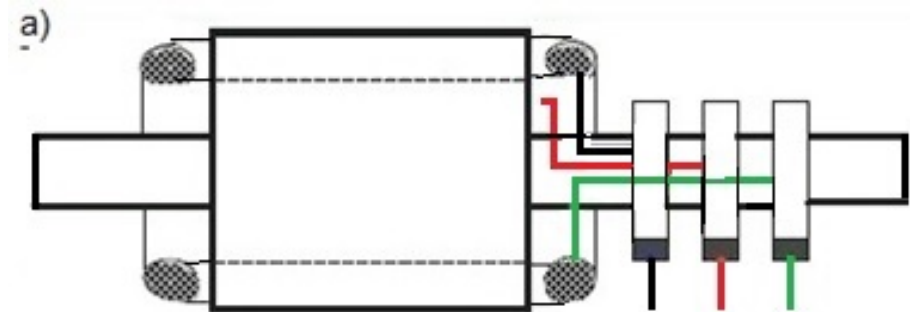




Opracowano na podstawie dokumentacji firmowej za zgodą firmy Eurodrive Polska

**Uzwojenie wirnika pierścieniowego** jest wykonane, podobnie jak w stojanie, z drutu nawojowego, co umożliwia przyłączenie do każdej fazy obwodu wirnika dodatkowej rezystancji.

Aby było to możliwe, początki poszczególnych faz uzwojenia wirnika silnika pierścieniowego są przyłączone na stałe do pierścieni ślizgowych osadzonych na wale wirnika, natomiast końce – są zwarte wewnątrz wirnika.



### Wirnik silnika indukcyjnego pierścieniowego

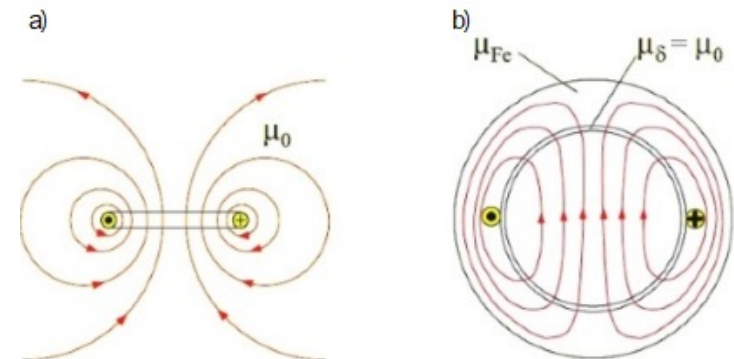
a) przekrój wirnika pierścieniowego silnika indukcyjnego,

b) schemat połączeń wirnika silnika indukcyjnego pierścieniowego,

Oznaczenia: 1 – wirnik,  
2 – szczotki, 3 – pierścienie.

## Obwód magnetyczny silnika indukcyjnego

Obwodem magnetycznym silnika indukcyjnego nazywa się zespół elementów wykonanych najczęściej z materiałów ferromagnetycznych, tworzących drogę zamkniętą dla strumienia magnetycznego, powstającego w wyniku działania źródła pola magnetycznego. Źródłem pola magnetycznego i wytworzonego zmiennego strumienia magnetycznego w silniku indukcyjnym jest uzwojenie, przez które przepływa prąd elektryczny przemienny.



### Obwód magnetyczny silnika indukcyjnego

a) Strumień magnetyczny cewki z prądem w ośrodku o  $\mu = \mu_0$

b) Strumień magnetyczny cewki z prądem w rdzeniu stojana silnika o  $\mu_{Fe} \gg \mu_0$

Oznaczenia:  $\mu_0$  – przenikalność magnetyczna w próżni,  $\mu_{Fe}$  – przenikalność magnetyczna w rdzeniu ferromagnetycznym,  $\mu_\delta$  – przenikalność magnetyczna w szczelinie powietrznej

Trójfazowe uzwojenie stojana składa się z trzech cewek, przesuniętych względem siebie w przestrzeni o kąt  $120^\circ$  przy jednej parze biegunów ( $p = 1$ ). Początki i końce cewek przyłączone są do tabliczki zaciskowej silnika, w sposób umożliwiający łączenie poszczególnych faz w gwiazdę lub trójkąt. Do tabliczki zaciskowej uzwojenie stojana przyłącza się przewody fazowe sieci zasilającej L1, L2 i L3.

Po włączeniu do sieci, w trzech uzwojeniach stojana, przesuniętych względem siebie o kąt  $120^\circ$ , płyną prądy fazowe sinusoidalne o wartości chwilowej  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$ , przesuniętych względem siebie w czasie o  $1/3$  okresu, co można wyrazić wzorami:

$$i_1 = I_m \sin \omega t$$

$$i_2 = I_m \sin \omega t \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$i_3 = I_m \sin \omega t \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right)$$

.Prądy  $i_1, i_2, i_1$  wytwarzają w uzwojeniach poszczególnych faz stojana strumienie magnetyczne  $\Phi_{L1}, \Phi_{L2}, \Phi_{L3}$ , czyli:

$$\Phi_{L1} = \Phi_m \sin\omega t$$

$$\Phi_{L2} = \Phi_m \sin\omega t \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$\Phi_{L3} = \Phi_m \sin\omega t \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right)$$

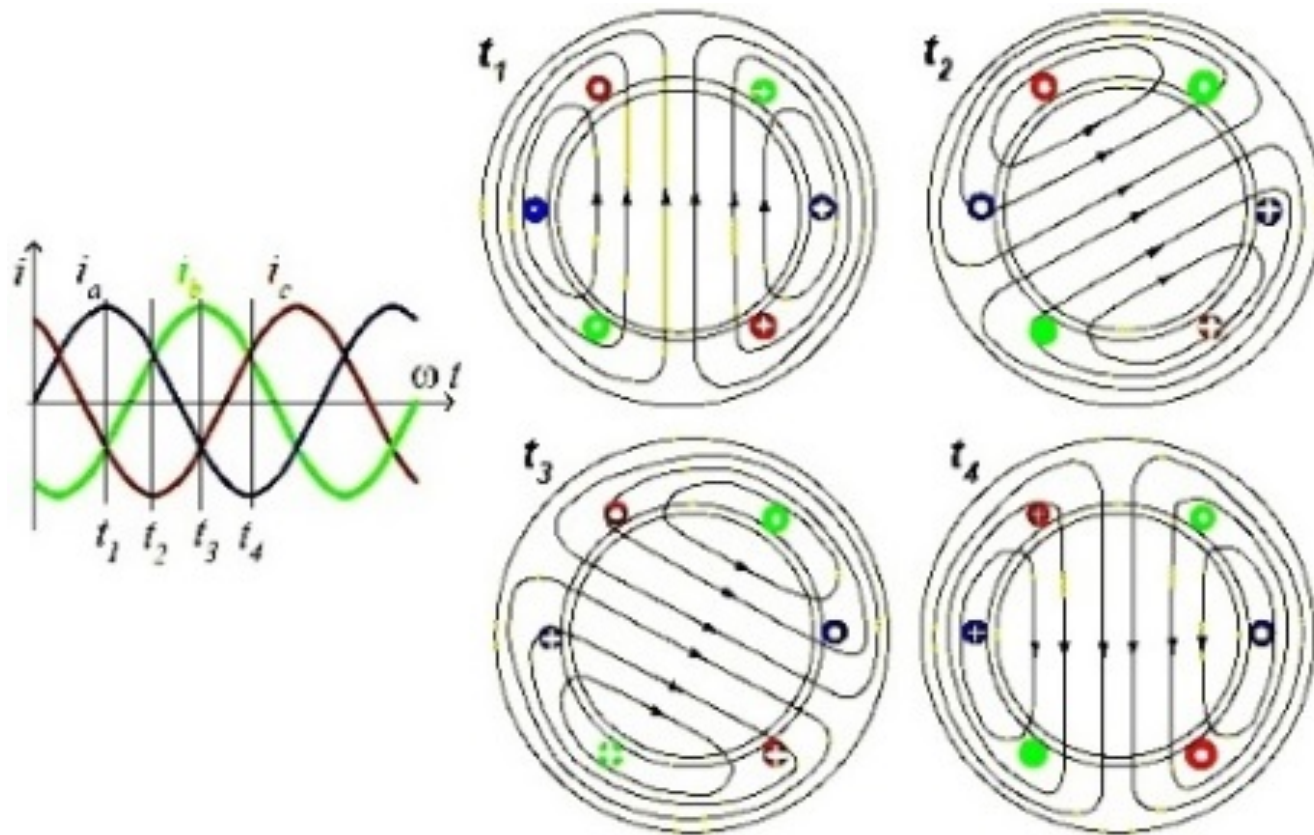
gdzie:

$\Phi_m$  – wartość maksymalna strumienia jednej cewki.

W przestrzeni strumienie te zajmują położenie niezmiennie w stosunku do nieruchomych cewek i są względem siebie przesunięte o kąt  $120^\circ$ . Dają one w każdej chwili strumień wypadkowy, równy sumie geometrycznej strumieni składowych, czyli

$$\Phi = \Phi_{L1} + \Phi_{L2} + \Phi_{L3}$$

Strumień wypadkowy ma wartość stałą, niezależną od czasu i wiruje w przestrzeni ze stałą prędkością kątową, zależną od częstotliwości prądu i liczby par biegunów maszyny.



Jeżeli uzwojenie stojana jest zasilane napięciem trójfazowym, powstaje pole magnetyczne pochodzące od uzwojenia stojana, wirujące z prędkością ( $n_1$ ). Prędkość ta zależy od częstotliwości ( $f_1$ ) i liczby par biegunów ( $p$ ) uzwojenia zgodnie z wzorem:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}$$

## Zasada działania silnika indukcyjnego

Podstawowe wielkości odnoszące się do silnika indukcyjnego oznaczają się następująco:

a) wielkości odnoszące się do stojana oznaczają się wskaźnikiem 1,

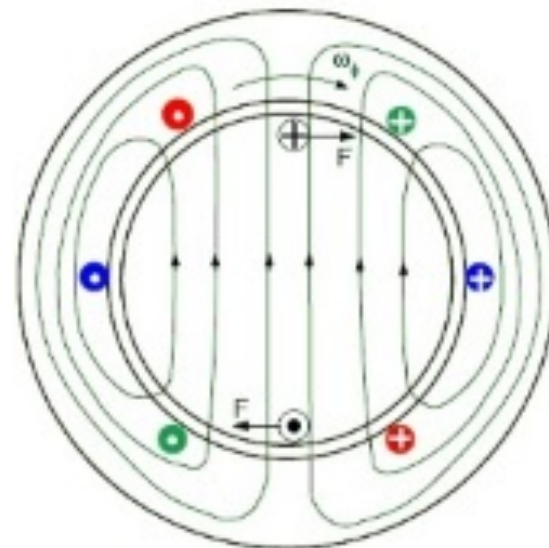
np.  $U_1, N_1, f_1, n_1$ ,

b) wielkości odnoszące się do wirnika oznaczają się wskaźnikiem 2, np.  $U_2, N_2, f_2$ ,

c) wielkości opisujące bieg jałowy (bez obciążenia) – wskaźnikiem 0,

d) wielkości opisujące stan zwarcia – wskaźnikiem z.

Prędkość ( $n$ ) z jaką wiruje wirnik, oznacza się bez żadnego wskaźnika.



Uzwojenie stojana zasilane napięciem trójfazowym wytwarza pole magnetyczne wirujące z prędkością obrotową strumienia magnetycznego ( $n_s$ ). Jest to prędkość synchroniczna, która zależy od częstotliwości ( $f$ ) i liczby par biegunów ( $p$ ), zgodnie ze wzorem:

$$n_s = \frac{f}{p}$$

Przy prędkości wirowania wirnika ( $n$ ) pole obraca się względnie wirnika z prędkością:

$$n_2 = n_1 - n$$

Wielkością charakterystyczną dla maszyn indukcyjnych jest **poślizg  $s$** ; jako stosunek prędkości pola względem wirnika do prędkości synchronicznej, czyli:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Gdy wirnik silnika pozostaje nieruchomy, czyli  $n = 0$ , to poślizg  $s = 1$ , a gdy wirnik wiruje synchronicznie ze strumieniem z prędkością  $n = n_s$ , to poślizg  $s = 0$ .

Przeciętne wartości poślizgu przy obciążeniu znamionowym mieszczą się w granicach od 0,01 (dla dużych maszyn) do 0,1 (dla bardzo małych maszyn). Prędkość wirowania wirnika jest tym większa, im mniejszy jest poślizg:

$$n = n_1 (1 - s)$$

W polu wirującym stojana jest umieszczony wirnik z uzwojeniem. W czasie gdy wirnik jest jeszcze nieruchomy  $n = 0$ , pole wirujące stojana względem wirnika przecina pręty wirnika, indukując w nich siłę elektromotoryczną:

$$E_{20} = 4,44k_{u2}N_2f_1\Phi$$

gdzie:

$E_{20}$  – siła elektromotoryczna indukowana w nieruchomym wirniku, w V;

$k_{u2}$  – współczynnik uzwojenia wirnika;

$N_2$  – liczba zwojów uzwojenia wirnika;

$f_1$  – częstotliwość napięcia zasilającego, w Hz;

$\Phi$  – strumień główny (wirujący), w Wb.

Strumień wirujący indukuje również siłę elektromotoryczną ( $E_1$ ) w uzwojeniu stojana:

$$E_1 = 4,44 k_{u1} N_1 f_1 \Phi$$

gdzie:

$k_{u1}$  – współczynnik uzwojenia stojana,

$N_1$  – liczba zwojów uzwojenia stojana.

## Rodzaje pracy maszyny indukcyjnej

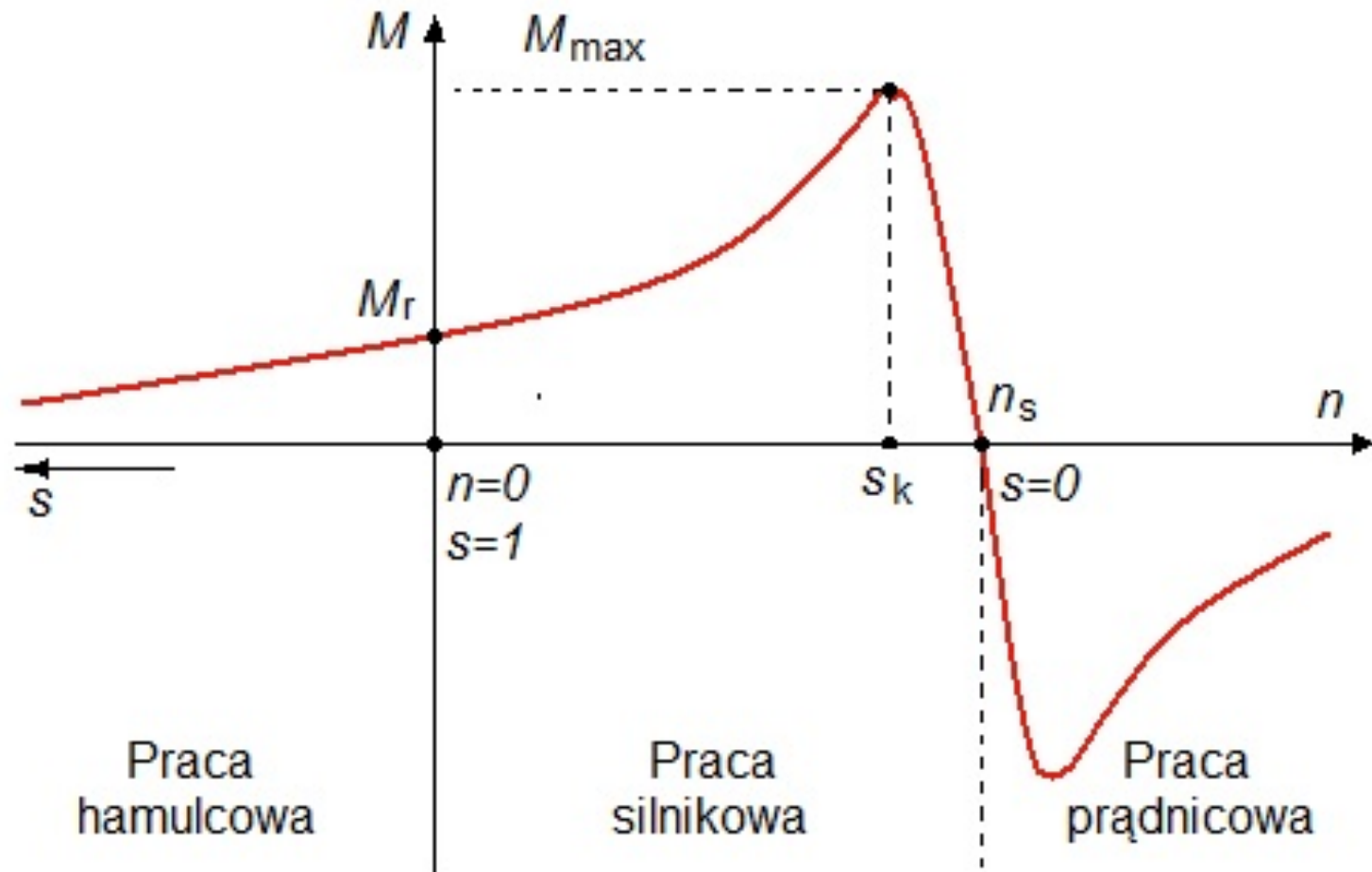
W zależności od rodzaju przetwarzanej energii każda maszyna elektryczna może pracować jako prądnica lub silnik (bez zasadniczych zmian konstrukcyjnych).

Z tego względu rozróżnia się następujące rodzaje pracy maszyny indukcyjnej:

- 1) Praca prądnicowa – przetwarzająca energię mechaniczną na elektryczną;
- 2) Praca silnikowa – przetwarzająca energię elektryczną na mechaniczną;
- 3) Przetwornice – przetwarzają energię elektryczną na taką samą energię, lecz o innych parametrach, np. przetwornice: częstotliwości, napięcia, prądu.

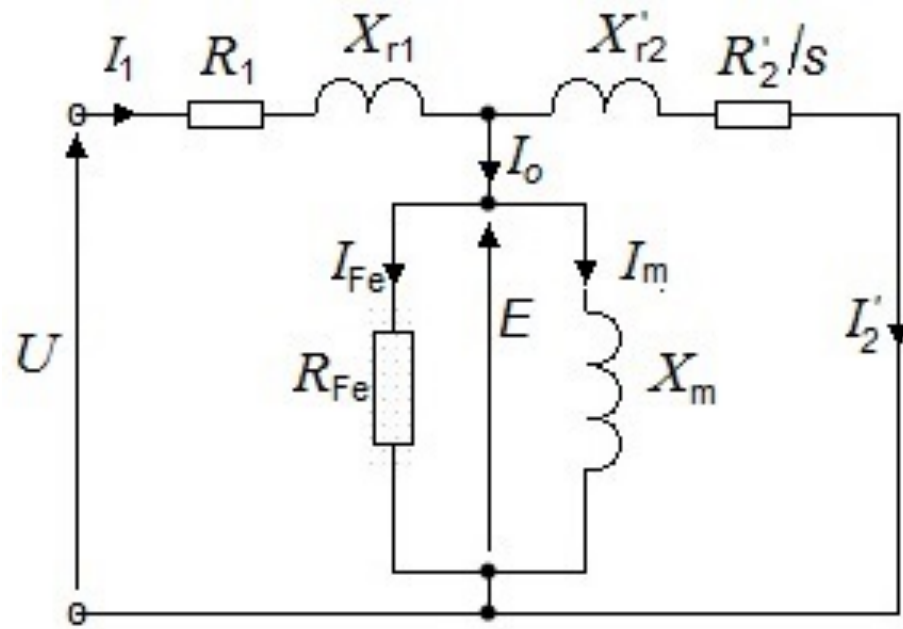
Pod wpływem indukowanego w zamkniętym uzwojeniu wirnika napięcia  $E_{20}$  (SEM), popłynie w tym uzwojeniu prąd. Oddziaływanie pola magnetycznego na przewodnik z prądem powoduje powstanie momentu elektromagnetycznego ( $M$ ). Jeżeli wytworzony moment osiągnie wartość większą niż moment obciążenia (moment hamujący –  $M_h$ ), pochodzący od napędzanej maszyny roboczej oraz tarcia, to wirnik zacznie się obracać. Maszyna pracuje jako silnik przetwarzając pobraną z sieci energię elektryczną na energię mechaniczną. W stanie obciążenia silnika momentem znamionowym wirnik wiruje z prędkością mniejszą od prędkości synchronicznej.

## Rodzaje pracy maszyny indukcyjnej



## Moment obrotowy maszyn indukcyjnych

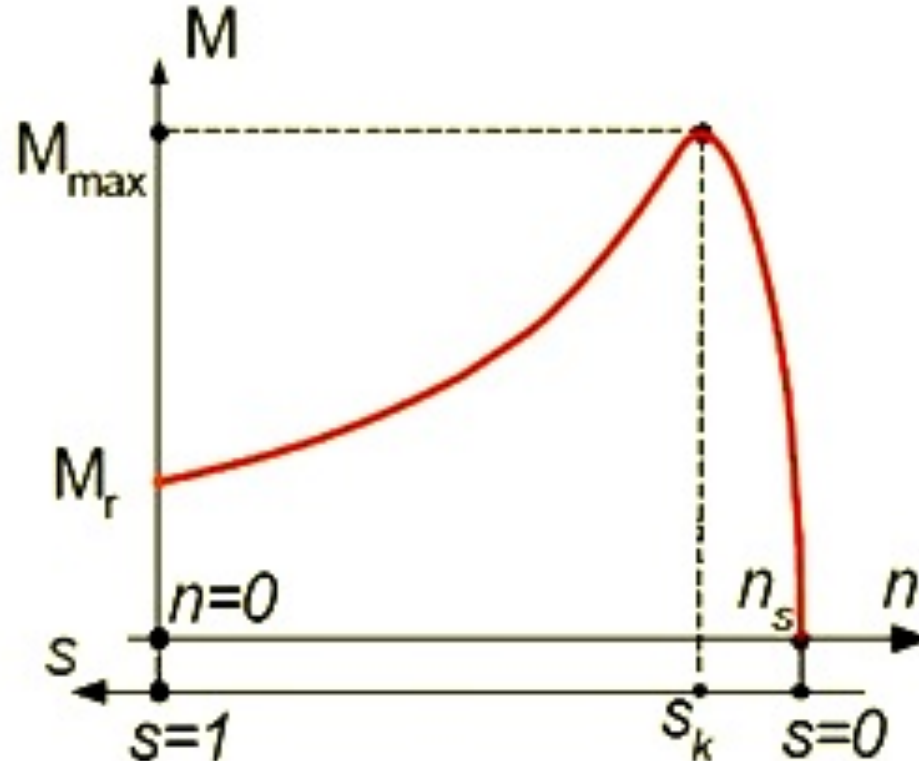
Prądy w uzwojeniach oraz zależne od nich wielkości można wyrazić także za pomocą parametrów schematu zastępczego maszyny indukcyjnej. Przybliżone wartości rezystancji oraz reaktancji najczęściej wyznacza się w sposób pośredni, na podstawie wyników pomiaru prądów, napięć oraz mocy czynnej w wybranych stanach pracy, np. w stanie jałowym oraz w stanie zwarcia pomiarowego.



Schemat zastępczy silnika indukcyjnego

## Podstawowe zależności między parametrami maszyn indukcyjnych

Charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego przedstawia zależność momentu  $M$  na wale silnika od jego prędkości obrotowej  $n$ .



Charakterystykę mechaniczną silnika indukcyjnego można wyrazić za pomocą wzoru Klossa, określającym zależność momentu od poślizgu:

gdzie:

$M$  – moment silnika indukcyjnego,

$M_k$  – moment krytyczny,

$s$  – poślizg,

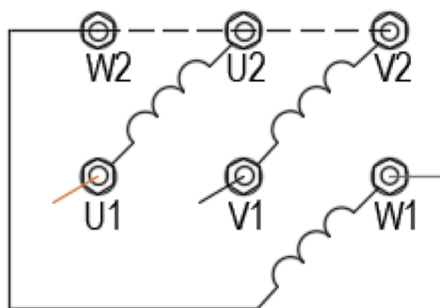
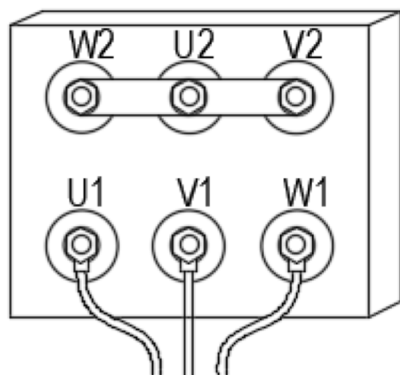
$s_k$  – poślizg krytyczny.

$$\frac{M}{M_k} = \frac{2}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}$$

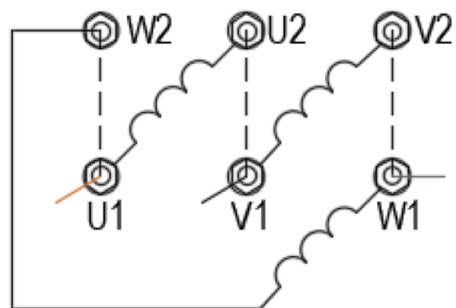
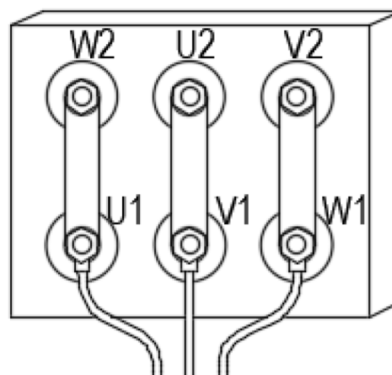
## Objaśnienia symboli na tabliczce znamionowej.

		Rodzaj pracy S1		Klasa izolacji / temp. otoczenia jeśli jest inna niż 40°C	
Nazwa producenta	FABRYKA MASZYN ELEKTRYCZNYCH S.A.		Iz F / °C	CE	Forma wykonania
Numer silnika	<b>indukta</b>	S1			Stopień ochrony
Typ silnika	Nr V021546	IM 1001			Częstotliwość znamionowa
	Typ Sg 132M-4		IP 55		
	3~ 400Δ/ 690Y		V 50 Hz		
Napięcie znamionowe	7,5 kW		14,6/8,4 A		Prąd znamionowy
	$\cos \phi$ 0,85		$\eta$ 87,0 %		Sprawność znamionowa
Moc znamionowa	n 1450 1/min				
	G0G40B3120MG000Z				
Współczynnik mocy	<b>Cantoni</b> GROUP	06/08			Numer katalogowy
			MADE IN POLAND		
Znamionowa prędkość obrotowa				Data wykonania miesiąc/rok	

## Połączenie: GWIAZDA



## Połączenie: TRÓJKĄT



## Zastosowanie maszyn indukcyjnych

Szerokie zastosowanie maszyn indukcyjnych w przemysłowych procesach technologicznych i układach automatyki wiąże się przede wszystkim z ich prostą budową i łatwą obsługą oraz niewysoką ceną. Napędy elektryczne w gospodarce, przemyśle, energetyce, rolnictwie, transporcie i gospodarce komunalnej realizowane są za pomocą trójfazowych silników indukcyjnych. Natomiast jednofazowe silniki indukcyjne stosowane są powszechnie w urządzeniach gospodarstwa domowego, urządzeniach technologicznych małej mocy i w usługach.

Maszyny indukcyjne stosuje się przede wszystkim jako silniki do napędu maszyn i urządzeń, zwłaszcza o nieregulowanej prędkości obrotowej. Coraz częściej są przydatne silniki o prędkości obrotowej regulowanej w sposób ciągły w szerokim zakresie, przystosowane do współpracy z układami przekształtnikowymi.

Obecnie stosuje się maszyny indukcyjne jako prądnice obcowzbudne lub samowzbudne, głównie w lokalnych elektrowniach z jednostkami o mocy nawet do 2 MW. Ponadto maszyny indukcyjne wykorzystuje się jako przetwornice częstotliwości, a także, w stanie nieruchomym, jako regulatory napięcia, przesuwniki fazowe oraz dławiki o regulowanej reaktancji.

# Dziękuję za uwagę



mgr inż. Robert Czak

*tel: 0048 603687444*

*mail: robert.czak@op.pl*