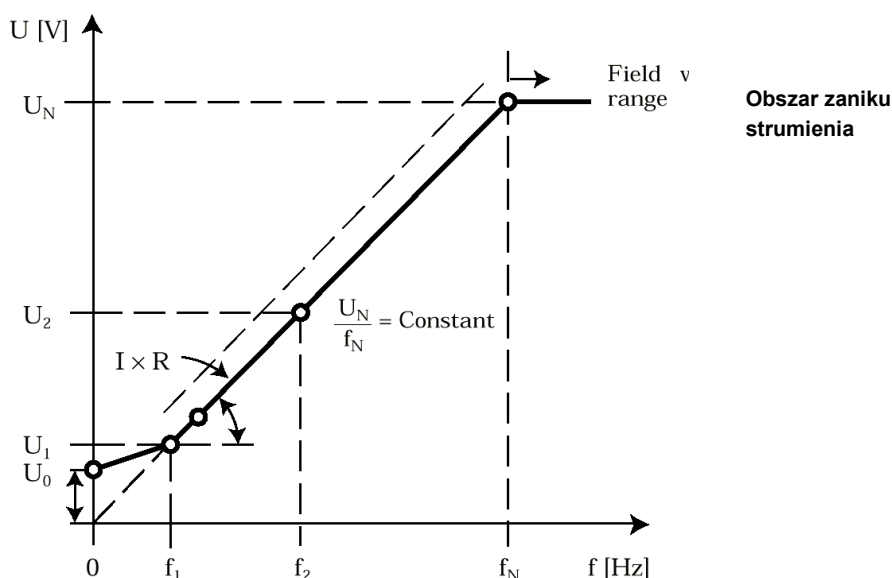


4 Przemienneiki częstotliwości i silniki trójfazowe

Moment obrotowy M rozwijany przez silnik asynchroniczny jest proporcjonalny do prądu I_w i strumienia ϕ : $M \sim \phi \times I_w$, gdzie I_w jest prądem wirnika, a ϕ jest strumieniem magnetycznym w szczeliny powietrznej silnika.

Do optymalizacji momentu obrotowego silnika, strumień magnetyczny ($\phi \sim V/f$) w szczeliny powietrznej silnika musi być utrzymany na stałym poziomie. To znaczy, że jeśli zmieniamy wartość częstotliwości, wartość napięcia musi być zmieniona proporcjonalnie, rys. 3.01.



Rys. 4.01 Sterowanie napięciem w funkcji częstotliwości - charakterystyka $U/f = \text{const}$.

Dla ciężkich rozruchów np. w podnośnikach śrubowych, konieczna jest optymalizacja momentu rozruchowego i wymuszenie dodatkowego napięcia początkowego U_0 . W źle dobranych warunkach zasilania silnik po prostu nie ruszy. Kiedy silnik jest obciążony i pracuje w zakresie małych prędkości - $f < 10\text{Hz}$, występuje duży spadek napięcia na rezystancji uzwojeń stojana. W szczególności dotyczy to małych silników. W konsekwencji ten spadek napięcia prowadzi do wyraźnego osłabienia strumienia ϕ w szczeliny powietrznej.

☒ Przykład.

Silnik o mocy $P=1,1\text{kW}$, napięciu nominalnym $U=3 \times 400\text{V}/f=50\text{Hz}$ o rezystancji uzwojenia stojana R (jednej fazy) wynoszącej około 8Ω , pobiera prąd 3A przy nominalnym obciążeniu. Spadek napięcia na rezystancji uzwojenia stojana w tym przypadku wynosi $R \times I = U$, wtedy $8\Omega \times 3\text{A} = 24\text{V}$. Producenci silników zapewniają, że taka strata jest kompensowana w trakcie normalnej pracy silnika.

Napięcie ok. 40V przy 5 Hz jest odpowiednim napięciem do sterowania silnika wg charakterystyki U/f . Jeśli obciążymy silnik nominalnie i pobierze on prąd do 3A, wtedy napięcie o wartości około 24V powoduje jedynie powstawanie strat. Ważne jest, że tylko napięcie o wartości 16V jest wykorzystywane do magnesowania silnika. Gdy silnik jest niedomagnesowany to wytwarza mniejszy moment napędowy.

Z powyżej analizy wynika że, aby utrzymać stały strumień silnika spadek napięcia na rezystancji uzwojeń silnika musi być kompensowany, a najprostszymi metodami realizującymi ten cel są:

- zwiększenie napięcia wyjściowego przemiennika częstotliwości w zakresie małych prędkości silnika przez wykorzystanie otwartej pętli sterowania.
- regulacja napięcia wyjściowego przemiennika częstotliwości poprzez wykorzystanie oddziaływania na wartość składowej czynnej prądu wyjściowego przemiennika.

Ta kompensacja nazywana jest: kompensacją $I \times R$, podbiciem napięcia (ang. boost), zwiększeniem momentu (ang. torque raising), a przez firmę DANFOSS nazywana jest kompensacją startu (ang. start compensation).

Taki sposób oddziaływania na wartość napięcia wyjściowego przemiennika częstotliwości ma pewne ograniczenia wynikające z występujących zakłóceń. Uniemożliwiają one właściwe przeprowadzenie pomiarów wartości skutecznej napięcia wyjściowego przemiennika, szczególnie przy szybkich zmianach obciążenia, np. w napędach z wahadłowym obciążeniem silnika rezystancja uzwojenia fazowego waha się w granicach 25% między silnikiem ciepłym a zimnym. Wartość napięcia kompensacji powinna wtedy przyjmować różne wartości.

Niewłaściwa wartość tego napięcia przy silniku nie obciążonym może prowadzić do jego przemagnesowania, a gdy silnik jest obciążony do zmniejszenia głównego strumienia. W przypadku przemagnesowania silnika, nastąpi przepływ składowej biernej prądu o nadmiernej wartości, co prowadzi do przegrzewania silnika. W przypadku dociążenia silnika przemagnesowanego będzie rozwijał on mały moment z powodu osłabionego strumienia głównego, co może spowodować jego zatrzymanie.

4.1 Warunki pracy silnika

4.1.1 Kompensacja

W niektórych przypadkach trudno jest właściwie dostroić przemiennik częstotliwości do silnika, niektóre z funkcji kompensacyjnych takie jak napięcie startu U_0 , start, kompensacja poślizgu, są trudne do zrozumienia.

Jakkolwiek, obecnie bardziej zaawansowane technicznie przemienniki częstotliwości automatycznie kontrolują te parametry kompensacyjne na podstawie częstotliwości, napięcia i prądu silnika. Zwykle nastawy kompensacyjne mogą być także zmieniane ręcznie.

4.1.2 Zależne i niezależne od obciążenia silnika parametry kompensacji

Parametry kompensacyjne umożliwiają zapewnienie optymalnego magnesowania i tym samym maksymalnego momentu, zarówno przy starcie silnika jak i od małych do maksymalnie dopuszczalnych prędkości silnika. Napięcie przemiennika otrzymuje odpowiednie napięcie dodatkowe, które efektywnie kompensuje wpływ spadku napięcia na rezystancji uzwojeń przy niskich częstotliwościach. Zależne od obciążenia parametry wpływające na wartość napięcia dodatkowego napięcia kompensacji - start i kompensacja poślizgu, zależą od dokładności pomiaru prądu obciążenia - składowej czynnej tego prądu. Parametr - napięcie startu, nie zależy od obciążenia i zapewnia optymalną wartość momentu w zakresie małych prędkości silnika.

Silniki, które są znacznie mniejsze od wymaganych dla danego przemiennika częstotliwości potrzebują ręcznego ustawienia napięcia startu dla zapewnienia właściwego magnesowania w zakresie małych prędkości silnika - niskich częstotliwości pracy przemiennika.

Jeśli kilka silników jest dołączonych do jednego przemiennika częstotliwości - praca równoległa, funkcje kompensacji napięcia zależne od obciążenia powinny być wyłączone. W przypadku stosowania przemienników częstotliwości najnowszych generacji kompensacja napięcia, w typowych zastosowaniach, jest realizowana automatycznie przez przemiennik częstotliwości.

4.1.3 Kompensacja poślizgu

Poślizg w silnikach asynchronicznych jest zależny od obciążenia i wynosi około 5% prędkości nominalnej silnika. Stąd, dla dwubiegunowego silnika poślizg będzie wynosić 150 obr./min.

Przy sterowaniu silnika przemiennikiem częstotliwości poślizg może wynosić ok. 50% w zakresie małych obrotów np. 300 obr./min. (tj. 10% wartości nominalnej).

Jeśli przemiennik częstotliwości steruje pracą silnika w zakresie 5% wartości nominalnej prędkości obrotowej przy pełnym obciążeniu, to silnik może nie ruszyć. Poślizg nie jest zjawiskiem korzystnym, lecz może być w pełni skompensowany przez przemiennik częstotliwości poprzez efektywny pomiar składowej czynnej prądu na wyjściach fazowych - fazowych prądów silnika.

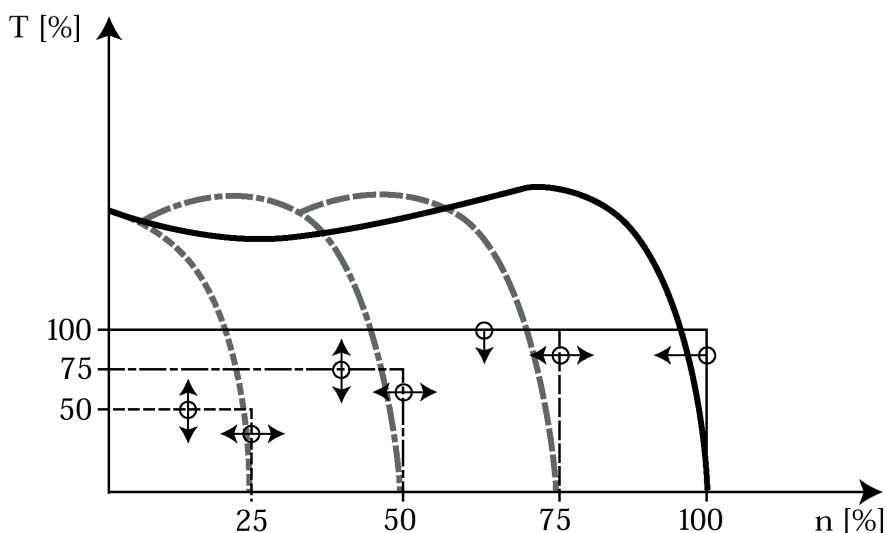
Kompensacja poślizgu jest realizowana przez odpowiednie zwiększenie częstotliwości napięcia wyjściowego przemiennika częstotliwości. Ta metoda jest nazywana czynną kompensacją poślizgu (ang. active slip compensation).

4.2 Charakterystyki momentu silnika

4.2.1 Ograniczenie prądowe

Jeśli przemiennik częstotliwości byłby zdolny do przesłania prądów wielokrotnie większych od prądów znamionowych silnika, charakterystyki momentu mogłyby przebiegać jak przedstawione na rys. 2.22.

Tak duże prądy, które mogłyby uszkodzić silnik lub elementy energoelektroniczne przemiennika częstotliwości, nie są wymagane dla zapewnienia normalnej pracy silnika. W konsekwencji przemiennik ogranicza prąd silnika przez zmniejszanie napięcia i częstotliwości wyjściowej. Poziom ograniczenia prądowego jest regulowany i gwarantuje, że silnik nie będzie pobierał zbyt dużego prądu przez dłuższy czas, co mogłoby doprowadzić do jego uszkodzenia. Ponieważ przemiennik częstotliwości steruje prędkością silnika niezależnie od obciążenia możliwe jest zadanie różnych wartości poziomów ograniczeń prądowych (prądów granicznych) dla różnych przedziałów prędkości obrotowych silnika.

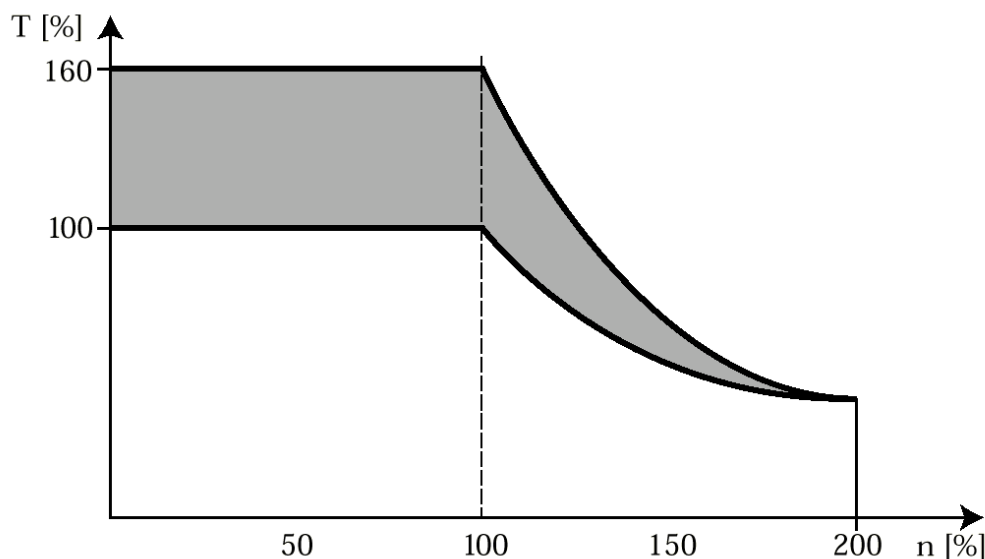


Rys. 4.02 Charakterystyki momentu silnika zasilanego z przemiennika częstotliwości mogą być zawarte w zakresach zaznaczonych prostokątami.

Charakterystyki momentu silnika zawierają się w obszarze prądów znamionowych przemiennika częstotliwości. Jednakże przewagą przemiennika częstotliwości jest możliwość zwiększenia momentu silnika ponad jego moment znamionowy, np. uzyskanie 160% wartości momentu znamionowego przez dłuższy lub krótszy okres czasu. Jest także możliwe dla przemiennika częstotliwości sterowanie pracą silnika przy prędkościach większych od jego prędkości synchronicznej. Silnik może pracować przy prędkościach nadsynchronicznych w zakresie ok. 200% nominalnych obrotów.

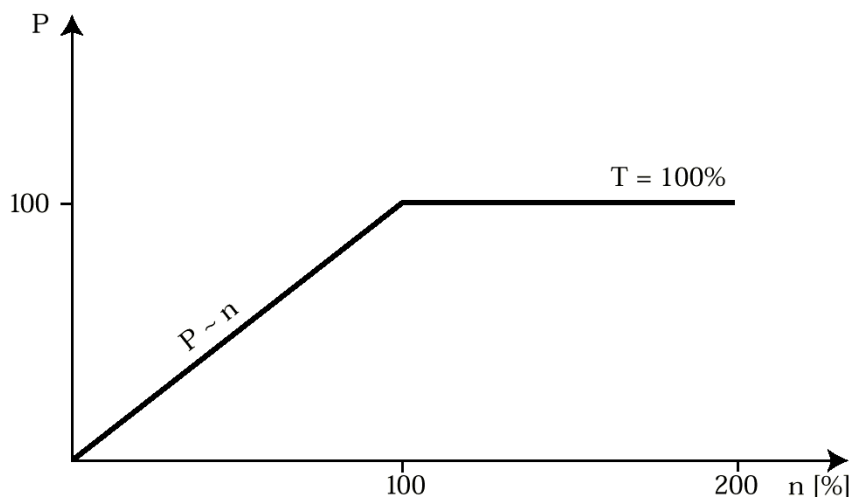
Przemiennik nie jest w stanie dostarczyć wyższego napięcia niż napięcie sieci, z której jest zasilany, co prowadzi do zmniejszania się stosunku napięcia zasilania silnika do częstotliwości przy przekraczaniu prędkości znamionowych. Wówczas pole

magnetyczne słabnie i moment wytwarzany na wale silnika zmniejsza się w stosunku $1/n$.



Rys. 4.03 Moment silnika w I i II strefie regulacji (I - obszar prędkości podsynchronicznych, II - obszar prędkości nadsynchronicznych).

Maksymalny prąd na wyjściu przemiennika częstotliwości pozostaje niezmienny ($I_s = \text{const.}$). To prowadzi do utrzymania stałej mocy silnika w przedziale prędkości od nominalnej do ok. 200% ponad prędkość nominalną.

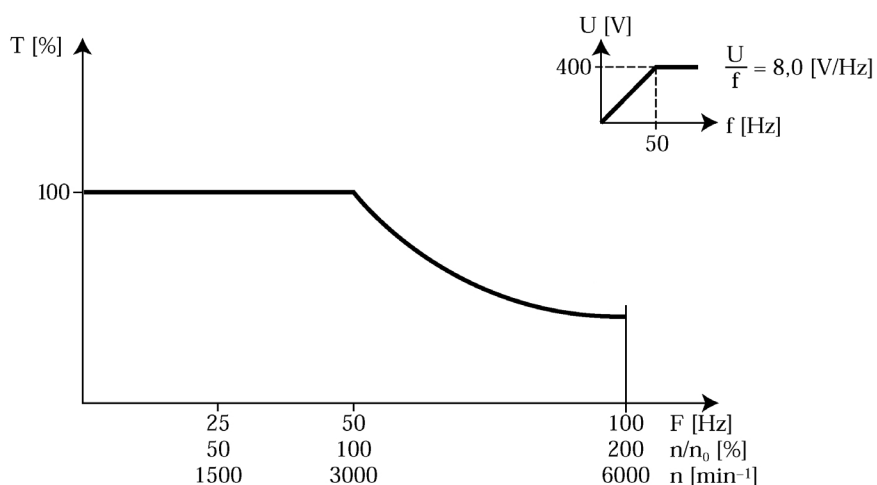


Rys. 4.04 Przebieg mocy czynnej silnika w funkcji prędkości obrotowej.

Szybkość silnika może być wyrażona na trzema różnymi sposobami:

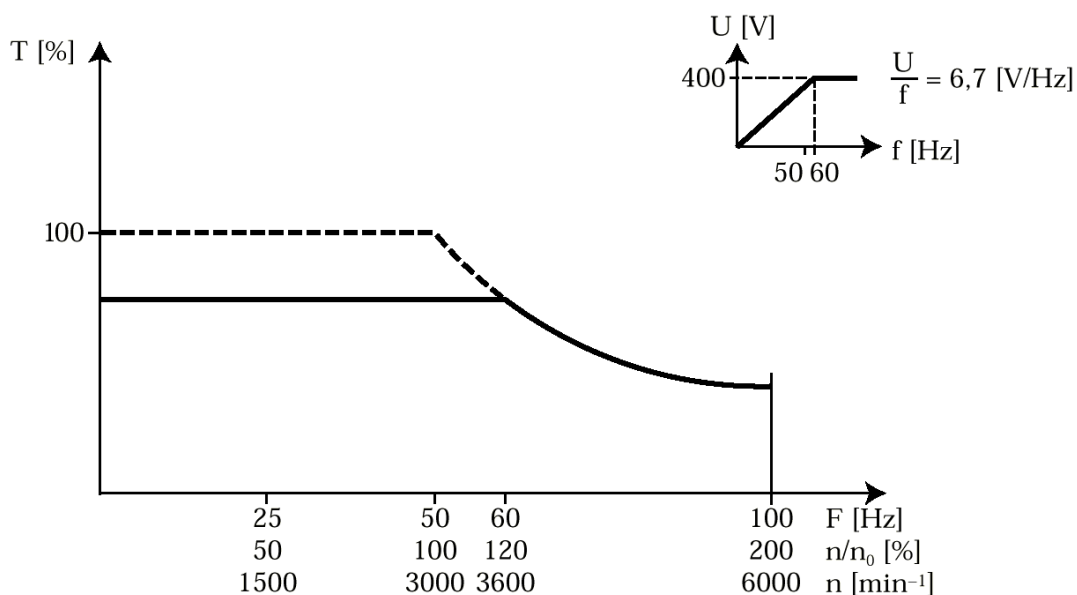
- w obrotach na minutę - rpm,
- w hercach - Hz,
- w procentach nominalnej prędkości silnika - %.

Punktem odniesienia jest zawsze prędkość nominalna przy nominalnej częstotliwości.



Rys. 4.05 Przedstawienie opisu prędkości silnika (tutaj dla silnika dwubiegowego).

Zmiana stosunku napięcia do częstotliwości ma wpływ na przebieg charakterystyk momentu obrotowego silnika. Na rysunkach poniżej pokazany jest przebieg charakterystyk momentu w zależności od stosunku U/f , zmniejszenie stosunku z wartości 8,0V/Hz, na 6,7V/Hz. powoduje zmniejszenie wartości momentu.



Rys. 4.06 Przebieg momentu przy różnych stosunkach U/f .

4.2.2 Wymagania stawiane zaawansowanym cyfrowym przemiennikom częstotliwości

Rozwój energoelektroniki, technologii mikroprocesorowej oraz układów scalonych odegrały ogromną rolę w rozwoju nowoczesnych przemienników częstotliwości, a w szczególności opartych na układach cyfrowych, które cechują się większą szybkością i dokładnością przetwarzania danych.

Dodatkowymi atutami cyfrowych urządzeń stosowanych w napędach są:

- polepszenie powtarzalności i stabilność parametrów sterowania,
- łatwiejsze sterowanie układami pomiarowymi,
- elastyczność urządzeń w zastosowaniach do nietypowych aplikacji,
- precyzyjniejsze sterowanie, także z większych odległości np.: łącza modemowe RS485, itp.

Stare analogowe przemienniki częstotliwości posiadały analogowe podzespoły regulacyjne: potencjometry, elementy bierne, których parametry zmieniały się wraz ze zmianą temperatury i co stwarzało dodatkowo szereg problemów z częściami zamiennymi. Natomiast w przemiennikach cyfrowych jest to, że wszystkie parametry sterowania mogą być zapisane w pamięci EEPROM.

Mikroprocesor pozwala na łatwą realizację takich funkcji jak: czynna kontrola przemiennika, przełączanie między zestawami wprowadzanych danych, itp. Nawet kompletne procedury programowe - sterowania procesami i inne w pełni inteligentne procedury dla nietypowych napędów silników mogą być zawarte w układzie sterowania przemiennika częstotliwości. Produkowane dzisiaj przemienniki częstotliwości do napędów silników prądu przemiennego - AC charakteryzują się odpowiednio dużą dynamiką pracy dla szerokiego zakresu regulacji prędkości i są stosowane w aplikacjach, gdzie poprzednio jedynie można było stosować przekształtniki napięcia stałego - DC i silniki prądu stałego.

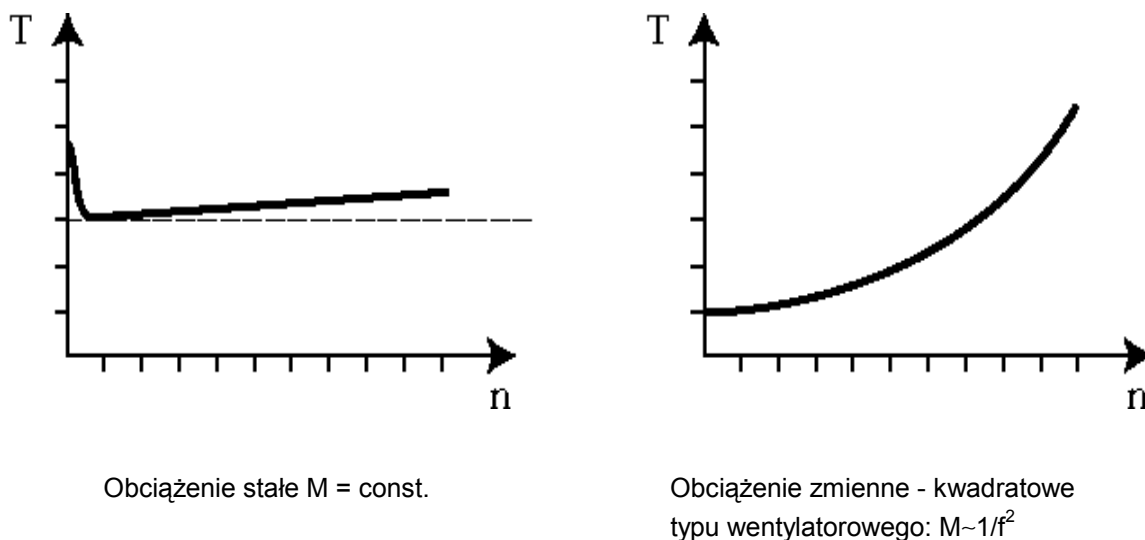
Wymagania napędów w nowych obszarach aplikacji spowodowały porzucenie techniki sterowania przemienników wg metody U/f i wprowadzone zostały do przemienników metody sterowania napięciem silnika wg wektora napięcia zorientowanego polowo (ang. Field Oriented Vector Control).

4.3 Dobór przemiennika częstotliwości

Kiedy decydujemy o rodzaju przemiennika częstotliwości, pierwszym krokiem jest rozważenie przebiegu charakterystyki obciążenia silnika funkcji prędkości. Możemy wyróżnić cztery metody wyznaczania wymaganych osiągnięć wyjściowych przemiennika częstotliwości, wybór metody zależy od danych silnika.

4.3.1 Rodzaje charakterystyk obciążenia

Zanim zdecydujemy się na określenie rodzaju przemiennika częstotliwości, należy rozważyć, która z dwóch najczęściej występujących charakterystyk obciążenia jest w danym przypadku, rys.2.29 - str. 34.



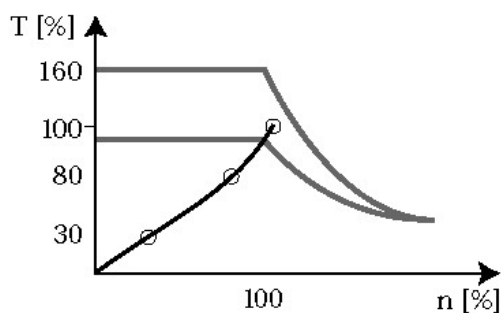
Rys. 4.07 Stałe i zmienne w kwadracie do prędkości obciążenie momentem roboczym silnika.

Przesłanki dla odróżnienia charakterystyk obciążenia są następujące:

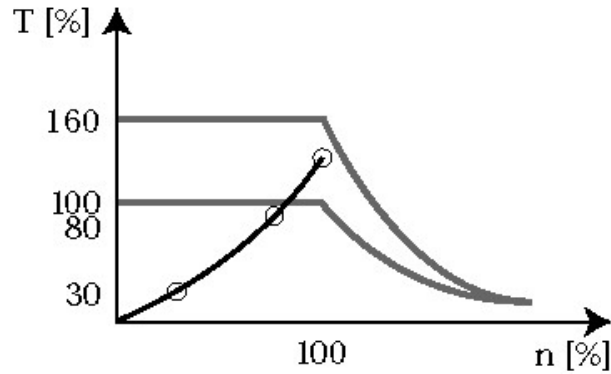
- - kiedy prędkość pomp odśrodkowych i wentylatorów wzrasta, moc również wzrasta proporcjonalnie do prędkości w trzeciej potęgze $P = f(n^3)$,
- - podczas normalnej pracy pomp odśrodkowych i wentylatorów prędkość jest regulowana w zakresie 50-90% prędkości znamionowej. Obciążenie wzrasta w kwadracie prędkości obrotowej silnika i może przykładowo kształtować się na poziomie 30-80%.

Te dwa czynniki są uwzględniane w charakterystykach momentu przemiennika częstotliwości przy sterowaniu silnika.

Rysunki 4.08 i 4.09 pokazują przebieg charakterystyk momentu dla dwóch różnych pod względem mocy przemienników częstotliwości - jeden z nich ma moc mniejszą od mocy nominalnej silnika. Oba przemienniki obciążone są tym samym momentem, typowym dla pomp odśrodkowych.



Rys. 4.08 Duży przemiennik częstotliwości - moc i prądy dobrane do wartości nominalnych silnika.

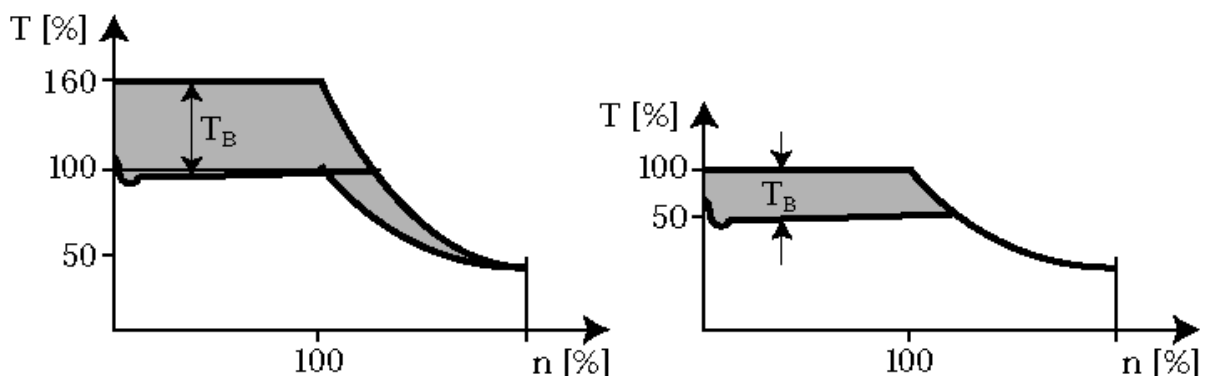


Rys. 4.09 Mniejszy przemiennik częstotliwości - moc i prądy mniejsze od wartości nominalnych silnika.

Na rysunku 4.08 możemy zauważyć, że całkowity obszar pracy pompy (0-100%) leży w granicach wartości silnika. Ponieważ obszar normalnej pracy pompy do tego przypadku wynosi 30-80% prędkości znamionowej, dlatego przemiennik częstotliwości o mniejszej mocy może być tu także zastosowany.

Jeżeli obciążenie silnika jest stałe, silnik musi być zdolny do wytworzenia większego momentu niż moment obciążający. Nadwyżka momentu zużywana jest do zapewnienia odpowiedniego rozpędzania (przyspieszania) wału silnika.

Moment nadmiarowy o wartości ok. 60% wytwarzany przez przemiennik częstotliwości przez krótki okres czasu, jest wystarczający dla zapewnienia odpowiedniego przyspieszenia silnika i uzyskania dużego momentu rozruchowego; np. w napędzie taśmociągu. Możliwość przeciążenia przemiennika zapewnia, że system jest zdolny radzić sobie z nagłym chwilowym wzrostem obciążenia. Przemiennik częstotliwości nie dopuszcza, aby jakiegokolwiek przeciążenie momentem M_B wykraczało poza granice założone granice, np. określone parametrami znamionowymi przemiennika, rys 4.10.

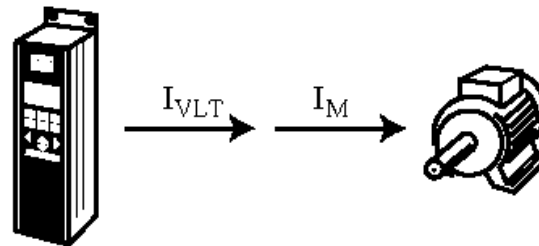


Rys. 4.10 Nadmiarowy moment rozruchowy silnika jest wykorzystywany dla zapewnienia odpowiedniego przyspieszenia.

Możliwość przeciążenia gwarantuje, że system jest zdolny radzić sobie z nagłą zmianą obciążenia.

Kiedy charakterystyki obciążenia maszyny roboczej są znane - przebieg momentu obciążenia w funkcji prędkości silnika, wtedy o doborze typu przemiennika częstotliwości decydują 4 różne zestawy danych technicznych silnika.

1. Typ przemiennika częstotliwości może zostać szybko i dokładnie wybrany na podstawie prądu I_M , który pobiera silnik. Jeżeli silnik nie jest w pełni obciążony, prąd silnika może zostać zmierzony w podobnym napięciu pracującym przy pełnej wydajności.



Rys. 4.11 Wybór przemiennika częstotliwości na podstawie nominalnego prądu silnika.

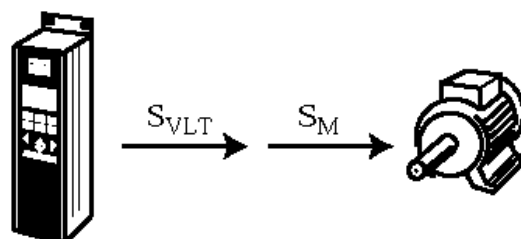
☒ Przykład: Silnik 7,5kW/3x400 V pobiera prąd 14,73 A.

Odwołując się do danych technicznych przemiennika, możemy stwierdzić, że powinien on zostać wybrany na ciągły prąd wyjściowy wyższy albo równy 14,73 A dla stałego momentowej lub zmiennej w kwadracie prędkości charakterystyki momentu obciążenia.

Uwaga:

Jeżeli przemiennik jest wybierany na podstawie mocy - metody 2 i 4, to ważne jest dla wyznaczenia jego mocy, aby moc podana w danych technicznych przemiennika była porównywana dla tego samego napięcia jak napięcie zasilania silnika. Takie postępowanie nie jest konieczne, jeżeli przemiennik został dobrany na podstawie prądu - metoda 1, ponieważ na prąd wyjściowy przemiennika ma wpływ na pozostałe parametry przemiennika, które należy wziąć pod uwagę przy jego doborze.

2. Przemiennik częstotliwości można dobierać na podstawie mocy pozornej S_M pobieranej przez silnik i dostarczanej z przemiennika częstotliwości.



Rys. 4.12 Wybór przemiennika częstotliwości bazujący na wartości mocy pozornej S_M .

☒ Przykład: Silnik 7.5kW/3x400V pobiera prąd 14.73 A

$$S_m = \frac{U \times I \times \sqrt{3}}{1000} = \frac{400 \times 14,73 \times \sqrt{3}}{1000} = 10,2 \text{ kVA}$$

Odwołujemy się do danych technicznych przemiennika częstotliwości i wybieramy przemiennik, którego maksymalna ciągła wyjściowa moc pozorna jest wyższa lub równa 10,2kVA przy stałej albo zmiennej w kwadracie w funkcji prędkości charakterystyce momentu.

3. Przemiennik może być również dobierany wg mocy czynnej P_M wytwarzanej przez silnik. Jednakże, ponieważ $\cos \phi$ i sprawność η silnika zmieniają się wraz z obciążeniem, to ta metoda jest nieprecyzyjna.



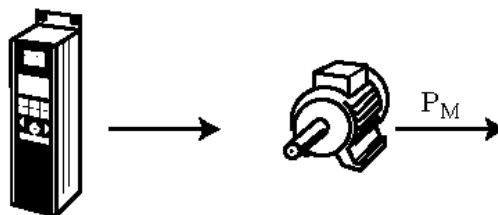
Rys. 4.13 Wybór przemiennika częstotliwości w zależności od mocy czynnej na wale silnika.

☒ Przykład: Silnik o mocy 3kW ze sprawnością $\eta = 0.8$ i $\cos \phi = 0.81$

$$S_m = \frac{P_M}{\eta \times \cos \phi} = \frac{3}{0,8 \times 0,81} = 4,6 \text{ kVA}$$

Przemiennik jest dobierany – na podstawie jego danych technicznych, na maksymalną wyjściową ciągłą moc czynną większą lub równą 4.6kVA stałej lub kwadratowej charakterystyce momentu.

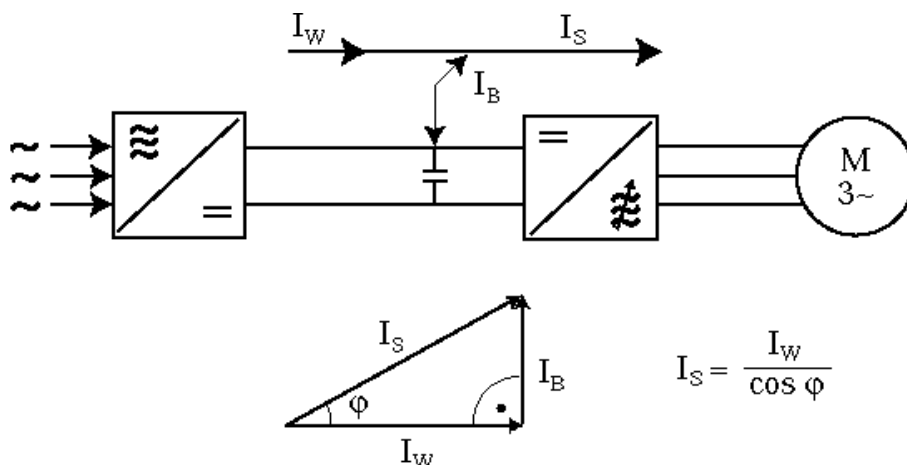
4. Z praktycznych przyczyn moc znamionowa większości przemienników jest specyfikowana dla standardowych serii - typoszeregu silników asynchronicznych. W wyniku tego przemienniki często są dobierane na tej podstawie, ale może to prowadzić do nie precyzyjnego dopasowania, w szczególności jeżeli silnik jest przeznaczony do pracy z nie pełnym obciążeniem.



Rys. 4.14 Wybór przemiennika na podstawie na podstawie standardowych serii silników.

4.3.2 Rozpływ prądu w przemienniku częstotliwości. Współczynnik mocy silnika $\cos\phi$

Prąd magnesujący silnika jest przesyłany z kondensatora obwodu pośredniego przemiennika częstotliwości. Prąd magnesujący jest prądem biernym płynącym między kondensatorem i silnikiem, rys. 4.15.



Rys. 4.15 Prądy w przemienniku częstotliwości.

Tylko prąd czynny I_W jest pobierany bezpośrednio z sieci zasilającej. Dlatego prąd wyjściowy przemiennika jest zawsze większy niż jego prąd na wejściu zasilania. Dodatkowo część prądu czynnego I_{loss} pobierana z transformatora sieci zasilania powoduje straty wydzielane w sieci zasilającej, co można wyraźnie zaobserwować w czasie pracy przemiennika częstotliwości bez obciążenia.

☒ Przykład:

Prąd przewodowy nieobciążonego czterobiegunowego silnika 1,1kW wynosi 1,6 A. Prąd na wyjściach mocy przemiennika częstotliwości jest w przybliżeniu równy 1,6 A. Prąd fazowy na wejściach zasilania przemiennika częstotliwości przy pracy silnika bez obciążenia jest prawie równy zero.

Producenci silników normalnie określają $\cos \phi$ przy prądzie nominalnym. Przy niższej wartości $\cos \phi$ - np. dla silnika reluktancyjnego, nominalny prąd silnika – przy tej samej mocy i nominalnym napięciu – będzie większy, jak pokazuje poniższe równanie:

$$I_s = \frac{I_w}{\cos \phi}$$

Jeżeli przemiennik został dobrany zgodnie z kryterium prądowym - metoda 1, wtedy nie będzie możliwa żadna redukcja nominalnego momentu obrotowego. Kondensator dołączony do zacisków uzwojeń silnika zapewnienia odpowiedniego prądu biernego kompensacji musi być usunięty.

Wysoka częstotliwość przełączania zaworów mocy falownika przemiennika częstotliwości powoduje, składowej przemiennej prądu na kondensatorze obwodu

pośredniego, prowadzi to do znacznego wzrostu prądu upływu w obwodzie pośrednim. Przemiennek będzie traktował to jako zwarcie doziemne lub zwarcie międzyfazowe zasilania i wyłączy się.

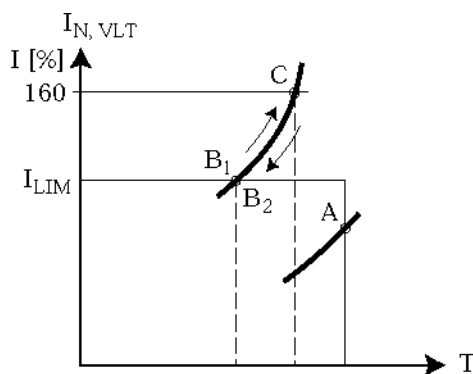
4.3.3 Sterowanie prędkością obrotową silnika

Częstotliwość na wyjściu przemiennika częstotliwości, a więc prędkość obrotowa silnika jest sterowana przez jeden lub więcej sygnałów: 0-10V; 4-20mA albo napięcie pulsacyjne, - określanych jako sygnały referencyjne prędkości. Jeżeli wartość sygnału referencji wzrasta, prędkość silnika także się zwiększa i pionowa część charakterystyki momentu obrotowego silnika jest przesuwana w prawo rys. 4.16.



Rys. 4.16 Zależność pomiędzy sygnałem zadawania prędkości i charakterystyką momentu silnika obrotowego silnika.

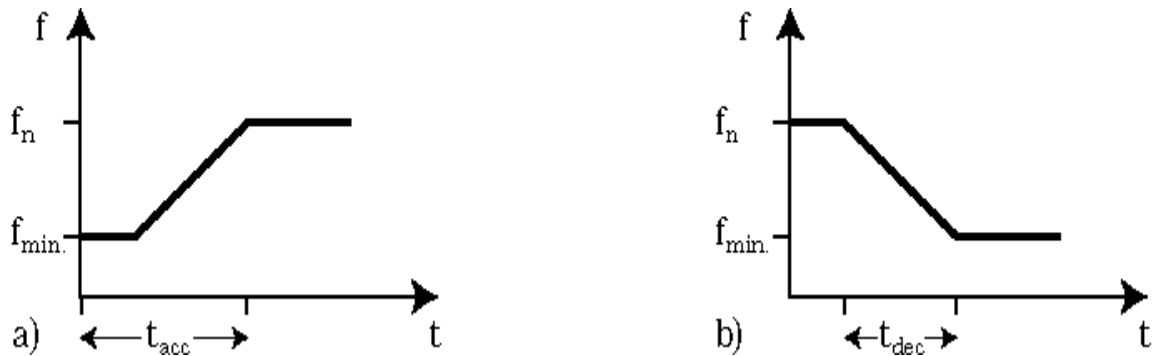
Gdy moment obciążający jest mniejszy niż maksymalny moment napędowy silnika, prędkość silnika osiągnie zadaną wartość. Jak pokazano na rys. 4.17 charakterystyka momentu obciążenia przecina charakterystykę momentu napędowego silnika w pionowej części - punkt A. Jeżeli przecięcie znajduje się w poziomej części - punkt B, prędkość silnika nie może osiągnąć wymaganej dla pracy ciągłej zadanej wartości. Przemiennek umożliwia przekroczenie - przez krótki czas, uderzenia prądowego, tj. prądu większego niż zadana maksymalna wartość prądu ciągłego, bez zatrzymania napędu - punkt C, ale trzeba pamiętać o ograniczeniu czasu jej trwania.



Rys. 4.17 Prąd silnika może przez krótki czas przekroczyć dopuszczalną wartość określoną nastawami przemiennika częstotliwości.

4.3.4 Minimalne czasy zwiększania i zmniejszania prędkości silnika.

Czas zwiększania prędkości, rozruchu silnika (ang. ramp up time, acceleration time) określa, kiedy nastąpi osiągnięcie maksymalnej prędkości silnika od chwili jego startu. Czas ten oznaczany jest jako t_{acc} i bazuje zwykle na częstotliwości nominalnej silnika, np. $t_{acc} = 5$ sek., co oznacza, że przemiennik osiągnie po 5 sekundach częstotliwość synchroniczną pracy silnika od 0Hz do 50Hz.



Rys. 4.18 Minimalne czasy przyspieszania i zwalniania prędkości obrotowej silnika.

Czas zmniejszania prędkości (ang. ramp down time, deceleration time) - hamowania silnika, wskazuje jak szybko silnik od prędkości nominalnej może osiągnąć prędkość zerową. Oznaczany jest jako t_{dec} .

Możliwe jest bezpośrednie przejście od przyspieszania do hamowania, ponieważ obroty silnika zawsze uzależnione są od częstotliwości napięcia na wyjściach mocy falownika przemiennika częstotliwości.

Jeżeli moment bezwładności wału silnika jest znany, optymalne czasy przyspieszania i hamowania mogą być obliczone wg równań:

$$t_{acc} = J \times \frac{n_2 - n_1}{(T_{acc} - T_{fric}) \times 9,55}$$

$$t_{dec} = J \times \frac{n_2 - n_1}{(T_{dec} - T_{fric}) \times 9,55}$$

J - moment bezwładności wału silnika.

T_{fric} - moment oporów tarcia układu.

T_{acc} - moment przyspieszający.

T_{dec} - moment hamujący, który występuje, gdy prędkość zadana - referencyjna jest redukowana.

n_1 i n_2 prędkości przy częstotliwości f_1 i f_2 .

Jeśli przemiennik częstotliwości na pewien krótki czas zostanie przeciążony, wtedy momenty silnika w czasie przyspieszania i zmniejszania jego prędkości obrotowej dążą do wartości znamionowej. W praktyce czasy przyspieszania i hamowania są identyczne.

☒ Przykład:

$$J = 0,042 \text{ kgm}^2, \quad n_1 = 500 \text{ obr/min}, \quad n_2 = 1000 \text{ obr/min}$$

$$T_{\text{fric}} = 0,05 \times T_N, \quad T_N = 27 \text{ Nm}$$

$$t_{\text{acc}} = J \times \frac{n_2 - n_1}{(T_{\text{acc}} - T_{\text{fric}}) \times 9,55} = 0,042 \times \frac{1000 - 500}{(27 - 0,05 \times 27) \times 9,55} = 0,1 \text{ [s]}$$

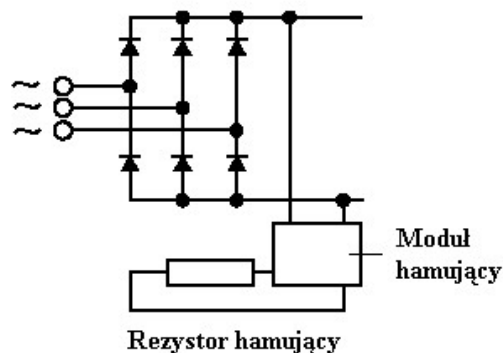
4.3.5 Hamowanie dynamiczne

Kiedy prędkość jest zmniejszana silnik pracuje jako generator i hamuje. Efektywność hamowania zależy od zastosowanej metody hamowania, wielkości i rodzaju obciążenia silnika. Dla przykładu, przy hamowaniu maszyną synchroniczną silnika obciążonego dużą masą bezwładną: wirówki, młyny kulowe, duża ilość energii jest przekazywana przez silnik do sieci zasilania.

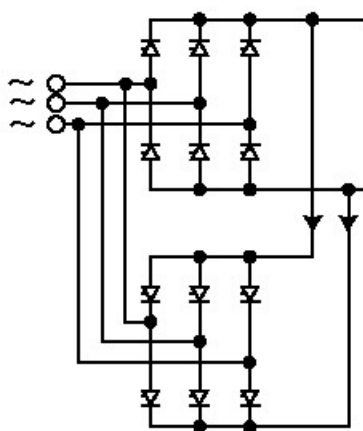
Silniki podłączone bezpośrednio do sieci zasilającej dostarczają moc hamującą (odzyskową) bezpośrednio do niej.

Jeżeli silnik jest sterowany przez przemiennik częstotliwości, moc wytworzona przez silnik w czasie hamowania jest dostarczana i gromadzona w obwodzie pośrednim DC przemiennika. Gdy moc hamująca (odzyskowa) przewyższa straty mocy w przemienniku, napięcie stałe kondensatorów w obwodzie pośrednim wzrasta.

Napięcie w obwodzie pośrednim może wzrastać do czasu, aż nastąpi zatrzymanie pracy przemiennika wskutek zadziałania układów zabezpieczających, czasami jest konieczne umieszczenie modułu obciążenia obwodu pośredniego przemiennika, nazywanego modułem hamującym i rezystora zewnętrznego do absorbowania mocy wytworzonej podczas hamowania. Użycie modułu hamowania i rezystora hamującego umożliwi szybkie hamowanie układów z dużym obciążeniem, rys 4.19. Jednakże może to spowodować problemy z odprowadzaniem ciepła. Alternatywą jest jednostka hamująca umożliwiająca przekazywanie energii do sieci zasilania. Rekuperacja energii do sieci zasilającej w przemiennikach z niesterowanym prostownikiem jest możliwa jedynie, poprzez moduły hamowania odzyskowego współpracujące z obwodem pośrednim przemiennika, które przetwarzają napięcie stałe na przemienne o parametrach sieci zasilania. Przykładowo moc hamowania może być przesyłana do sieci - rys. 4.20, np. przez dodatkowy falownik w przeciw równoległym połączeniu do niesterowanego lub sterowanego prostownika.



Rys. 4.19 Układ hamowania rezystancyjnego silnika: moduł hamujący (przerwywacz prądu - ang. chopper) i rezystor.

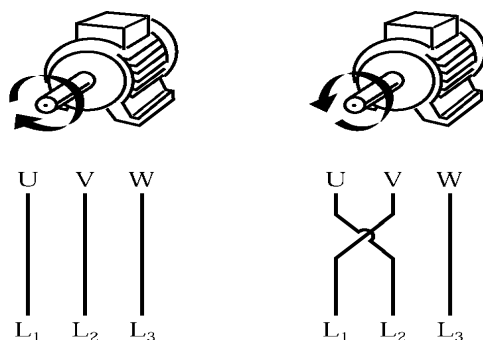


Rys. 4.20 Układ hamowania odzyskowego: falownik przeciw równolegle dołączony do sterowanego prostownika przemiennika częstotliwości.

Innym rodzajem hamowania jest hamowanie prądem stałym (ang. DC brake). Polega ono na przyłączeniu pomiędzy dwie fazy pracującego silnika napięcia stałego, które wytwarza w uzwojeniach silnika stałe pole magnetyczne w stojanie. Moc hamowania wydziela się w postaci ciepła w silniku, dlatego możliwe jest jego przegrzanie. Aby do tego nie dopuścić zaleca się stosowanie tego hamowania w zakresie mniejszych prędkości wówczas prąd silnika nie będzie przekraczał jego wartości. Podstawowym ograniczeniem hamowania prądem stałym jest przede wszystkim wartość stałego napięcia hamowania i czas hamowania.

4.3.6 Zmiana kierunku wirowania

Kierunek wirowania w silnikach asynchronicznych jest określony przez kolejność dołączonych faz napięcia zasilania. Jeżeli dwie fazy zostaną między sobą zamienione zmieni się kierunek wirowania wału silnika. Większość silników jest produkowana tak, że wał obraca się zgodnie ze wskazówkami zegarka, jeżeli jest połączony według następującego schematu:

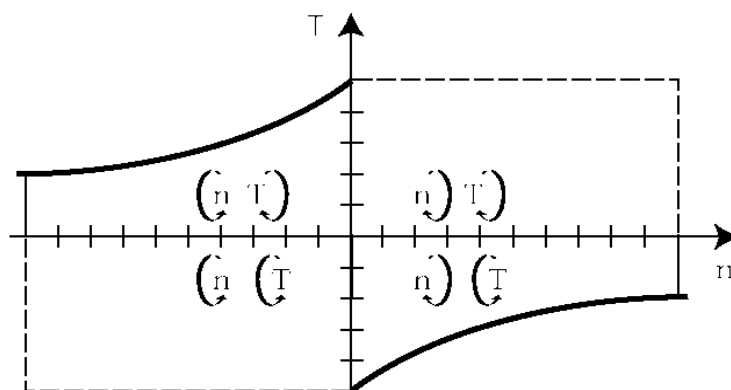


Rys. 4.21 Zmiana kierunków obrotów przez zmianę kolejności faz: kierunek normalny - kierunek rewersyjny.

Kolejność faz na wyjściach mocy przemiennika częstotliwości jest właściwa dla pracy w normalnym kierunku wirowania wału silnika niezależnie od kolejności faz napięcia zasilania.

Przy współpracy przemiennika z silnikiem przemiennik może programowo - w sposób elektroniczny, dokonywać zmiany kolejności faz zasilania silnika. Zmiana kierunku jest realizowana przez zadanie sygnału referencji o przeciwnej polaryzacji lub cyfrowy sygnał wejściowy. Jeżeli od silnika wymagany jest określony kierunek wirowania wału silnika przy pierwszym rozruchu, wtedy ważna jest informacja o nastawach fabrycznych przemiennika.

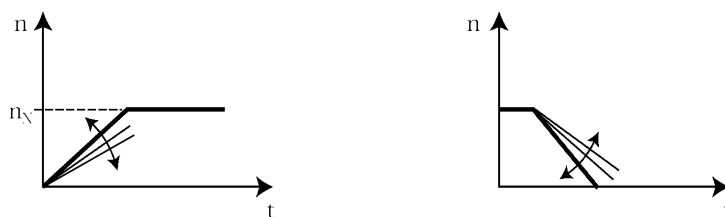
Ponieważ przemiennik częstotliwości ogranicza prąd silnika do ustalonej - zwykle nominalnej wartości, dlatego zmiana kierunku wirowania wału może być realizowana o wiele częściej niż w silniku zasilanym bezpośrednio do sieci.



Rys. 4.22 Moment hamujący przemiennika podczas zmiany kierunku obrotów.

4.3.7 Czasy rozruchu i hamowania silnika.

Wszystkie przemienniki mają funkcje programowania wartości czasów rozruchu i hamowania, zapewniające łagodne warunki pracy układu napędowego. Czasy te są zadawane i gwarantują, że szybkość wirowania wału silnika wzrasta lub maleje wg ustalonej wstępnie wartości.



Rys. 4.23 Ustawiany przez użytkownika czas zwiększania i zmniejszania prędkości silnika.

Jeżeli zadane czasy zmian prędkości silnika są zbyt małe, wtedy w pewnych sytuacjach silnik nie będzie nadążał ze zmianą prędkości.

Prowadzi to do wzrostu prądu silnika aż do osiągnięcia jego wartości granicznej. W przypadku zbyt krótkiego czasu zmniejszania prędkości (ang. ramp down time) t_{rd} , napięcie stałe w obwodzie pośrednim może wzrosnąć do takiego poziomu, że zadziała obwód ochronny przemiennika i zostanie on wyłączony.

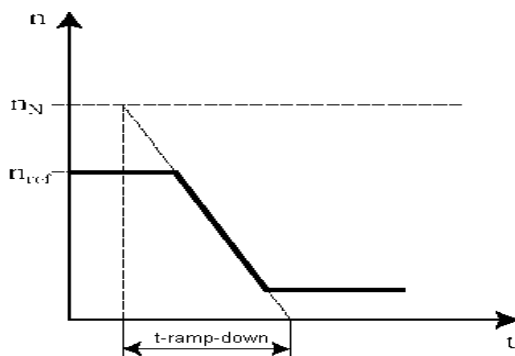
Optymalny czas zwiększania i zmniejszania prędkości silnika może być obliczany na podstawie poniższych wzorów:

$$t_{ramp-up} = \frac{n_N}{(T_N - T_{fric}) 9,55} J [s]$$

$$t_{ramp-down} = \frac{n_N}{(T_N - T_{fric}) 9,55} J [s]$$

- $t_{ramp-up}$ - czas rozpędzania wału silnika od wartości zero do wartości znamionowej
- $t_{ramp-down}$ - czas zwalniania prędkości wału silnika od prędkości znamionowej do zera
- n_N - obroty znamionowe w obr./min
- T_N - moment znamionowy
- T_{fric} - moment oporów tarcia układu
- J - moment bezwładności układu napędowego

Czasy narastania są zwykle wyznaczone na podstawie nominalnej prędkości silnika



Rys. 4.24 Sposób wyznaczania czasów zwiększania i zmniejszania prędkości wału silnika.

4.3.8 Monitorowanie napędu

Przeмиenniki mogą monitorować sterowany napęd i interweniować w przypadku wystąpienia zakłóceń. To monitorowanie może dotyczyć trzech obszarów zagadnień: urządzenia produkcyjnego, silnika i przeмиennika częstotliwości.

Monitorowania urządzenia produkcyjnego opiera się na informacji o wartościach: częstotliwości wyjściowej, prądu i momentu obciążenia silnika.

Pewna grupa tych parametrów granicznych może zostać zapisana i jeżeli zostaną one przekroczone zadziała funkcja kontroli przeмиennika. Bazując na tych wielkościach mogą być ustawione określone ich ograniczenia i ich przekroczenie spowoduje określoną reakcję układu sterowania przeмиennika.

Te granice mogą dotyczyć dopuszczalnych minimalnych prędkości silnika, dopuszczalnego maksymalnego prądu silnika lub dopuszczalnego momentu obciążenia. Jeżeli wartości graniczne zostaną przekroczone przeмиennik może, np.: być zaprogramowany na wysłanie sygnału ostrzegawczego, zmniejszenie prędkości obrotowej silnika lub zatrzymanie go - tak szybko jak to możliwe.

Przykład:

W instalacji, w której silnik jest połączony z resztą układu napędowego poprzez przekładnię pasową (ang. V-belt connection), przeмиennik może być zaprogramowany do monitorowania stanu połączenia pasowego.

Jeżeli przyrost częstotliwości wyjściowej następuje szybciej niż wstępnie wyznaczony lub występujący w normalnej pracy napędu, oznacza to zarwanie się pasa transmisyjnego. Jeżeli takie zdarzenie wystąpi, przeмиennik częstotliwości może być wykorzystany do wysłania sygnału ostrzegawczego lub zatrzymania silnika.

Kontrola stanu termicznych warunków pracy silnika przez przeмиennik jest możliwa w oparciu o obliczenia jego warunków cieplnych albo w oparciu o bezpośredni pomiar jego temperatury poprzez dołączenie termistora silnika. Podobnie jak wyłącznik termiczny, przeмиennik może zabezpieczać silnik przed przeciążeniem. Częstotliwość napięcia zasilania i prądu silnika są obliczane przez przeмиennik i podstawiane do modelu cieplnego silnika. Gwarantuje to, że silnik nie przegrzewa się przy małych obrotach, gdy wentylacja jest zmniejszona. Dzisiejsze przeмиenniki częstotliwości są zdolne chronić silnik z wymuszonym obiegiem powietrza, jeżeli prąd jest zbyt duży.

Typowa jednostka monitorująca jest tak wykonana, że w przypadku przeciążenia silnika zadziała w przeмиenniku wyłącznik samoczynny. Niektóre przeмиenniki częstotliwości pozwalają na krótkotrwałe przeciążenie silnika. Mikroprocesor przeмиennika analizuje prądy silnika i czasy ich przepływu, a następnie optymalizuje pracę przeмиennika w taki sposób, aby silnik nie ulegał przeciążaniu.

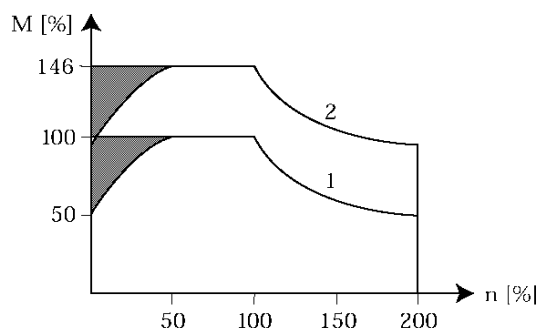
4.4 Wpływ obciążenia na nagrzewanie się silnika

Gdy silnik jest połączony z przemiennikiem częstotliwości to w czasie jego pracy musi być utrzymywana właściwa temperatura, a wpływ na to mają czynniki:

- jeśli następuje spadek prędkości silnika, to jest słabsza wentylacja uzwojeń,
- jeśli wystąpi niesinusoidalny prąd silnika, to spowoduje wytworzenie zwiększonej temperatury uzwojeń.

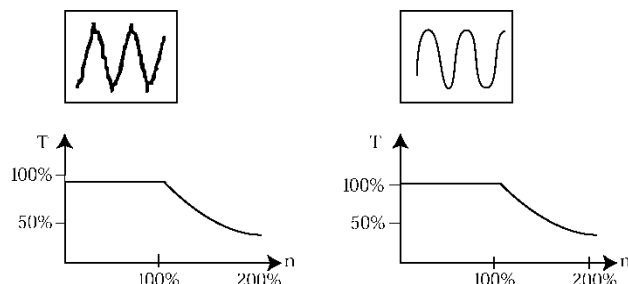
Przy niskich obrotach silnika jego wentylator nie jest zdolny zapewnić wystarczającej ilości powietrza do odbioru ciepła. Ten problem powstaje, jeżeli moment obciążenia jest stały w całym obszarze regulacji prędkości silnika. Ta zmieszona wentylacja decyduje o dopuszczalnej wartości stało momentowego obciążenia silnika. Jeżeli silnik pracuje w obszarze regulacji prędkości ze 100% momentem obciążenia i jego prędkość obrotowa jest mniejsza od połowy jego prędkości nominalnej, wtedy silnik potrzebuje dodatkowego powietrza dla zapewnienia właściwego chłodzenia, szary obszar na rys. 4.25).

Alternatywnie stopień obciążenia silnika może być zmniejszony przez dobranie większego silnika. Jednakże należy zwrócić uwagę na to, że nie może być dobrany za duży silnik do danego przemiennika.



Rys. 4.25 Obszary zapotrzebowania na wymuszone chłodzenie dla silnika dopasowanego i przewymiarowanego w stosunku do obciążenia:
 wykres 1 - silnik o mocy nominalnej np. 15kW
 wykres 2 - silnik przewymiarowany np. 22kW.

Jeżeli prąd silnika nie jest sinusoidalny, to nie może on być obciążany w 100% przez cały czas pracy, ponieważ wyższe harmoniczne prądu powodują zwiększone straty i tym samym zwiększaną temperaturę silnika.



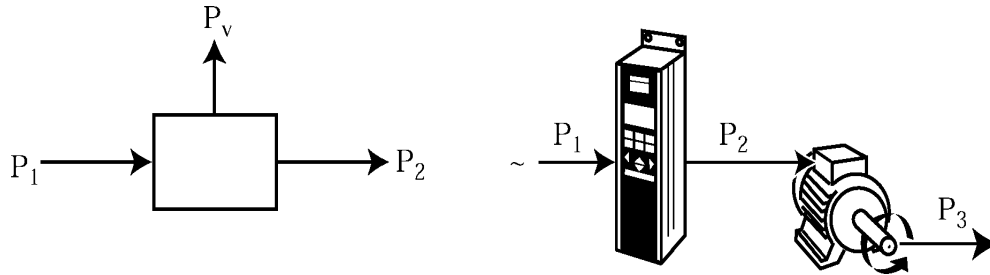
Rys. 4.26 Prąd niesinusoidalny silnika powoduje powstawanie dodatkowych strat.

4.5 Sprawność urządzeń układu napędowego

Sprawność η jest definiowana jako stosunek czynnej mocy oddanej P_2 do czynnej mocy pobranej P_1 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Różnica między P_1 i P_2 jest definiowana jako moc strat P_v , np. jest to moc wydzielana w postaci ciepła w danym urządzeniu.

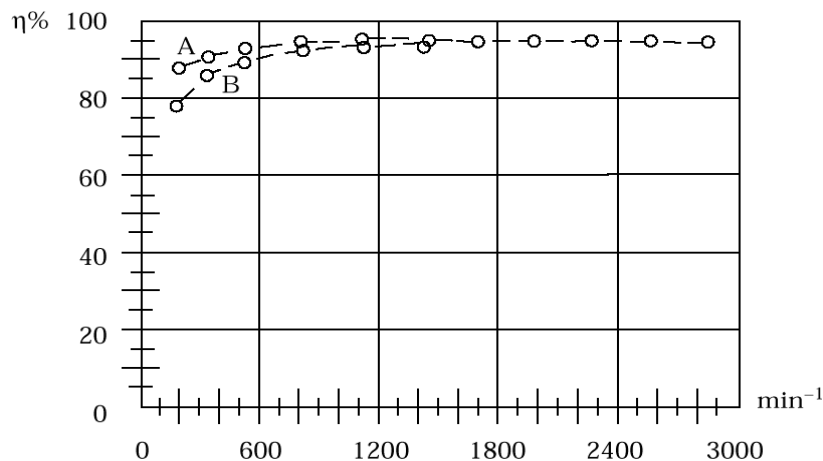


Rys. 4.27 Moc czynna dostarczona, moc strat i moc czynna oddana - sprawność.

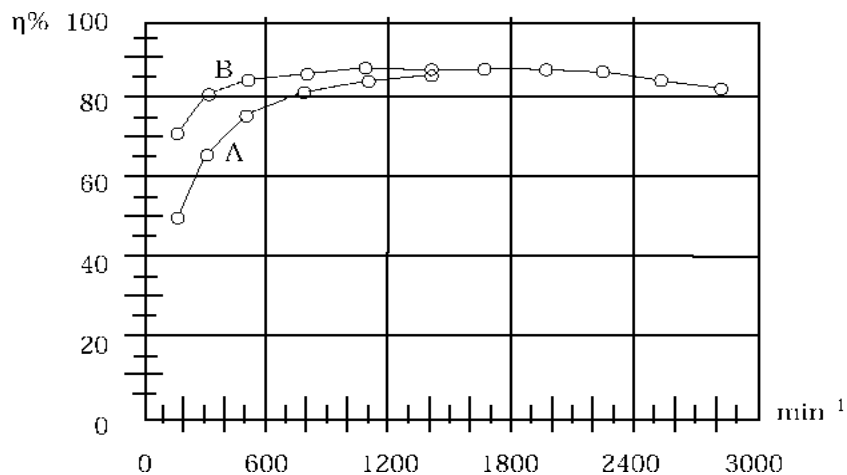
Sprawność może być oddzielnie wyznaczona dla przemiennika częstotliwości i silnika oraz dla układu napędowego: przemiennik - silnik (sprawność systemu).

Sprawność przemiennika: $\frac{P_2}{P_1}$, Sprawność silnika: $\frac{P_3}{P_2}$, Sprawność systemu: $\frac{P_3}{P_1}$

Na poniższych wykresach przedstawiono doświadczalnie wyznaczone charakterystyki sprawności urządzeń układu napędowego.



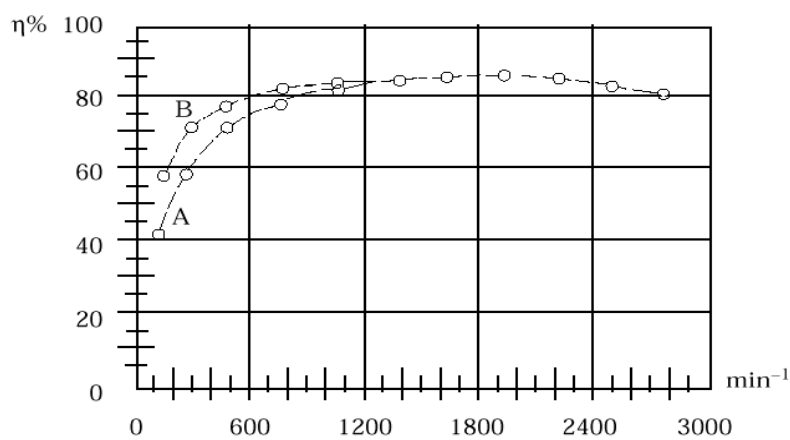
Rys. 4.28 Sprawność przemiennika częstotliwości przy obciążeniu 100%(A) i 25%(B) obciążeniu.



Rys. 4.29 Sprawność typowego silnika zasilanego z przemiennika częstotliwości przy obciążeniu 100%(A) i 25%(B).

Wykresy pokazują że sprawność silnika ma bardzo podstawowy wpływ na sprawność systemu. Sprawność przemiennika częstotliwości jest wysoka dla dużych i małych poziomów obciążenia w całym zakresie regulacji prędkości silnika.

Można też zauważyć, że sprawności są najniższe przy małych prędkościach. Jednakże to nie znaczy, że całkowite straty są największe przy tych prędkościach.



Rys. 4.30 Sprawność całego układu napędowego: przemiennik - silnik przy obciążeniu 100%(A) i 25%(B)

☒ **Przykład do rys. 4.30**

1. $n = 800 \text{ min}^{-1}$ $P_3 = 9628 \text{ W}$ $\eta = 77,3\%$
 $P_1 = P_3/\eta = 12455,4 \text{ W}$ $P_V = P_1 - P_3 = 2827,4 \text{ W}$
2. $n = 500 \text{ min}^{-1}$ $P_3 = 1500 \text{ W}$ $\eta = 70\%$
 $P_1 = P_3/\eta = 2143 \text{ W}$ $P_V = P_1 - P_3 = 643 \text{ W}$

Wysoka sprawność przemienników częstotliwości daje wiele korzyści:

- większa sprawność powoduje mniejsze straty ciepłe systemu, które muszą być usunięte z instalacji. Jest to ważne, gdy przemiennik jest zintegrowany z panelem sterowania.
- mniejsze straty ciepłe występują w półprzewodnikowych zaworach mocy falownika i dławikach przemiennika częstotliwości co wpływa na zmniejszenie zużycia się tych elementów - zwiększa się ich żywotność, a przez to jest dłuższy okres bezawaryjnego użytkowania przemiennika.
- wyższa sprawność to niższe zużycie energii.