

PUBLIKACJA SPECJALISTYCZNA



# UTRZYMANIE RUCHU

4/2015

**DODATEK SPECJALNY:**  
Napędy – rynek,  
dobór, eksploatacja

Oznakowanie  
bezpieczeństwa maszyn

Cechy serwonapędów  
elektropneumatycznych

## Robotyzacja – zbawienie czy przekleństwo?



dr inż. Mariusz Hetmańczyk  
EMT Systems Sp. z o.o.

# Napędy elektryczne

## Kryteria doboru do aplikacji przemysłowych

Jakie kryteria doboru napędów elektrycznych są niezbędne do spełnienia w przypadku wymagań różnych aplikacji przemysłowych? Jakie parametry eksploatacyjne wpływają na zachowanie założonej dynamiki ruchu oraz jakości parametrów obsługiwanego procesu? Przedstawiamy podstawowe charakterystyki mechaniczne najczęściej spotykanych maszyn roboczych oraz ogólną zależność umożliwiającą wyznaczenie przybliżonej wartości momentu oporowego maszyn o ruchu obrotowym.





Poznanie podstaw doboru komponentów składowych urządzeń napędowych wymaga znajomości przebiegu pracy obsługiwanej maszyny oraz możliwości oferowanych przez nowoczesne urządzenia sterujące napędami. Kryteria doboru napędów elektrycznych można podzielić na wiele grup uwzględniających podstawowe parametry w postaci: mocy znamionowej [kW], prędkości obrotowej [obr./min], momentów obrotowego oraz rozruchowego [Nm], wymaganych parametrów sieci zasilającej (napięcia oraz natężenia prądów znamionowego oraz rozruchowego), wymagań eksploatacyjnych (przebiegu pracy napędu, sposobu mocowania, parametrów eksploatacyjnych obudowy, sposobu montażu, typu chłodzenia), współczynnika mocy, wartości znamionowej prędkości obrotowej, zmienności kierunku obrotów oraz wymaganej dynamiki, a także wartości współczynnika sprawności, typu sterowania (w tym sposobu rozruchu, sterowania momentem i prędkością), dostępności dodatkowych opcji konfiguracji (przekładni, sprzęgieł, wykonania w postaci układu motoreduktora, hamulca, enkodera) oraz kryteriów ekonomicznych.

Przedstawione wymagania określone są przez grupy norm identyfikujących oznaczenia naniesione na tabliczkach znamionowych silników elektrycznych, a ich identyfikacja nie niesie ze sobą istotnych problemów.

Najważniejszym elementem jest jednak zaprojektowanie i dobór układu napędowego pozwalającego na uzyskanie wymaganego momentu obrotowego oraz założonej dynamiki ruchu (z uwzględnieniem zmienności sił obciążających, bezwładności oraz odśrodkowych).

### Kryterium mocy a dostępne typy silników elektrycznych

Każda z grup silników elektrycznych oferuje określony zakres dostępnych mocy (rys. 1). Najczęściej używana grupa asynchronicznych silników prądu przemiennego działa w szerokim zakresie wartości mocy, a przy tym cechuje się szeregiem zalet eksploatacyjnych (m.in.: prostotą podłączenia do sieci, swobodnym sterowaniem parametrami pracy, szerokim spektrum metod chłodzenia oraz relatywnie niską ceną). Oczywiście każda grupa silników różni się sposobem sterowania, budową oraz

charakterystykami pracy, co dodatkowo wzbogaca możliwości doboru silnika do konkretnej aplikacji napędowej (tab. 1). Kolejnym istotnym aspektem jest zakres rozwijanej wartości prędkości obrotowej, przy którym spełniony jest warunek stałości oraz zachowania dopuszczalnych odchyłek, wynikających ze zmiennych warunków pracy (wymaganie związane z jakością parametrów pracy).

### Określenie wartości momentu oporowego silnika napędowego

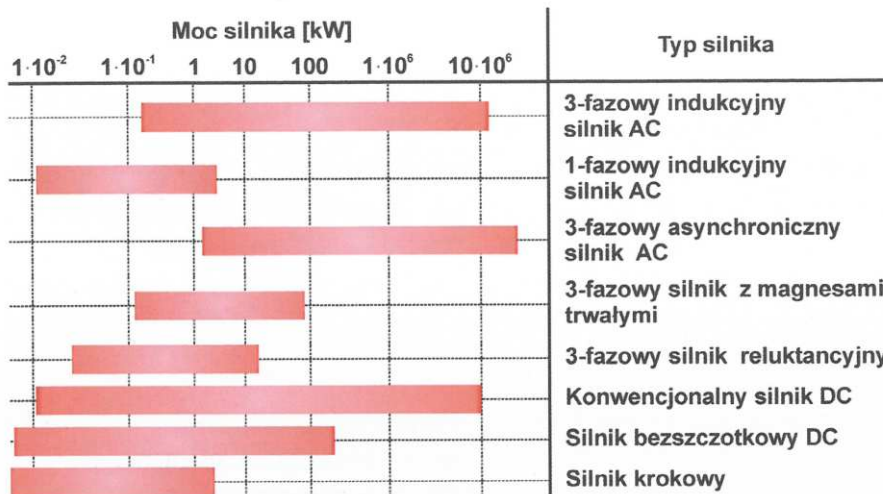
W fazie doboru układu napędowego należy zwrócić uwagę na konfigurację zespołów pośredniczących w przekazywaniu momentu napędowego z silnika (tzn. sprzęgieł, przekładni mechanicznych) oraz charakterystykę pracy maszyny roboczej. Moment dostępny na wale silnika powinien umożliwiać pokonanie oporów wewnętrznych układu napędowego oraz napędzanej maszyny, zebranych w postaci momentów oporowych:

- **czynnych  $M_c$  (zmiana energii potencjalnej)** – są one związane bezpośrednio ze zmianami oporów ruchu ▶

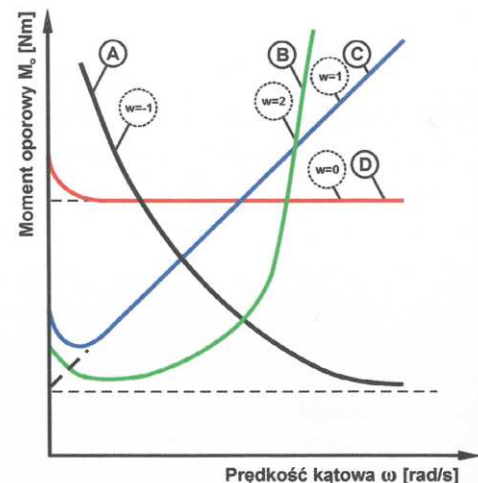
Lp.	Typ silnika	Zalety	Wady
1.	Silniki prądu stałego	<ul style="list-style-type: none"> <li>• niska masa,</li> <li>• duży moment mechaniczny,</li> <li>• wysoki współczynnik sprawności,</li> <li>• łatwość regulacji parametrów roboczych,</li> <li>• wysokie wartości prędkości obrotowych</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zasilanie przez prostownik,</li> <li>• wysoki koszt,</li> <li>• kłopotliwa konserwacja,</li> <li>• duży hałas,</li> <li>• praca dorywcza,</li> <li>• niski stopień odporności na warunki środowiskowe</li> </ul>
2.	Silniki prądu zmiennego	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zasilanie bezpośrednio z sieci,</li> <li>• wysoka trwałość,</li> <li>• cicha praca,</li> <li>• bezobsługowość,</li> <li>• niski koszt,</li> <li>• duża różnorodność doboru algorytmów kontroli prędkości oraz momentu,</li> <li>• możliwość uzyskania stałego momentu obrotowego nawet w niskich zakresach prędkości obrotowych</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mała wartość momentu rozruchowego,</li> <li>• duży ciężar,</li> <li>• ograniczone wartości prędkości obrotowych,</li> <li>• wymagane użycie dodatkowego urządzenia do regulacji parametrów pracy (przetwornica częstotliwości)</li> </ul>
3.	Silniki krokowe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bezpośrednia kontrola,</li> <li>• cicha praca,</li> <li>• wysoka trwałość,</li> <li>• produkowane również jako jednostki liniowe,</li> <li>• stała wartość momentu w fazie spoczynku,</li> <li>• wysoka dynamika pracy</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• skomplikowane układy zasilania,</li> <li>• niska wartość momentu mechanicznego,</li> <li>• duża masa,</li> <li>• wysoki koszt,</li> <li>• niska sprawność,</li> <li>• możliwość wystąpienia stref rezonansowych (zależne od częstotliwości sterowania)</li> </ul>
4.	Silniki bezszczotkowe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• duża wartość momentu rozruchowego,</li> <li>• niska masa,</li> <li>• cicha praca,</li> <li>• bezobsługowość,</li> <li>• wysoka trwałość,</li> <li>• możliwość pracy w środowiskach zagrożonych wybuchem,</li> <li>• możliwość precyzyjnej regulacji prędkości obrotowej w szerokim zakresie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• wysoki koszt zakupu oraz układu sterowania,</li> <li>• występowanie tętnienia momentu elektromagnetycznego,</li> <li>• problemy związane z kontrolą położenia wirnika</li> </ul>

Tab. 1. Porównanie wybranych typów silników elektrycznych [1-6]





Rys. 1. Zakresy mocy uzyskiwanych przez różne konstrukcje silników elektrycznych [1]



Rys. 2. Charakterystyki mechaniczne maszyn roboczych [1, 3, 4]

► wywołanych zmiennymi parametrami procesu (np. przemieszczanie obiektów, wpływ działania elementów sprężystych) oraz z towarzyszącą im zmiennością charakterystyki podzespołu napędowego;

- **biernych  $M_b$  (zmiana energii kinetycznej)** – są one zależne od wartości sił dynamicznych oraz bezwładności (zmiana kierunku ruchu, przyspieszenia, rozpędzanie oraz hamowanie elementów ruchomych).

Należy pamiętać o dwóch istotnych zasadach: **momenty oporowe czynne  $M_c$**  w pewnych przypadkach działają jako czynnik zwiększający wartość momentu napędowego (zwrot energii potencjalnej), a **momenty oporowe bierne  $M_b$**  w każdym z przypadków przeciwdziałają ruchowi robocznemu maszyny, a więc mają charakter hamujący.

W wyniku analizy ruchu maszyn można wyodrębnić cztery podstawowe charakterystyki pracy maszyn roboczych (rys. 2). Ogólny wzór na wyznaczenie wartości momentu oporowego  $M_o$  w przypadku ma-

szyn wykonujących ruchy obrotowe, można zapisać w następującej postaci [1, 3, 4]:

$$M_o = M_{OT} + (M_{Ozn} - M_{OT}) \left( \frac{\omega}{\omega_{zn}} \right)^w$$

gdzie:

$M_{OT}$  – moment tarcia ruchowego [Nm],  
 $M_{Ozn}$  – moment znamionowy [Nm],  
 $\omega, \omega_{zn}$  – wartość prędkości kątowych ruchu podzespołów (rzeczywistej) oraz znamionowej silnika [rad/s],  
 $w$  – wykładnik potęgowy uwzględniający typ maszyny roboczej (tj. kształt charakterystyki mechanicznej, rys. 2).

W każdym z przypadków należy rozważyć indywidualne podejście do określenia wartości zewnętrznych momentów obciążających, pamiętając o uwzględnieniu wszystkich składników wpływających na opory ruchu napędu [6].

W doborze napędów elektrycznych coraz częściej pojawiają się wytyczne dotyczące ekonomii napędu. W aplikacjach o szybkiej zmienności prędkości, częstym hamowaniu oraz zmianach kierunku obrotów istotny staje się fakt dużej ilości energii

rozpraszonej (w postaci ciepła) w rezystorach hamujących. Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie układów napędowych umożliwiających zwrot energii elektrycznej do sieci [1].

### Wymagania dotyczące przetwornic częstotliwości

Napęd elektryczny bez możliwości swobodnej regulacji podstawowych wartości parametrów pracy jest rzadko spotykanym przypadkiem. W układach przemysłowych używane są różne typy przetwornic częstotliwości, dedykowanych do tradycyjnych silników prądu przemiennego lub do serwo-silników.

Pierwszym kryterium doboru jest dostosowanie mocy przetwornicy częstotliwości do wymagań silnika, co może zostać zrealizowane na bazie różnych metod (określenia wartości natężenia prądu lub mocy pozornej, czynnej, znamionowej). Wśród wielu kryteriów można wyodrębnić dwie podstawowe grupy (rys. 3).

Na uwagę zasługuje zbiór funkcji dodatkowych oferowanych przez przetwornice

Lp.	Oznaczenie	Cechy charakterystyki momentu oporowego $M_o$	Kategorie napędzanych maszyn
1.	A	Odwrotnie proporcjonalna do prędkości kątowej	Przemysł hutniczy (urządzenia do nawijania i rozwijania taśm, wstęg oraz drutów), branża papiernicza i włókiennicza
2.	B	Zależy od kwadratu prędkości kątowej	Wentylatory, śruby okrętowe, hydraulika siłowa (pompy odśrodkowe), turbosprężarki itp.
3.	C	Liniowa zależność od prędkości kątowej	Prądnicą obcowzbudną prądu stałego obciążoną stałą wartością rezystancji
4.	D	O stałej wartości	Górnictwo (maszyny wyciągowe, przenośniki taśmowe), transport (mechanizmy podnoszenia i jazdy urządzeń dźwigowych), przemysł hutniczy (wałcarki, kalandry), maszyny papiernicze, obrabiarki z posuwem proporcjonalnym do prędkości skrawania itp.

Tab. 2. Przyporządkowanie urządzeń i maszyn roboczych do charakterystyk mechanicznych przedstawionych na rys. 2



częstotliwości (rys. 4), które determinują funkcjonalność nie tylko samego zespołu napędowego, ale całej aplikacji napędowej. Warto rozważyć dobór przetwornicy z dedykowanym zestawem parametrów ułatwiających etapy implementacji, opracowania algorytmów sterowania oraz diagnostyki kontrolowanego procesu lub urządzenia.

Przedstawione na rys. 4 grupy parametrów stanowią ogół możliwości konfiguracji układów dostępnych na rynku. Wiele przetwornic częstotliwości zawiera wbudowane algorytmy do obsługi pomp, wentylatorów itp. Dodatkowo umożliwiają kształtowanie przebiegu charakterystyki pracy w zależności od zmienności parametrów przepływu medium roboczego.

W aplikacjach wymagających bazowania na zderzakach mechanicznych lub wymagających zabezpieczenia przed kolizją elementów ruchomych z wyposażeniem warto rozważyć zastosowanie układu napędowego z kontrolą wartości momentu. Takie rozwiązanie umożliwia zapobieganie uszkodzeniom konstrukcji, a także zwiększa bezpieczeństwo pracowników.

## Poznanie podstaw doboru komponentów składowych urządzeń napędowych wymaga znajomości przebiegu pracy obsługiwanej maszyny oraz możliwości oferowanych przez nowoczesne urządzenia sterujące napędami.

### Podsumowanie

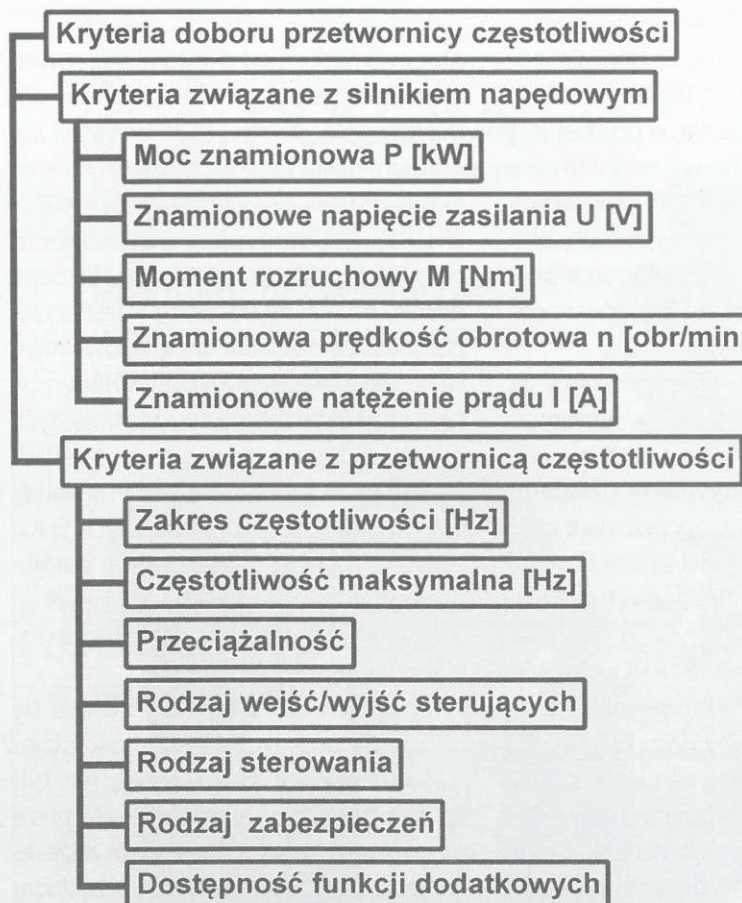
Wybór typu napędu należy rozpocząć od określenia wymagań procesu, maszyny lub obsługiwanego urządzenia. W większości przypadków układ napędowy traktowany jest jako zestawienie silnika elektrycznego (lub motoreduktora) oraz sterownika ruchu (np. przetwornicy częstotliwości). W przypadku napędów sklasyfikowanych jako elementy maszyn krytycznych warto wziąć pod uwagę także podatność diagnostyczną, charakteryzującą się możliwością zabudowy dodatkowych urządzeń lub czujników do oceny stanu bieżącego napędu oraz jego podzespołów eksploatacyjnych.

W przypadku zastosowań specjalnych istotne staje się spełnienie wymagań

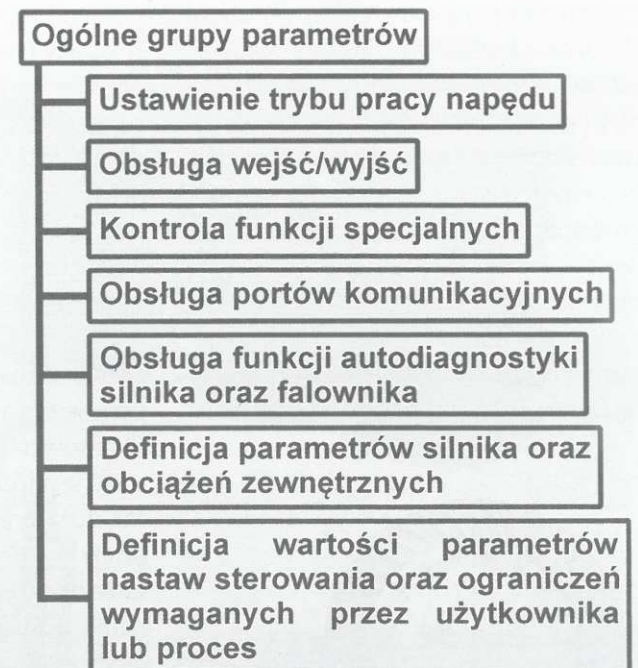
dodatkowych, typowych np. dla branży spożywczej, farmaceutycznej czy medycznej. □

### Piśmiennictwo

1. Hughes A.: *Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Application*. Elsevier Linacre House, London 2006.
2. Acarnley P.P.: *Stepping Motors: A Guide to Modern Theory and Practice*. IEE Publishing, London 2002.
3. Toliyat H.A., Kliman G.B.: *Handbook of Electric Motors*. CRC Press, Boca Raton 2004.
4. De Doncker R., Pulle D.W.J., Veltman A.: *Advanced Electrical Drives: Analysis, Modeling, Control*. Springer, Germany 2011.
5. Crowder R.M.: *Electric Drives and Electromechanical Systems*. Newnes, London 2006.
6. Kosmol J.: *Serwonapędy obrabiarek sterowanych numerycznie*. WNT, Warszawa 1998.



Rys. 3. Klasyfikacja podstawowych kryteriów istotnych w fazie doboru przetwornicy częstotliwości [1, 3-5]



Rys. 4. Podstawowe grupy parametrów przetwornicy częstotliwości [1, 3-5]