

Sterowanie wektorowe silników AC

Rozwiązanie alternatywne do stosowania silników DC

Wstęp

Do niedawna, do zastosowań, gdzie konieczna była regulacja prędkości obrotowej stosowano wyłącznie silniki prądu stałego (DC). Obecnie, dzięki rozwojowi techniki mikroprocesorowej i elektroniki wysokonapięciowej, sterowanie prędkością obrotową i momentem obrotowym silników prądu zmiennego (AC) jest równie proste i tanie jak w przypadku napędów DC.

W zastosowaniach przemysłowych coraz częściej układy napędowe DC są zastępowane napędami AC z silnikami klatkowymi. Podstawową zaletą zespołów napędowych AC są właśnie silniki, które w odróżnieniu od silników DC charakteryzują się bardzo prostą budową. Poza tym nie posiadają szczotek i mechanicznego komutatora. Są zatem tańsze i mniej awaryjne, nie wymagają tak częstych napraw i konserwacji jak silniki DC. Co więcej, awaryjność przekształtników trystorowych - najczęściej zasilają-

cych silniki prądu stałego - jest stosunkowo duża. Dzięki zastosowaniu nowej generacji tranzystorów mocy IGBT, przemienniki częstotliwości do silników AC są praktycznie niezawodne. A zatem, zastąpienie napędu DC układem napędowym AC powoduje nie tylko zmniejszenie ceny, ale również zminimalizowanie kosztów jego eksploatacji oraz zwiększenie niezawodności.

Dotychczas zastąpienie silnika prądu stałego silnikiem prądu zmiennego nie zawsze było możliwe. Dotyczyło to zwłaszcza zastosowań wymagających dużej dynamiki napędu, precyzyjnej regulacji prędkości i momentu obrotowego oraz efektywnej pracy przy małych lub bardzo dużych prędkościach. Układy napędowe z silnikami prądu zmiennego zaczęły nabierać znaczenia dopiero po pojawieniu się tzw. wektorowych przemienników częstotliwości. Przykładem są przemienniki częstotliwości koncernu Ansaldo, które potrafią regulować prędkość i moment obrotowy silników asynchronicznych - klatkowych. Dzięki tym własnościom z powodzeniem mogą zastępować układy napędowe z silnikami prądu stałego.

Napędy prądu zmiennego

Aby w pełni wykorzystać zalety silników prądu zmiennego, konieczne staje się zastosowanie właściwego napędu powszechnie nazywanego przemiennikiem częstotliwości lub falownikiem. Typowym przemiennikiem częstotliwości składa się

z trzech bloków (rys. 1): prostownika, pośredniego obwodu prądu stałego z baterią kondensatorów i falownika napięcia. Przemiana energii elektrycznej przebiega dwustopniowo: z sieci zasilającej (najczęściej prądu zmiennego) pobierana jest energia z ustalonymi wartościami parametrów U [V] oraz f [Hz], która za pośrednictwem prostownika sterowanego przekształcana jest w napięcie stałe. Następnie, w module falownika, napięcie stałe jest przekształcane w 3-fazowe napięcie zmienne o odpowiedniej amplitudzie i częstotliwości.

Przemiennikiem częstotliwości steruje układ mikroprocesorowy. Jego zadaniem jest odczyt zmiennych parametrów silnika, generowanie odpowiednich załączeń tranzystorów mocy oraz kontrola stanu poszczególnych elementów przemiennika i silnika.

W ciągu jednej sekundy mikroprocesor przetwarza średnio 150000 odczytów zmiennych oraz wypracowuje odpowiednie sygnały sterujące dla tranzystorowego falownika napięcia. Ze względu na potrzebę sterowania w czasie rzeczywistym wszystkimi elementami przemiennika, coraz powszechniej jako jednostki obliczeniowe stosuje się szybkie procesory sygnałowe.

Metody regulowania prędkości i momentu obrotowego

Układ sterujący przemiennikiem częstotliwości może realizować różne algorytmy. Każdy z nich zapewnia inną funkcjonalność i własności zespołu napędowego. Najprostszym i najczęściej stosowanym jest

W urządzeniach nawijających i odwijających należy kontrolować naprężenie materiału. Regulację momentu obrotowego i naprężenia nawijanego materiału umożliwia napęd wektorowy.

Najczęściej spotykanymi w przemyśle urządzeniami napędowymi są klatkowe silniki elektryczne.

Wykorzystuje się je do napędu pomp, wentylatorów,

przenośników, dźwigów i maszyn technologicznych.

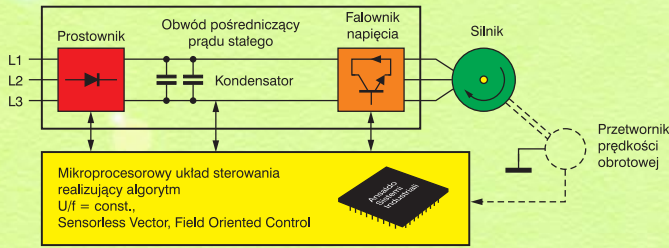
W celu zapewnienia prawidłowej pracy napędzanych urządzeń powinno być możliwe płynne regulowanie prędkości lub momentu obrotowego silnika.

Okazuje się, że najwięcej problemów przysparza regulacja wartości momentu obrotowego silników klatkowych. Moment obrotowy silnika jest proporcjonalny do

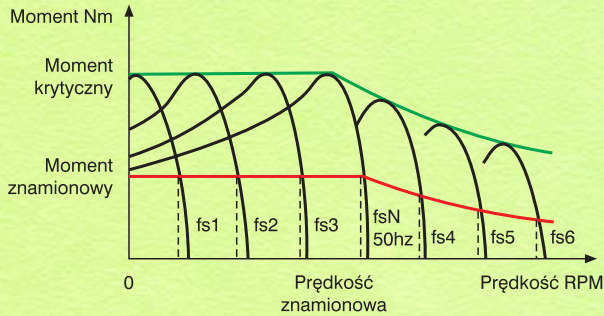
prądu płynącego w klatce wirnika. Jak jednak zmierzyć jego wartość, skoro na tabliczkę zaciskową są wyprowadzone jedynie końce uzwojeń stojana?

Jak zmieniać wartość prądu wirnika, aby możliwa była płynna regulacja wartości momentu?

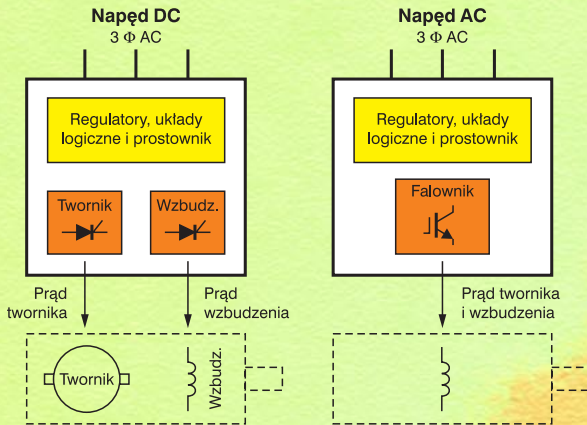
Odpowiedzi postaramy się udzielić w artykule.



Rys. 1. Schemat ogólny przemiennika częstotliwości.



Rys. 2. Sterowanie prędkością poprzez zmianę częstotliwości.



Rys. 3. Porównanie cech napędów DC i AC.

algorytm skalarny U/f. Prędkość obrotowa jest regulowana poprzez zmianę częstotliwości zasilania uzwojeń silnika (rys. 2). W celu zachowania względnie stałego momentu obrotowego, proporcjonalnie do zmian częstotliwości zmieniana jest również wartość napięcia podawanego na zaciski silnika.

Przemiennik częstotliwości U/f nie reguluje zatem prędkości obrotowej, a jedynie częstotliwość napięcia zasilania silnika. Ze względu na występowanie poślizgu (różnicy pomiędzy prędkością wirowania pola w silniku a prędkością obrotową wału), prędkość obrotowa wału silnika nie jest ściśle proporcjonalna do częstotliwości.

Przemienniki częstotliwości z algorytmem U/f stosuje się w aplikacjach nie wymagających dokładnej regulacji prędkości obrotowej oraz tam, gdzie moment obciążenia maleje wraz z prędkością lub jest względnie stały w całym zakresie jej zmian. Do tej grupy można zaliczyć takie urządzenia jak pompy wirowe, wentylatory, sprężarki, dmuchawy oraz walcarki i taśmociągi.

Wadami przemienników skalarnych są stany przejściowe o długim czasie trwania, oscylacje prędkości obrotowej wokół prędkości zadanej, brak możliwości regulacji momentu obrotowego oraz jego niewielka wartość przy niskich częstotliwościach. Niewątpliwą zaletą tych przemienników jest przystępna cena, łatwość uruchamiania oraz brak konieczności stosowania dodatkowych urządzeń realizujących sprzężenie zwrotne (zależne od prędkości). W ostatnich latach opracowano tzw. napędy wektorowe umożliwiające precyzyjną regulację prędkości (nie częstotliwości) oraz pełną kontrolę momentu obrotowego silnika. Dostępne na rynku rozwiązania różnią się od siebie sposobem pomiaru wewnętrznego „stanu silnika” oraz me-

W kruszarkach i młynach zmiany obciążenia są nieregularne i bardzo gwałtowne. Sterowanie wektorowe, dzięki dużej dynamice, zapewnia prawidłowy przebieg procesu rozdrabniania.



Przenośniki wymagają zastosowania przemiennika częstotliwości do zapewnienia dużego momentu obrotowego i regulacji prędkości obrotowej w zakresie od kilku obr./min do prędkości maksymalnej.

todą wpływania na jego prędkość i moment obrotowy. Najbardziej popularne jest Sterowanie Zorientowane Polowo (ang. Field Oriented Control). Metodę Field Oriented Control zastosowano w nowej serii przemienników częstotliwości SVTS firmy Ansaldo.

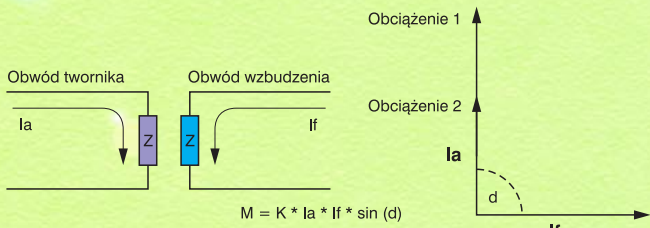
Napędy Field Oriented Control są aktualnie jednymi z najbardziej zaawansowanych przemienników częstotliwości. Umożliwiają osiągnięcie parametrów pracy porównywalnych - a nawet lepszych - niż w napędach prądu stałego. Potrafią one w sposób rozdzielny sterować prądem wirnika odpowiedzialnym za moment obrotowy oraz prądem magnesującym - wytwarzającym strumień. Dzięki temu, przemiennik częstotliwości może sterować prędkością i momentem obrotowym w sposób niezależny.

Napędy te, ze względu na swoją funkcjonalność i atrakcyjną cenę, są konkurencyjne do układów napędowych z silnikami prądu stałego. Dzięki bezpośredniej kontroli momentu oraz możliwości wpływania na jego wartość, możliwe jest osiągnięcie wysokiej dynamiki, cha-

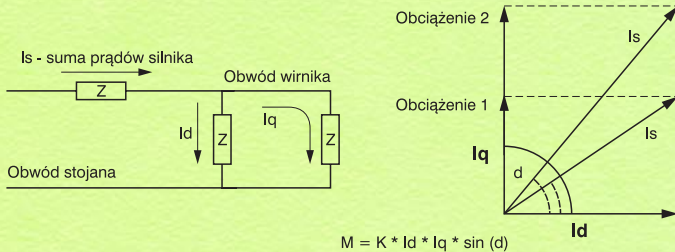
rakteryzującej się szybką odpowiedzią na zmiany wartości zadanej i obciążenia silnika. Moment rozruchowy może być równy lub nawet większy od jego wartości znamionowej, co nie jest bez znaczenia w przypadku obracania dużych mas lub gdy tarcie spoczynkowe ma znaczne wartości. Napęd wektorowy umożliwia również wytworzenie dużego momentu chwilowego, odpowiedzialnego np. za przyspieszenie silnika w momentach zmiany prędkości zadanej. Napędy Field Oriented Control doskonale sprawdzają się w przemyśle metalurgicznym, papierniczym, tekstylnym oraz wszędzie tam, gdzie wał silnika powinien mieć duży moment obrotowy w całym zakresie prędkości - od zera do wartości maksymalnej.

Ze względu na swoją funkcjonalność, napędy te mogą być stosowane w aplikacjach, w których dotychczas wykorzystywano wyłącznie układy napędowe prądu stałego. Napędy Field Oriented Control z powodzeniem stosuje się w urządzeniach dźwigowych, nawijarkach, walcarkach, wylączar-





Rys. 4. Schemat zastępczy silnika DC.



Rys. 5. Schemat zastępczy silnika AC.

kach, pompach tłokowych oraz w napędach robotów.

Idea sterowania wektorowego - Field Oriented Control

Sterowanie wektorowe (Field Oriented Control) najłatwiej można zrozumieć porównując je z napędem prądu stałego. Na schemacie z rys. 3 można zauważyć, że napęd prądu stałego z silnikiem obcowzbudnym jest właśnie napędem wektorowym. Zasilacz tyrystorowy steruje oddzielnie obwodem twornika odpowiedzialnym za moment obrotowy silnika oraz obwodem wzbudzenia zapewniającym wytwarzanie strumienia magnetycznego i właściwe magnesowanie silnika. Komutator umieszczony na wirniku utrzymuje stały kąt między wektorami prądów twornika i wzbudzenia. Za sprawą mechanicznych zależności pomiędzy komutatorem a dotykającymi do niego szczotkami, kąt ten wynosi 90°. Zgodnie z poniższą formułą, przy kącie równym 90° rozwijany przez silnik moment obrotowy jest maksymalny:

$M = K \times I_a \times I_f \times \sin(d)$, gdzie:
 I_a - prąd twornika;
 I_f - prąd wzbudzenia;
 $\sin(d)$ - kąt pomiędzy wektorami I_a i I_f ;
 K - współczynnik proporcjonalności

Utrzymując na stałym poziomie prąd wzbudzenia można płynnie regulować wartość momentu zmieniając tylko prąd twornika.

Zgodnie ze schematem zastępczym silnika AC (rys. 5) obwody

„twornika“ i „wzbudzenia“ nie są odseparowane.

Całkowity prąd I_s pobierany przez silnik jest więc sumą wektorową prądu wirnika I_q oraz prądu magnesującego I_d . Ponadto, nie ma fizycznej możliwości pomiaru prądu twornika, gdyż na listwę zaciskową wyprowadzone są jedynie końce uzwojeń stojana.

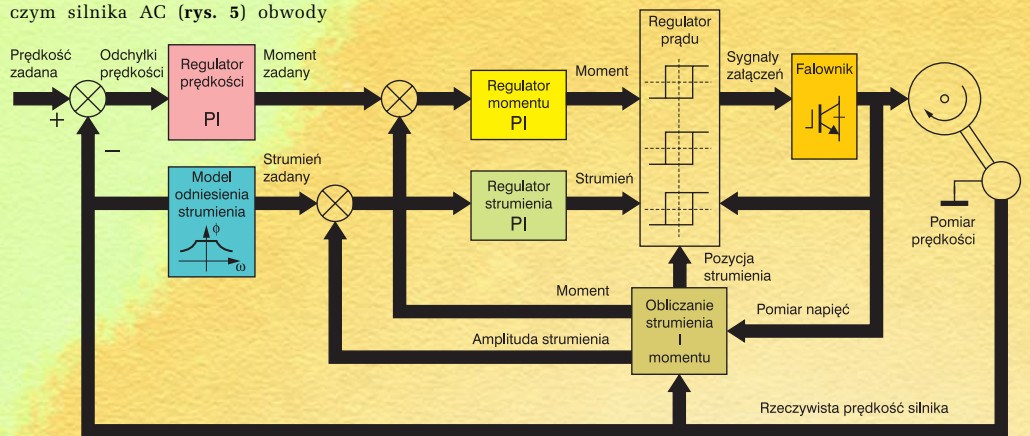
W napędach wektorowych Ansaldo (schemat blokowy na rys. 6) wartości poszczególnych prądów oraz kąt przesunięcia fazowego między nimi są określane na podstawie pomiaru napięć stojana oraz prędkości obrotowej wału silnika. Wyznaczone w ten sposób wartości stanowią podstawę do obliczenia wartości strumienia oraz rozwijanego w danej chwili przez silnik momentu obrotowego. Informacja o prędkości silnika jest dodatkowo wykorzystywana przez główny regulator prędkości PI. W przeciwieństwie do napędów U/f, regulator prędkości nie reguluje częstotliwości napięcia zasilania uzwojeń, ale moment obrotowy rozwijany przez silnik.

Regulacja wartości momentu pozwala na pełną kontrolę prędkości w stanach przejściowych oraz na zwiększenie dynamiki zespołu napędowego.

Jak widać na schemacie blokowym, oprócz regulatora prędkości



W urządzeniach dźwigowych silnik powinien dysponować bardzo dużym momentem rozruchowym nawet przy zerowej prędkości. Celowe jest tu zatem zastosowanie napędu wektorowego.



Rys. 6. Schemat blokowy napędu Field Oriented Control.



występuje jeszcze jeden równoległy regulator. Celem zapewnienia prawidłowego magnesowania silnika, w napędach Field Oriented Control stosuje się oddzielny regulator strumienia. Działa on niezależnie od regulatora prędkości, a jego zadaniem jest utrzymywanie optymalnego i w miarę możliwości stałego strumienia magnetycznego. Ze względu na konieczność zmniejszenia wartości pola powy-

żej prędkości znamionowej, wartość zadana dla regulatora strumienia uzależniona jest od aktualnej prędkości silnika i od modelu odniesienia strumienia. Powyżej prędkości znamionowej napięcie podawane na zaciski silnika nie może bowiem przekroczyć jego wartości znamionowej. Zwiększenie napięcia silnika ponad tę wartość groziłoby przebicciem izolacji uzwojeń silnika.

Zespoły napędowe z wektorowym przemiennikiem częstotliwości mogą pełnić rolę silowników elektrycznych. Na zdjęciu falownik wektorowy pełni rolę silownika napędzającego urządzenie do produkcji rur stalowych.

Sygnały wypracowane przez regulatory strumienia i momentu wykorzystywane są przez blok regulatorów prądu, który generuje sygnały stanów załączeń tranzystorowego falownika PWM.

Jak widać, istota sterowania Field Oriented Control polega na rozdzielnym sterowaniu momentem i stru-

Zastosowania	Charakterystyka
Siłowniki elektryczne	<ul style="list-style-type: none"> Sterowanie wektorowe umożliwia rozwijanie dużego i stabilnego momentu obrotowego w całym zakresie prędkości - od zera do prędkości maksymalnej silnika. Czas reakcji na zmianę obciążenia jest krótszy od 5 ms. Dzięki temu można uzyskać wysoką dynamikę zespołu napędowego. Falownik wektorowy współpracuje ze standardowym silnikiem klatkowym. Koszty układu siłownika są zatem niewielkie w porównaniu z tradycyjnym serwonapędem.
Dźwigi i podnośniki	<ul style="list-style-type: none"> Dzięki sterowaniu wektorowemu możliwe jest wytworzenie dużego momentu obrotowego nawet przy zerowej prędkości. Narastanie prędkości i hamowanie może odbywać się wg krzywej "S", redukując tym samym zbędne naprężenia lin.
Młyny i miksery	<ul style="list-style-type: none"> W przypadku mieszania algorytm wektorowy umożliwia dokładną regulację i monitorowanie momentu obrotowego (pośrednio monitorowanie np. lepkości). Młyny charakteryzują się nagłymi i bardzo dużymi wzrostami obciążenia. Napęd zapewnia stabilizację prędkości i wytworzenie dużego momentu obrotowego.
Wirówki	<ul style="list-style-type: none"> Zastosowanie falownika umożliwia rozwinięcie dużego momentu obrotowego - odpowiedzialnego za czas przyspieszania i hamowania dużych mas wirówki.
Przenośniki i stoły obrotowe	<ul style="list-style-type: none"> Przebieg częstotliwości pozwala na rozwinięcie dużego momentu rozruchowego potrzebnego do wystartowania i wyhamowania obciążonego przenośnika.
Wytłaczarki i nawijarki	<ul style="list-style-type: none"> Wytłaczarki charakteryzują się małą inercją, dużym tarciem oraz stałym momentem obciążenia w zakresie prędkości od zera do znamionowej. Przebieg częstotliwości umożliwia wytworzenie większego niż znamionowy momentu rozruchowego oraz dokładną regulację prędkości. W przypadku nawijarek napęd zapewnia regulację momentu obrotowego i naprężenia nawijanego materiału.

mieniem silnika - analogicznie jak w napędzie z silnikiem prądu stałego. Dzięki temu dokładność regulacji prędkości wynosi 0,01%. Czas reakcji przebiegu na zmianę obciążenia lub wartości zadanej jest krótszy od 5ms. Wartość momentu rozruchowego i chwilowego - odpowiedzialnego za dynamikę układu napędowego sięga 300% momentu znamionowego. Porównanie działania nowego przebiegu Ansaldo z algorytmem wektorowym (Field Oriented Control) z napędem prądu stałego przedstawiono na rys. 7.

W przypadku zmiany obciążenia silnika, napęd wektorowy Ansaldo reaguje podobnie do napędu DC. Zwiększenie momentu obrotowego odbywa się poprzez zwiększenie prądu wirnika. Zarówno w silniku DC, jak i AC prąd magnesujący i kąt pomiędzy wektorami I_d oraz I_q pozostaje stały. Silnik jest zatem zawsze optymalnie namagnesowany, a rozwijany przy tym moment obrotowy ma wartość maksymalną.

Podsumowanie

Dzięki niskiej cenie i wyjątkowo dużym możliwościom aplikacyjnym nowe przebiegi częstotli-

wości firmy Ansaldo stanowią bardzo atrakcyjną ofertę rynkową. Typowe zastosowania przebiegów częstotliwości serii SVTS zostały wyszczególnione w tab. 1.

W falownikach SVTS zastosowano nowe algorytmy wektorowe, pozwalające na uzyskanie bardzo dużej dynamiki zespołu napędowego oraz umożliwiające precyzyjną regulację prędkości i momentu obrotowego. Ze względu na swoją funkcjonalność potrafią realizować układy napędowe spełniające warunki nawet najbardziej wymagających aplikacji.

Przebiegi Ansaldo mogą współpracować ze standardowymi silnikami klatkowymi. Należy pamiętać jednak, że przy prędkościach rzędu kilku lub kilkunastu obrotów na minutę wydajność umocowanego na wale silnika wentylatora

jest bardzo niska. W związku z tym, w celu zapewnienia właściwego chłodzenia silnika, stosuje się tzw. chłodzenie obce lub zmniejsza się obciążenie silnika. Koszty zespołu napędowego składającego się z przebiegu wek-

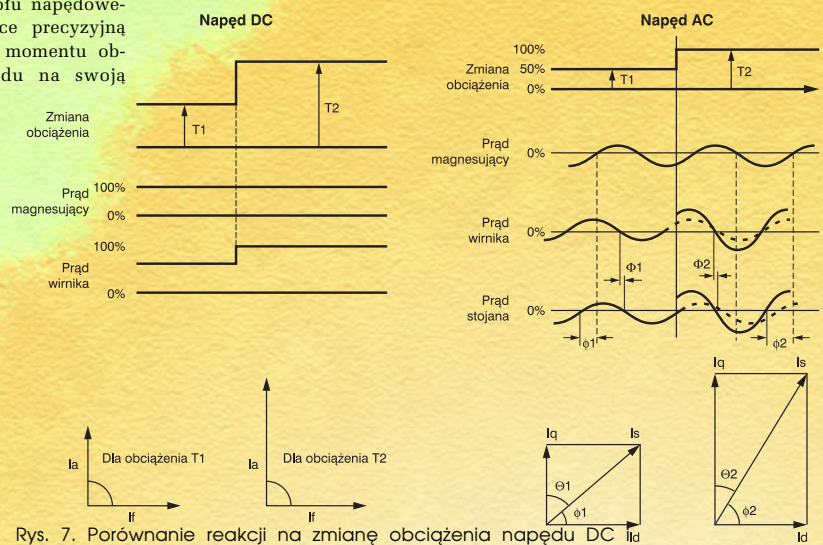
torowego i silnika klatkowego są niewielkie w porównaniu do układów napędowych prądu stałego lub serwonapędów. Ich funkcjonalność i właściwości napędowe są zbliżone.

Na rynku można spotkać silniki o podwyższonych parametrach, przeznaczone do pracy z przebiegami wektorowymi. Silniki te oprócz obcego chłodzenia mają lepszą i bardziej wytrzymałą elektrycznie i termicznie izolację uzwojeń oraz wirnik o zmniejszonym momencie bezwładności. Prędkości maksymalne sięgają 9500obr./min (przykład dla silnika czterobiegunowego).

Wojciech Kuś, Elmark Automatyka

Artykuł przygotowany na podstawie dokumentacji techniczno-ruchowej przebiegów częstotliwości SVTS firmy ANSALDO oraz Informacji Technicznej Nr IT-17022000 wydanej przez Elmark Automatyka Sp. z o.o.

Katalogi firmy ANSALDO oraz inne dodatkowe informacje można otrzymać od firmy Elmark Automatyka.



Rys. 7. Porównanie reakcji na zmianę obciążenia napędu DC i wektorowego AC.