

**LABORATORIUM  
URZĄDZEŃ  
ENERGO –  
ELEKTRONICZNYCH**



---

# SPIS TREŚCI

<b>1. ASYNCHRONICZNY SILNIK KLATKOWY .....</b>	<b>3</b>
1.1. WSTĘP .....	3
1.2. ZASADA DZIAŁANIA.....	3
1.3. SCHEMAT ZASTĘPCZY .....	5
1.4. WIELKOŚCI OPISUJĄCE STAN SILNIKA ASYNCHRONICZNEGO .....	7
1.4.1. MOMENT ELEKTROMAGNETYCZNY .....	7
1.4.2. SPRAWNOŚĆ I STRATY .....	8
1.4.3. TABLICZKA ZNAMIONOWA SILNIKA.....	8
1.5. PODŁĄCZENIE SILNIKA DO SIECI .....	10
<b>2. SOFTSTART .....</b>	<b>11</b>
2.1. WSTĘP .....	11
2.2. OGÓLNA ZASADA DZIAŁANIA SOFTSTARTU .....	12
2.3. ENERGIA.....	14
2.4. FAZY PRACY SOFTSTARTU .....	15
2.5. FAZY ŁAGODNEGO ROZRUCHU .....	16
2.5.1. LINIOWE NARASTANIE NAPIĘCIA .....	16
2.5.2. FAZA USTALONA (PLATEAU).....	18
2.5.3. OPTIMALIZACJA ZUŻYCIA ENERGII .....	19
2.6. FUNKCJE DODATKOWE .....	20
2.6.1. OGRANICZENIE PRĄDOWE – PRACA W UKŁADZIE ZAMKNIĘTEJ PĘTLI .....	20
2.6.2. POCZĄTKOWY MOMENT IMPULSOWY.....	21
2.6.3. PRACA Z OBEJŚCIEM SOFTSTARTU (BY PASS).....	22
2.6.4. ŁAGODNE ZATRZYMANIE - SOFTSTOP.....	22
2.7. PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ SOFTSTARTU .....	23
<b>3. PRZEMIENNIK CZĘSTOTLIWOŚCI.....</b>	<b>24</b>
3.1. WSTĘP .....	24
3.2. ELEMENTY PRZEMIENNIKA CZĘSTOTLIWOŚCI .....	25
3.2.1. PROSTOWNIK .....	25
3.2.2. STOPIEŃ POŚREDNI.....	27
3.2.3. FALOWNIK.....	30

---

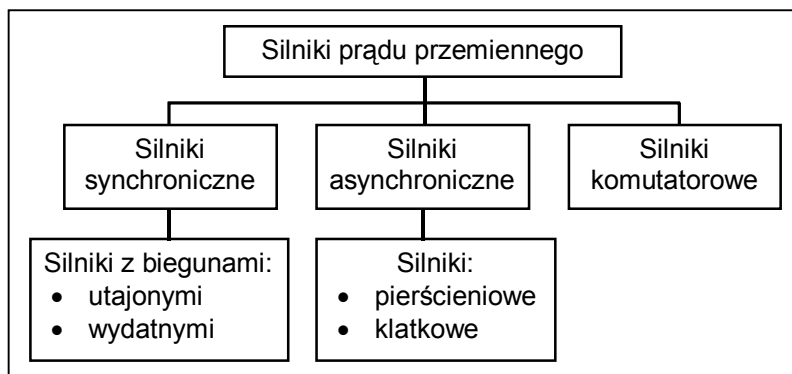
3.2.4. UKŁAD STEROWANIA I KONTROLI.....	31
3.3. SPOSOBY UZYSKIWANIA NAPIĘCIA WYJŚCIOWEGO .....	31
3.4. KOMPENSACJA ORAZ SAMODOSTROJENIE PRZETWORNICY DO SILNIKA .....	38
3.5. WŁAŚCIWOŚCI PRZEMIENNIKA CZĘSTOTLIWOŚCI .....	40
3.5.1. CHARAKTERYSTYKI MOMENTU I MOCY PRZETWORNICY CZĘSTOTLIWOŚCI .....	41
3.5.2. PROGRAMOWALNE CHARAKTERYSTYKI MOMENTU .....	42
3.6. SPRAWNOŚĆ PRZEMIENNIKA CZĘSTOTLIWOŚCI.....	44
3.7. ZAKŁÓCENIA.....	45
<b>4. OSCYLOGRAMY .....</b>	<b>47</b>
4.1. SIEĆ SZTYWNA.....	47
4.2. ROZRUCH REZYSTOROWY .....	47
4.3. SOFTSTART .....	48
4.4. PRZEMIENNIK CZĘSTOTLIWOŚCI.....	52
4.4.1. PRZEBIEGI WEJŚCIOWE .....	52
4.4.2. PORÓWNAWCZE PRZEBIEGI WYJŚCIOWE DLA RÓŻNYCH CZĘSTOTLIWOŚCI NOŚNYCH .....	53
4.4.3. PORÓWNAWCZE PRZEBIEGI SILNIKA Z FILTREM LC I BEZ FILTRA NA WYJŚCIU PRZEMIENNIKA.....	54
<b>5. LITERATURA .....</b>	<b>56</b>

## 1. ASYNCHRONICZNY SILNIK KLATKOWY

### 1.1. WSTĘP

Silniki elektryczne są głównymi maszynami stosowanymi w przemyśle. Stanowią one podstawowe ogniwo napędów elektrycznych. Są to zarówno silniki prądu stałego, jak i prądu przemiennego.

Podział silników prądu przemiennego trójfazowego przedstawiony jest na rysunku poniżej.



Na uwagę zasługują silniki asynchroniczne klatkowe. Są proste w konstrukcji i tanie. Stosowane są niemal wszędzie, począwszy od drobnych indywidualnych gospodarstw po duże zakłady przemysłowe, od ułamków kW do dziesiątków MW, od łagodnych warunków pracy po typowo ciężkie.

### 1.2. ZASADA DZIAŁANIA

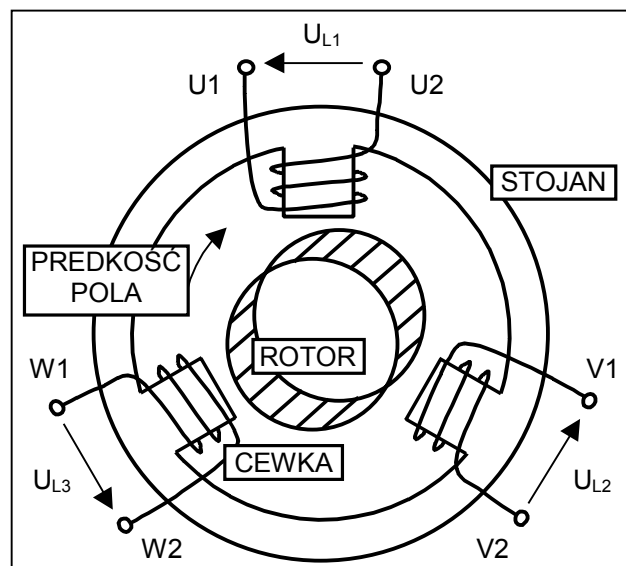
W silnikach klatkowych zasilane jest tylko uzwojenie stojana. W uzwojeniu wirnika, które nie jest połączone galwanicznie z siecią zasilającą, powstaje prąd w wyniku zjawiska indukcji elektromagnetycznej. Dlatego silnik tego typu nazywa się silnikiem indukcyjnym.

Symetryczne uzwojenie 3 – fazowe umieszczone w stojanie i zasilane z sieci napięciem 3 – fazowym wytwarza pole wirujące kołowe (rysunek poniżej). Prędkość obrotowa  $n_1$  tego pola (prędkość synchroniczna) zależy od częstotliwości  $f_1$  napięcia zasilania i liczby par biegunów  $p$  uzwojenia:

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

Prędkości pola  $n_1$  i przybliżone prędkości wirnika  $n$  dla częstotliwości sieci równej 50Hz przedstawia tabela poniżej.

p	1	2	3	4	5	6	8	10
$n_1$	3000	1500	1000	750	600	500	375	300
n	2880	1440	960	720	575	480	360	290

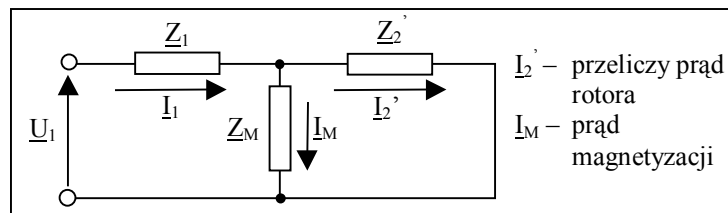


Schematyczny model silnika klatkowego

W żłobkach na obwodzie wirnika umieszczone są pręty miedziane lub aluminiowe, zwarte po obu końcach rotora. Pręty te wraz z dwoma pierścieniami zwierającymi tworzą tzw. klatkę – stąd nazwa wirnika klatkowego i silnika klatkowego.

Pole wirujące przecina pręty klatki i wskutek tego indukują się w nich napięcia i płyną w nich prądy – powstaje moment elektrodynamiczny  $M_e$ . Jeżeli moment ten osiąga większą wartość niż moment obciążenia  $M_m$ , pochodzący od przyłączonej maszyny roboczej i tarcia, to wirnik rusza i zwiększa się jego prędkość obrotowa  $n$ . Ze zwiększaniem się prędkości wirowania wirnika, napięcie indukowane i prąd w prętach wirnika maleją, w następstwie czego maleje moment obrotowy  $M_e$  działający na wirnik.

### 1.3. SCHEMAT ZASTĘPCZY



Uproszczony schemat zastępczy silnika indukcyjnego dla 1 fazy.

W oparciu o uproszczony schemat zastępczy maszyny indukcyjnej z rysunku jak powyżej, możemy wyznaczyć prąd stojana ( $I_1$ ):

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2' \cdot \underline{Z}_M}{\underline{Z}_2' + \underline{Z}_M}}$$

gdzie:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= R_1 + jX_1 && \text{impedancja stojana,} \\ \underline{Z}_2' &= R_2' + jX_2' && \text{impedancja rotora przeliczonego na} \\ &&& \text{stronę stojana,} \\ \underline{Z}_M &= R_M + jX_{M1} && \text{impedancja obwodu magnetycznego.} \end{aligned}$$

Prąd stojana silnika ( $I_1$ ) jest wprost proporcjonalny do napięcia zasilania ( $U_1$ ). Zmiana wartości napięcia ( $U_1$ ) powoduje zmianę wartości prądu ( $I_1$ ). Jednak zmniejszenie napięcia zasilania pociąga za sobą obniżenie momentu elektromagnetycznego maszyny rozwijanego przez silnik indukcyjny wg zależności:

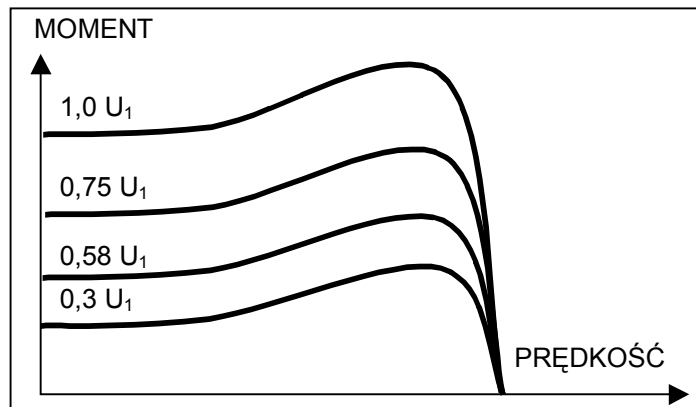
$$M = \frac{p \cdot m \cdot U_1^2}{2\pi f_1 \left[ \left( R_1 + \sigma \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + \sigma X_2')^2 \right]} \cdot \frac{R_2'}{s}$$

gdzie:

- p - liczba par biegunów,
- m - liczba faz obwodu zasilającego,
- f<sub>1</sub> - częstotliwość napięcia zasilania,
- σ - współczynnik rozproszenia,
- s - poślizg.

Zilustrowanie graficzne momentu elektromagnetycznego przy różnej wartości napięcia zasilającego przedstawia rysunek poniżej, przy czym:

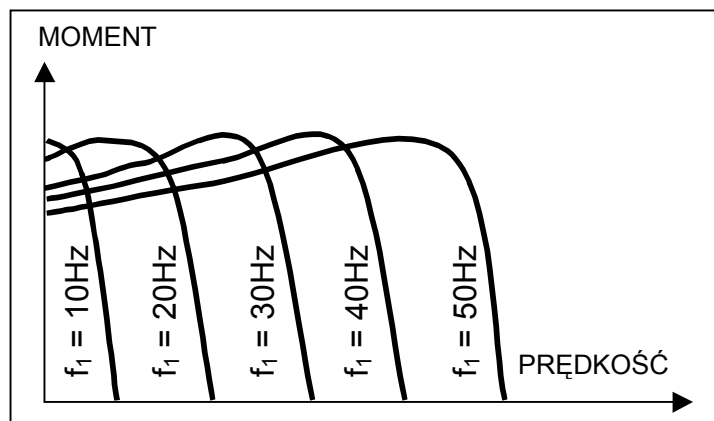
$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$



**Charakterystyki momentu dla różnych wartości napięcia zasilania przy stałej częstotliwości zasilania.**

Regulując częstotliwość napięcia zasilania, przy zachowaniu stałego stosunku napięcia do częstotliwości zasilania silnika klatkowego  $U/f = \text{const.}$ , otrzymuje się regulację prędkości obrotowej silnika przy zachowaniu stałego momentu na wale silnika. Sytuację taką przedstawiają charakterystyki na rysunku poniżej.



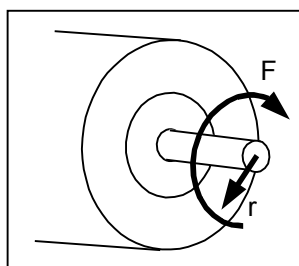


Charakterystyki momentu dla różnych wartości częstotliwości zasilania przy  $U/f = \text{const.}$

## 1.4. WIELKOŚCI OPISUJĄCE STAN SILNIKA ASYNCHRONICZNEGO

### 1.4.1. MOMENT ELEKTROMAGNETYCZNY

W silniku następuje przetworzenie energii elektrycznej w mechaniczną, dostępną na wale jako moment siły.



$$M = F \cdot r$$

Jeśli na wale zostanie zamontowane koło zamachowe o promieniu  $r$ , to układ taki wykona pracę  $W$  na drodze  $l = n \cdot 2 \cdot \pi \cdot r$  równą:

$$W = F \cdot l$$

Iloczyn mocy i czasu również jest określany jako praca:

$$W = P \cdot t$$

Z powyższych zależności można napisać:

$$M = F \cdot r = \frac{W}{l} \cdot r = \frac{P \cdot t}{n \cdot 2 \cdot \pi \cdot r} \cdot r = \frac{9,55}{n} P \quad [\text{Nm}]$$

Współczynnik 9,55 powstał w wyniku przeliczeń, aby prędkość obrotową  $n$  podawać w [obr/min], a moc czynną  $P$  w [W].

#### 1.4.2. SPRAWNOŚĆ I STRATY

Sprawność definiuje się jako stosunek mocy na wale silnika ( $P_2$ ) do mocy pobieranej z sieci:

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

Moc  $P_2$  jest mocą  $P_1$  pomniejszoną o straty silnika  $\Delta P$ , które obejmują: straty w żelazie, straty w miedzi, straty wentylacyjne oraz straty tarcia.

#### 1.4.3. TABLICZKA ZNAMIONOWA SILNIKA

Tabliczka znamionowa silnika może zawierać następujące dane:

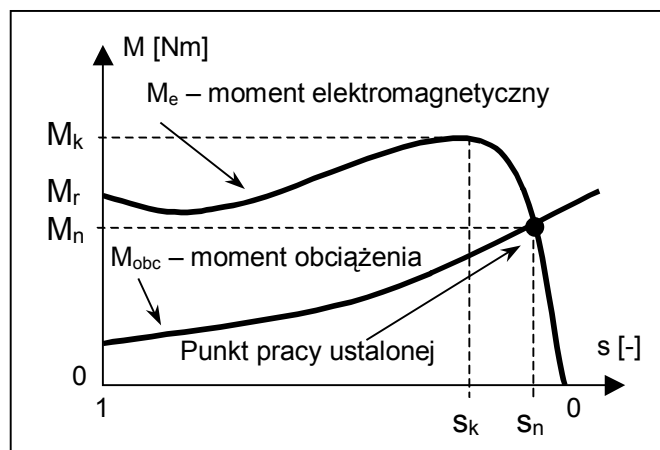
OPIS	PRZYKŁAD
Częstotliwość znamionowa, silnik 3-fazowy	3~, 50Hz
Moc znamionowa silnika (moc mechaniczna na wale maszyny)	15kW
Rodzaje połączeń silnika (gwiazda / trójkąt) z podanymi wartościami napięć i prądów	Y (380V, 29A) Δ (220V, 50A)
Współczynnik mocy silnika $\cos\varphi = P/S$ , stosunek mocy czynnej do mocy pozornej.	0,9
Prędkość znamionowa silnika – prędkość silnika obciążonego znamionowym momentem przy znamionowym napięciu i częstotliwości.	2910

Stopień ochrony obudowy (norma IEC 34-5) określający stopień zabezpieczenia silnika przed możliwością dostania się do jego wnętrza pyłów i ciał stałych oraz stopień zabezpieczenia użytkownika przed dotknięciem do części będących pod napięciem.	IP 54
Rodzaj chłodzenia silnika (norma IEC 34-6)	IC ...
Sposób montażu silnika (norma IEC 34-7)	IM ...
Klasa izolacji silnika	F

Na podstawie tabliczki znamionowej silnika można określić:

1. Moment znamionowy silnika:  $M = \frac{9,55}{n} P = \frac{9,55}{2910} 15000 = 49 \text{ Nm}$
2. Sprawność silnika:  $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_n}{\sqrt{3} UI \cos \varphi} = \frac{15000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 29 \cdot 0,9} = 0,87$
3. Poślizg znamionowy:  $s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{3000 - 2910}{3000} = 0,03$

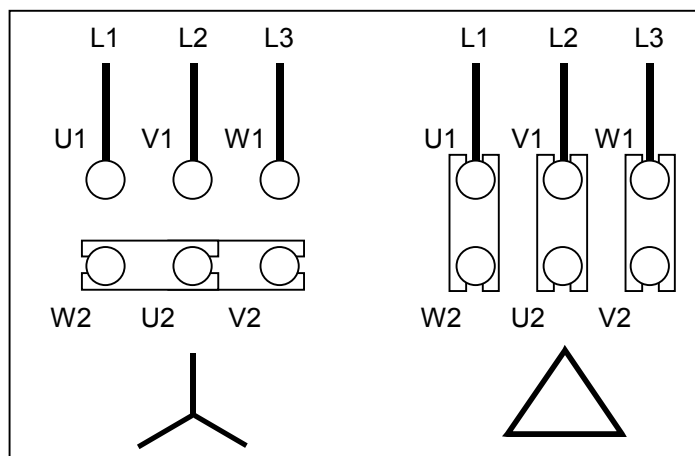
Poniżej przedstawiona jest charakterystyka mechaniczna silnika asynchronicznego dla niektórych wielkości opisujących silnik.



$M_k, s_k$  – moment i poślizg krytyczny,  
 $M_n, s_n$  – moment i poślizg znamionowy,  
 $M_r$  – moment rozruchowy.

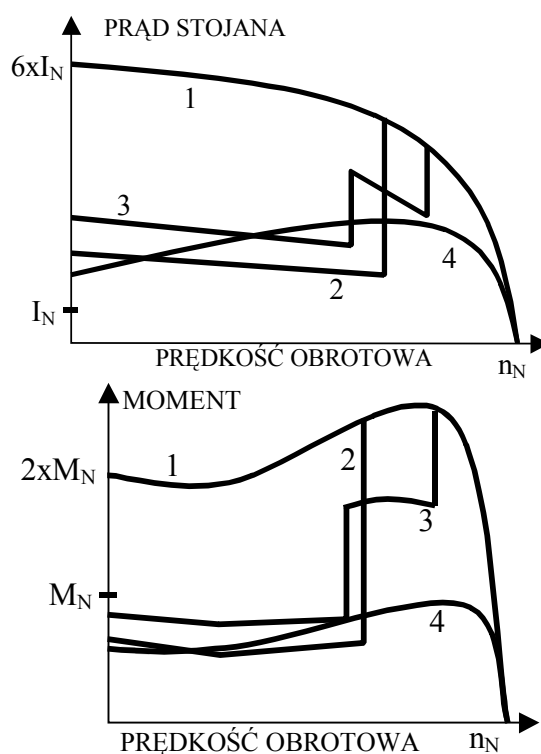
## 1.5. PODŁĄCZENIE SILNIKA DO SIECI

Jeżeli na tabliczce zaciskowej silnika są wyprowadzone sześć końcówek, oznacza to, że silnik może być podłączony do pracy w „trójkąt” lub „gwiazdę”. Producent silnika celowo odpowiednio rozmieszcza końce uzwojeń do zacisków, aby w prosty sposób można było przejść do żądanego układu połączenia silnika, jak to pokazano na rysunku poniżej.



## 2. SOFTSTART

### 2.1. WSTĘP



**Przebiegi prądu i momentu dla:**

- 1 – bezpośredniego załączenie z sieci,
- 2 – przełącznika „gwiazda – trójkąt”,
- 3 – zasilania z autotransformatora,
- 4 – zasilania z softstartu.

Bezpośrednie załączenie silnika klatkowego do trójfazowej sieci prądu przemiennego powoduje gwałtowny wzrost prądu pobieranego przez silnik. Występuje tzw. uderzenie prądu rozruchowego, który przewyższa prąd znamionowy kilkakrotnie (zazwyczaj pięć lub więcej razy) oraz powoduje największe obciążenie mechaniczne wirnika, sprzęgieł, przekładni i przyłączonego obciążenia.

Stosowanie elementów obniżających napięcie przy rozruchu, np. przełącznik gwiazda – trójkąt, autotransformator, niewiele pomaga w tej sytuacji, gdyż wciąż występuje obciążenie udarowe, które powstaje na skutek impulsów prądowych, powodujących powstawanie składowych przejściowych momentu, w chwilach przełączania układu. Występujące obciążenia udarowe są przyczyną, skrócenia czasu eksploatacji elementów układu oraz podwyższają koszty eksploatacji i utrzymania. Na rysunku poniżej przedstawiono charakterystyki prądu i momentu w funkcji prędkości obrotowej silnika dla różnych metod rozruchu silnika indukcyjnego.

## 2.2. OGÓLNA ZASADA DZIAŁANIA SOFTSTARTU

Softstart to urządzenie energoelektroniczne pozwalające ograniczyć prąd rozruchowy poprzez ograniczenie wartości napięcia zasilającego:

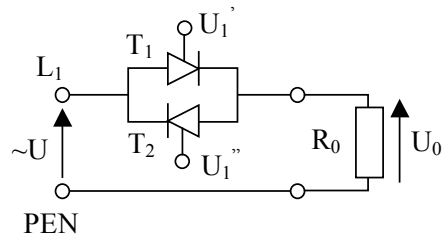
$$U_{\text{SILNIK}} = U_{\text{ZASILANIE}} - U_{\text{SOFT}}$$

jak to przedstawia rysunek poniżej.



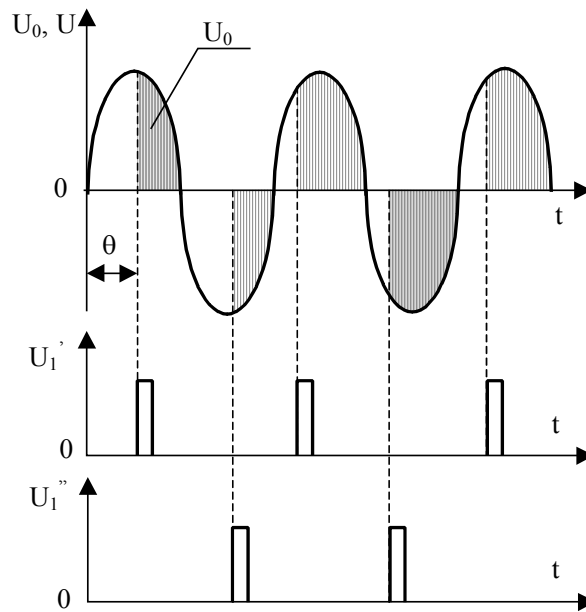
**Schemat blokowy połączenia softstartu.**

Softstart składa się z szeregu płytek drukowanych (PCB), bloków tyrystorowych, radiatora i transformatorów sterujących. Jego działanie oparte jest na zastosowaniu układu tyrystorowego – układu odwrotnie równoległego (patrz rysunek niżej). Źródła napięć  $u_1$  i  $u_1'$  sterujące zapłonem tyrystorów muszą być od siebie odizolowane. Impulsy ( $u_1$ ) powodują zwieranie tyrystora  $T_1$  w czasie trwania dodatnich półokresów napięcia zasilającego ( $u$ ), a impulsy ( $u_1'$ ) – zapłon tyrystora  $T_2$  w czasie trwania ujemnego półokresu napięcia ( $u$ ). Wskutek tego na obciążeniu ( $Z_0$ ) pojawia się napięcie przemiennie ( $u_0$ ) o wartości skutecznej zależnej od chwili występowania impulsów zapłonowych – sterowanie kątem zapłonu ( $\theta$ ).



**Schemat zestawu tyrystorowego dla jednej fazy.**

Zasada działania przedstawiona jest na rysunku niżej.



**Zasada działania softstartu.**

Wartość skuteczna napięcia silnika będzie wynosiła:

$$U_S = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [u(t)]^2 dt}$$

---

## 2.3. ENERGIA

Prąd magnesujący silnika indukcyjnego, przyłączonego bezpośrednio do sieci, wirującego z pełną prędkością ma wartość stałą, niezależną od przyłączonego obciążenia. Przy obciążeniu mniejszym od obciążenia nominalnego, współczynnik mocy silnika osiąga wartość mniejszą od wartości nominalnej ponieważ przy mniejszym obciążeniu mniejsza jest składowa prądu wytwarzającego moment obrotowy, a wartość prądu magnesującego nie ulega zmianie. Im mniejsze obciążenie silnika tym gorszy współczynnik mocy.

Dobierając silnik z typoszeregu mocy, zawsze dobieramy silnik o takiej mocy znamionowej by zapewnić pewien zapas mocy przy maksymalnym obciążeniu, przy czym prawie w żadnej instalacji silniki nie są, w pełni obciążane. Tak więc ich współczynniki mocy nie osiągają nigdy wartości nominalnych, nawet przy maksymalnym dopuszczalnym obciążeniu. Jeśli obciążenie silnika jest zmienne to straty energii są jeszcze większe.

Softstart pozwala użytkownikowi na sterowanie wartością prądu rozruchu silnika elektrycznego praktycznie od wartości minimalnej, wymaganej przy rozruchu, oraz na utrzymywanie prądu rozruchu na takim poziomie jaki jest najbardziej odpowiedni dla warunków rozruchu i przyłączonego do silnika obciążenia. Dzięki takiemu działaniu urządzenia możliwa jest też regulacja przepływu energii potrzebnej do osiągnięcia przez silnik nominalnej prędkości roboczej oraz obniżenie do minimum obciążenia mechanicznego układu napędowego.

Ze względu na tendencję do dobierania silników z nadmiarem mocy, funkcja optymalizacji zużycia energii przynosi korzyści praktycznie w każdej aplikacji silników, nie tylko w tych ze zmiennym obciążeniem.

Charakterystyki softstartu optymalizujących zużycie energii są w części zaprogramowane przez producenta a częściowo mogą być korygowane przez użytkownika. Użytkownik może dokonywać zmian w konfiguracji softstartu, pod kątem określonych warunków pracy bądź aplikacji, posługując się zestawem zwór i mikroprzełączników na płycie głównej, podając określone sygnały na złącza zewnętrznych układów sterowania, bądź korzystać z dodatkowego oprogramowania systemu.



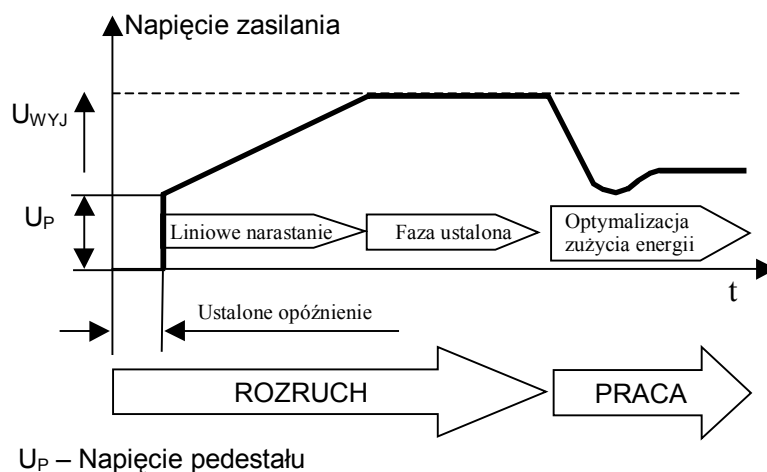
## 2.4. FAZY PRACY SOFTSTARTU

Na rysunku poniżej przedstawiono trzy podstawowe fazy występujące w pełnym cyklu pracy softstartu:

- Liniowe narastanie napięcia - układ otwartej bądź zamkniętej pętli,
- Faza ustalona (plateau),
- Optymalizacja zużycia energii.

Podczas normalnej pracy układu, po zakończeniu rozruchu, układ realizuje kilka trybów pracy, standardowych dla wszystkich urządzeń:

- Wykrywanie uszkodzeń i wyłączanie układu,
- Kasowanie nastaw, tryb pracy wymuszonej,
- Łagodne zatrzymanie silnika,
- Optymalizacja poboru energii.



$U_p$  – Napięcie pedestalu

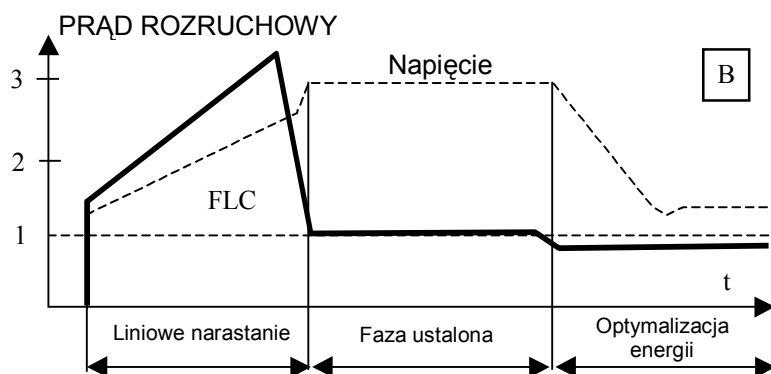
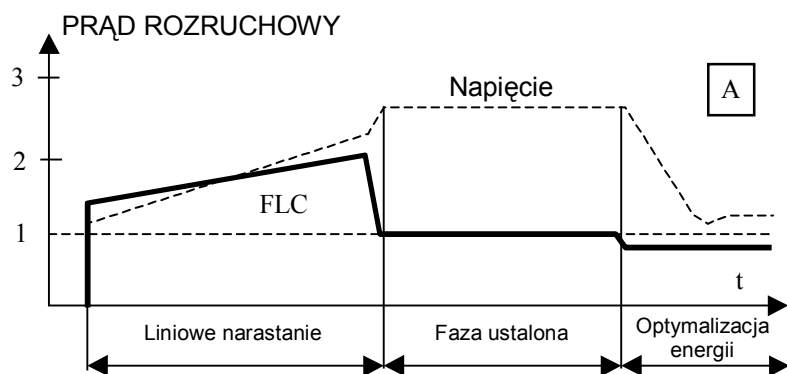
**Fazy pracy softstartu.**

Niektóre z urządzeń softstartu są, ponadto wyposażone w:

- Ograniczenie prądowe podczas rozruchu,
- Przekaznik sygnalizujący koniec fazy liniowego narastania napięcia,
- Przekaznik sygnalizujący uszkodzenie.

## 2.5. FAZY ŁAGODNEGO ROZRUCHU

### 2.5.1. LINIOWE NARASTANIE NAPIĘCIA



**Prąd rozruchowy w funkcji czasu narastania (otwarta pętla).**

A. Długi czas.

B. Krótki czas.

FLC – prąd przy pełnym obciążeniu.

Po dostarczeniu do układu sygnału do rozpoczęcia pracy oprogramowanie systemowe wymusza najpierw ustalone opóźnienie o długości 3-400 ms, podczas którego układ sam się testuje. Dopiero po upływie czasu opóźnienia, napięcie jest podawane na zaciski silnika w celu wytworzenia momentu rozruchowego napięcie piedestału (standardowo, napięcie piedestału równe jest 40% napięcia zasilania, choć czasami może być ustawiane indywidualnie).

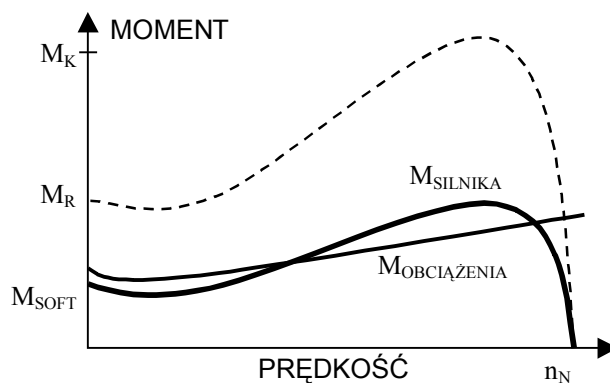
Następnie układ zaczyna zwiększać liniowo napięcie, w wyniku czego napięcie na zaciskach silnika zaczyna łagodnie narastać od napięcia piedestału do napięcia maksymalnego. Na końcu fazy liniowego narastania napięcia, napięcie podawane na zaciski silnika za pośrednictwem bloków tyrystorowych równe jest napięciu podawanemu z sieci.

Wartość prądu pobieranego przez każdy uruchamiany silnik, w konfiguracji otwartej pętli sprzężenia, uzależniona jest od nastawy długości czasu liniowego narastania napięcia. Im krótszy czas liniowego narastania tym większy impuls prądu po włączeniu silnika (patrz rysunek wyżej), ale i większe przyspieszenie układu. Z kolei nastawa dłuższa powoduje obniżenie wartości prądu rozruchowego oraz przedłużenie okresu, w którym obciążenie osiąga pełną prędkość.

W przypadku obciążonego napędu, gdy to napięcie rozruchu będzie zbyt niskie, silnik nie wystartuje (zbyt mały moment rozruchowy), gdyż:

$$M = k \cdot U_{\text{SILNIK}}^2$$

jak to przedstawiają charakterystyki na rysunku niżej.



**Charakterystyka momentu silnika przy obniżonym napięciu softstartu.**

Dopiero przy odpowiedniej wartości napięcia softstartu, gdy moment dynamiczny  $M_D = M_{\text{SILNIKA}} - M_{\text{OBCIĄŻENIA}} > 0$ , silnik rozpocznie pracę.

Początkowy moment elektromagnetyczny softstartu ( $M_{\text{SOFT}}$ ) można obliczyć wg wzoru:

$$M_{\text{SOFT}} = M_{\text{START}} \cdot \left( \frac{U_{\text{SOFT}}}{U_N} \right)^2$$

gdzie:

- $M_{\text{START}}$  – moment rozruchowy przy napięciu znamionowym,
- $U_{\text{SOFT}}$  – napięcie softstartu,
- $U_N$  – napięcie znamionowe.

Rzeczywisty czas rozruchu silnika jest różny od nastawianego czasu  $t_R$  i zależy od parametrów silnika oraz urządzenia napędzanego przez ten silnik. Dobór czasu  $t_R$  narastania napięcia przeprowadza się doświadczalnie mierząc prąd rozruchu oraz czas po jakim silnik osiąga prędkość znamionową. Należy dobrać taki czas  $t_R$ , przy którym w warunkach normalnego obciążenia silnika uzyskuje się optymalny rzeczywisty czas rozruchu oraz optymalny prąd rozruchu.

Czas rozruchu można wyznaczyć także ze wzoru:

$$t_R = t_{\text{SOFT}} \cdot \frac{I_{\text{START}}}{I_{\text{SOFT}}} \quad (1)$$

gdzie:

- $t_{\text{SOFT}}$  – czas ustawiony na softstarcie,
- $I_{\text{START}}$  – bezpośredni prąd pobierany z sieci przy starcie,
- $I_{\text{SOFT}}$  – prąd wymuszony napięciem softstartu pobierany przez silnik indukcyjny.

### 2.5.2. FAZA USTALONA (PLATEAU)

Faza ustalona - plateau - rozpoczyna się w chwili, w której napięcie wyjściowe osiąga wartość maksymalną równą napięciu zasilania. Czas trwania równy jest wybranemu czasowi liniowego narastania, lub wynosi w przybliżeniu 10 s gdy czas liniowego narastania jest krótszy od 10 s.

---

Podczas fazy ustalonej napięcie na zaciskach silnika ma wartość stałą, co pozwala układowi silnik – obciążenie na osiągnięcie stanu ustalonego, po zakończeniu przyspieszania w pierwszej fazie rozruchu, przed wkroczeniem w fazę optymalizacji zużycia energii.

### **2.5.3. OPTIMALIZACJA ZUŻYCIA ENERGII**

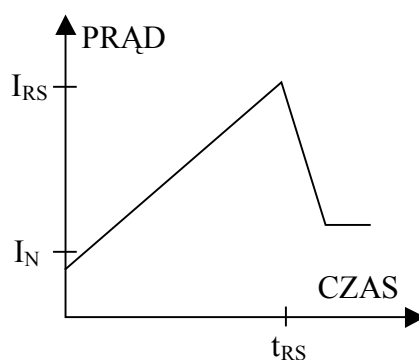
Optymalizacja zużycia energii to normalny tryb pracy wszystkich urządzenia softstartu po osiągnięciu przez silnik pełnych obrotów, przy dowolnym obciążeniu. Należy pamiętać, że optymalizacja nie jest w stanie poprawić współczynnika mocy poza taką wartość, jaka byłaby przy pełnym obciążeniu. Największe korzyści występują w przypadku, gdy silnik pracuje tylko z częściowym obciążeniem.

Podczas fazy narastania liniowego, oprogramowanie systemowe wyznacza wzorcową wartość współczynnika mocy. Po przejściu do fazy optymalizacji wartość wzorcowa jest przez cały czas porównywana z bieżącą wartością współczynnika mocy. Analizując sygnał wyjściowy z komparatora, program przez cały czas wyznacza, dostraja i aktualizuje punkty zapłonu tyrystorów, tak by ilość energii dostarczanej do silnika odpowiadała aktualnemu momentowi na wale silnika, a nie była zużywana na wytwarzanie dodatkowego strumienia magnetycznego. Współczynnik mocy na zaciskach wejściowych silnika utrzymywany jest przez to na najwyższym możliwym poziomie dla każdego warunków obciążenia.

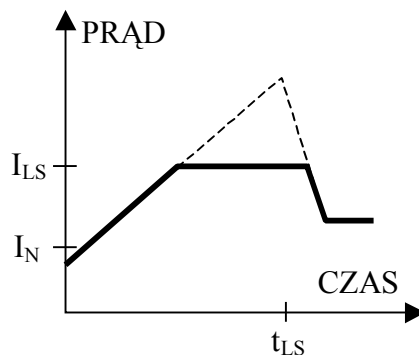
Sterowanie wartością współczynnika mocy w żadnym względzie nie ogranicza możliwości silnika, nie pogarsza jego parametrów roboczych. Działanie tej funkcji ma charakter czysto elektryczny i ma na celu, aby silnik dostarczał przez cały czas taki moment jaki jest w danej chwili potrzebny, przy czym silnik może pobierać tylko taki prąd magnesujący jaki jest konieczny do utrzymania określonego momentu na wale. Bez działania tej funkcji, silnik pobierałby przez cały czas maksymalny prąd magnesujący niezależnie od przyłączonego obciążenia. Działanie funkcji optymalizacji zużycia energii przynosi więc znaczne korzyści w ograniczeniu poboru energii przez cały układ.

## 2.6. FUNKCJE DODATKOWE

### 2.6.1. OGRANICZENIE PRĄDOWE – PRACA W UKŁADZIE ZAMKNIĘTEJ PĘTLI



**Bez ograniczenia prądowego.**



**Z ograniczeniem prądowym.**

W części przypadków możliwe jest dobranie takiego czasu  $t_R$  narastania napięcia, który zapewnia w trakcie rozruchu utrzymanie prądu silnika poniżej  $2\div 2,5I_n$  (prądu znamionowego). W przypadku szczególnie ciężkich rozruchów nie jest to możliwe. W tego typu układach przyspieszenie zazwyczaj nie nadaża za wzrostem napięcia na zaciskach silnika podczas fazy liniowego narastania, nawet jeśli wybrane czasy narastania napięcia są bardzo długie. Z drugiej zaś strony przy tego typu obciążeniach może zachodzić

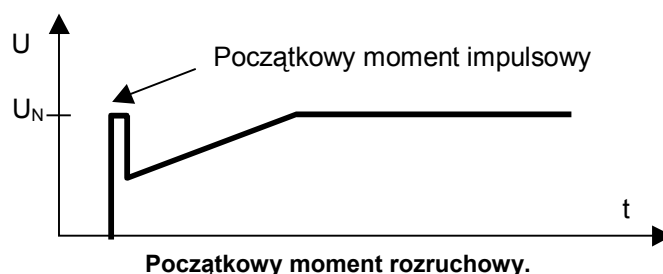
---

potrzeba nastawy krótkich czasów narastania w celu zapewnienia dostatecznego momentu rozruchowego. Przy krótkim czasie rozruchu napięcie na zaciskach silnika rośnie szybko do wartości maksymalnej, zaś wzrost prędkości wirowania nie nadąży za wzrostem napięcia z racji charakteru obciążenia. W rezultacie silnik zacznie pobierać większy prąd. Problem ten można rozwiązać przez zastosowanie dodatkowej karty do ograniczania prądu rozruchu. Układ taki zatrzymuje dalszy liniowy wzrost napięcia, w momencie gdy prąd wyjściowy osiągnie zadany poziom. Liniowy wzrost napięcia zatrzymany jest zwykle na czas 20-25 sekund. Jeśli w tym czasie prąd silnika nie spadnie to układ zostanie wyłączony lub wzrost napięcia będzie kontynuowany do wartości maksymalnej w celu zapewnienia normalnych warunków pracy układom zabezpieczającym (np. bezpiecznikom). Taki sposób sterowania funkcją stanowi zabezpieczenie przed zjawiskiem utknięcia silnika, bądź zbyt niskim progiem ograniczenia prądowego. Warto dodać, że w praktyce nie stosuje się wyłącznie skokowego ograniczenia prądu, a jego przebieg czasowy jest kształtowany tak, aby dopasować charakterystykę silnika do każdego rodzaju obciążenia oraz ograniczyć momenty przejściowe. Wiąże się to z zastosowaniem softstartu o bogatszej wersji oprogramowania wyposażonego w dodatkowe funkcje tj. ograniczenie napięciowe i impuls startowy (forsowanie prądu na początku rozruchu).

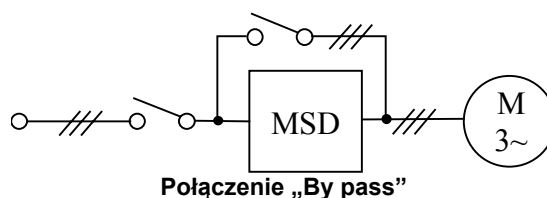
Praca z ograniczeniem prądowym narzuca konieczność ciągłego pomiaru oraz objęcia pętlą sprzężenia zwrotnego prądu silnika. W tym celu na wyjściu bloków tyrystorowych montuje się przekładnik prądowy, który dostarcza informacji o prądzie silnika na płytę główną zespołu rozruchowego.

## **2.6.2. POCZĄTKOWY MOMENT IMPULSOWY**

Funkcja początkowego momentu impulsowego pozwala na uzyskanie maksymalnego momentu rozruchowego poprzez dostarczenie napięcia znamionowego na zaciski stojana silnika w czasie 0,1 – 2 s. Jest to bardzo przydatne w przypadku dużego początkowego momentu obciążenia. Po zakończeniu tej operacji następuje dalszy rozruch silnika wg ustalonego programu. Funkcja może być stosowana tylko z jednoczesnym użyciem nastawionego czasu rozruchu.



### 2.6.3. PRACA Z OBEJŚCIEM SOFTSTARTU (BY PASS)



W niektórych układach silnik-obciążenie może być korzystne, bądź nawet niezbędne, zbocznikowanie softstartu po zakończeniu fazy rozruchu i przyłączenie silnika bezpośrednio do sieci zasilającej. W przypadku gdy softstart zostanie zbocznikowany, ale nie wyłączony, należy wówczas zablokować działanie funkcji zabezpieczenia przed uszkodzeniem i optymalizacji energii. Bocznikowanie softstartu i blokowanie wspomnianych funkcji stosujemy wszędzie tam, gdzie występują problemy z odprowadzaniem ciepła ze struktur tyrystorowych - np. gdy urządzenie zamontowane jest w obudowie IP 54. Płyta główna wyposażona jest w wejście sterujące, które po zwarceniu lub rozwarciu, przez zewnętrzny stycznik może blokować działanie funkcji wykrywania uszkodzenia i optymalizacji zużycia energii.

### 2.6.4. ŁAGODNE ZATRZYMANIE - SOFTSTOP

Działanie funkcji łagodnego zatrzymania (SOFT-STOP) ma na celu zapobieżenie nagłym zahamowaniom obciążenia. Funkcja ta może być użyteczna w systemach transportu mechanicznego, taśmociągach, układach pomp hydraulicznych, oraz wszędzie tam



---

gdzie nagłe wyłączenie układu napędowego może wywołać niepożądane efekty, np. uderzenia hydrauliczne w rurociągach.

Funkcję łagodnego zatrzymania SOFT-STOP można uaktywnić w dowolnym momencie po zakończeniu fazy liniowego narastania napięcia, nawet w przypadku gdy urządzenie jest bocznikowane. Funkcja zostaje uaktywniona przez podanie zewnętrznego sygnału sterującego. Działanie funkcji łagodnego zatrzymania polega na tym, że napięcie na zaciskach silnika jest liniowo obniżane do 40% wartości maksymalnej, po czym następuje wyłączenie tyrystorów. Układ silnik-obciążenie następnie zatrzymuje się.

Układ do łagodnego zatrzymania, w wykonaniach specjalnych, może być wyposażony w opcję automatycznego ponownego rozruchu, która umożliwi wielokrotne włączanie i wyłączanie układu przez podawanie sygnału zewnętrznego na wejście sterujące.

## 2.7. PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ SOFTSTARTU

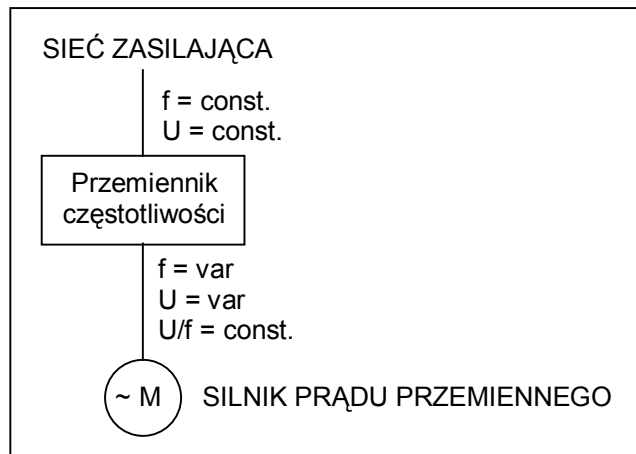
Ze względu na obniżenie momentu rozruchowego softstart będzie miał zastosowanie przy niewielkich obciążeniach. Przy tym warunku można go zastosować w:

- Przenośniki taśmowe, wyciągi, schody ruchome,
- W maszynach tekstylnych (ciągarkach drutu),
- Młyny kulowe, tokarki, nawijarki, skrawarki obrotowe do fornit,
- Kalander (gładziarka), przenośniki ślimakowe (przy pustych komorach ślimakowych), maszyny do gładzenia tkanin i papieru, gorący magiel,
- Napęd wentylatora,
- Rozruch wysokonapięciowych silników klatkowych,
- Pompy tłokowe i sprężarki przy tłoczeniu przy stałym ciśnieniu, dmuchawy waporowe, walcarki, taśmociągi, obrabiarki ze stałą siłą skrawania.

### 3. PRZEMIENNIK CZĘSTOTLIWOŚCI

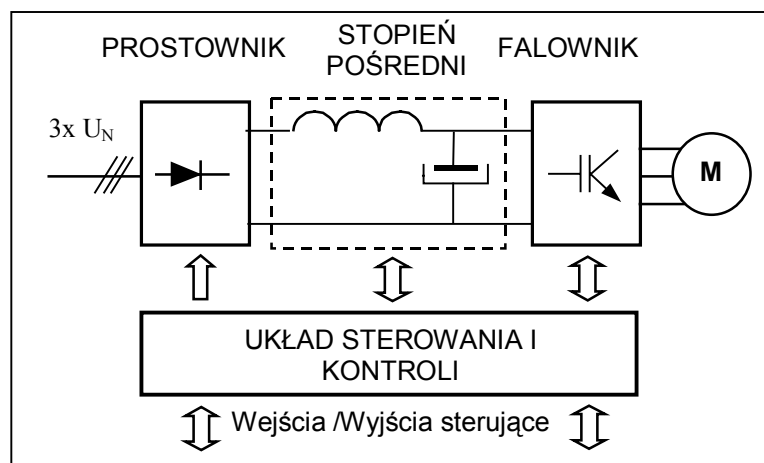
#### 3.1. WSTĘP

**Przemienniki częstotliwości** to urządzenie energoelektroniczne, które pozwala na płynną regulację napięcia i częstotliwości wyjściowej zasilający silnik prądu przemiennego. Poprzez regulację częstotliwości uzyskuje się regulację prędkości obrotowej, natomiast poprzez zmianę wartości napięcia osiąga się zmianę momentu elektromagnetycznego silnika. Aby otrzymać stałość momentu przy zmianie częstotliwości, utrzymuje się stałość tych dwóch wielkości  $U/f = \text{const.}$



Przemienniki częstotliwości zaczęto produkować seryjnie pod koniec lat sześćdziesiątych ubiegłego stulecia. Od tego czasu w elektronice nastąpił tak szybki rozwój technologii, że dzisiejsze przetwornice różnią się znacznie od swoich protoplastów. Pomimo to podstawowe zasady pracy i schemat blokowy w ogólnym zarysie pozostały bez zmian.

## 3.2. ELEMENTY PRZEMIENNIKA CZĘSTOTLIWOŚCI



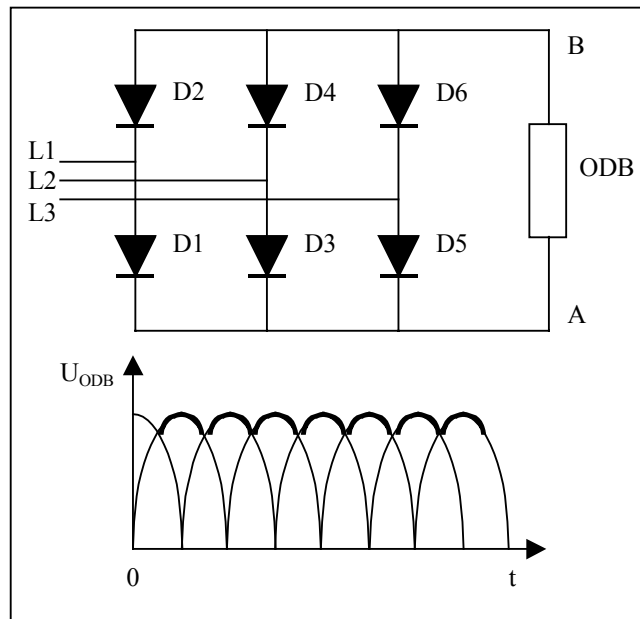
Uproszczony schemat blokowy

### 3.2.1. PROSTOWNIK

**Prostownik** trójfazowy na wejściu prostuje trójfazowe napięcie sieci zasilającej, w wyniku czego otrzymujemy pulsujące napięcie stałe. Istnieją dwa podstawowe typy prostowników: niesterowane (diodowe) oraz sterowane (tyrystorowe i tyrystorowo–diodowe).

Większość napędów przemysłowych wyposażona jest w silniki trójfazowe, toteż stosuje się prostowniki trójfazowe na wejściu przemiennika częstotliwości. Jest to zwykle tzw. mostek trójfazowy, składający się z sześciu elementów półprzewodnikowych. W przypadku gdy składa się on tylko z samych diod jest określany jako niesterowany. Mostek prostowniczy składający się z trzech diod i trzech tyrystorów, określany jest jako mostek sterowany niepełny lub półokresowy. Mostek prostowniczy, składający się natomiast z sześciu tyrystorów, określany jest jako mostek sterowany pełnookresowy.

**Mostek trójfazowy niesterowany** składa się z dwu grup diod. Jedna grupa – A, zawiera diody: D1, D3, D5, druga grupa – B, diody: D2, D4, D6. Każda dioda przewodzi przez 1/3 okresu (120°). Dwie grupy diod przewodzą kolejno.



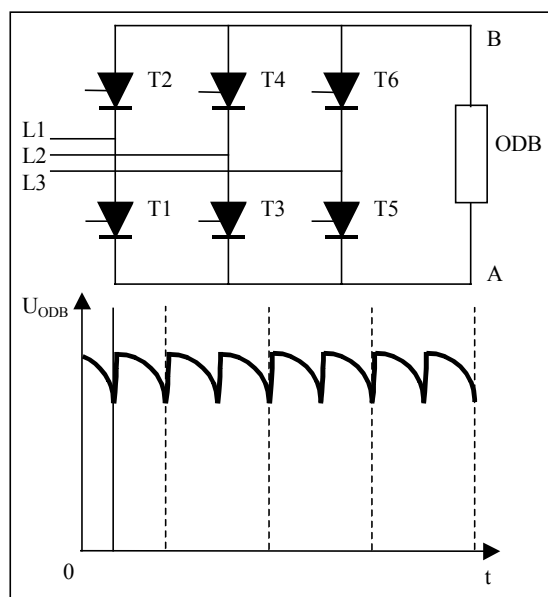
**Mostek trójfazowy niesterowany.**

Zmiana przewodzenia diod gr. A i gr. B ma miejsce co  $1/6$  okresu ( $60^\circ$ ). Napięcie wyjściowe mostka  $U_{A-B}$  jest różnicą napięć pomiędzy grupą diod A a grupą B.

**Mostek trójfazowy pełnookresowy** zbudowany jest z sześciu tyrystorów. Tyrystor, podobnie jak dioda, przewodzi prąd tylko w jednym kierunku, z tą różnicą, że przewodzenie to zależy od obecności sygnału sterującego podawanego na jego bramkę.

Jeśli na anodzie tyrystora jest napięcie wyższe niż na jego katodzie oraz gdy na bramkę zostanie podany dodatni sygnał sterujący względem katody, to tyrystor wejdzie w stan przewodzenia. w Stanie tym pozostanie tak długo, aż płynący przez niego prąd osiągnie wartość zero. Sygnał bramkowy nie może wyłączyć klasycznego tyrystora SCR (skrót z jęz. ang. Silicon Controlled Rectifier). Parametrem mówiącym o momencie załączenia tyrystora jest kąt wyzwalania  $\alpha$  określany w stopniach. Jego wartość mówi o opóźnieniu czasowym od momentu przejścia przez zero głównego

tyrystora do momentu jego załączenia. W zakresie wartości kąta przewodzenia  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ , układ tyrystorowy pracuje jako prostownik.



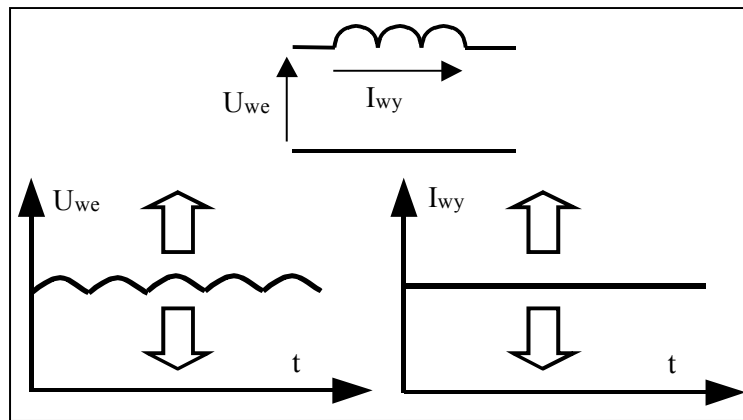
Mostek trójfazowy sterowany pełnookresowy.

### 3.2.2. STOPIEŃ POŚREDNI

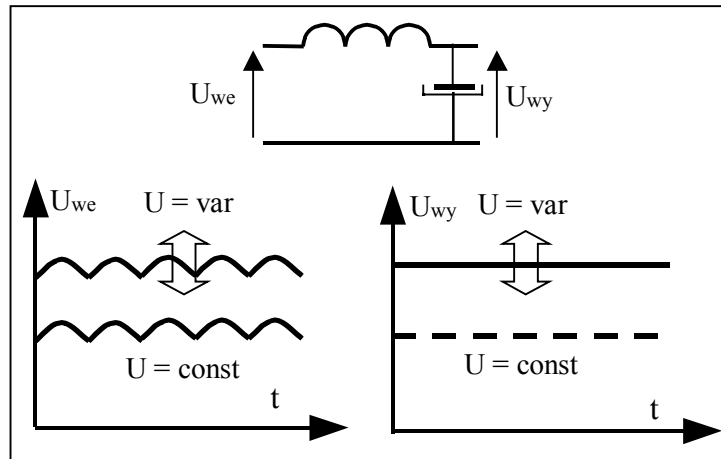
**Stopień pośredni** w przetwornicy – niezależnie od jego budowy – wygładza wyjściowe pulsujące napięcie prostownika dając na jego wyjściu napięcie stałe o regulowanej wartości, jak również jest „magazynem energii”, z którego zasilany jest falownik. Istnieją trzy typy stopni pośrednich, stosowane w zależności od rodzaju falownika:

- stopień pośredni z regulowanym prądem,
- stopień pośredni z regulowanym lub stałym napięciem wejściowym i wyjściowym,
- stopień pośredni ze stałym napięciem wejściowym i zmiennym wyjściowym.

**Stopień pośredni z regulowanym prądem** ma dużą cewkę, przez którą płynie cały prąd obciążenia. Ten rodzaj obwodu pośredniego stosuje się tylko w przypadku tyrystorowych układów wejściowych. Cewka przekształca napięcie zmienne z wyjścia prostownika w prąd stały o regulowanej wartości. Wielkość obciążenia określa więc wartość napięcia na wyjściu przetwornicy. Rozwiązania tego rodzaju są stosowane w układach hamowania ze zwrotem energii do sieci zasilającej.



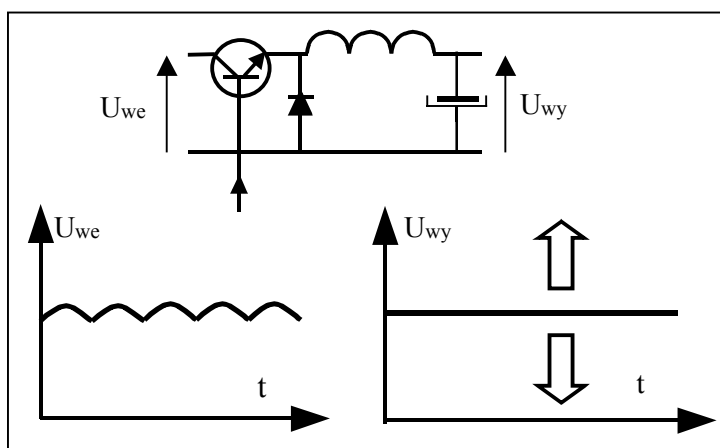
**Stopień pośredni z regulowanym prądem.**



**Stopień pośredni z regulowanym lub stałym napięciem wejściowym i wyjściowym.**

**Stopień pośredni z regulowanym lub stałym napięciem wejściowym i wyjściowym** składa się z cewki i kondensatora, które stanowią razem filtr typu LC. Tego typu układ może współpracować zarówno z prostownikami sterowanymi, jak i niesterowanymi. Filtr LC wygładza napięcie tętniące za mostkiem sterowanym. Jeśli napięcie pochodzi z mostka sterowanego, jest ono wygładzane niezależnie od wielkości amplitudy. Jeśli napięcie pochodzi z prostownika diodowego, jest ono wygładzane napięciem o stałej amplitudzie. W stopniu pośrednim tego typu wielkość obciążenia określa wartość prądu silnika.

**Stopień pośredni ze stałym napięciem wejściowym i zmiennym wyjściowym** jest tzw. impulsatorem lub czoperem (w jęz. ang. chopper). Głównym elementem czopera jest tranzystor mocy, który kluczuje wyprostowane napięcie z mostka. Układ sterowania mierzy wartość napięcia na wyjściu stopnia pośredniego i porównuje z wartością zadaną (znaną pośrednio z zadanej częstotliwości). Jeśli wystąpi różnica tych wartości, to następuje wówczas regulacja napięcia wyjściowego.



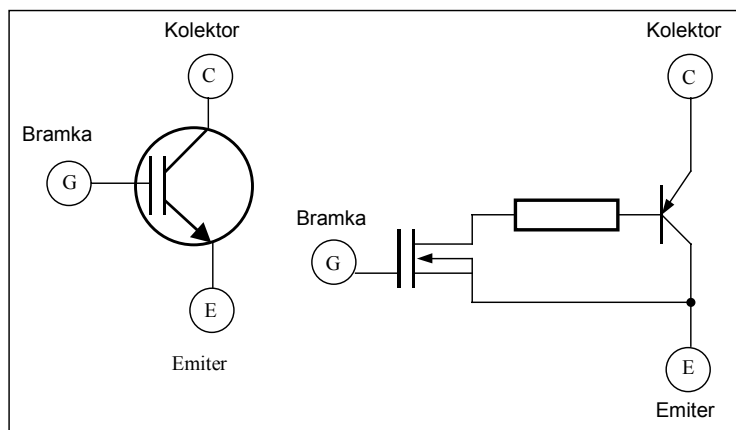
Stopień pośredni ze stałym napięciem wejściowym i zmiennym wyjściowym.

### 3.2.3. FALOWNIK

**Falownik (inwerter mocy)** - wytwarza napięcie zmienne trójfazowe o regulowanej wartości i częstotliwości. W zależności od rozwiązania stopnia pośredniego falownika może on być zasilany:

- prądem stałym o regulowanej wartości,
- napięciem stałym o regulowanej wartości,
- napięciem stałym nieregulowanym.

Falownik dokonuje zmiany jednej z tych wielkości na trójfazowe napięcie o regulowanej wartości i częstotliwości. Jeśli do falownika dostarczymy regulowane napięcie lub prąd ze stopnia pośredniego, to jedynym parametrem do regulacji pozostaje częstotliwość. Natomiast, jeśli napięcie dostarczane do falownika jest nieregulowane, to zarówno regulacja częstotliwości, jak i napięcia będzie dokonywana w nim samym. Falownik zawiera zwykle tyrystory lub tranzystory, umieszczone parami w trzech gałęziach mocy. Obecnie w większości falowników wykorzystuje się tranzystory, które – w tym przypadku – są lepsze od tyrystorów. Główną zaletą tranzystorów – stanowiącą o ich przydatności w stopniu mocy – jest możliwość ich wyłączenia w dowolnym momencie przebiegu napięcia, podczas gdy tyrystor można wyłączyć dopiero przejściem napięcia przez zero. Dlatego też częstotliwość pracy falownika tranzystorowego może być znacznie zwiększona (od 300Hz do 15kHz), co daje większe możliwości kształtowania sinusoidalnego napięcia wyjściowego inwertera.



**Tranzystor IGBT (symbol i schemat zastępczy)**



---

Obecnie najbardziej popularne są tranzystory z izolowaną bramką IGBT (skrót z jęz. ang. Insulated Gate Bipolar Transistor), które łączą w sobie najlepsze cechy tranzystorów bipolarnych i MOS FET. Tranzystor IGBT sterowany jest napięciowo, tak jak tranzystor MOS FET, natomiast od strony wyjścia można go traktować jak tranzystor dużej mocy.

### 3.2.4. UKŁAD STEROWANIA I KONTROLI

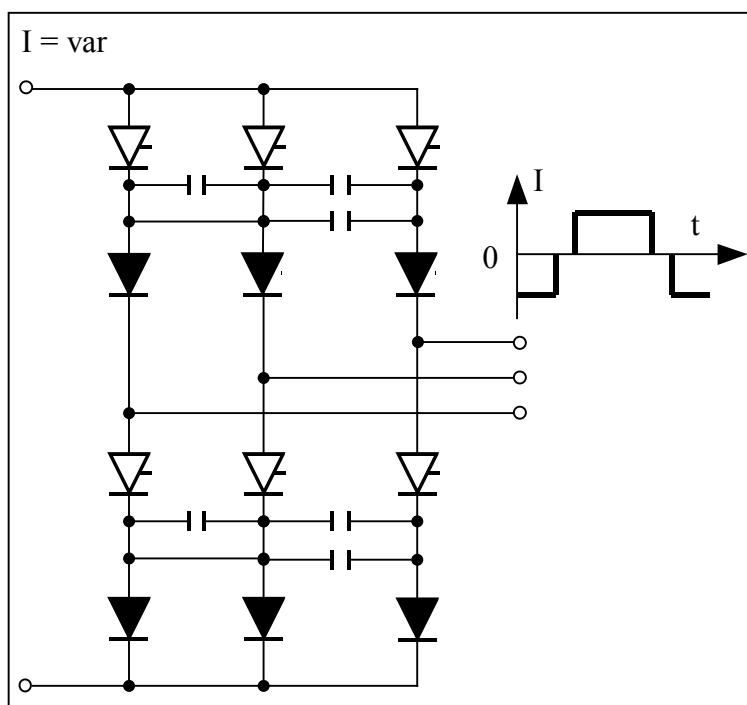
**Układ sterowania i kontroli** jest czwartym blokiem przetwornicy i jest „mózgiem przetwornicy”. Pełni on dwie podstawowe funkcje: steruje pracą falownika oraz otrzymuje i obsługuje sygnały komunikacyjne z otoczeniem przetwornicy. Sygnały te mogą pochodzić z zewnętrznych urządzeń sterujących bądź z panelu operatora. Komunikacja odbywa się w obu kierunkach: zarówno do, jak i z przetwornicy.

Zależnie od metody otrzymywania napięcia wyjściowego, przetwornice można sklasyfikować w trzech grupach:

- przetwornice ze źródłem prądowym – CSI (skrót z jęz. ang.: Current Source Inverter),
- przetwornice z modulacją amplitudy – PAM (skrót z jęz. ang.: Pulse Amplitude Modulation),
- przetwornice z modulacją szerokości impulsu – PWM (skrót z jęz. ang.: Pulse Width Modulation), a w tym przetwornice z kontrolą wektora napięcia VVC (skrót z jęz. ang.: Voltage Vector Control).

### 3.3. SPOSOBY UZYSKIWANIA NAPIĘCIA WYJŚCIOWEGO

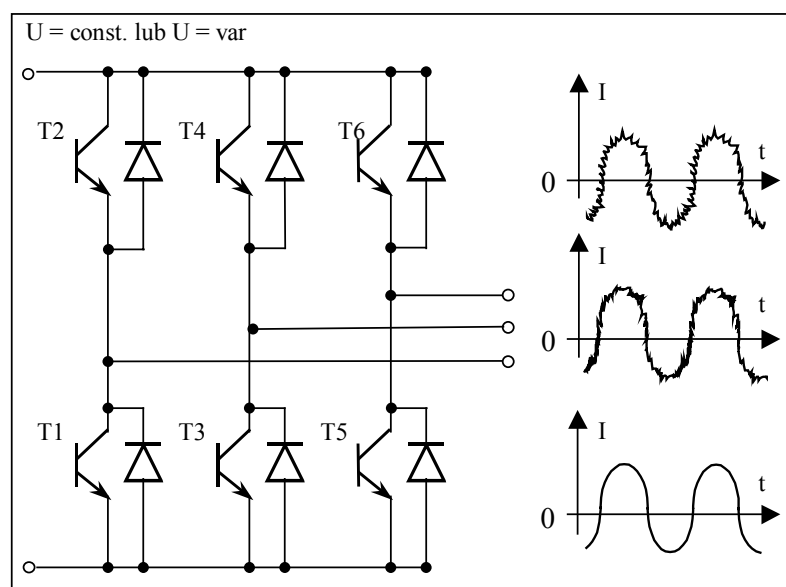
Sterowanie falownik IEM odbywa się w module sterowania i kontroli według jednego z algorytmów : CSI , PAM , PWM lub VVC. Oprócz różnych algorytmów pracy, falownik może być sterowany prądowo lub napięciowo.



Inwerter ze sterowaniem prądowym.

**Sterowanie prądowe inwertera** wymaga użycia większej liczby elementów niż sterowanie napięciowe. Zasadniczymi elementami falownika jest sześć diod, sześć tyrystorów i sześć kondensatorów. Kondensatory w falowniku muszą zmagazynować dostatecznie dużą ilość energii, potrzebnej do włączenia tyrystorów. Stąd ich pojemność jest dobierana do wielkości mocy silnika. Dzięki odpowiedniemu włączeniu kondensatorów następuje komutacja prądu w fazach wyjściowych co  $120^\circ$ . Jeśli sterowanie odbywa się w sekwencji: U–V, V–W, W–U, U–V, to w uzwojeniach podłączonego silnika powstanie pole wirujące o żądanej częstotliwości. Prądy fazowe będą miały kształt prostokątny, natomiast napięcie będzie sinusoidą z wąskimi impulsami w momentach przełączania prądów fazowych. Dodatkowe diody w falowniku zabezpieczają kondensatory od przepływu prądu rozładowania do obwodu pośredniego.

**Sterowanie napięciowe inwertera** może odbywać się w układzie ze stałym lub regulowanym napięciem stopnia pośredniego. Zasadę pracy przedstawia rysunek poniżej. Falownik składa się z sześciu kluczy półprzewodnikowych (tyrystorów lub tranzystorów). Sterowanie falownikiem odbywa się w bloku sterowania według algorytmu PAM lub PWM. Klucze półprzewodnikowe są otwierane według pewnego, cyklicznie powtarzającego się wzorca. Najbardziej popularny jest wzorec składający się z sześciu lub osiemnastu impulsów.



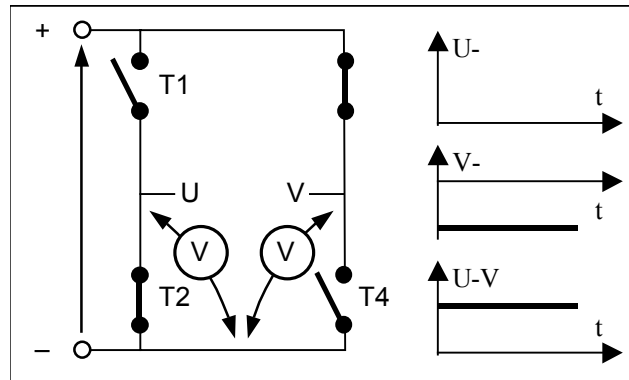
**Sterowanie napięciowe inwertera.**

Wzorec taki jest sterowany napięciem bądź prądem obwodu pośredniego w układzie oscylatora sterowanego napięciowo (VCO). Częstotliwość na wyjściu układu będzie zawsze pożądaną za zmianą amplitudy napięcia. Ten rodzaj sterowania falownika nazwano modulacją amplitudy impulsu – PAM.

Inny wzorec sterowania falownika wykorzystuje zmianę czasu otwarcia kluczy półprzewodnikowych w funkcji napięcia sterującego. Napięcie obwodu pośredniego pozostaje stałe, natomiast zmianę napięcia wyjściowego uzyskuje się przez zmianę czasu trwania impulsów otwierających odpowiednie klucze

falownika. Ten rodzaj sterowania nazwano modulacją impulsu – PWM. Najdoskonalszą metodą PWM sterowania falownika jest sterowanie wektorem napięcia – VVC. W metodzie tej stałe napięcie stopnia pośredniego jest kluczowane według wzorca, w którym czas trwania impulsów otwierających obliczany jest na podstawie pomiaru prądu obciążenia i zadanych parametrów pracy przetwornicy. Optymalny czas otwarcia tranzystorów falownika obliczany jest przez specjalny układ ASIC (skrót z jęz. ang. Application Specific Integrated Circuit).

**Metoda modulacji amplitudy PAM** jest stosowana w układach ze zmiennym napięciem stopnia pośredniego i częstotliwością zmienianą w falowniku. Wzorzec sygnału wyjściowego składa się z sześciu lub osiemnastu impulsów. We wzorcu sześciopulsowym każdy z sześciu kluczy falownika sterowany jest jednym impulsem w ciągu okresu, natomiast we wzorcu osiemnastopulsowym każdy z kluczy sterowany jest trzema impulsami w ciągu okresu. Kształt napięcia wyjściowego na zaciskach U,V,W zależy więc od zastosowanego wzorca sterowania. Można przeprowadzić analizę wytwarzania napięcia pomiędzy zaciskami U–V, posługując się rysunkiem poniżej.



**Praca elementów półprzewodnikowych jako kluczy.**

Napięcia pomiędzy U-W oraz W-U będą wytwarzane w sposób analogiczny. Stan kluczy T1, T2, T3, T4 wpływa bezpośrednio na napięcie między zaciskami U-V. Dla ułatwienia przyjęto, że elementy półprzewodnikowe funkcjonują jak klucze włączające i wyłączające napięcie  $U_m$ . Jak zaznaczono na rysunku,

klucze T2 i T3 są włączone , co oznacza , że pomiędzy zaciskami U-V pojawia się napięcie  $U_m$ . Klucze T1 i T4 są otwarte (nie sąysterowane i są spolaryzowane ). Sytuacja jest następująca:

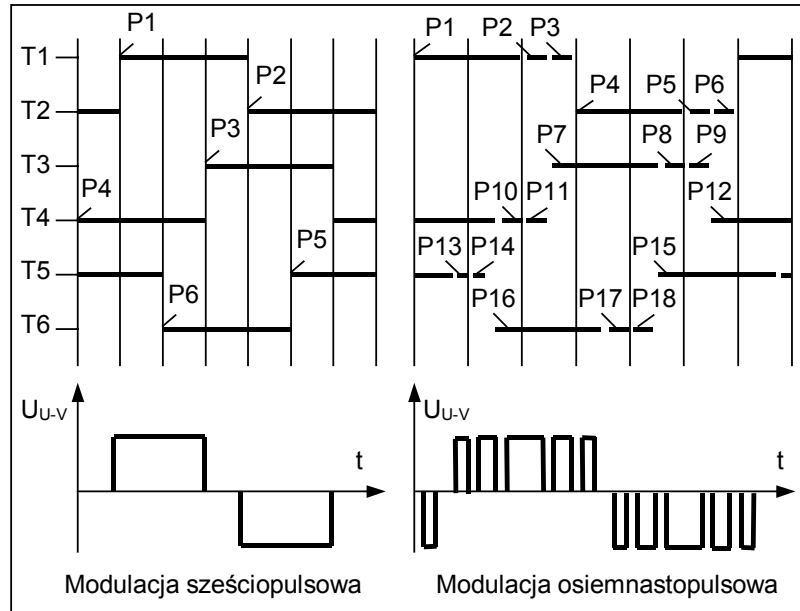
- napięcie pomiędzy „U” a „-” jest równe zero,
- napięcie pomiędzy „V” a „-” jest równe  $-U_m$ ,
- napięcie pomiędzy „U” a „V” jest równe  $U-V = -V = U_m$ .

Jeśli w następnym kroku klucze T1 i T4 będą zamknięte a T2 i T3ysterowane , to sytuacja się odwróci i napięcie pomiędzy zaciskami U-V będzie równe  $-U_m$ . Można więc – przy odpowiednim algorytmie – uzyskać napięcie przemiennie pomiędzy tymi zaciskami. Jeśli tę sytuację przeniesiemy do układu z sześcioma kluczami, to uzyskamy napięcie o kształcie jak na rysunku poniżej – dla modulacji sześciopulsowej lub osiemnastopulsowej. Z pokazanych przebiegów widać, że napięcie wyjściowe jest ciągiem impulsów o amplitudzie  $U_m$ . Czas trwania impulsów można określić jako  $t = t_2 + t_1$ , przy czym :  $t_2 = 2t_1$ . Wartość skuteczna napięcia wyjściowego wyniesie więc :

$$U_{wy} = \sqrt{U_m^2 \frac{2t_1}{3t_1}} = 0,816U_m \text{ – dla układu sześciopulsowego,}$$

$$U_{wy} = \sqrt{U_m^2 \frac{24t_1}{36t_1}} = 0,816U_m \text{ – dla układu osiemnastopulsowego.}$$

Tak więc, w przypadku modulacji amplitudy impulsu, maksymalna wartość skuteczna napięcia wyjściowego falownika wynosi 81,6% napięcia pośredniego. To oznacza z kolei, że maksymalna wartość napięcia wyjściowego zależy od maksymalnego napięcia stopnia pośredniego.



**Modulacja PAM sześć- i osiemnastopulsowa**

**Synteza napięcia wyjściowego metodą PWM** polega na zmianie szerokości impulsów napięcia stopnia pośredniego według algorytmu porównywania dwóch napięć pomocniczych: referencyjnego napięcia sinusoidalnego oraz napięcia piłokształtnego. Częstotliwość napięcia sinusoidalnego odpowiada częstotliwości wyjściowej falownika, natomiast częstotliwość napięcia piłokształtnego odpowiada maksymalnej częstotliwości kluczowania falownika. W układzie sterowania falownikiem następuje porównanie punktów przecięcia się dwóch napięć pomocniczych (sinusoidalnego i piłokształtnego). Napięcia pomocnicze sinusoidalne są generowane niezależnie dla sterowania każdej z faz wyjściowych. Impulsy wyjściowe w danej fazie są dodatnie, jeśli napięcie piłokształtne ma wartość mniejszą od sinusoidalnego; natomiast ujemne, gdy napięcie piłokształtne ma wartość większą od sinusoidalnego. Maksymalne napięcie wyjściowe zależy wprost proporcjonalnie od wartości napięcia stopnia pośredniego oraz czasu otwarcia kluczy półprzewodnikowych, czyli od częstotliwości kluczowania. Ponieważ impulsy wyjściowe podczas jednej półfali napięcia odniesienia są dodatnie, a podczas następnej są ujemne,

stąd amplituda napięcia fazowego na wyjściu falownika będzie równa połowie napięcia stopnia pośredniego  $U_m$ . Napięcie stopnia pośredniego (na kondensatorze) ma natomiast wartość  $\sqrt{2}U_{we}$ , gdzie  $U_{we}$  to wartość skuteczna napięcia wejściowego. Natomiast napięcie wyjściowe międzyfazowe ma wartość  $\sqrt{3}$  × wartość skuteczna napięcia fazowego, czyli:

$$U_{we} = \sqrt{3} \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{\sqrt{2}U_{we}}{2} \right) = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{we} = 0,866U_{we}$$

Wartość maksymalna napięcia wyjściowego równa  $0,866U_{we}$  wynika z niedoskonałości metody PWM i powoduje tzw. efekt obniżania wartości znamionowych silnika (w jęz. ang.: derating). Oznacza to w praktyce, że przy częstotliwości wyjściowej równej 50Hz napięcie wyjściowe przetwornicy osiąga wartość  $0,866U_n$ , a tym samym moc silnika jest mniejsza od znamionowej. Stąd też biorą się opinie, że aby uzyskać znamionową moc silnika, przetwornice należy dobierać o rząd mocy wyżej niż moc silnika. W przypadku metody PWM – bez dodatkowych kompensacji powyżej częstotliwości 40Hz – opinie te są słuszne. Dodatkowy wzrost napięcia wyjściowego można uzyskać, np. zmniejszając liczbę impulsów przy częstotliwościach powyżej 40Hz (tzw. przemodulowanie). wiąże się jednak ze skokowymi przyrostami napięcia, co powoduje niestabilną pracę silnika oraz wzrost emisji harmonicznnych. Inną metodą podwyższania napięcia wyjściowego jest stosowanie trapezoidalnego napięcia referencyjnego. Najczęściej stosowaną metodą podwyższania napięcia wyjściowego w metodzie PWM jest wykorzystanie trzeciej harmonicznej w sinusoidalnym napięciu referencyjnym. Zwiększając amplitudę napięcia referencyjnego o 15,5% i dodając trzecią harmoniczną, można uzyskać korzystny kształt napięcia odniesienia, pozwalający zwiększyć napięcie wyjściowe do wartości znamionowej.

### 3.4. KOMPENSACJA ORAZ SAMODOSTROJENIE PRZETWORNICY DO SILNIKA

Praca przetwornic starszego typu z tradycyjną modulacją PWM z silnikami asynchronicznymi w zakresie niskich częstotliwości stwarzała zwykle wiele problemów technicznych, a w specyficznych zastosowaniach była nawet niemożliwa. W nowoczesnej, mikroprocesorowej przetwornicy takie problemy praktycznie nie występują, gdyż zaadaptowanie jej do warunków, jakie występują podczas rozruchu i pracy silnika z małą prędkością obrotową odbywa się przez wprowadzenie korekt podstawowych parametrów wyjściowych. Korekty te, zwane również kompensacjami, pozwalają na pracę silnika ze stałym momentem przy niskich prędkościach obrotowych (nawet poniżej 5 Hz) i zmieniającym się obciążeniu.

Są to kompensacje:

- rozruch i napięcia rozruchu,
- częstotliwości początkowej,
- poślizgu,
- napięcia wyjściowego w funkcji obciążenia.

Te kompensacje można wprowadzić do programu przetwornicy na drodze doświadczalnej bądź zastosować nastawy fabryczne. Istnienie kompensacji w przetwornicy decyduje niejednokrotnie o możliwości uruchomienia danego układu napędowego i jego w krytycznych warunkach obciążenia.

**Kompensacje rozruchu i napięcia rozruchu** zapewniają optymalny strumień magnesujący i maksymalny moment początkowy przy pracy z niskimi prędkościami. Uzyskuje się to przez zwiększenie wartości napięcia wyjściowego przy niskich częstotliwościach. W ten sposób kompensacja rozruchu przeciwdziała zwiększonemu udziałowi rezystancji uzwojeń w całkowitej impedancji dla niskich częstotliwości wyjściowych.

Napięcie rozruchu nie jest zależne od obciążenia, podczas gdy w kompensacji rozruchu napięcie zależy od obciążenia. Obie tak zdefiniowane funkcje są realizowane w przetwornicy programowo, tzn. dla konkretnego silnika są one automatycznie wprowadzane do programu z możliwością dokonywania zmian przez użytkownika, o ile wymaga tego konkretny układ napędowy. Przykładowo w przetwornicach do zastosowań pompowych nie przewidziano możliwości zmiany kompensacji ze względu na stosunkowo prosty



rozruch układów pompowych o kwadratowej charakterystyce momentu. W przypadkach, gdy przetwornica współpracuje z silnikiem mniejszym niż jej moc znamionowa, zastosowanie kompensacji rozruchu ułatwia uzyskanie właściwego strumienia magnesującego i może być ustawione ręcznie. W przypadku pracy równoległej kilku silników kompensacje rozruchu nie powinny być stosowane.

Należy zwrócić uwagę, że nie wszystkie przetwornice posiadają kompensację rozruchu i w takich przypadkach producenci podają zakres regulacji częstotliwości wyjściowych nie od zera, lecz od pewnej wartości początkowej, np. 5Hz.

#### **Kompensacja poślizgu**

Poślizg w silnikach asynchronicznych zależy od obciążenia i jego wartość wynosi zwykle od 4 do 8% prędkości znamionowej. W silniku z jedną parą biegunów poślizg rzędu 5% da różnicę prędkości równą 150 obr/min. Gdy silnik taki będzie pracował z prędkością np. 300 obr/min (10% prędkości znamionowej), to poślizg będzie stanowił 50% tej wartości. Przy prędkości wynoszącej 150 obr/min silnik przestałby się obracać.

Kompensacja poślizgu jest funkcją umożliwiającą stabilną pracę układu napędowego w całym zakresie prędkości obrotowej. Dzięki ciągłemu pomiarowi prądu na wyjściu trzech faz przetwornicy możliwa jest kontrola poślizgu przez zwiększanie częstotliwości proporcjonalnie do składowej czynnej prądu.

#### **Kompensacja napięcia wyjściowego w funkcji obciążenia.**

Ten rodzaj kompensacji zapewnia dopasowanie napięcia wyjściowego przetwornicy do zmieniających się warunków obciążenia, a w związku z tym uzyskanie odpowiedniej dynamiki silnika. Kompensacja napięcia rozruchu powinna działać tylko dla niskich częstotliwości, czyli w czasie rozruchu silnika. Zaraz po rozruchu moment obciążenia zmienia się gwałtownie (maleje) i silnik jest chwilowo nadmiernie magnesowany. Do silnika płynie składowa bierna prądu o dużej wartości i silnik się przegrzewa. Zasada kontroli wektora napięcia (VVC) polega na dopasowaniu chwilowego napięcia wyjściowego do aktualnego obciążenia. Składowe schematu zastępczego silnika  $R1$ ,  $X1$  są imitowane w przetwornicy i w ten sposób mogą być dopasowane do różnego typu silników. Na podstawie tych wartości oraz dokładnego pomiaru napięcia wyjściowego przetwornicy program ciągle oblicza optymalną wartość

---

napięcia wyjściowego  $U_{wy} = U_1 + (R_1 + X_1)I_1$ . Taka kontrola napięcia w funkcji zmiennego obciążenia zwana jest również kontrolą strumienia magnetycznego i pozwala na maksymalne dynamiczne wykorzystanie silnika .

#### **Samodostrojenie przetwornicy do silnika**

Wszystkie opisane wyżej kompensacje wymagają przy ich stosowaniu dobrej znajomości teorii silnika i dla wielu użytkowników mogą być trudne do opanowania. Dlatego w firmie Danfoss opracowano po raz pierwszy dla silników prądu przemiennego, współpracujących z przetwornicą, funkcję *autotuning* (automatycznego dopasowania wartości parametrów rozruchu). Funkcję tę wykonuje się zwykle jednorazowo, po włączeniu nie obciążonego silnika. Przetwornica dokonuje pomiaru oporności uzwojeń stojana przez krótkotrwałe podanie na swoje wyjścia prądu stałego o wartości bliskiej znamionowej (pozwala to na eliminację nieliniowości pomiaru ). Następnie, przy braku obciążenia, przez podanie prądu zmiennego o częstotliwości 20Hz dokonuje sześciokrotnie pomiary impedancji uzwojeń silnika. W ostatnim etapie następuje obliczenie przez program wartości  $R_1$ ,  $X_1$ , wszystkich kompensacji oraz prądu magnesującego. Funkcja ta wykonywana jest w ciągu kilku sekund.

Szczególnie przydatna jest w przypadku nietypowych silników o trudnym rozruchu. Funkcje tę posiadają tylko przetwornice przeznaczone do pracy za stałym momentem.

### **3.5. WŁAŚCIWOŚCI PRZEMIENNIKA CZĘSTOTLIWOŚCI**

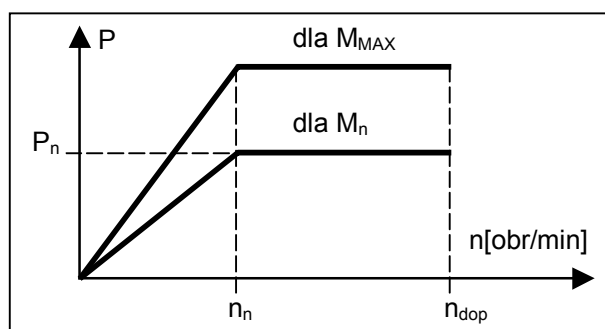
Schemat zastępczy silnika pozwala na łatwiejszą analizę współpracy przetwornicy z silnikiem. Jeśli w schemacie napięcie wejściowe  $U_1$  – pochodzące zwykle z sieci zasilającej – zostanie zastąpione napięciem pochodzącym z przetwornicy, to będzie możliwa analiza współpracy przetwornicy z silnikiem. Można powiedzieć, że przetwornica widzi silnik na podstawie danych znamionowych i programowo obliczonych elementów schematu zastępczego. Przetwornica pracująca w oparciu o metodę VVC dodatkowo optymalizuje swoje parametry wyjściowe. Aby była możliwa praca w całym zakresie prędkości obrotowych, przetwornica powinna posiadać dodatkowe funkcje adaptujące ją do

najtrudniejszych warunków, takich jak bardzo niskie częstotliwości wyjściowe lub zmienne obciążenie silnika. Te dodatkowe, specjalne funkcje realizowane przez przetwornicę nazywają się kompensacjami.

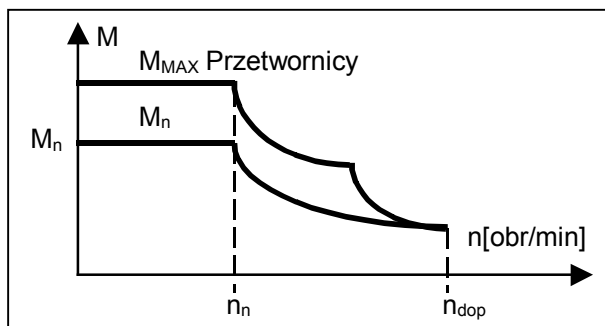
### 3.5.1. CHARAKTERYSTYKI MOMENTU I MOCY PRZETWORNICY CZĘSTOTLIWOŚCI

Przetwornica częstotliwości jest urządzeniem potrafiącym utrzymywać zadaną charakterystykę momentu obciążenia. Jest to możliwe, dzięki kontroli stosunku  $U/f$  na jej wyjściu oraz kontroli prądu obciążenia. Jak wiemy z dotychczasowych rozważań, utrzymanie stałego stosunku  $U/f$  zapewnia utrzymanie stałego strumienia magnetycznego silnika, a w konsekwencji, przy ciągłej kontroli prądu obciążenia – utrzymanie stałego momentu silnika. Jeśli przetwornica została poprawnie dobrana do mocy i prądu silnika, nie ma potrzeby, by dla różnych prędkości obrotowych prąd wyjściowy przetwornicy był większy od prądu znamionowego. Dlatego ograniczenie prądowe w przetwornicach pozwala zwykle na nastawę wartości maksymalnej do 160% prądu znamionowego. Taka wartość prądu obciążenia może być utrzymana na wyjściu jedynie przez krótki czas – rzędu kilku sekund. Pozwala to na forsowanie chwilowego obciążenia, większego od momentu znamionowego.

Zależność napięcia wyjściowego od częstotliwości pokazują wykresy przedstawiające moc i moment wyjściowy, uzyskane z przetwornicy przy częstotliwościach poniżej i powyżej znamionowej.



Zależność mocy od częstotliwości wyjściowej przetwornicy.



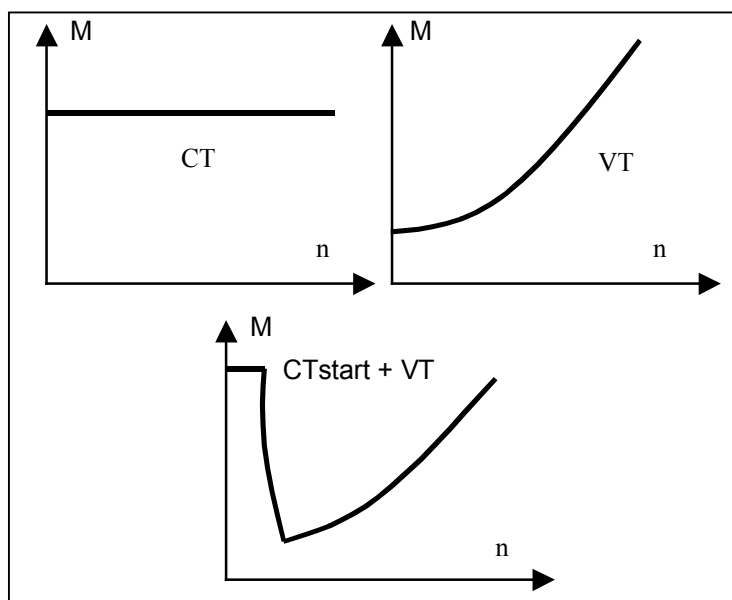
Zależność momentu od częstotliwości wyjściowej przetwornicy.

Wykresy te są odzwierciedleniem zależności na wyjściu przetwornicy na moc  $P = f(U)$  – przy założeniu stałego prądu silnika – oraz na moment  $M = kxU/f$  – przy założeniu stałej wartości stosunku  $U/f$ .

### 3.5.2. PROGRAMOWALNE CHARAKTERYSTYKI MOMENTU

Oprócz charakterystyk stałego momentu bardzo często spotykane są układy napędowe o charakterystyce kwadratowej momentu  $M = f(n)^2$ . Przykładem są tutaj pompy odśrodkowe i wentylatory. Urządzenia te mają zwykle charakterystykę, którą można określić funkcją  $y = ax^2 + b$ . Składnik  $b$  reprezentuje tutaj początkowy moment rozruchowy. Współczesne przetwornice oferują zwykle do wyboru kilka charakterystyk kwadratowych dla różnych momentów rozruchowych. Niektórzy producenci wyposażają przetwornice w charakterystyki kwadratowe ze stałym momentem początkowym. Określa się je jako: CT start + VT (skrót z jęz. ang. :Constant Torque start + Variable Torque ).

Przetwornice częstotliwości produkowane są zwykle jako stałomomentowe CT (z możliwością uzyskania momentu kwadratowego VT) oraz jako wersje dla pomp i wentylatorów (tylko z momentem VT). Przetwornice dla pomp i wentylatorów określane są często za pomocą symbolu HV-AC (skrót z jęz. ang. Heating, Ventilation – Air Conditioning), wskazującego na obszar ich zastosowań.



**Podstawowe charakterystyki momentu programowane w przetwornicy.**

Dobór właściwej charakterystyki momentu w przetwornicy jest bardzo istotny dla sprawnej pracy układu regulacji ( np. dla pomp i wentylatorów ) i wpływa bezpośrednio na uzyskiwane oszczędności w zużyciu energii elektrycznej. Praca z właściwą charakterystyką momentu pozwala użytkownikowi zużyć minimalną ilość energii, potrzebną do pracy pompy bądź wentylatora. Zgodnie ze wzorem na moc:  $(P = \sqrt{3}UI\cos\phi) \cdot \Phi$  , pobrana moc będzie wynikiem optymalnych wartości prądu i napięcia wtedy, gdy charakterystyka momentu obciążenia pokrywa się z zaprogramowaną w przetwornicy charakterystyką.

Reasumując można stwierdzić , że warunkiem poprawnej współpracy przetwornicy z układem napędowym jest przeprowadzenie dokładnej analizy rodzaju momentu obciążenia danego układu i możliwości adaptacji przetwornicy do danego zastosowania. Producenci przetwornic w swoich kartach katalogowych eksponują zwykle możliwości programowania momentu, dlatego dokonanie takiej analizy nie powinno stwarzać problemów w praktyce.

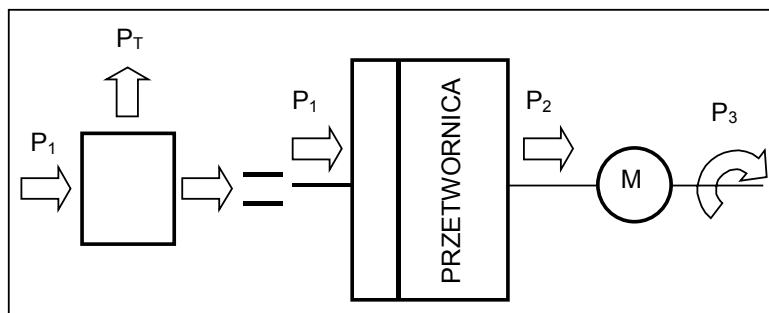
### 3.6. SPRAWNOŚĆ PRZEMIENNIKA CZĘSTOTLIWOŚCI

Zgodnie z niemiecką normą VDE 0160, sprawność urządzenia definiowana jest jako stosunek mocy wyjściowej  $P_2$  urządzenia do zużycia mocy  $P_1$  i określana jako współczynnik sprawności  $\eta$ . Sprawność można więc obliczyć dla samej przetwornicy, dla samego silnika lub całego układu: przetwornica – silnik. Różnica między mocą wyjściową  $P_2$  a mocą dostarczoną  $P_1$  określona jest jako moc strat  $P_T$ . Zależności te można przedstawić jako:

$P_2/P_1$  – sprawność przetwornicy  $\eta_P$ ,

$P_3/P_2$  – sprawność silnika  $\eta_S$ ,

$P_3/P_1$  – sprawność układu napędowego  $\eta$ .



**Sprawność w układzie przetwornica – silnik – obciążenie.**

Duży wpływ na całkowitą sprawność ma sprawność silnika. Sprawność przetwornicy jest prawie w całym zakresie stała i bardzo wysoka. Sprawności te są najmniejsze przy małych prędkościach obrotowych. Nie oznacza to jednak, że całkowite straty mocy są wówczas większe. Tak więc – mimo malejących sprawności – przy niższych prędkościach straty mocy są również mniejsze. Wysoka sprawność przetwornicy daje nam następujące korzyści:

- Im wyższa jest sprawność przetwornicy, tym mniejsza ilość ciepła musi zostać doprowadzona z układu (wielkość układu chłodzenia może być ograniczona);
- Im mniejsze są straty mocy w elementach końcowych mocy, tym dłuższa jest żywotność całego urządzenia.

---

### 3.7. ZAKŁÓCENIA

Zakłócenia elektryczne, z którymi mamy do czynienia w praktyce, można podzielić na trzy grupy :

- zakłócenia wynikające z interferencji termicznej,
- zakłócenia pochodzenia atmosferycznego,
- zakłócenia wytwarzane przez użytkowników instalacji elektrycznych.

Międzynarodowym skrótem całego obszaru zjawiska zakłóceń jest EMC (skrót z jęz. ang.: Electro-Magnetic Compability ) – kompatybilność elektromagnetyczna. Pod tym pojęciem kryją się: odporność na zakłócenia elektryczne oraz poziom emisji zakłóceń przez dane urządzenie. Przetwornice częstotliwości spełniające normy kompatybilności EMC są odporne na zakłócenia zewnętrzne oraz same nie emitują zakłóceń powyżej ustalonych poziomów.

Przetwornica może być źródłem zakłóceń dla sieci zasilającej, jak również źródłem emitowanych w przestrzeń zakłóceń o częstotliwościach radiowych. Emisja zakłóceń do sieci zasilającej może powstać w wyniku sprzężenia obwodów, transmisji, interferencji oraz przepięć. Sprzężenie obwodów może powstać na drodze galwanicznej, pojemnościowej lub indukcyjnej. Sprzężenie galwaniczne nastąpi wtedy, gdy dwa obwody elektryczne mają wspólną impedancję. W zależności od wielkości impedancji, zakłócenia mogą być przenoszone do odbiornika przez dwie impedancje  $Z_{L1}$  i  $Z_{UZIEM}$ .

Sprzężenie pojemnościowe powstanie, jeśli dwa obwody elektryczne mają ziemię jako wspólny przewód powrotny. Przykładem może być sytuacja, gdy kabel silnika jest umieszczony w sąsiedztwie innych przewodów, podłączonych do układów wrażliwych na zakłócenia. Prąd płynący w pętli zakłóceń zależy od częstotliwości pracy inwertera mocy oraz odległości kabla silnikowego od innych przewodów. Wysoka częstotliwość pracy inwertera powoduje małą wartość reaktancji pojemnościowej kabla silnikowego i w efekcie wzrost prądu w pętli zakłóceń. Sprzężenie indukcyjne występuje wówczas, gdy pole magnetyczne przewodu, w którym płynie prąd oddziałuje na inne urządzenia. Wartość indukowanego napięcia zakłóceń zależy od wartości prądu i odległości wytwarzającego pole urządzenia. Szczególnie w przypadku prądu przemiennego występuje sytuacja, że napięcie w jednej pętli indukuje napięcie w innej pętli.

Kolejny rodzaj przenoszenia się zakłóceń to transmisja przez sieć zasilającą. Sytuacja taka ma miejsce, gdy napięcie sieciowe jest odkształcone lub zakłócone przez zasilane urządzenie. Transmisja zakłóceń jest często wynikiem interferencji zakłóceń pochodzących od przetwornicy z sinusoidą sieci zasilającej. Te zakłócenia nakładają się na sinusoidę sieci, powodując zakłócenie pracy innych odbiorników.

Kolejnym zakłóceniem są przepięcia w sieci zasilającej, które są szkodliwe dla wszystkich współpracujących odbiorników. Są to krótkotrwałe szczyty o amplitudzie 1000 V, powstające podczas przełączania dużych obciążeń w sieciach wyposażonych w baterie kondensatorów. Przepięcia w sieci pojawiają się w odległości do 20 km od miejsca wyładowań i przenoszone są między sieciami przemysłowymi. Międzynarodowe normy określają, jak odporna powinna być sieć na występujące w sieci przepięcia. Niszczący efekt przepięć można ograniczyć, stosując warystory w obwodzie wejściowym i pośrednim przetwornicy.

Ostatnim rodzajem zakłóceń powstających w przetwornicy są zakłócenia radioelektryczne. Efektem ubocznym pracy elementów półprzewodnikowych (jak diody i tyrystory), w mostku prostowniczym oraz tranzystorów w inwerterze mocy są tzw. zakłócenia przełączania. Zakłócenia o częstotliwościach między 150 kHz a 30 MHz nazywane są zakłóceniami radioelektrycznymi (RFI).

Poziom tych zakłóceń zależy od takich czynników, jak :

- wartość impedancji sieci zasilającej,
- częstotliwość pracy inwertera mocy,
- sposób ekranowania przetwornicy,
- moc danej przetwornicy.

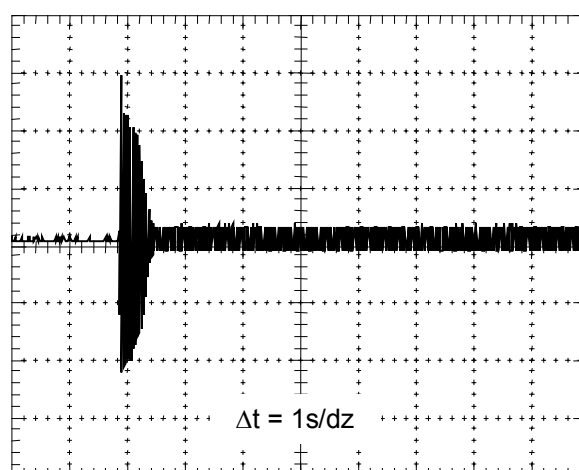
Zakłócenia radioelektryczne mogą być wprowadzone przez sieć lub przez sprzężenie. Istnieje wiele norm i standardów mówiących o dopuszczalnym poziomie emisji zakłóceń radioelektrycznych.

Skuteczne ograniczenie emisji zakłóceń RFI można uzyskać przez stosowanie odpowiedniego filtra oraz stosowanie ekranowanego kabla silnikowego. Filtr RFI powinien być zabudowany na wejściu na przetwornicy, natomiast jeśli ekranowanie kabla silnikowego nie ogranicza emisji zakłóceń dożądanego poziomu, należy na wyjściu zastosować dodatkowy filtr typu LC. Stosowanie filtra LC jest wymagane w poszczególnych przypadkach, takich jak duża odległość silnika od przetwornicy lub równoległa praca wielu silników małej mocy.



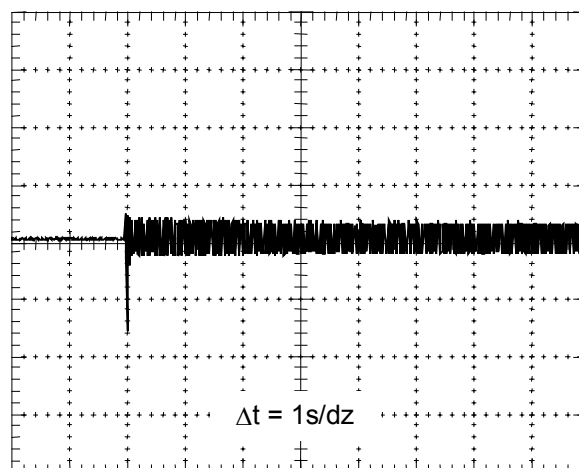
## 4. OSCYLOGRAMY

### 4.1. SIEĆ SZTYWNA



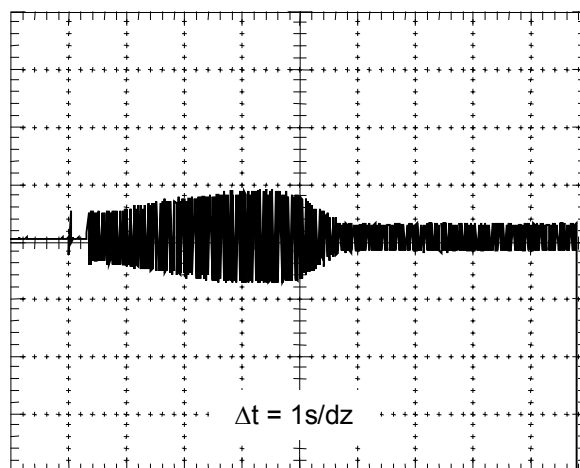
**BIEG JAŁOWY.** Bezpośrednie załączenie silnika do sieci zasilającej.

### 4.2. ROZRUCH REZYSTOROWY

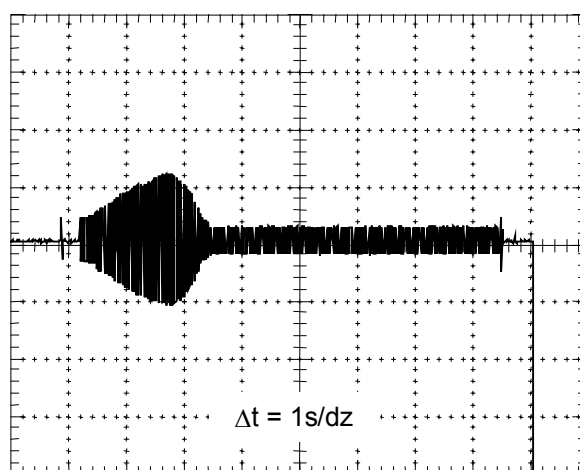


**BIEG JAŁOWY.** Rozruch silnika za pomocą rozrusznika rezystorowego.

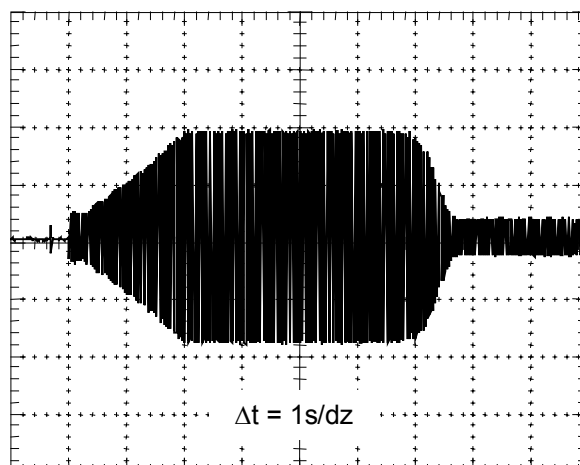
### 4.3. SOFTSTART



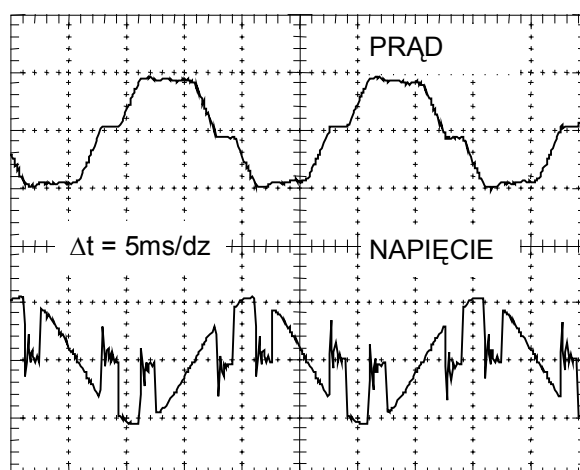
**BIEG JAŁOWY. Rozruch za pomocą softstartu z czasem rozruchu 20s.**



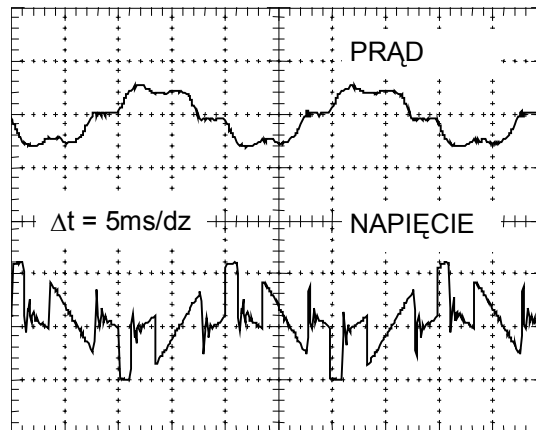
**BIEG JAŁOWY. Rozruch za pomocą softstartu z czasem rozruchu 5s.**



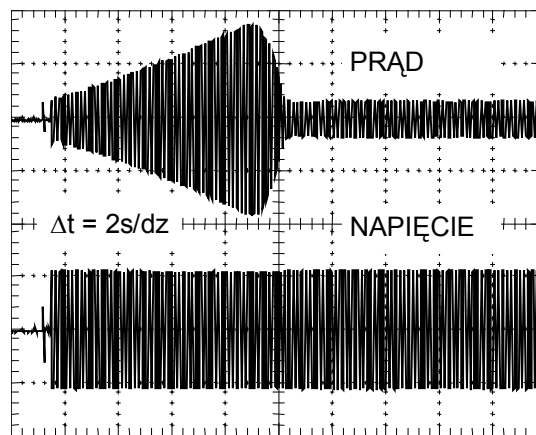
**OBCIĄŻENIE. Rozruch za pomocą softstartu z czasem rozruchu 5s.**



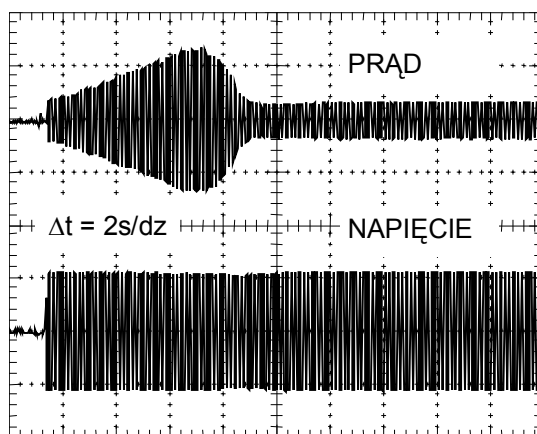
**OBCIĄŻENIE. Podczas rozruchu za pomocą softstartu z czasem rozruchu 5s.**



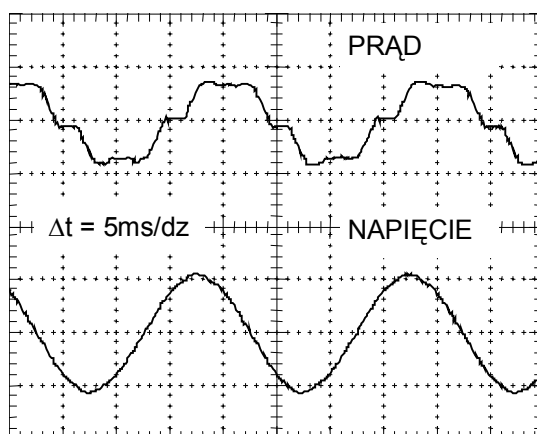
**OBCIĄŻENIE.** Podczas rozruchu za pomocą softstartu z czasem rozruchu 20s.



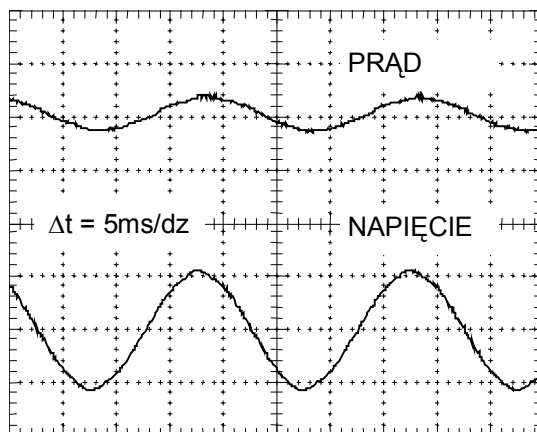
**OBCIĄŻENIE.** Rozruch za pomocą softstartu z czasem rozruchu 20s.



**OBCIĄŻENIE. Rozruch za pomocą softstartu z czasem rozruchu 20s.**



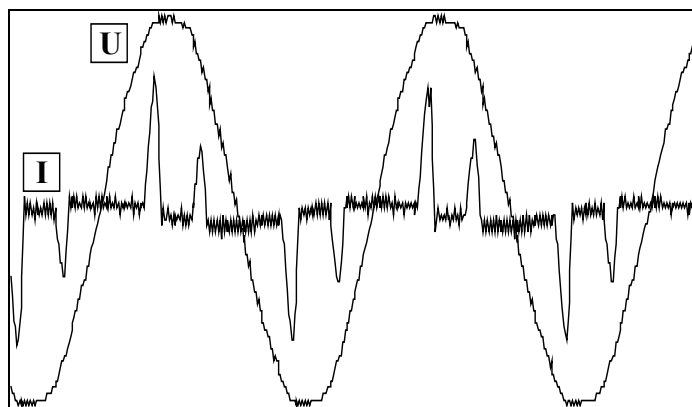
**OBCIĄŻENIE. Sieć. Podczas rozruchu za pomocą softstartu z czasem rozruchu 20s.**



**OBCIĄŻENIE** Sieć i silnik. Po rozruchu za pomocą softstartu z czasem rozruchu 20s.

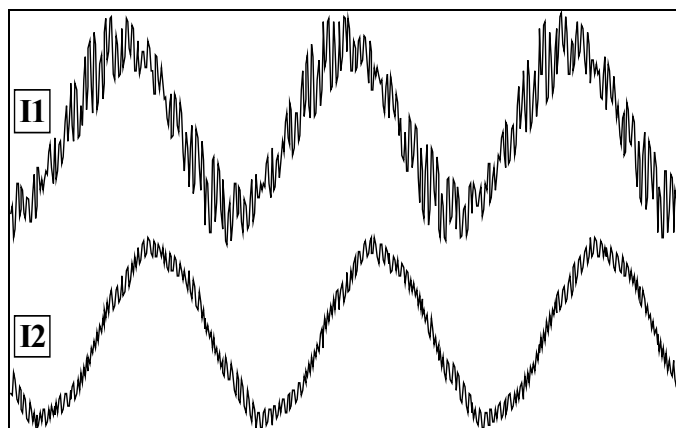
#### 4.4. PRZEMIENNIK CZĘSTOTLIWOŚCI

##### 4.4.1. PRZEBIEGI WEJŚCIOWE

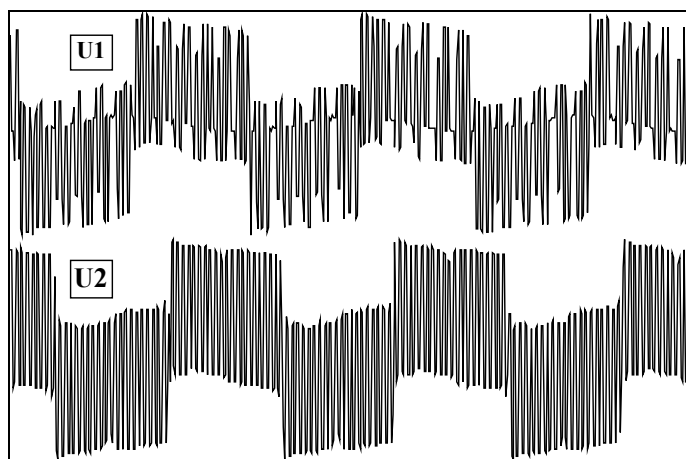


**Prąd fazowy i napięcie fazowe na wejściu przemiennika częstotliwości**

#### 4.4.2. PORÓWNAWCZE PRZEBIEGI WYJŚCIOWE DLA RÓŻNYCH CZĘSTOTLIWOŚCI NOŚNYCH

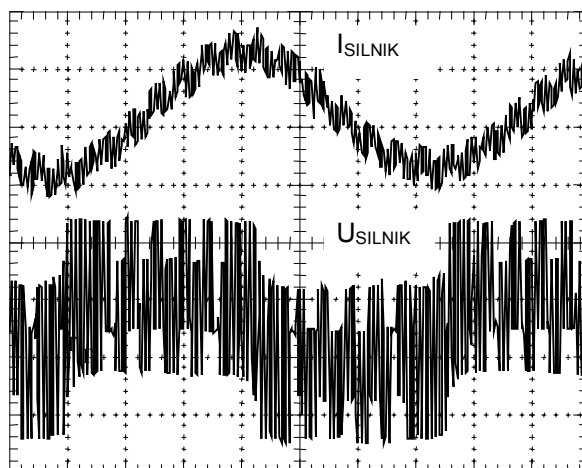


Prądy fazowe wyjściowe przemiennika częstotliwości dla różnych częstotliwości nośnych (kluczowania tyrystorów): 2 kHz (I1) i 14 kHz (I2);  $f_{\text{WYJŚCIOWA}} = 30 \text{ Hz}$ .

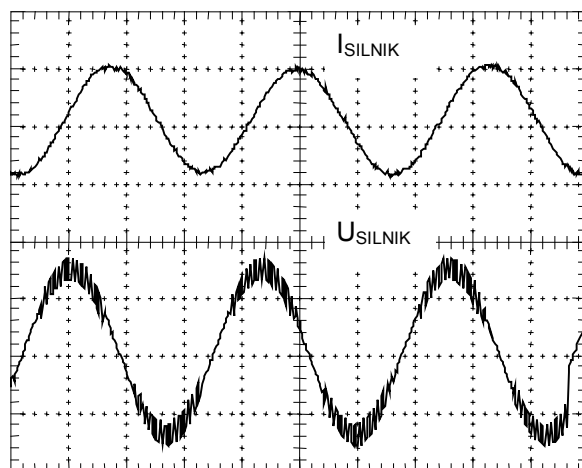


Napięcia międzyfazowe przemiennika częstotliwości dla różnych częstotliwości nośnych (kluczowania tyrystorów): 2 kHz (U1) i 14 kHz (U2);  $f_{\text{WYJŚCIOWA}} = 30 \text{ Hz}$ .

#### 4.4.3. PORÓWNAWCZE PRZEBIEGI SILNIKA Z FILTREM LC I BEZ FILTRA NA WYJŚCIU PRZEMIENNIKA

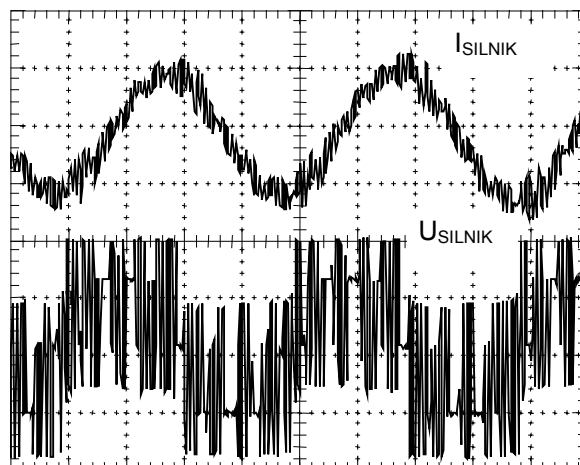


Prąd i napięcie silnika dla 30Hz bez filtra LC.

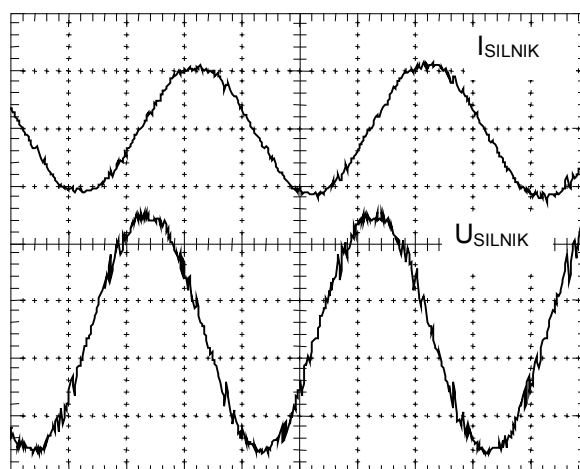


FILTR LC. Prąd i napięcie silnika dla 30Hz





**Prąd i napięcie silnika dla 50Hz bez filtra LC.**



**FILTR LC. Prąd i napięcie silnika dla 50Hz.**

## 5. LITERATURA

1. Antoni M. Plamitzer „Maszyny elektryczne”. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, wydanie VII poprawione, Warszawa 1982.
2. Lech Ptaszyński „Przetwornice częstotliwości”. ENVIROTECH, Poznań 1996.
3. Dokumentacje Techniczno – Ruchowe softstartów.
4. Dokumentacje Techniczno – Ruchowe przemienników częstotliwości.