

## PROJEKTOWANIE MECHATRONICZNE

na przykładzie obrabiarek

Dr hab. inż. Piotr Pawelko  
p. 141  
Piotr.Pawelko@zut.edu.pl  
www.pio.pawelko.zut.edu.pl




---

---

---

---

---

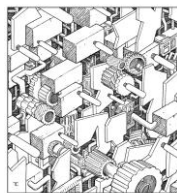
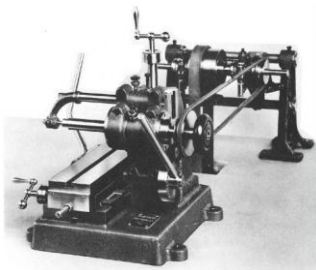
---

---

---

## UKŁADY NAPĘDOWE OBRABIAREK

Wśród układów napędowych obrabiarek można rozróżnić  
**napędy główne oraz napędy posuwu.**




---

---

---

---

---

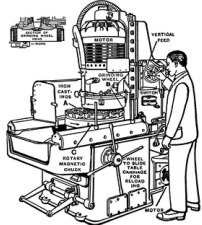
---

---

---

## UKŁADY NAPĘDOWE OBRABIAREK

Wśród układów napędowych obrabiarek można rozróżnić  
**napędy główne oraz napędy posuwu.**




---

---

---

---

---

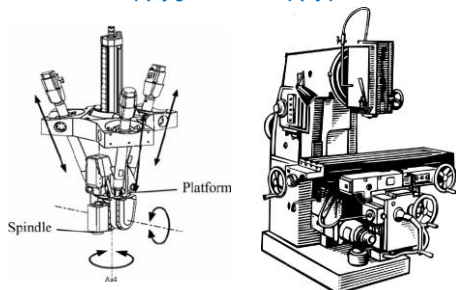
---

---

---

## UKŁADY NAPĘDOWE OBRABIAREK

Wśród układów napędowych obrabiarek można rozróżnić **napędy główne oraz napędy posuwu**.




---

---

---

---

---

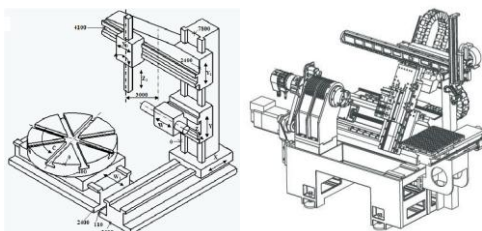
---

---

---

## UKŁADY NAPĘDOWE OBRABIAREK

Wśród układów napędowych obrabiarek można rozróżnić **napędy główne oraz napędy posuwu**.




---

---

---

---

---

---

---

---

## UKŁADY NAPĘDOWE OBRABIAREK

Wśród układów napędowych obrabiarek można **rozróżnić napędy główne oraz napędy posuwu**.

□ Jako **napędy główne** najczęściej stosowane są układy napędowe prądu przemiennego w postaci elektrowrzecion lub zespołów wrzecionowych z oddzielnymi silnikami elektrycznymi. W skład napędów głównych wchodzi także sprzęgła, hamulce, przekładnie (pasowe, zębate).

□ Jako elementy składowe **napędów posuwu** można wyróżnić: układy napędowe prądu stałego i przemiennego, silniki elektryczne serwonapędowe i krokowe (obrotowe, liniowe, zintegrowane z nakrętką), kompaktowe jednostki napędowe, przekładnie (pasowe, zębate), toczne przekładnie śrubowe.

---

---

---

---

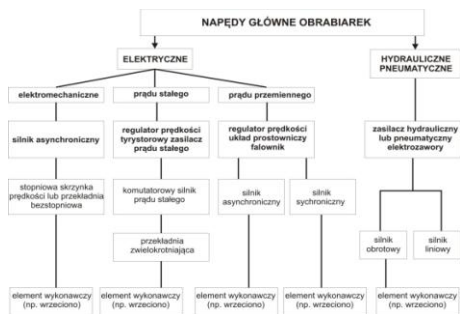
---

---

---

---

### UKŁADY NAPĘDOWE OBRABIAREK KLASYFIKACJA NAPĘDÓW GŁÓWNYCH




---

---

---

---

---

---

---

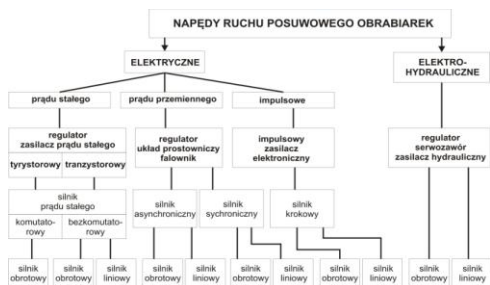
---

---

---

---

### UKŁADY NAPĘDOWE OBRABIAREK KLASYFIKACJA NAPĘDÓW POSUWOWYCH




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

### UKŁADY NAPĘDOWE OBRABIAREK

NAPĘDY GŁÓWNE	NAPĘDY POSUWU
układy serwonapędowe prądu stałego i przemiennego	układy napędowe prądu stałego i przemiennego
silniki elektryczne serwonapędowe i krokowe (obrotowe, liniowe), zintegrowane z nakrętką	silniki elektryczne
zintegrowane jednostki napędowe	elektrowrzeciona i zespoły wrzecionowe
przekładnie (pasowe, zębate)	przekładnie (pasowe, zębate)
przekładnie śrubowe toczone	mechaniczne przekładnie bezstopniowe
	sprzęgła i hamulce

Informacje w INTERNECIE nie podlegają często weryfikacji !

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## UKŁADY NAPĘDOWE OBRABIAREK WYMAGANIA

### Wymagania stawiane napędom głównym obrabiarek:

- duża sztywność charakterystyki mechanicznej,
- duży zakres bezstopniowej zmiany prędkości obrotowej silnika,
- przebieg dopuszczalnego obciążenia w funkcji prędkości obrotowej, dostosowany do technologicznej charakterystyki obciążenia obrabiarki,
- szybki rozruch,
- zdolność do pracy serwonapędowej.

### Wymagania stawiane napędom ruchu posuwowego obrabiarek:

- duży zakres bezstopniowej zmiany prędkości obrotowej silnika,
- szybki rozruch i hamowanie,
- duża sztywność mechaniczna,
- duża równomierność ruchu,
- duża dokładność pozycjonowania.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## UKŁADY NAPĘDOWE OBRABIAREK

Sam proces doboru silnika mającego spełniać w obrabiarence określone funkcje napędowe poprzedzają obliczenia. Zależnie od tych funkcji danymi wyjściowymi do obliczeń mogą być:

- **prędkość** napędzanych zespołów lub elementów wykonawczych, określana już na etapie obliczeń kinematycznych,
- **moc użyteczna** potrzebna do realizacji procesu skrawania (moc skrawania),
- **siły i momenty obrotowe**, jakie mają rozwijać zespoły i elementy wykonawcze (np. główna składowa siły skrawania, moment skrawania, siła posuwowa, siła zacisku, siła podnoszenia, siła przesuwu itp.),
- **charakterystyka dopuszczalnych obciążeń** napędzanego zespołu (ograniczenia parametrów siłowych i energetycznych w zakresie występujących prędkości),
- **charakter i warunki pracy silnika** (praca ciągła, przerywana czy dorywcza, przeciążenia, temperatura otoczenia),
- **parametry i wymagania dynamiczne napędzanych zespołów** (masy, momenty bezwładności, przyspieszenia, stałe czasowe).

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## UKŁADY NAPĘDOWE OBRABIAREK - WYTYCZNE

□ Podstawowym parametrem jest **dostępne źródło zasilania**, które w przypadku rozwiązań mobilnych, gdzie nie można skorzystać z istniejącej sieci energetycznej. Może zostać zrealizowane za pomocą np. agregatów prądotwórczych jedno i trójfazowych. W szczególnych przypadkach może to być bateria akumulatorów.

□ Zastosowane układy napędowe powinny mieć **stopień ochrony IP** dopasowany do planowanych warunków środowiskowych.

□ Określenie docelowych **parametrów ruchu** elementów korpusowych (prędkości, przyspieszenia oraz dokładności pozycjonowania) pozwala na określenie rodzaju zastosowanych silników.

Jeśli od projektowanego układu nie wymaga się dużej precyzji i dynamiki ruchu to istnieje możliwość zastosowania silników asynchronicznych co pozwala znacznie zredukować koszty. Jednak w większości przypadków obrabiarek warunek ten nie jest spełniony i powszechnie stosowane są np. bezszczotkowe silniki prądu stałego **BLDC** (ang. *Brushless Direct Current Motor*).

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## STOPIEŃ OCHRONY IP

IP67		Druga cyfra: ochrona przed wodą	
Pierwsza cyfra: ochrona przed ciałami obcymi		0	Brak
0	Brak	1	Krople wody padające pionowo
1	Ciała obce o średnicy powyżej 50 mm	2	Krople wody padające pod kątem 15°
2	Ciała obce o średnicy powyżej 12,5 mm	3	Krople wody padające pod kątem 60°
3	Ciała obce o średnicy powyżej 2,5 mm	4	Krople wody padające pod dowolnym kątem
4	Ciała obce o średnicy powyżej 1 mm	5	Strumień wody
5	Pyłoodporność	6	Fala wody
6	Pyłoszczelność	7	Zanurzenie przez 30 min
		8	Ciągłe zanurzenie
		9	Strumień wody pod ciśnieniem wg DIN 40050

Polska Norma PN-IEC 60364-7.701:1999.

Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych -- Wymagania dotyczące specjalnych instalacji lub lokalizacji -- Wymagania dotyczące uzemiień instalacji urządzeń przetwarzających dane

Norma ta reguluje zasady instalowania urządzeń elektrycznych

IP53  
IP51 IP43  
IP67 IP54  
IP52  
IP54  
IP54  
IP65

## STOPIEŃ OCHRONY IP

IP67		Druga cyfra: ochrona przed wodą	
Pierwsza cyfra: ochrona przed ciałami obcymi		0	Brak
0	Brak	1	Krople wody padające pionowo
1	Ciała obce o średnicy powyżej 50 mm	2	Krople wody padające pod kątem 15°
2	Ciała obce o średnicy powyżej 12,5 mm	3	Krople wody padające pod kątem 60°
3	Ciała obce o średnicy powyżej 2,5 mm	4	Krople wody padające pod dowolnym kątem
4	Ciała obce o średnicy powyżej 1 mm	5	Strumień wody
5	Pyłoodporność	6	Fala wody
6	Pyłoszczelność	7	Zanurzenie przez 30 min
		8	Ciągłe zanurzenie
		9	Strumień wody pod ciśnieniem wg DIN 40050

Według normy PN-EN 60529:2003: Kod IP (ang. IP Codes) – system oznaczania stopni ochrony zapewnianej przez obudowy przed dostępem do części niebezpiecznych, wnikaniem obcych ciał stałych, wnikaniem wody oraz system podawania dodatkowych informacji związanych z taką ochroną.

IP53  
IP51 IP43  
IP67 IP54  
IP52  
IP54  
IP54  
IP65

## UKŁADY NAPĘDOWE OBRABIAREK - WYTYCZNE

□ Bardzo ważną rolę odgrywa **właściwe poprowadzenie przewodów zasilających** silnik. Nie powinny one biec równoległe do przewodów aparatury kontrolno-sterującej ze względu na możliwość wystąpienia zakłóceń w przewodach sygnałowych, ich rozmieszczenie na obrabiarce przenośnej stanowi odrębne zagadnienie projektowe.

□ W zależności od rozwiązania konstrukcyjnego należy określić sposób **realizacji sprzężenia zwrotnego**.

W przypadku, gdy ze względów technologicznych nie ma możliwości wykonania zerowania układu i zjazdu na punkty referencyjne, konieczne jest zastosowanie enkoderów absolutnych co istotnie zwiększa koszt układu. W chwili obecnej dla nowych konstrukcji praktycznie nie stosuje się innych metod pomiarowych jak np. resolwery czy prądnice tachometryczne.

### UKŁADY NAPĘDOWE OBRABIAREK - WYTYCZNE

□ Dobór układu sterującego powinien uwzględniać parametry obiektu i być poprzedzony **analizą dynamiki konstrukcji mechanicznej** ze szczególnym uwzględnieniem występujących rezonansów i ewentualną możliwością wzbudzenia maszyny do drgań w tym zakresie poprzez układ sterowania.

Jeśli to konieczne stosowane w układzie sterowania są filtry np. grzebieniove, które umożliwiają eliminację wybranych częstotliwości składowych w sygnale sterującym.

□ Istnieje możliwość wystąpienia zniekształcenia zarysu i trajektorii wywołanych niewłaściwym doбором **współczynników wzmocnienia układu regulacji**.

Jeśli w układzie występują mierzalne czynniki (np. masa elementu) mające bezpośredni wpływ na pracę układu napędowego, wykorzystuje się struktury regulacji typu sprzężenie w przód (ang. feedforward) umożliwiające kompensację mierzalnych zakłóceń.




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

### UKŁADY NAPĘDOWE OBRABIAREK - WYTYCZNE

□ Układy sterujące w poszczególnych osiach muszą **współpracować** ze sobą **synchronicznie**, co wiąże się z koniecznością zadawania pozycji w czasie rzeczywistym przez nadrzędną jednostkę sterującą realizującą funkcję generatora trajektorii.

W przypadku konstrukcji o dużej podatności musi on uwzględniać jej właściwości dynamiczne w celu ograniczenia wartości przyspieszeń do wartości niepowodujących nadmiernych drgań. Ograniczenia narzucone w jednej z osi powodują konieczność zmodyfikowania wartości w pozostałych osiach biorących udział w realizacji zadanej trajektorii.

□ Konieczne jest uwzględnienie **ciepłych warunków pracy silników i układów sterujących**. Realizuje się to przez zastosowanie zabezpieczeń termicznych silników oraz dodatkowych w razie konieczności układów wspomagających chłodzenie.




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

### UKŁADY NAPĘDOWE OBRABIAREK - WYTYCZNE

□ Należy zaznaczyć cechę wspólną dla obrabiarek skrawających do metali, że występuje w nich **zmienność obciążeń** zarówno podczas wykonywania konkretnych operacji oraz w całym okresie eksploatacji.

Dlatego też do obliczeń związanych z doбором silników przyjmuje się graniczne (maksymalne) wartości parametrów pracy lub ich najniekorzystniejsze skojarzenia ze względu na obciążenia.




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## SILNIKI ELEKTRYCZNE – RODZAJE PRACY WG. PN-IEC 34-1:1997

**Praca ciągła - S1.** Praca z obciążeniem stałym, trwającym tak długo aż zostanie osiągnięty stan równowagi cieplnej.

**Praca dorywcza - S2.** Praca z obciążeniem stałym, trwającym przez określony czas, krótszy niż czas potrzebny do osiągnięcia równowagi cieplnej, i następującym po tym czasie postojem, trwającym tak długo aż ustalona temperatura nie będzie się różnić o więcej niż 20C od temperatury czynnika chłodzącego.

**Praca okresowa przerywana - S3.** Szereg identycznych okresów pracy, z których każdy obejmuje czas pracy przy obciążeniu stałym i czas postoju. Przy tym rodzaju pracy okres jest taki, że prąd rozruchowy nie wpływa w sposób znaczący na nagrzewanie się maszyny.

**Praca okresowa przerywana z rozruchem - S4.** Szereg identycznych okresów pracy, z których każdy obejmuje znaczący (ze względów cieplnych) czas rozruchu, czas pracy przy obciążeniu stałym i czas postoju.

**Praca okresowa przerywana z hamowaniem elektrycznym - S5.** Szereg identycznych okresów pracy, z których każdy obejmuje czas rozruchu, czas pracy przy obciążeniu stałym, czas szybkiego hamowania elektrycznego oraz czas postoju.

## SILNIKI ELEKTRYCZNE – RODZAJE PRACY WG. PN-IEC 34-1:1997

**Praca okresowa długotrwała z przerwami jałowymi - S6.** Szereg identycznych okresów pracy, z których każdy obejmuje czas pracy przy obciążeniu stałym i czas pracy przy biegu jałowym. W tym rodzaju pracy nie występuje czas postoju.

**Praca okresowa długotrwała z hamowaniem elektrycznym - S7.** Szereg identycznych okresów pracy, z których każdy obejmuje czas rozruchu, czas pracy przy obciążeniu stałym oraz czas hamowania elektrycznego. W tym rodzaju pracy nie występuje czas postoju.

**Praca okresowa długotrwała ze zmianami prędkości obrotowej - S8.** Szereg identycznych okresów pracy, z których każdy obejmuje czas pracy przy obciążeniu stałym odpowiadającym określonej uprzednio prędkości obrotowej i z jednego lub kilku czasów pracy przy innych obciążeniach odpowiadających innym prędkościom obrotowym (osiągany np. przez zmianę liczby biegunów w przypadku silników indukcyjnych). W tym rodzaju pracy nie występuje czas postoju.

**Praca z nieokresowymi zmianami obciążenia i prędkości obrotowej - S9.** Praca, przy której na ogół obciążenie i prędkość obrotowa zmieniają się nieokresowo w dopuszczalnym zakresie. Praca ta obejmuje często przeciążenia, które mogą przekraczać znacznie pełne obciążenie.

## SILNIKI ELEKTRYCZNE – RODZAJE PRACY WG. PN-IEC 34-1:1997



## RODZAJE SILNIKÓW - PRZYKŁADY

Silniki asynchroniczne

SIEMENS

IEC Squirrel-Cage Motors

Frame sizes 56 to 450  
Power range 0.06 to 1250 kW

Catalog D 81.1 - 2008



Introduction

New Generation 1LE1BFC1

Standard motors up to frame size 315 L

Non-standard motor frame size 315 and above

Explosion-proof motors

Motors operating with frequency converters

Pump motors

Fan motors

Compressor motors

Smoke extraction motors

Marine motors

0

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

## RODZAJE SILNIKÓW - PRZYKŁADY

Silniki asynchroniczne

SIEMENS



IEC Squirrel-Cage Motors

Introduction motors 1LA, 1LG, 1LL, 1LP, 1MA, 1MJ, 1PP, 1PQ

General technical data

Admissible axial load

1LA5, 1LA6, 1LA7, 1LP5, 1LP7, 1MA6, 1MA7, 1MJ6, 1MJ7, 1PP5, 1PP6, 1PP7 motors in vertical type of construction - basic version

Frame size	3000 rpm		1500 rpm		1000 rpm		750 rpm	
	downwards	upwards	downwards	upwards	downwards	upwards	downwards	upwards
56	Load down N	Load up N	Load down N	Load up N	Load down N	Load up N	Load down N	Load up N
63	80	245	250	85	80	200	210	85
71	105	305	320	130	90	280	440	130
80	110	425	360	160	100	540	605	100
90	110	440	360	180	100	680	580	100
100	140	710	550	280	130	900	830	285
112	140	710	550	300	130	900	850	310
132	200	1200	950	470	180	1660	1200	420
160	1500	15500	13000	4270	15000	47300	18000	4770

## RODZAJE SILNIKÓW - PRZYKŁADY

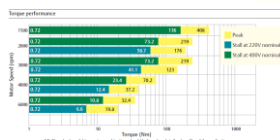
Silniki BLDC



rpm  
obr/min  
min<sup>-1</sup>



	095	U	2	B	30	1	V	
Frame size	095	U = 230V		2 = Standard peak torque		B = High peak torque		
Motor voltage	095	2 = Standard peak torque		B = High peak torque		V = High energy/disipation		
Peak torque selection	095 frame only		075-142 frame only		075-190 frame only			
Stator length	A	C		D				
Winding speed	095 frame only	60 - 6000 rpm		1 = Parking brake fitted 24Vdc				
Brake	095 frame only	X = Special		V = Power and Signal vertical				
Connection type	0 = Not fitted (Std)		X = Special		0 = Not fitted (Std)			
	B = Power and Signal 90° rotatable (Std)		C = Power 90° rotatable and Signal vertical		A = Power and Signal 90° fixed			

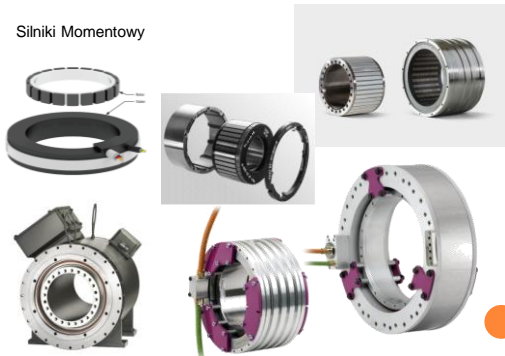


40 - 4000 rpm	1 = Parking brake fitted 24Vdc	075-190 frame only
45 - 4500 rpm	5 = High energy/disipation	B = Power and Signal 90° rotatable
50 - 5000 rpm	0 = Not fitted (Std)	X = Special
60 - 6000 rpm	1 = Parking brake fitted 24Vdc	075-190 frame only
10 - 1000 rpm	0 = Not fitted (Std)	V = Power and Signal vertical/Std
15 - 1500 rpm	5 = High energy/disipation	X = Special
20* - 2000 rpm		250 frame only
25* - 2500 rpm		250 frame only



### RODZAJE SILNIKÓW - PRZYKŁADY

#### Silniki Momentowe




---

---

---

---

---

---

---

---

### RODZAJE SILNIKÓW - PRZYKŁADY

#### Silniki Momentowe

SIEMENS



#### Kompletne silniki momentowe 1FW3

Kompletne silniki momentowe są silnikami synchronicznymi AC, z magnesami trwałymi. Są one szczególnie polecane do użycia jako bezpośrednie napędy w aplikacjach z zakresami momentu od 100Nm do 7000Nm, przy prędkościach od 50 do 1700 obr./min.

#### Silniki momentowe 1FW6 (do zabudowy)

Idealne dla osi obrotowych z wysokim momentem obrotowym i mogą być bezpośrednio zintegrowane z maszyną. Pracują z najwyższą precyzją i dynamiką, ponieważ sprężystość i luzy w systemie napędowym zostają całkowicie wyeliminowane a masa całkowita i siły tarcia zminimalizowane. Zastosowanie w maszynach zadaniowych, stołach obrotowych, osiach uchylnych i obrotowych oraz we wrzeciennikach frezarskich.

Osiągają one moment obrotowy do 8570 Nm




---

---

---

---

---

---

---

---

### ZABUDOWA SILNIKÓW




---

---

---

---

---

---

---

---

## ZABUDOWA SILNIKÓW



## RODZAJE SILNIKÓW - PRZYKŁADY

## Silniki Liniowe

**Silniki liniowe 1FN3**

Główną zaletą silników liniowych jest wykluczenie efektów sprężystości, błędów geometrii, efektów tarcia i drgań własnych układu napędowego. Dzięki temu sterowanie ruchem jest maksymalnie dynamiczne i precyzyjne.

Silniki liniowe z grupy 1FN3 odznaczają się prędkością przemieszczania (do 800 m/min), dużą dynamiką i szczególnie dużą precyzją. Stopień ochrony silnika wynosi IP65. Silnik osiąga maksymalną siłę 20700 N.

Zastosowanie silników 1FN3 pozwala na rezygnację z mechanicznej części układu sterowania, tj. śruby tocznej, sprzęgła czy sprzęgła pasowego.

**Silniki liniowe 1FN6**

Rodzina synchronicznych silników liniowych z chłodzeniem własnym lub wodnym.

Zakres sił maksymalnych dla silników z chłodzeniem własnym wynosi od 157 do 8080 N, natomiast z chłodzeniem wodnym wynosi od 157 do 1890 N.

Maksymalne prędkości przemieszczania sięgają 1280 m/min (z chłodzeniem własnym) i 852 m/min (z chłodzeniem wodnym).

## RODZAJE SILNIKÓW - PRZYKŁADY

## Silniki Liniowe

