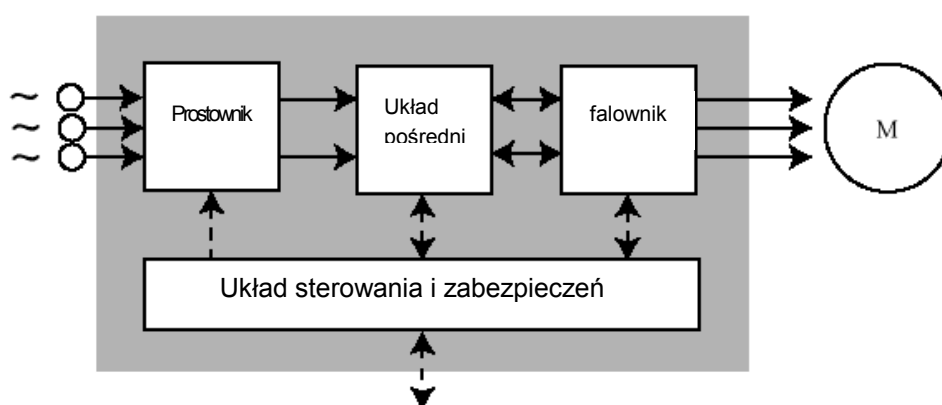


3 Przeмиenniki częstotliwości

Od późnych lat sześćdziesiątych naszego stulecia, przeмиenniki częstotliwości przechodziły nadzwyczaj szybkie zmiany. W wielkiej mierze było to zasługą burzliwego rozwoju technologii półprzewodnikowej i mikroprocesorowej oraz związanych z tym redukcji cen elementów półprzewodnikowych. Pomimo to, podstawowe zasady pracy i schemat blokowy w ogólnym zarysie pozostały bez zmian.

Przeмиennik częstotliwości możemy podzielić na cztery główne komponenty:



Rys. 3.01 Schemat blokowy przeмиennika częstotliwości

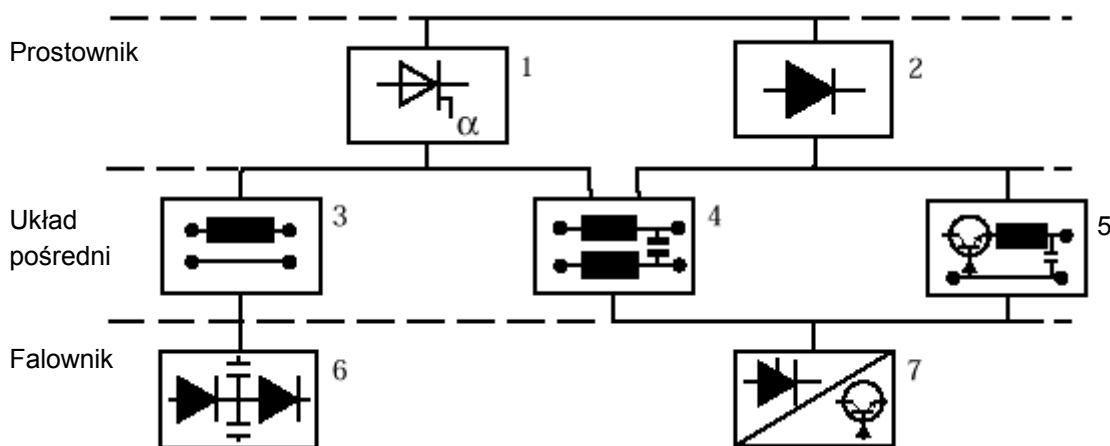
1. Prześciownik, jest podłączony do jednej lub trzech faz zasilających napięcia przemiennego (ang. AC voltage) i na jego wyjściu generowane jest pulsacyjne napięcie stałe (ang. DC voltage). Wyróżniamy dwa podstawowe rodzaje prześciowników:
 - a) niesterowane (diodowe np. 1f4D, 3f6D, 3f12D),
 - b) sterowane (tyrystorowe i tyrystorowo - diodowe).
2. Układ pośredni. Występują trzy rodzaje układów pośrednich:
 - a) zamieniający napięcie wyprostowane na prąd stały,
 - b) stabilizujący i wygładzający pulsujące napięcie stałe (odfiltrowuje składową przemienną z napięcia wyprostowanego),
 - c) zamieniający stałe napięcie na napięcie stałe o regulowanej wartości.
3. Falownik, który generuje częstotliwość napięcia zasilania silnika. Niektóre falowniki przekształcają napięcie stałe na napięcie przemiennie trójfazowe o regulowanej wartości i częstotliwości.
4. Układ elektroniczny sterowania i zabezpieczeń, który nadzoruje pracę przeмиennika, wysyłając i otrzymując sygnały sterujące do i od prześciownika, układu pośredniego i falownika. Budowa układów sterowania i zabezpieczeń przeмиenników zależy od indywidualnych cech przyjętego rozwiązania obwodu mocy przeмиennika częstotliwości, rys. 3.02.

Wspólną cechą wszystkich przemienników częstotliwości jest posiadanie układu sterowania, który wykorzystuje sygnały sterujące do załączania i wyłączania zaworów półprzewodnikowych falownika (praca dwustanowa). Przemienniki częstotliwości można podzielić ze względu na przyjętą metodę wzorca przełączania zaworów do kształtowania przemiennego napięcia wyjściowego.

Na rys. 3.02 przedstawiono klasyfikację przemienników częstotliwości w zależności od budowy i metody kształtowania napięcia wyjściowego.

Poszczególne podzespoły oznaczono odpowiednio:

1. Prostownik sterowany.
2. Prostownik niesterowany.
3. Układ pośredni przekształcający pulsujące napięcie stałe na stały prąd.
4. Układ pośredni z nieregulowanym wyprostowanym napięciem stałym.
5. Układ pośredni z regulowaną wartością napięcia stałego (ang. chopper).
6. Falownik prądowy.
7. Falownik napięciowy.



Przemienniki częstotliwości z falownikami prądowymi - **CSI** (Current Source Inverter): (1+3+6)

Przemienniki częstotliwości z falownikami napięciowymi i modulacją amplitudy - **PAM** (Pulse Amplitude Modulation): (1+4+7),(2+5+7)

Przemienniki częstotliwości z falownikami napięciowymi i modulacjami szerokości impulsu - **PWM** i jej odmianami: **VVC** / **VVC^{plus}** (Pulse Width Modulation / Vector Voltage Control) oraz bezpośredniego sterowania momentem - **DTC** (Direct Torque Control) (2+4+7)

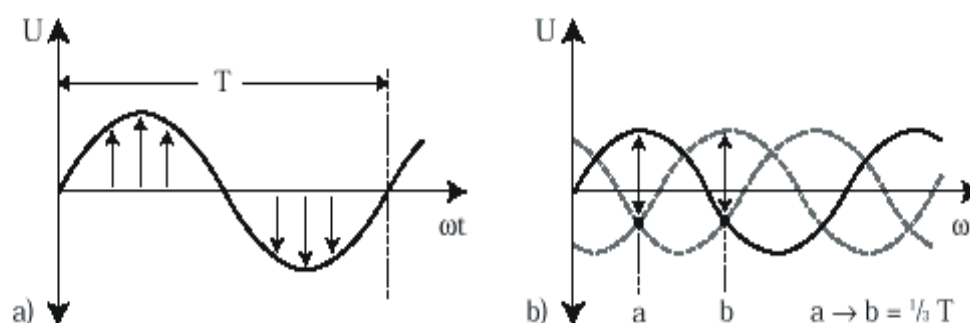
Rys. 3.02 Klasyfikacja przemienników częstotliwości w zależności od budowy i metody kształtowania napięcia wyjściowego

Na świecie występują także przemienniki częstotliwości, które nie posiadają układu (- stopnia) pośredniego. Są to przemienniki, które bezpośrednio przetwarzają napięcie z sieci przemysłowej 50-60Hz i wykorzystywane są do napędów o bardzo

dużych mocach (rzędu megawatów), ale o małych częstotliwościach wyjściowych. Ich maksymalne częstotliwości są rzędu 30 Hz.

3.1 Prostowniki

Napięcie do prostownika dostarczane jest z trzech faz lub z jednej fazy źródła napięcia przemiennego o stałej amplitudzie i częstotliwości (np. 3 x 400 V/50 Hz lub 1 x 240 V/50 Hz), a ich charakterystyczne własności można zilustrować jak niżej:

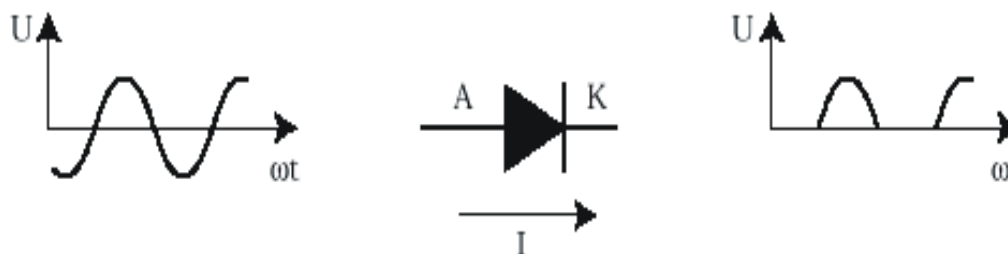


Rys. 3.03 Jednofazowe i trójfazowe napięcie prądu przemiennego.

Jak pokazuje powyższy rysunek trzy fazy napięcia przemieszczają się stale w czasie zmieniając swój kierunek, zaś częstotliwość określana jest przez liczbę okresów na sekundę. Częstotliwość 50Hz oznacza, że występuje 50 okresów na sekundę tj. jeden okres trwa 20 milisekund.

Prostownik przemiennika składa się z diod, tyrystorów lub ich kombinacji. Prostownik składający się z diod jest niesterowalny, a prostownik tyrystorowy jest określany jako sterowany. Jeśli prostownik zbudowany jest z obydwu rodzajów tych elementów to wówczas jest on nie w pełni sterowany - półsterowany.

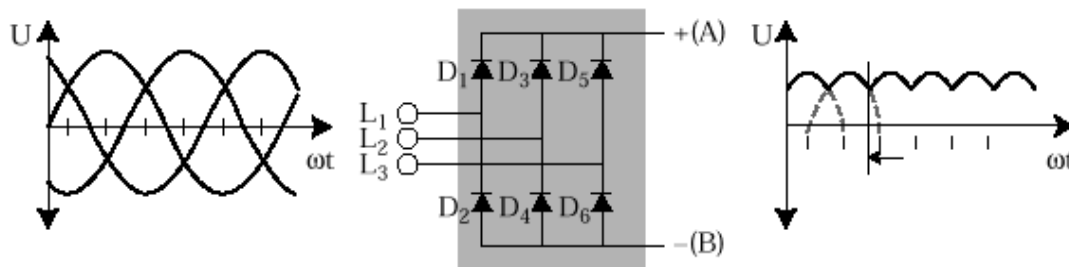
⇒ **Prostowniki niesterowalne**



Rys. 3.04 Zasada działania diody.

Diody umożliwiają przepływ prądu tylko w jednym kierunku od anody A do katody K przepływ w innym kierunku jest niemożliwy ze względu na budowę diody. Kontrolowanie przepływu mocy nie jest możliwe jak w przypadku innych

półprzewodników. Napięcie prądu przemiennego na wyjściu zasilania prostownika diodowego jest zamieniane na napięcie stałe pulsujące. Jeżeli trójfazowe napięcie prądu przemiennego jest dostarczane do niesterowalnego prostownika trójfazowego, to na jego wyjściu uzyskamy napięcie stałe o mniejszych pulsacjach.



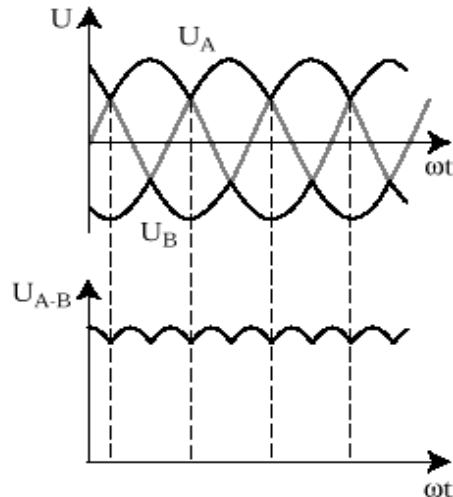
Rys. 3.05 Trójfazowy prostownik niesterowalny - 3f6D.

Rysunek 3.05 przedstawia niesterowalny prostownik trójfazowy składający się z dwóch grup diod. Jedna grupa składa się z: D_1 , D_3 i D_5 , a druga grupa z diod D_2 , D_4 , D_6 . Każda dioda z danej grupy przewodzi przez $1/3$ okresu (120°). Poszczególne diody obu grup przewodzą kolejno. Po rozpoczęciu przewodzenia przez diodę danej grupy w drugiej grupie nastąpi przełączenie komutacyjne między przewodzącymi diodami po czasie $1/6$ okresu (60°). Np.: gdy przewodzi D_1 przez $1/3T$, wtedy przewodzi D_4 przez $1/6T$ następnie D_6 przez $1/6T$ i odwrotnie: $D_4 - 1/3T$, to $D_5 - 1/6T$ i $D_1 - 1/6T$

Diody $D_{1,3,5}$ przewodzą, gdy amplituda napięcia jest dodatnia. Jeśli napięcie fazy L_1 osiąga dodatnią wartość maksymalną, wtedy napięcie na zacisku A osiąga także maksymalną wartość. Dwie pozostałe diody tej grupy mają wtedy wsteczne napięcie polaryzacji wynosi U_{L2-2} i U_{L3-3} .

Podobna sytuacja występuje przy przewodzeniu grupy diod $D_{2,4,6}$. Napięcie na zacisku B otrzymuje ujemną polaryzację fazową. Jeśli w danej chwili czasowej L_3 osiąga ujemną wartość szczytową napięcia, dioda D_6 przewodzi. Dwie pozostałe diody tej grupy mają wtedy wsteczną polaryzację o wartości U_{L1-2} i U_{L2-4} .

Napięcie wyjściowe prostownika niesterowanego ma inną wartość niż napięcie tych dwóch grup diod. Wartość średnia pulsującego napięcia wyprostowanego dla prostownika typu 3F6D wynosi 1,35 wartości skutecznej napięcia międzyfazowego sieci zasilającej.



Rys. 3.06 Przebiegi napięć wyjściowych niesterowalnego prostownika trójfazowego - 3f6D.

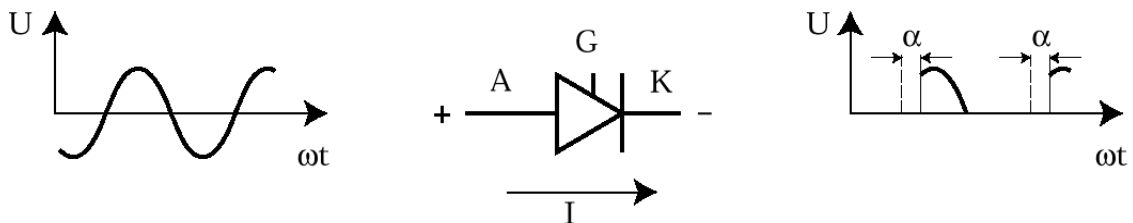
⇒ **Prostowniki sterowalne**

W prostownikach sterowalnych diody zastąpione są przez tyrystory. Tyrystor podobnie jak dioda pozwala przewodzić prąd od anody A do katody K z tą różnicą, że tyrystor ma dodatkową bramkę G, na którą podawany jest sygnał sterujący pracą tyrystora. Na bramkę trzeba podać sygnał sterujący, aby tyrystor przewodził prąd. Jeśli przez tyrystor płynie prąd to znaczy, że jest on w stanie przewodzenia i pozostanie w tym stanie do momentu, aż płynący przez niego prąd osiągnie wartość zerową.

Przewodzenie tyrystora nie może być przerwane tylko przez zanik sygnału sterującego podawanego na bramkę. Tyrystory są nie tylko używane w prostownikach, ale również w falownikach.

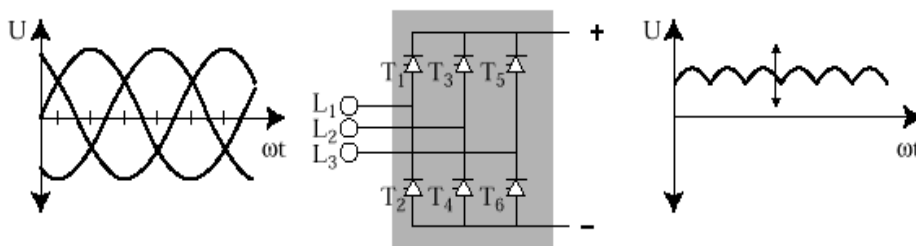
Układ sterujący bramką tyrystora opóźnia podanie impulsu sterującego przez określony czas w stosunku do fazy napięcia przemiennego dołączonego do obwodu głównego tyrystora.

Opóźnienie to opisane jest parametrem α określającym czas między przejściem przez zero napięcia przemiennego, a rozpoczęciem przewodzenia przez tyrystor. Czas ten wyrażany jest w stopniach kątowych wynikających z okresu napięcia przemiennego. Tyrystory są nie tylko wykorzystywane w prostownikach, ale również w falownikach.



Rys. 3.07 Zasada działania tyrystora.

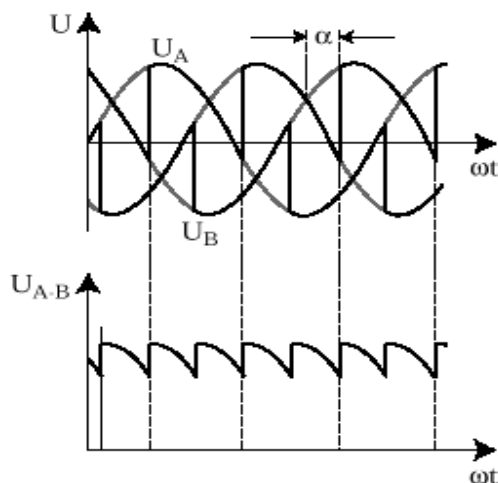
Jeżeli kąt przewodzenia α ma wartość pomiędzy 0° a 90° to układ z tyrystorami połączonymi jak na rys. 3.08, pracuje jako prostownik, natomiast gdy jest on między 90° i 300° jako falownik.



Rys. 3.08 Prostownik trójfazowy sterowalny.

Praca prostownika sterowanego jest zasadniczo taka sama jak prostownika niesterowalnego. Różnica polega na tym, że tyrystory sterowane są kątem wyzwolenia α . Początek przewodzenia tyrystora zaczyna się np. od kąta 30° , natomiast dioda rozpoczyna przewodzenie do punktu za przejściem napięcia przez wartość zero. Pozwala to na zmianę wartości przetworzonego napięcia. Prostowniki sterowalne uzyskują na wyjściu średnią wartość napięcia określoną wzorem:

$$U_{AB} = 1,35 U_{sk} \cdot \cos \alpha$$



Rys. 3.09 Przebieg napięć wyjściowego sterowalnego trójfazowego prostownika.

W porównaniu do prostowników niesterowalnych, prostownik sterowalny powoduje większe straty i poziom zakłóceń w sieci zasilania, ponieważ tyrystory wprowadzają do sieci większy prąd bienny wyższych harmonicznnych, szczególnie przy krótkotrwałym czasie przewodzenia.

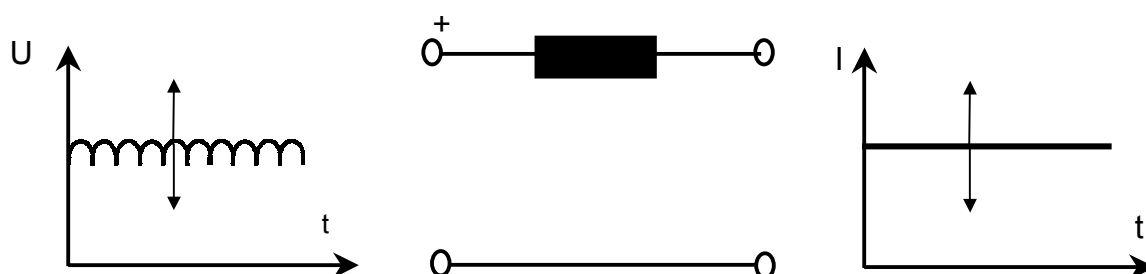
Jednakże zaletą tych układów prostownikowych jest to, że mogą pracować w obu kierunkach, tzn. w czasie pracy falownikowej zwracają energię do sieci zasilającej.

3.2 Obwód pośredni

Obwód pośredni w przetwornicy służy do pobierania energii z wyjść prostownika i przekazywania jej po przetworzeniu do falownika, z którego zasilany jest silnik. Obwody te mogą być budowane według trzech różnych zasad zależnie typów prostowników i falowników.

W obecnych przemiennikach z falownikiem prądowym obwód pośredni zawiera duży dławik który jest zasilany z prostownika sterowanego. Dławik transformuje napięcie wyjściowe prostownika o regulowanej wartości na prąd o wartości zależnej od tego napięcia.

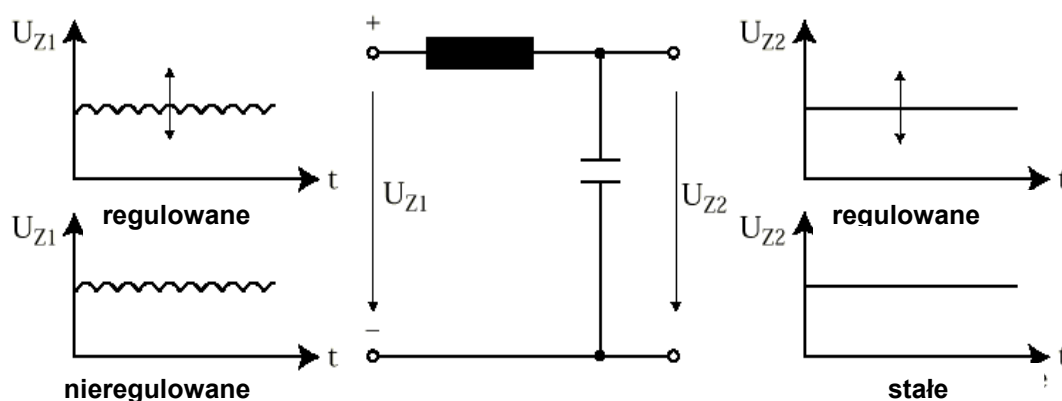
Dla falowników prądowych



Rys. 3.10 Obwód pośredni z regulowanym napięciem wejściowym i prądem wyjściowym.

W aktualnych przemiennikach obwód przejściowy składa się z: układu, który jest połączony ze sterowanym prostownikiem. Układ ten przekształca napięcie z prostownika na pulsujący prąd stały o określonym przebiegu. Obciążenie falownika prądowego tj. wartość prądu przepływającego przez obciążenie, określa w tym rozwiązaniu wartość napięcia na tym obciążeniu -silniku.

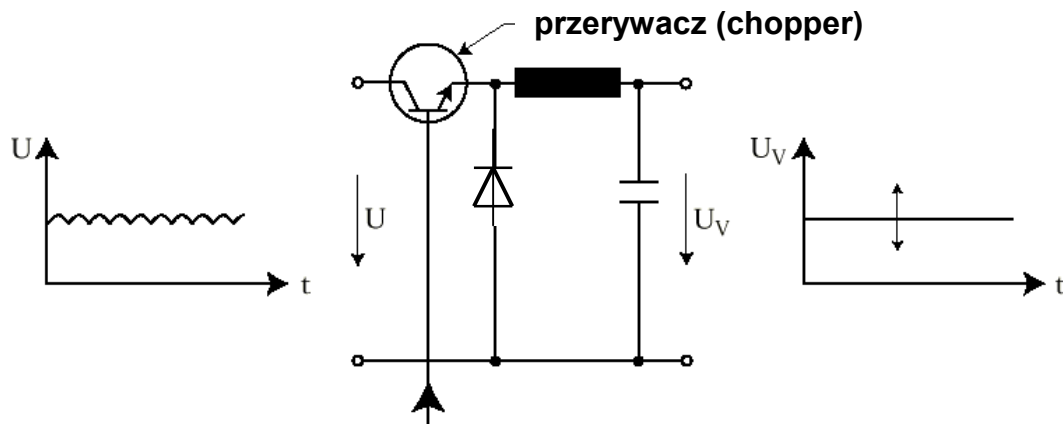
Dla falowników napięciowych



Rys. 3.11 Obwód pośredni z regulowanym lub stałym napięciem wejściowym i wyjściowym.

Układ obwodu przejściowego składa się z filtra zawierającego kondensator i może on być stosowany w obydwu typach prostowników. Filtr ten wygładza napięcie stałe pulsujące prostownika U_{Z1} .

W sterowalnym prostowniku napięcie na wyjściu ma stałą wartość przy danej częstotliwości wyjściowej falownika i podawane jest jako czyste (bez wyższych harmonicznych) na jego wejścia zasilania U_{Z2} .



Rys. 3.12 Obwód pośredni ze stałym napięciem wejściowym i regulowaną wartością wyjściową.

W prostownikach niesterowanych napięcie na wejściu falownika jest stałe (ze stałą amplitudą). Dla zapewnienia regulacji amplitudy napięcia stałego, na wejściu obwodu pośredniego może być wstawiony przerywacz prądu (ang. chopper), rys. 3.12. Przerywacz posiada tranzystor, który pracuje jak łącznik powodujący przerwy w przepływie prądu zgodnie z ustalonymi przez obwód sterowania zasadami. Obwód ten pracuje w oparciu o porównanie napięcia odniesienia (referencyjnego) U_{ref} z napięciem za filtrem U_V . Różnica między tymi napięciami jest regulowana czasem przez który tranzystor przewodzi i kiedy blokuje przepływ prądu zgodnie z zależnością:

$$U_V = \frac{t_{zal}}{t_{zal} + t_{wyl}} * U = \alpha * U \quad \alpha - \text{współczynnik wypełnienia impulsu}$$

gdzie:

U_V - napięcie stałe

U - napięcie na wejściu obwodu pośredniego

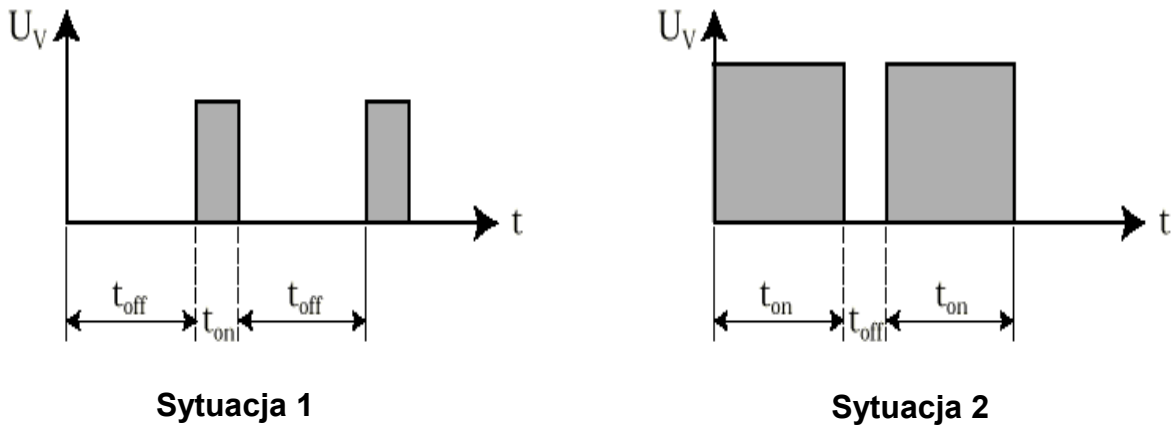
t_{zal} - czas załączenia tranzystora przerywacza

t_{wyl} - czas wyłączenia tranzystora przerywacza

Zmienia to efektywną wartość i kształt napięcia wyjściowego obwodu pośredniego.

Gdy tranzystor przerywacza będzie powodował odcięcie prądu przepływającego przez cewkę obwodu pośredniego, to odłoży się na nim niebezpieczne duże napięcie powstałe wskutek SEM samoindukcji cewki. Aby temu zapobiec i zabezpieczyć tranzystor przed uszkodzeniem, stosowana jest dioda zwrotna. Tranzystor bez diody zwrotnej narażony jest podczas prądu na przebiecia, przebiecia są tym większe im dłuższy jest czas przewodzenia prądu tj. im większa

jest wartość kąta przewodzenia α . W sytuacji 2, rys. 3.13 tranzystor jest bardziej narażony na uszkodzenie niż w sytuacji 1.



Rys. 3.13 Regulacja napięcia obwodu pośredniego za pomocą przerywacza prądu (chopper'a).

Filtr obwodu przejściowego wygładza przebieg prostokątny napięcia za przerywaczem. Pojemność filtru i dławik utrzymują stałą wartość napięcia na zasilaniu falownika przy danej częstotliwości jego napięcia wyjściowego.

Pośredni obwód może też zapewniać szereg dodatkowych funkcji takich jak:

- odseparowanie prostownika od bezpośredniego oddziaływania falownika,
- redukcja szkodliwych harmonicznych,
- magazynowanie energii podczas przejściowych uderów dynamicznych obciążenia.

3.3 Falownik

Falownik (ang. inverter) jest ostatnim członem przemiennika częstotliwości, do którego dołączony jest silnik i podzespołem w którym następuje ostateczna faza kształtowania napięcia na odpowiednie dla potrzeb silnika.

Przemiennik gwarantuje właściwe warunki pracy w całym zakresie regulacji poprzez odpowiednie adaptowanie napięcia do potrzeb obciążenia. Jest też możliwe zapewnienie właściwej magnetyzacji silnika.

Od obwodu przejściowego falownik może pobierać:

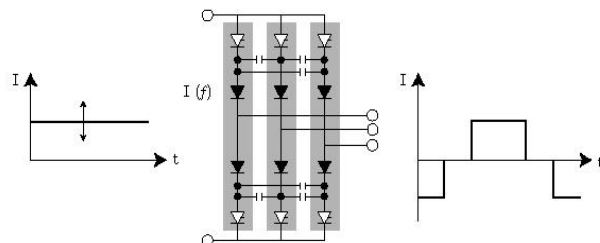
- prąd stały o regulowanej wartości,
- napięcie stałe o regulowanej wartości,
- napięcie stałe o nieregulowanej wartości.

W każdym przypadku falownik zapewnia dostarczanie do silnika napięcia o odpowiednio przetworzonych parametrach. Innymi słowy częstotliwość napięcia zasilającego silnik jest zawsze generowana w falowniku. Jeżeli prąd lub napięcie stałe jest regulowane w obwodzie pośrednim, falownik zmienia tylko jego częstotliwość, a jeżeli napięcie zasilania falownika jest stałe to falownik zmienia jego częstotliwość i wartość skuteczną.

Chociaż falownik pracuje w różny sposób jego podstawowa struktura jest zawsze taka sama. Głównymi członami falownika są sterowane półprzewodnikowe elementy mocy umieszczane w trzech oddzielnych gałęziach.

Ze względu na dużą częstotliwość przełączania, tyrystory obecnie są zastępowane przez tranzystory, które mogą być załączane i wyłączane bardzo szybko. Praca półprzewodnikowych elementów mocy jest dwustanowa stąd często używa się określenia - klucz półprzewodnikowy. Częstotliwość przełączania elementów mocy falownika zależy od rodzaju zastosowanych półprzewodników mocy i zwykle zawiera się w granicach od 300Hz do 20kHz.

Półprzewodniki w falowniku są przełączane przez sygnały sterujące generowane w obwodzie sterowania i zabezpieczeń przemiennika. Sygnały sterujące pracą elementów mocy falownika mogą być generowane według różnych sposobów (algorytmów, metod).



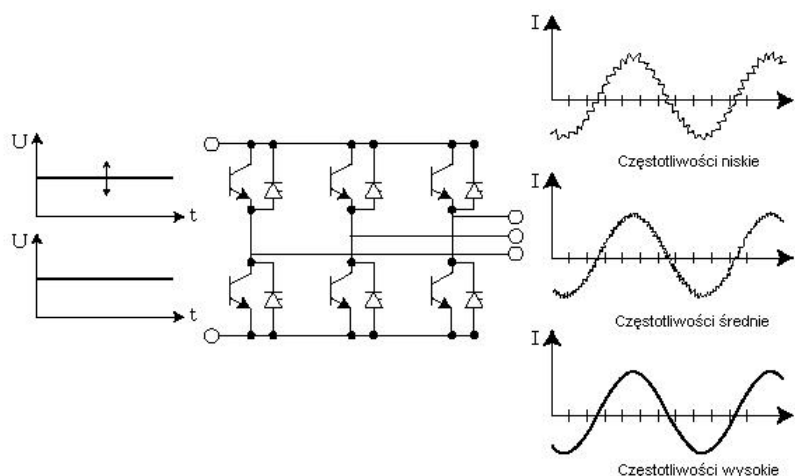
Rys. 3.14 Tradycyjne rozwiązanie układu falownika prądowego - regulowana wartość prądu stałego zasilania falownika.

W tradycyjnych rozwiązaniach przemienników z falownikami prądowymi, falownik zasilany jest prądem stałym o regulowanej wartości w funkcji częstotliwości jego prądu wyjściowego. Składa się on z sześciu diod, sześciu tyrystorów i sześciu kondensatorów.

Kondensatory umożliwiają przełączanie tyrystorów tak, że prądy fazowe są przesunięte względem siebie o 120° wartość ich pojemności musi być dopasowana do mocy silnika. Wirujące pole magnetyczne silnika jest wytwarzane wtedy, gdy zaciski silnika są zasilane periodycznie: U-V, V-W, W-U, U-V. Nawet, jeżeli prąd dostarczany przez falownik do silnika ma przebieg zbliżony do prostokątnego, napięcie silnika jest prawie sinusoidalne.

Należy zauważyć, że zawsze występują przepięcia na zaciskach silnikowych (impulsy napięciowe o dużej amplitudzie) podczas załączania lub wyłączania tyrystorów falownika. Inną niedogodnością jest możliwość powstania wyładowania łukowego o dużej energii w takim przemienniku w przypadku uszkodzenia silnika lub tyrystora przy jednoczesnym uszkodzeniu diody zwrotnej obwodu pośredniego - nastąpi łukowe wyładowanie rozładowujące energię zmagazynowaną w dławiku.

Diody separują kondensatory w falowniku prądowym przed zmianą ładunku przez prąd bierny obciążenia, rys. 3.14.



Rys. 3.15 Falownik napięciowy – tj. zasilany ze źródła napięcia stałego o regulowanej lub nieregulowanej wartości i przebiegi prądu fazowego silnika zależnie od częstotliwości przełączania elementów mocy falownika.

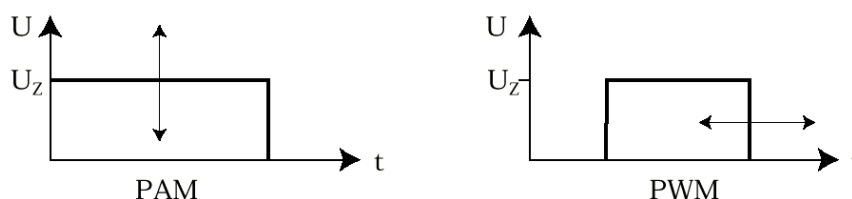
Przy regulowanej lub stałej wartości napięcia w obwodzie pośrednim falownik zawiera sześć sterowanych półprzewodników mocy, stawiane wymagania w zakresie parametrów elektrycznych i funkcja tych elementów jest zasadniczo taka sama w obu przypadkach. Sterowanie pracą - załączaniem i wyłączaniem półprzewodników mocy jest realizowane przy użyciu różnych technik modulacji zapewniających możliwość regulacji częstotliwości napięcia wyjściowego przemiennika.

Pierwszy omawiany tutaj sposób wykorzystuje regulowaną wartość napięcia lub prądu w obwodzie pośrednim.

Okresy, w których przewodzą poszczególne sterowane półprzewodnikowe elementy mocy falownika są rozłożone sekwencyjnie, z określonym czasem przewodzenia dla wytworzenia określonej częstotliwości napięcia wyjściowego przemiennika częstotliwości.

Dany półprzewodnik jest przełączany sekwencyjnie i czas jego przewodzenia jest ustalany zależnie od wartości napięcia lub prądu stałego obwodu pośredniego przemiennika. Stosując napięciowo sterowany regulator napięcia stałego obwodu pośredniego, jedynie częstotliwość napięcia wyjściowego falownika jest przez niego regulowana i zależy od amplitudy napięcia stałego obwodu pośredniego. Ten rodzaj modulacji określamy jako modulacja amplitudowa - PAM (ang. Pulse Amplitude Modulation). Przez to taki przemiennik częstotliwości nazywany jest przemiennikiem - PAM.

Inną obecnie głównie wykorzystywaną techniką jest stosowanie nieregulowanego napięcia stałego obwodu pośredniego przemiennika częstotliwości. Napięcie przemiennie silnika jest tutaj wytwarzane przez podawanie napięcia stałego obwodu pośredniego na uzwojenia silnika przez dłuższy lub krótszy okres czasu. W falowniku dokonywana jest regulacja wartości skutecznej i częstotliwości tego napięcia.



Rys. 3.16 Zasada modulacji amplitudowej - PAM i szerokości impulsów - PWM w przemiennikach napięciowych.

Częstotliwość jest zmieniana przez zmianę szerokości impulsu napięcia wzdłuż osi czasu dla dodatniego półokresu i odpowiednio dla ujemnego półokresu napięcia wyjściowego falownika.

Jeżeli modulacja powoduje zmiany szerokości impulsów napięciowych to jest ona nazwana jest modulacją PWM (Modulacja Szerokości Impulsów - MSI). Metoda PWM wraz jej modyfikacjami, jak np. sterowana sinusoidą PWM jest obecnie najczęściej stosowaną techniką sterowania pracą falowników w przemiennikach napięciowych.

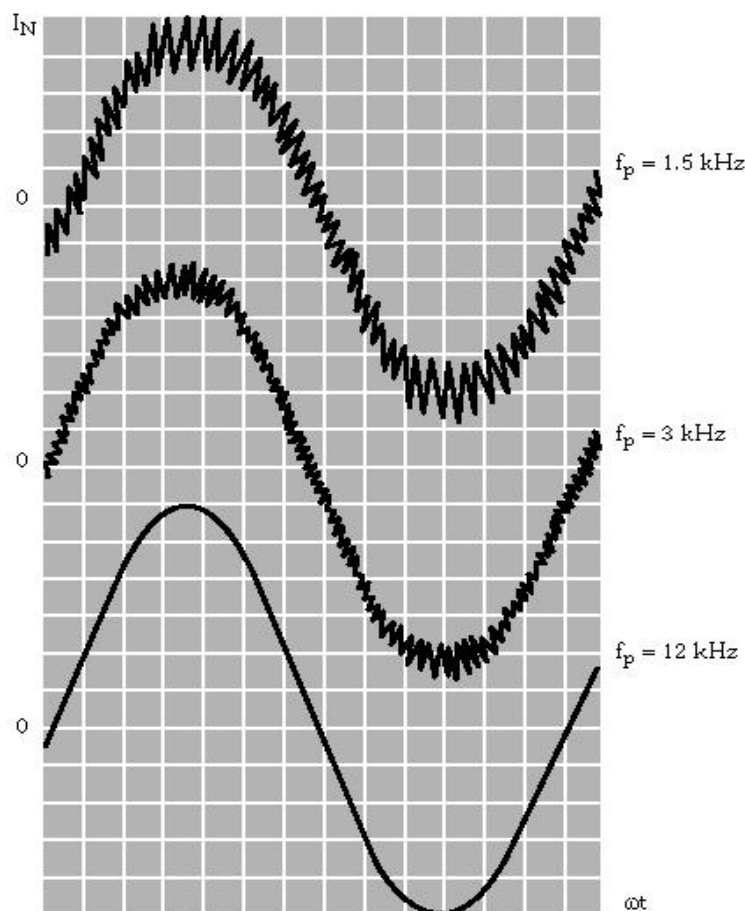
W modulacji napięcia wyjściowego falownika PWM obwód sterowania określa czas trwania okresów załączenia i wyłączenia sterowanych zaworów półprzewodnikowych falownika. Jest to realizowane na podstawie informacji o odstępach czasu między kolejnymi punktami przecięcia się nałożonych na siebie przebiegów modulacyjnych w układzie sterowania PWM: symetrycznego trójkątnego przebiegu nośnego z przesuniętymi o 120° sinusoidalnymi przebiegami modulującymi. Sinusoidalne przebiegi modulujące mają odpowiednio regulowaną

amplitudę i częstotliwość, i odpowiadają one odpowiednio za czasy przełączeń sterowanych elementów półprzewodnikowych mocy w poszczególnych gałęziach półmostków trójfazowego falownika. Przebiegi te określają wartość skuteczną i częstotliwość napięcia zasilania silnika (sterowana sinusoidą modulacja PWM). Inne zaawansowane odmiany metody modulacji PWM wykorzystujące technikę mikroprocesorową, to sterowanie wektorem napięcia VVC, VVC⁺ (ang. Vector Voltage Control), które firma DANFOSS stosuje w swoich przemiennikach częstotliwości.

Te metody modulacji będą oddzielnie omówione w dalszej części książki.

3.3.1 Tranzystor jako dwustanowy łącznik energoelektroniczny

Tranzystory mogą być przełączane z dużą szybkością, co zmniejsza szum elektromagnetyczny związany z magnesowaniem silnika. Inną zaletą szybkiego przełączania zaworów falownika jest możliwość dopasowania częstotliwości przełączania tych zaworów falownika do wartości obciążenia i częstotliwości podstawowej harmonicznej sinusoidalnego napięcia zasilania silnika. Umożliwia to generowanie sinusoidalnego prądu silnika. Obwód sterowania musi tylko odpowiednio szybko załączać i wyłączać tranzystory falownika.



Rys. 3.17 Prąd silnika przy różnych częstotliwościach przełączenia tranzystorów mocy falownika.

Zbyt duża częstotliwość przełączania tranzystorów mocy falownika prowadzi do nadmiernego grzania się przemiennika w skutek zwiększonego udziału strat dynamicznych w stosunku do strat statycznych w falowniku, przy jednoczesnym zmniejszeniu strat w silniku. Zwiększenie częstotliwości przełączania tranzystorów falownika przemiennika częstotliwości jest zawsze kompromisem między stratami przemiennika i silnika. Należy zwykle brać pod uwagę sprawność całego układu napędowego: przemiennik częstotliwości - silnik.

Innym problemem jest to, że zbyt niska częstotliwość przełączania tranzystorów falownika może prowadzić do zwiększenia hałasu pracującego silnika, co w niektórych warunkach może być uciążliwe dla personelu znajdującego się w bezpośrednim otoczeniu silnika, np. w laboratoriach badawczych i dydaktycznych.

Tranzystory o wysokiej częstotliwości przełączania stosowane do falowników mogą być dzielone na trzy grupy:

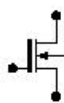

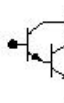
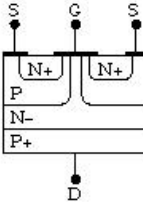
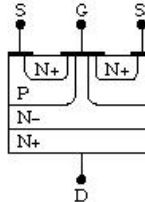
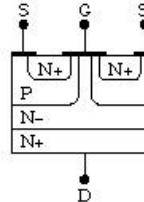
1. Bipolarne (LTR).
2. Unipolarne (FET, MOS-FET).
3. Bipolarne z izolowaną bramką (IGBT).

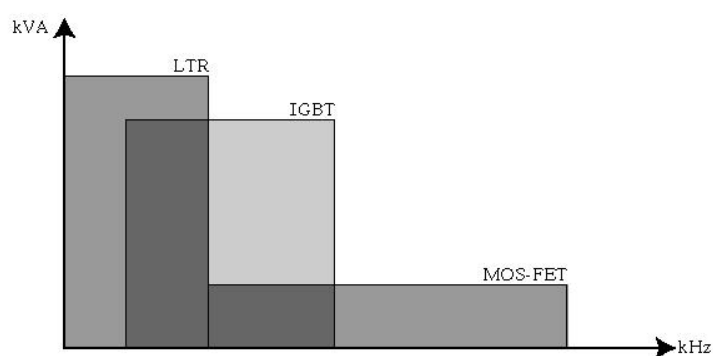
Obecnie najczęściej stosowane są tranzystory IGBT. Mają one własności sterowania tranzystorów MOS-FET i mogą przewodzić prądy oraz mają zakres mocy taki jak tranzystory LTR. Zaletą ich jest również duża przewodność (mała rezystancja przewodzenia) i dobre własności sterowania (sterowane sygnałem napięciowym) do zastosowań w nowoczesnych przemiennikach. Zastosowanie tych tranzystorów w falownikach spowodowało duży postęp technologiczny w budowie przemienników częstotliwości o mocach do 500kW i napięciach zasilania 3*380-690V, w stosunku do przemienników z falownikami opartymi uprzednio na tyrystorach czy tranzystorach bipolarnych.

Wprowadzenie tranzystorów IGBT, ze względu na małe zapotrzebowanie na moc ich sterowania spowodowało znaczne zwiększenie niezawodności zmniejszenie gabarytów przemienników. Cały układ sterowania został przeniesiony na stronę niskonapięciową, nazywaną IPM (ang. Intelligent Power Module). Ważne jest tutaj to, że między obwodem sterowania i obwodem mocy tranzystora IGBT jest izolacja galwaniczna, napięcie przebicia tej izolacji wynosi około 2kV. Przy załączaniu i wyłączeniu oraz podtrzymaniu stanu pracy statycznej tranzystora IGBT nie jest pobierana moc z układu sterowania. Można powiedzieć, że pracą tranzystora IGBT można sterować baterią o napięciu 12V, która nie ulega rozładowaniu, bo jej obciążenie jest bliskie zeru.

Tabela 3.01 przedstawia podstawowe różnice między sterowanymi półprzewodnikowymi elementami mocy stosowanymi w falownikach niskonapięciowych przemienników częstotliwości: MOS-FET, IGBT i LTR.

Tabela. 3.01 Porównanie własności w pełni sterowanych zaworów półprzewodnikowych stosowanych w falownikach przemienników częstotliwości.

Rodzaje tranzystorów Właściwości	MOS-FET	IGBT	LTR
Oznaczenie			
Budowa			
Wartości prądu Straty	Niskie Wysokie	Wysokie Znikome	Wysokie Znikome
Wartości graniczne	Niskie	Wysokie	Średnie
Czas narastania zbocza Czas opadania zbocza Straty częstotliwościowe	Szybki Szybki Znikome	Średni Średni Średni	Średni Niski Duże
Moc przetwarzana Sterowanie	Niskie Napięciowe	Niskie Napięciowe	Wysokie Prądowe



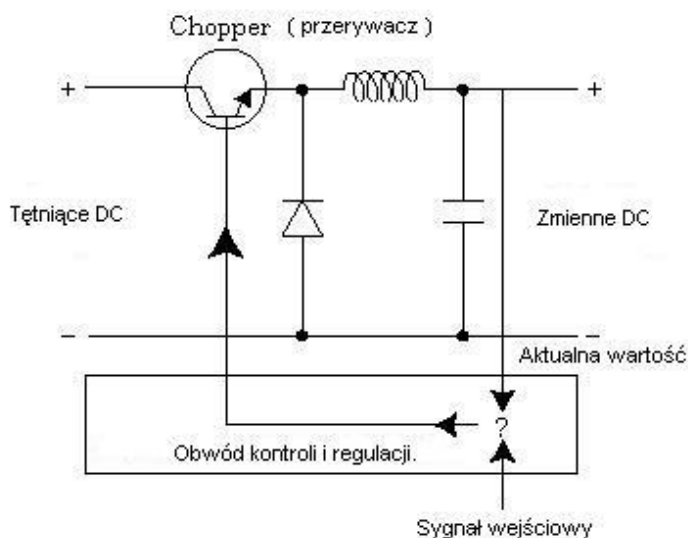
Rys. 3.18 Zakres mocy i częstotliwości przełączania różnych typów tranzystorów stosowanych w falownikach przemienników.

3.3.2 Metody kształtowania napięcia wyjściowego falownika

3.3.2.1 Kształtowanie napięcia metodą modulacji amplitudowej - PAM

PAM – jest używana dla przemienników ze regulowanym napięciem stałym w obwodzie pośrednim.

W przemiennikach częstotliwości z niesterowanymi prostownikami amplituda napięcia zasilania falownika jest regulowana przez wbudowany do obwodu pośredniego wewnętrzny przerywacz prądu (chopper), rys. 3.19. Przy stosowaniu prostowników regulowane napięcie wyjściowe prostownika jest bezpośrednio podawane na kondensator dołączony do falownika.



Rys. 3.19 Układ przerywacza prądu do regulacji wartości napięcia stałego zasilającego falownik.

Przełączanie tranzystora jest sterowane przez obwód kontroli i regulacji. Czas przewodzenia tranzystora przy stałej częstotliwości przełączania lub częstotliwość przełączania przy stałym współczynniku wypełnienia impulsu, zależą od wartości zadanej sygnału referencyjnego i zmierzonej faktycznej wartości napięcia stałego zasilania falownika. Wartość ta jest mierzona na kondensatorze.

Kondensator i cewka (lub dławik) działają jak filtr, który wygładza pulsujące napięcie za prostownikiem. Wartość napięcia za przerywaczem zależy od czasu przewodzenia tranzystora. Jeśli zadana wartość tego napięcia jest różna od wartości mierzonej, praca przerywacza jest uaktywniona aż napięcie osiągnie żądany poziom.

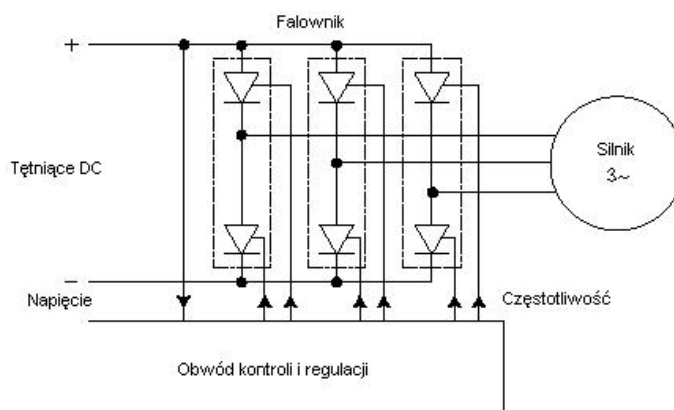
⇒ **Zadawanie częstotliwości napięcia wyjściowego falownika**

Częstotliwość napięcia wyjściowego falownika zależna jest od okresu przebiegu modulującego (w układach cyfrowych od okresu cyklu tablicy przełączeń), lub inaczej od ilości przełączeń sterowanych zaworów półprzewodnikowych

falownika w okresie ich cyklu powtarzalności. Elementy przełączające są aktywowane dużą liczbą razy w jednym cyklu przełączeń.

Są dwa sposoby sterowania długością okresu cyklu przełączania zaworów falownika:

1. Bezpośrednio przez wejściowy - referencyjny sygnał sterujący.
2. Przez regulowane napięcie stałe obwodu pośredniego, które jest proporcjonalne do wejściowego sygnału sterującego rys. 3.20.



Rys. 3.20 Układ sterowania częstotliwością wyjściową falownika PAM sygnałem napięcia obwodu pośredniego.

3.3.2.2 Kształtowanie napięcia metodą PWM

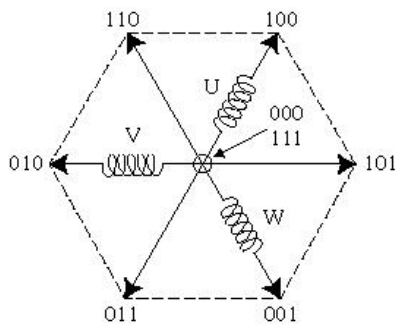
PWM jest najczęściej używaną metodą generowania przez falownik napięcia trójfazowego o regulowanej częstotliwości i amplitudzie.

W metodzie PWM stałe napięcie obwodu pośredniego ($\approx \sqrt{2} \cdot U_{zas}$) jest przełączane przez dwustanowe elementy mocy falownika. Szerokość impulsów napięcia między kolejnymi załączeniami i wyłączeniami zaworów półprzewodnikowych falownika określa amplitudę napięcia przemiennego.

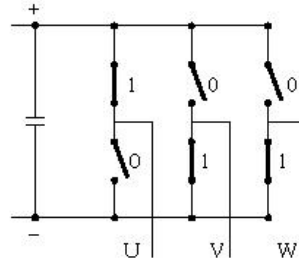
Rozróżniamy 3 główne rodzaje sposobów sterowania pracą zaworów falownika wg PWM:

1. sinusoidą sterowany PWM,
2. synchroniczne sterowanie PWM,
3. asynchroniczne sterowanie PWM.

Każda gałąź trójfazowego falownika może przyjmować dwa różne stany pracy: załączony lub wyłączony jeden z dwóch zaworów mocy gałęzi falownika - załączony / wyłączony. Trzy gałęzie falownika generują 8 możliwych kombinacji (2^3) i dlatego powstaje 8 oddzielnych wektorów napięcia na wyjściach mocy falownika albo odpowiednio na uzwojeniach stojana dołączonego silnika. Jak pokazano na rys. 3.21a te wektory 100, 010, 011, 001, 101 są umieszczane przy kątach sześciokąta, wektory zerowe oznaczono jako 000, 111.



Rys. 3.21 a



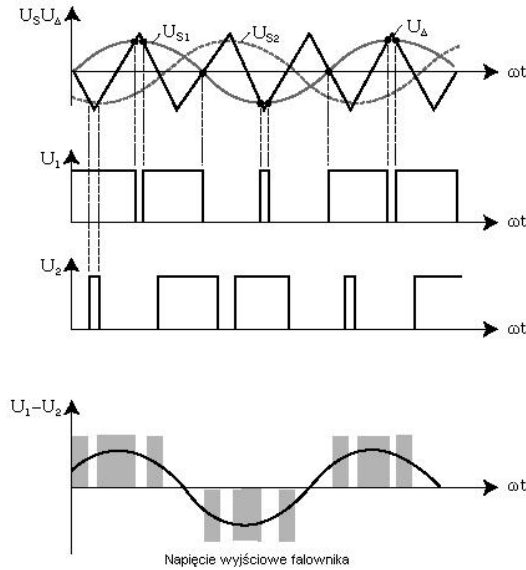
Rys. 3.21 b

Przy przełączaniu kombinacji 000, 111 ten sam potencjał jest generowany przy wszystkich 3 wyjściach mocy falownika o dodatniej lub ujemnej wartości potencjału obwodu pośredniego, rys. 3.21b. Dla dołączonego silnika powoduje to zwarcie uzwojeń stojana i wymuszanie na jego zaciskach zasilania napięcia o wartości 0V.

3.3.2.3 Modulacja PWM z sinusoidalnym przebiegiem nośnym

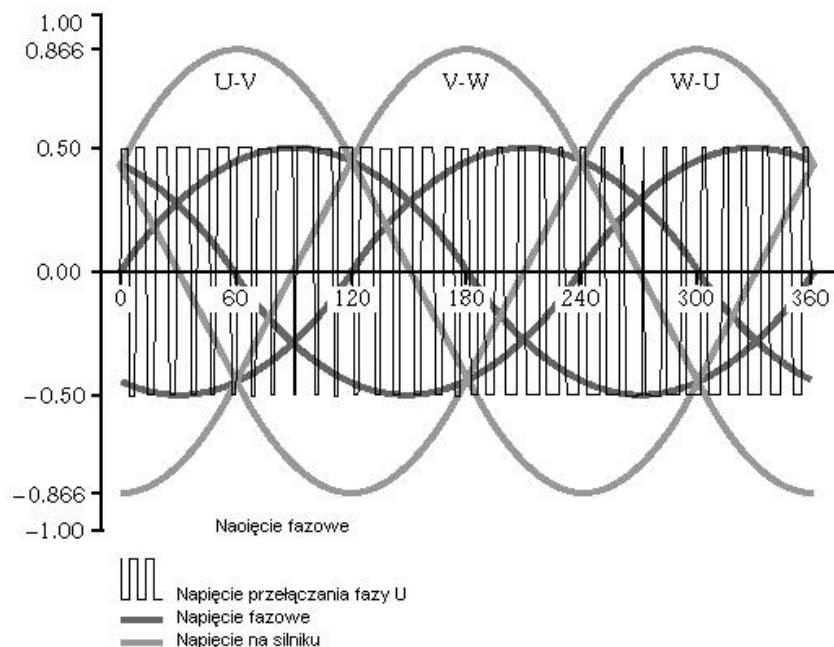
W metodzie tej używa się sinusoidalnego napięcia odniesienia (modulującego) U_s dla każdego wyjścia mocy falownika. Okres sinusoidalnego napięcia odniesienia odpowiada za okres podstawowej harmonicznej napięcia wyjściowego falownika. Trzy napięcia odniesienia, odpowiednio dla każdej gałęzi trójfazowego falownika są nałożone na trójkątny przebieg nośny (modulowany). Czasy przełączania elementów półprzewodnikowych (zaworów) falownika są określane względem punktów przecięcia przebiegów sinusoid napięć odniesienia i przebiegu trójkątnego napięcia modulowanego U_{Δ} , rys. 3.22. W miejscach przecięcia przebiegu modulowanego z przebiegiem modulującym następuje naprzemienne załączenie lub wyłączenie sterowanych zaworów mocy odpowiedniej gałęzi falownika. Jeden sinusoidalny przebieg modulujący steruje pracą jednej gałęzi trójfazowego falownika.

Przecięcia te określone są przez elektroniczny układ sterowania falownika. Jeżeli napięcie trójkątne U_{Δ} przyjmie większą wartość od modulującego napięcia sinusoidalnego to wytwarzane impulsy sterujące pracą danego zaworu gałęzi falownika zmieniają się z dodatnich na ujemne (lub z ujemnych na dodatnie). Jeżeli napięcie trójkątne U_{Δ} ma mniejszą wartość niż sinusoidalne napięcie modulujące to wówczas nie są generowane impulsy załączenia i wyłączenia zaworów półprzewodnikowych falownika i maksymalne przemiennie napięcie wyjściowe falownika jest określone przez wartość napięcia obwodu pośredniego.



Rys. 3.22 Sposób kształtowania napięcia wyjściowego trójfazowego falownika PWM z sinusoidalnym przebiegiem nośnym (dwa napięcia odniesienia - jedno napięcie międzyfazowe).

Wytworzone napięcie jest zależne od stosunku czasu przewodzenia i nieprzewodzenia zaworów falownika. Ten stosunek może być zmieniany zależnie od wymaganej wartości skutecznej napięcia przemiennego. Amplituda dodatnich i ujemnych impulsów wyjściowego napięcia fazowego falownika zawsze odpowiada połowie wartości napięcia obwodu pośredniego.



Rys. 3.23 Napięcie wyjściowe falownika PWM z sinusoidalnym przebiegiem nośnym.

Przy niskich częstotliwościach stojana czas trwania impulsu wyłączenia zaworów falownika wzrasta i może stać się tak duży, że nie jest możliwe utrzymanie właściwych chwil przełączeń tych zaworów, wyznaczanych z sinusoidalnych przebiegów modulujących o niskiej częstotliwości i małej amplitudzie oraz modulowanego napięcia trójkątnego U_{Δ} o amplitudzie i częstotliwości stałej (regulacja współczynnika głębokości modulacji może być także dokonywana przy zastosowaniu przebiegów: modulujący - sinusoidalny o stałej amplitudzie i regulowanej częstotliwości, modulujący - trójkątny o regulowanej amplitudzie i stałej lub regulowanej częstotliwości. Zbyt długie czasy wyłączenia zaworów falownika niekorzystnie wpływają na pracę silnika.

Powoduje to, że okres pracy silnika bez napięcia zasilania może być zbyt długi co wpływa jego niestabilną pracę. Żeby tego uniknąć częstotliwość napięcia trójkątnego U_{Δ} może być podwójna dla niskich częstotliwości napięcia wyjściowego falownika.

Maksymalne skuteczne napięcie fazowe na zaciskach wyjściowych falownika odpowiada w połowie wartości napięcia obwodu pośredniego podzielonego przez $\sqrt{2}$ i stąd jest równe połowie wartości skutecznej międzyfazowego napięcia sieci zasilającej. Wytwarzane skuteczne napięcie międzyfazowe na zaciskach mocy falownika jest równe $\sqrt{3}$ razy jego wyjściowe napięcie fazowe i stąd maksymalna wartość skuteczna tego napięcia wynosi 0,866 razy wartość skuteczną napięcia międzyfazowego sieci zasilającej.

W metodzie PWM z wyłącznie sinusoidalnym napięciem modulującym (odniesienia) można przekazywać na zaciski silnika do 86,6% wartości międzyfazowego napięcia zasilania przemiennika częstotliwości, rys. 3.23.

Napięcie wyjściowe przemiennika częstotliwości z wyłącznie modulacją sinusoidalną PWM falownika nie może osiągnąć nominalnej wartości napięcia zasilania silnika, dlatego jego napięcie zasilania jest obniżone przybliżeniu o 13%.

Dodatkowe zwiększenie napięcia można uzyskać przez zmniejszenie liczby pulsów gdy częstotliwość napięcia wyjściowego falownika osiąga 45Hz, ale jest kilka wad związanych z tą techniką. W szczególności takie działanie powoduje, że napięcie zmienia swoją wartość w tym zakresie krokowo i to powoduje, iż prąd w silniku staje się niestabilny. Jeżeli liczba pulsów jest zmniejszona to zawartość harmonicznym w napięciu wyjściowym przemiennika wzrasta powodując większe straty w silniku.

Innym sposobem rozwiązania tego problemu jest zastąpienie trzech sinusoidalnych napięć odniesienia przez innego rodzaju sygnały. Te sygnały mogłyby mieć inny kształt np.: trapezowy, schodkowy itp.

Przykładowo sinusoidalne przebiegi odniesienia mogłyby zawierać dodatkowo 3 harmoniczną. Przez powiększenie amplitudy sinusoidalnego napięcia odniesienia o 15,5% ($[1 / 0,866 - 1] * 100\%$) i dodanie 3 harmonicznym o amplitudzie 16,6% harmonicznym podstawowej, tablica przełączeń zaworów półprzewodnikowych

falownika ulegnie zmianie w ten sposób, że nastąpi zwiększenie napięcia wyjściowego falownika.

3.3.2.4 Synchroniczna modulacja PWM

Podstawowy problem sinusoidalnej modulacji PWM leży w określeniu optymalnej ilości przełączeń w okresie harmonicznej podstawowej napięcia wyjściowego falownika oraz kąta przesunięcia fazowego. Ilość przełączeń musi być tak dobrana, aby uzyskać jak najmniejszą zawartość wyższych harmoniczných. Stąd tablica przełączeń zaworów półprzewodnikowych falownika w przemienniku częstotliwości jest opracowana dla danego (ograniczonego) zakresu częstotliwości wyjściowego napięcia przemiennego falownika (harmonicznej podstawowej tego napięcia). Praca poza tym zakresem częstotliwości wymaga innej tablicy przełączeń zaworów falownika.

Stosując metodę modulacji sinusoidalnej PWM jest konieczne optymalizowanie zakresu częstotliwości stosowanego napięcia przy jednoczesnym minimalizowaniu widma wyższych harmoniczných. Jeżeli stosunek częstotliwości napięcia modulowanego U_{Δ} do częstotliwości napięcia odniesienia staje się bardzo duży, to te dwa sygnały mogą przebiegać asynchronicznie względem siebie. Przy stosunku tych częstotliwości bliskim 10 albo niższym, wystąpią szkodliwe wyższe harmoniczne. Staje się, więc konieczne zsynchronizowanie tych dwóch sygnałów. Ta synchronizacja widziana jako możliwość zmiany prędkości obrotowej silnika jest dobra dla trójfazowych napędów o małych wymaganiach dynamicznych, gdzie napięcie i częstotliwość (normalne sterowanie U/f) może być zmieniane powoli.

3.3.2.5 Asynchroniczna modulacja PWM

Zwiększone wymagania dla silników zorientowanych polowo oraz systemów napędowych prądu przemiennego wymagających szybkiej reakcji na zmiany momentu i prędkości obrotowej (wyłączając napędy typu serwo) powodują, że konieczna jest krokowa (ang. steep-wise) modyfikacja amplitudy oraz kąta fazowego napięcia falownika. Stosując typowy sinusoidalny PWM lub synchroniczny PWM nie można w tych metodach wytwarzania napięcia wyjściowego falownika zadawać krokowo amplitudę i kąt fazowy napięcia.

Istnieje jeden sposób sprostania tym wymaganiom przy użyciu asynchronicznej modulacji PWM. W tej procedurze zamiast synchronizacji przebiegu przemiennego napięcia wyjściowego do częstotliwości przełączania zaworów falownika, co jest normalnie stosowane dla ograniczenia zawartości wyższych harmoniczných prądu w silniku, można sterować położeniem wektora napięcia stosując odpowiedni cykl przełączeń zaworów falownika. W rezultacie otrzymywana jest asynchroniczna współzależność położenia wektora napięcia wyjściowego z jego częstotliwością.

Są dwie główne techniki asynchronicznej modulacji PWM.

1. SFAVM (Stator Flow-oriented Asynchronous Vector Modulation) - płynnie ukierunkowana asynchroniczna modulacja przestrzennego wektora napięcia stojana.
2. 60° AVM (Asynchronous Vector Modulation) - 60° modulacja wektora napięcia stojana.

SFAVM jest modulacją wektorową, w której jest możliwa zmiana napięcia falownika - amplitudy i kąta przesunięcia fazowego w sposób przypadkowy, ale krokowo przy przełączaniu zaworów falownika - innymi słowy asynchronicznie. Daje to lepsze własności dynamiczne silnika współpracującego z falownikiem przemiennika.

Główną zaletą tej modulacji jest optymalizowanie parametrów strumienia stojana silnika poprzez oddziaływanie na jego napięcie zasilania. Powoduje to minimalizowanie pulsacji momentu na wale silnika zależnego od odchylenia kąta fazowego napięcia i sekwencji przełączeń zaworów falownika. Brak właściwego strumienia magnetycznego w silniku prowadzi do zmniejszenia i większych pulsacji momentu. W konsekwencji przełączanie zaworów falownika musi zapewniać minimalizowanie kąta odchylenia wektora napięcia. Przełączanie między wektorami napięcia opiera się na obliczaniu żądanej trajektorii położenia strumienia stojana silnika, którego zmiany określają jakość generowanego momentu.

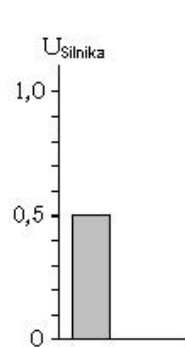
Wadą konwencjonalnej metody PWM jest to, że występowało w niej odchylenie amplitudy wektora strumienia stojana i jego kąta. Te odchylenia dotyczyły obracającego się strumienia magnetycznego w szczeliny powietrznej silnika i powodowały pulsowanie momentu. Skutek odchylenia amplitudy wektora strumienia jest nieznaczny i może być zmniejszany przez zwiększanie częstotliwości przełączania.

⇒ **Generacja napięcia silnika.**

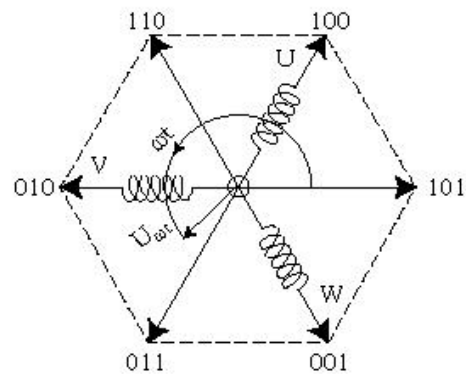
Dla Stabilnej pracy silnika należy zapewnić kołową trajektorię wektora napięcia $U_{\omega t}$ jak pokazano na rys. 3.24. Długość wektora napięcia jest miarą wartości napięcia silnika. Szybkość wirowania wektora odwzorowuje częstotliwość napięcia. Napięcie skuteczne silnika jest wytwarzane przez powstawanie krótkich impulsów napięciowych od sąsiednich wektorów.

Metoda SFAVM stosowana przez firmę Danfoss ma między innymi następujące właściwości:

1. wektor napięcia może być kontrolowany zgodnie z wstępnie przyjętą amplitudą napięcia i kątem odniesienia,
2. przełączanie, które zawsze zaczyna się od 000 , 111 umożliwia każdemu wektorowi napięcia posiadanie 3 trybów przełączania,
3. średnia wartość wektora napięcia jest otrzymywana przez krótkie impulsy sąsiednich wektorów jak również wektorów zgodnych (000,111). Sterowanie to dobrze objaśnia rys. 3.24 i 3.25.

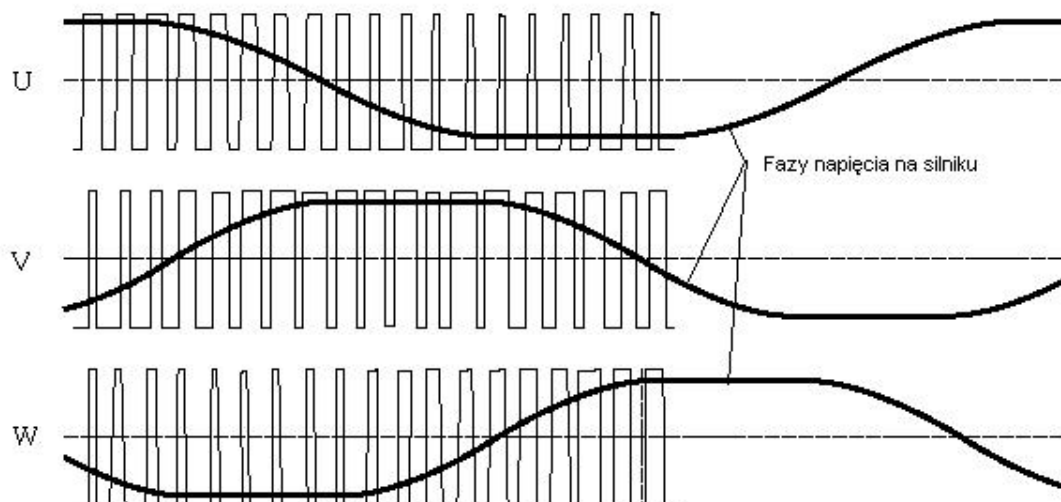


a) aktualne napięcie silnika (50% wartości nominalnej)



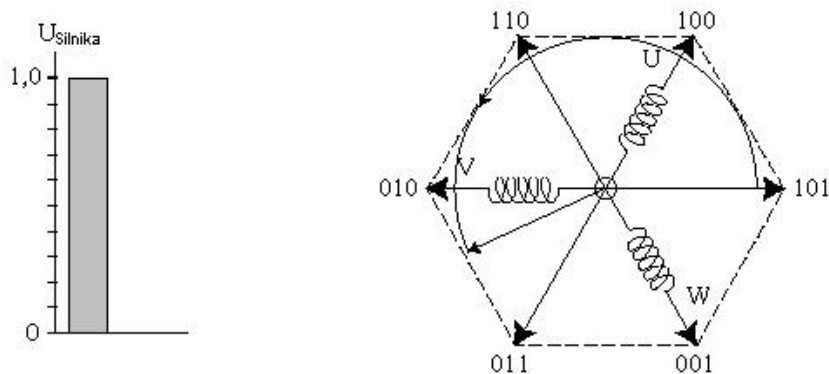
b) Sekwencja przełączeń idealnego wektora napięcia U_{ax} wg tablicy przełączeń PWM, z naniesionym zadaniem wektorem napięcia.

Rys. 3.24 Przełączanie zaworów mocy falownika wg metody PWM opartej na przestrzennym wektorze napięcia (SFAVM) dla 50% nominalnego napięcia.



Rys. 3.25 Przebiegi czasowe sygnałów sterujących falownika trójfazowego dla 50% napięcia wyjściowego - fazy U,V,W.

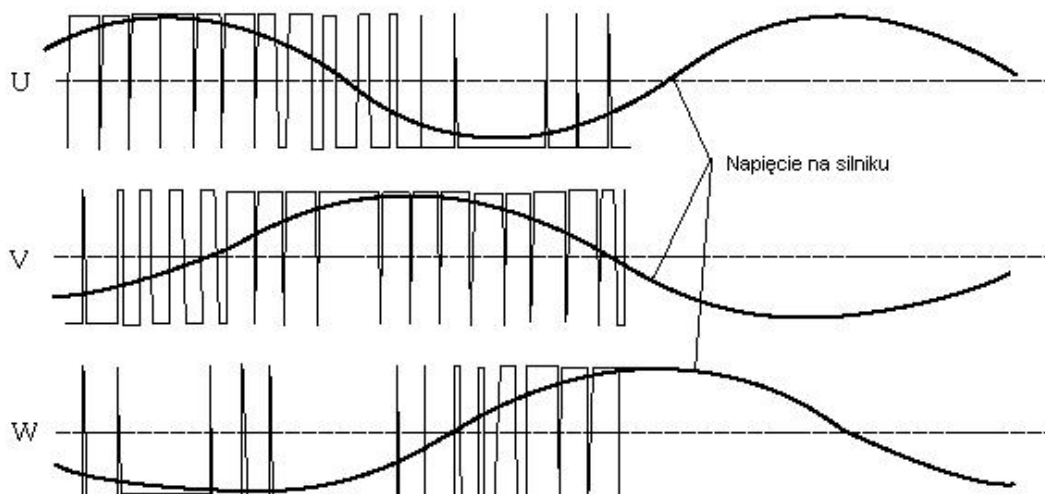
Chwilowa wartość napięcia zadanego $U_{\omega t}$ pokazana na rys. 3.24a, wynosi 50% nominalnego napięcia silnika. Napięcie wyjściowe generowane jest przez krótkie impulsy przynależnego wektora, - w tym przypadku 011 i 001 jak również 000 i 111 w formie wartości średniej -rys. 3.24b.



a) aktualne napięcie silnika (100% wartości nominalnej).

b) Sekwencja przełączeń idealnego wektora napięcia U_{ax} wg tablicy przełączeń PWM, z naniesionym zadany wektorem napięcia.

Rys. 3.26 Przełączanie zaworów mocy falownika wg metody PWM opartej na przestrzennym wektorze napięcia (SFAVM) dla 100% nominalnego napięcia.



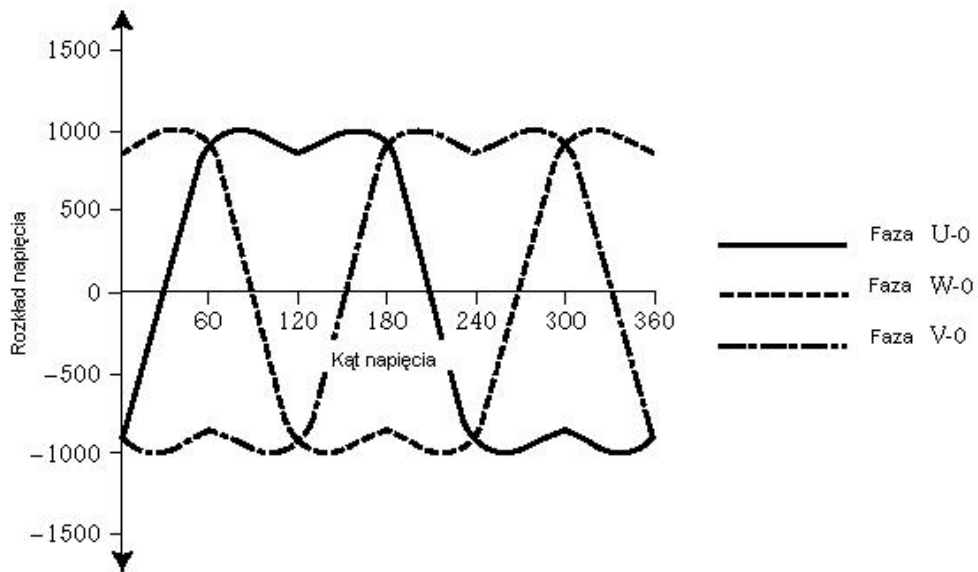
Rys. 3.27 Przebiegi czasowe sygnałów sterujących falownika trójfazowego dla 100% napięcia wyjściowego - fazy U,V,W.

SFAVM wytwarza szczególne połączenie układu sterowania i mocy obwodu przemiennika. Modulacja jest zsynchronizowana z zadaną z układu sterowania częstotliwością (patrz dział VVC^{plus}), i asynchroniczna do składowej podstawowej częstotliwości napięcia silnika.

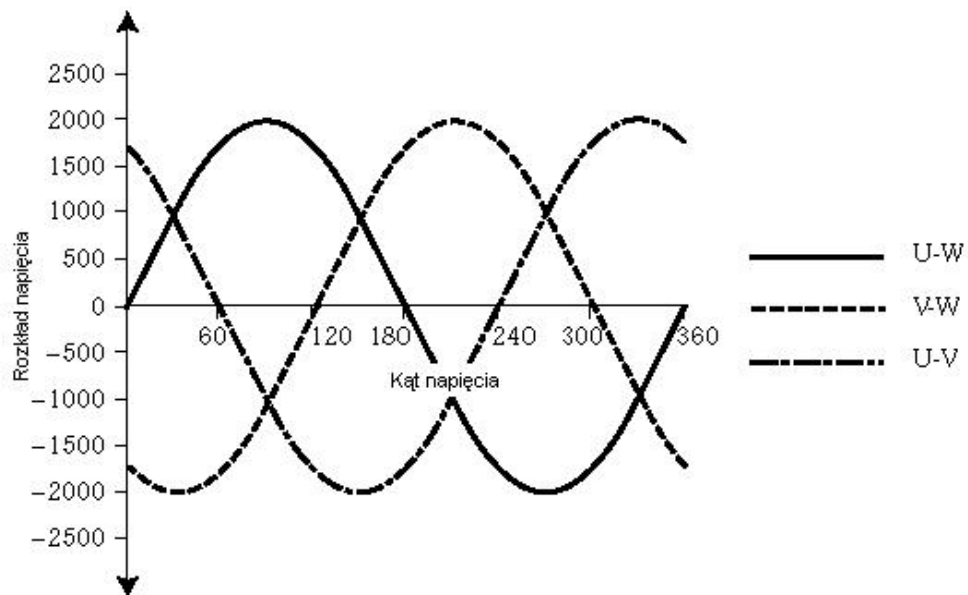
Synchronizacja między sterowaniem i modulacją ma przewagę w przemiennikach większych mocy (wektor napięcia, wektor strumienia) dlatego, że układ sterowania wektorem napięcia jest w stanie sterować bezpośrednio i bez ograniczeń (amplituda, kąt i kąt prędkości są sterowalne).

W przypadku konieczności radykalnego zredukowania czasu obliczeń w czasie rzeczywistym - "on-line", wartości napięcia dla różnych kątów są zadane w

odpowiedniej tabeli. Rys. 3.28 przedstawia w sposób uproszczony przykładowy przebieg modulacji wektorowej napięcia przy modulacji SFAVM oraz napięcia wyjściowe falownika (zasilania silnika).



Rys. 3.28 Wyjściowe napięcia fazowe falownika uzyskiwane wg tablicy łączeń dla modulacji SFAVM.



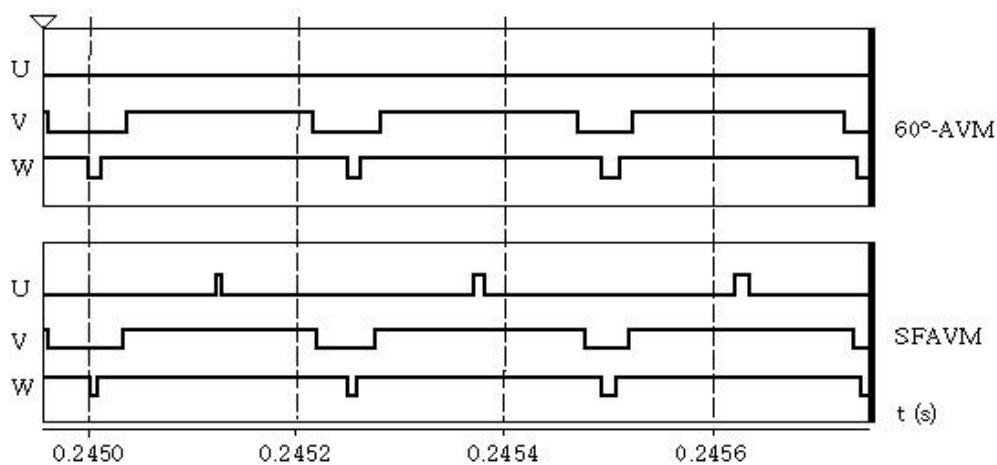
Rys. 3.29 Napięcie międzyfazowe na wyjściach mocy przemiennika (zasilania silnika) przy modulacji SFAVM.

⇒ **60° AVM.**

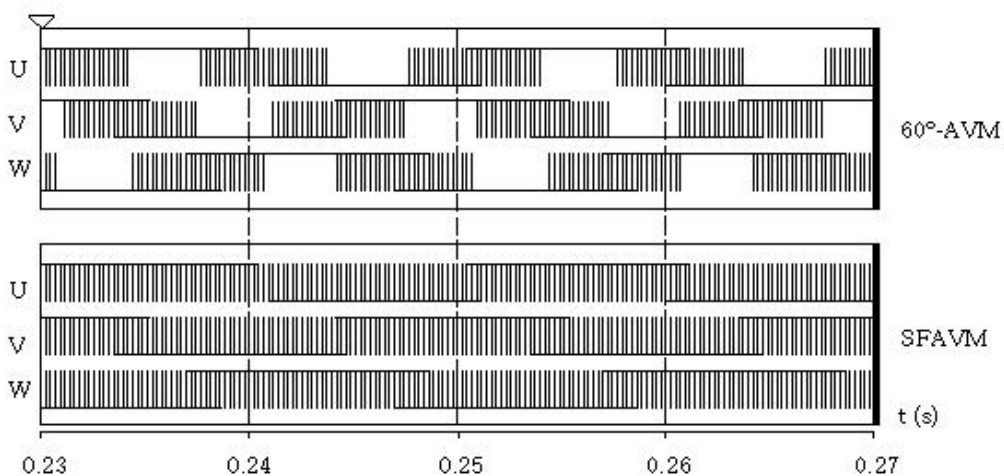
Kiedy stosujemy 60° AVM (ang. Asynchronous Vector Modulation) zamiast SFAVM wektory napięcia mogą być określone:

1. W granicach cyklu przełączeń, tylko jeden wektor zerowy (000 lub 111) jest tu wykorzystywany.
2. Sekwencja przełączania nie zawsze zaczyna się od zerowego wektora (000 lub 111).
3. W granicach 1/6 okresu (60°) falownik nie jest przełączany w jedne fazy. Stan przełączenia (0 lub 1) jest wtedy utrzymywany. W dwóch pozostałych fazach przełączanie odbywa się normalnie.

Rysunek 3.30 przedstawia porównanie sekwencji przełączeń dla modulacji 60° AVM i SFAVM dla krótkiego odstępu czasu (rys.3.30 a) i dla kilku okresów (rys.3.30 b).



Rys. 3.30 a Sekwencje przełączeń przy sterowaniu falownika wg modulacji 60° AVM i SFAVM w krótkich odstępach czasu.



Rys. 3.30.b Przełączanie zaworów falownika w metodach modulacji 60° AVM i SFAVM dla kilku kolejnych okresów.

3.4 Obwód sterowania

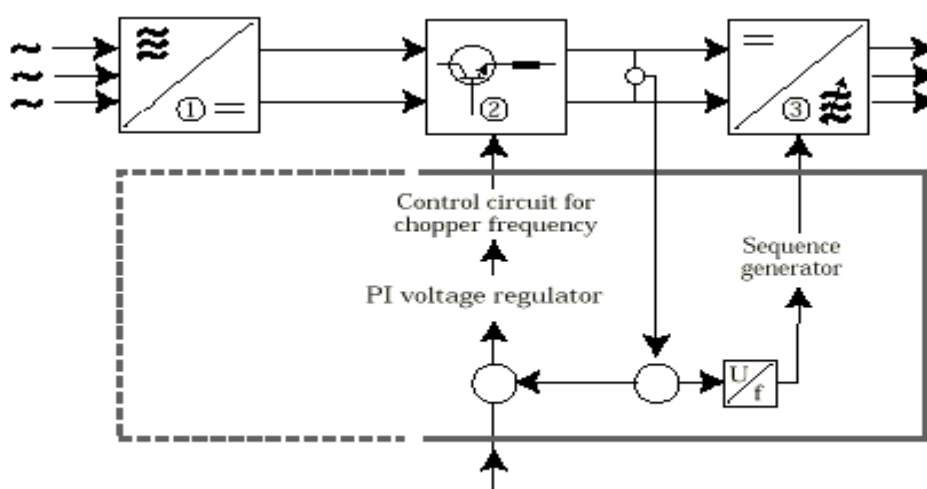
Obwód sterowania, lub karta sterowania jest czwartym głównym elementem w przemienniku częstotliwości, rys.3.01 i spełnia następujące zadania:

- sterowanie półprzewodnikowymi zaworami przemiennika częstotliwości (falownika, czasem obwodu pośredniego lub prostownika,
- wymiana danych pomiędzy przemiennikiem częstotliwości, a urządzeniami peryferyjnymi,
- zbieranie i raportowanie (sygnalizowanie) informacji o błędach i uszkodzeniach,
- pełni funkcję ochronną dla obwodu mocy przemiennika i silnika.

Mikroprocesory sukcesywnie zwiększają szybkość działania i ich wykorzystanie w obwodzie sterowania znacząco powiększyło możliwości obliczeniowe wykonywane w przemiennikach przy jednoczesnym zmniejszeniu ilości niezbędnych obliczeń. Przyczyniło się to do wzrostu ilości aplikacji napędowych.

Zastosowanie mikroprocesorów w układach sterowania przemienników częstotliwości spowodowało, że stały się one obecnie ich integralną częścią. Przemiennik jest w stanie wyznaczyć optymalny sposób przełączania zaworów falownika (tablicę przełączeń) w procesie modulacji dla każdego stanu pracy.

⇒ **Obwód sterowania dla przemiennika częstotliwości z modulacją PAM**



Rys. 3.31 Zasada pracy układu sterowania przemiennika PAM z wykorzystaniem przerwacza prądu (ang. chopper) do regulacji wartości napięcia stałego w obwodzie pośrednim.

Na powyższym rys. 3.31 przedstawiono przemiennik częstotliwości PAM z przerwaczem prądu w obwodzie pośrednim. Układ sterowania steruje pracą przerwacza (2) i falownikiem (3).

Wartość amplitudy napięcia wyjściowego falownika jest zależna od chwilowej wartości napięcia w obwodzie pośrednim.

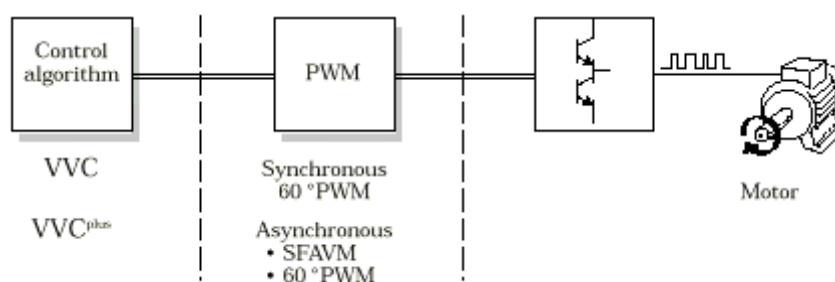
Sterowanie napięciowe odbywa się w układzie sterowania obwodu pośredniego według pewnego wzorca zadanego w tabeli przełączeń zaworów

falownika. Dla różnych wartości napięcia stałego obwodu pośredniego w tabeli zadany jest odpowiedni wzorzec sekwencji przełączeń zaworów falownika. Układ sterowania mierzy wartość napięcia na wyjściu stopnia pośredniego i porównuje z wartością zadaną. Jeżeli nastąpi różnica tych wartości to następuje regulacja napięcia wyjściowego i częstotliwości poprzez wybranie odpowiedniego adresu do tabeli przełączeń. Jeśli napięcie w obwodzie pośrednim wzrośnie wówczas odliczanie okresu napięcia wyjściowego falownika wzrasta w konsekwencji wzrasta częstotliwość napięcia przemiennego na wyjściach mocy falownika.

W tym układzie przerywacza prądu - impulsator (chopper) reguluje napięcie w obwodzie pośrednim, mierzona jest wartość tego napięcia i porównywana z wartością referencyjną (zadaną), a następnie następuje korekcja wartości napięcia w obwodzie pośrednim do wartości zadanej. Wartość napięcia w obwodzie pośrednim określa amplitudę i częstotliwość napięcia przemiennego na wyjściach mocy falownika. Jeśli napięcie referencyjne i sygnały pomiarowe obwodu pośredniego się zmieniają, wtedy regulator PI przesyła informację do układu sterowania o konieczności zmiany okresu napięcia przemiennego. Prowadzi to do regulacji wartości napięcia obwodu pośredniego do wartości określonej napięciem referencyjnym.

PAM jest tradycyjną starszą metodą sterowania falownikiem przemiennika częstotliwości. Następną bardziej nowoczesną metodą modulacji napięcia falownika w przemienniku jest PWM. W dalszej części będą przedstawione szczegóły w jaki sposób firma Danfoss adoptowała tę metodę dla uzyskania wielu specyficznych zalet produkowanych przez nią przemienników.

3.4.1 Zasada sterownia falownika PWM według firmy Danfoss



Rys. 3.32 Podstawowy układ sterowania stosowany przez firmę Danfoss.

Algorytmem sterowania falownika metodą PWM w przemienniku napięciowym jest sterowanie wektorem napięcia VVC (ang.: Voltage Vector Control).

VVC steruje amplitudą i częstotliwością wektora napięcia wykorzystując aktualną wartość obciążenia i kompensację poślizgu. Kąt wektora napięcia jest określany w stosunku do wartości częstotliwości napięcia silnika (referencja) a także częstotliwości przełączania zaworów półprzewodnikowych falownika. Przez co uzyskuje się:

- pełną nominalną wartość napięcia zasilania silnika dla nominalnej częstotliwości (to nie jest potrzebne przy redukcji mocy silnika),

- zakres regulacji prędkości silnika wynosi 1:25 bez sprzężenia zwrotnego,
- znaczną dokładność regulacji prędkości silnika $\pm 1\%$ bez sprzężenia zwrotnego,
- odporność na skokowe zmiany momentu obciążenia silnika.

Ostatnie rozwinięcie metody modulacji VVC to VVC^{plus} w której amplituda, a także kąt wektora napięcia jak i częstotliwość są bezpośrednio kontrolowane.

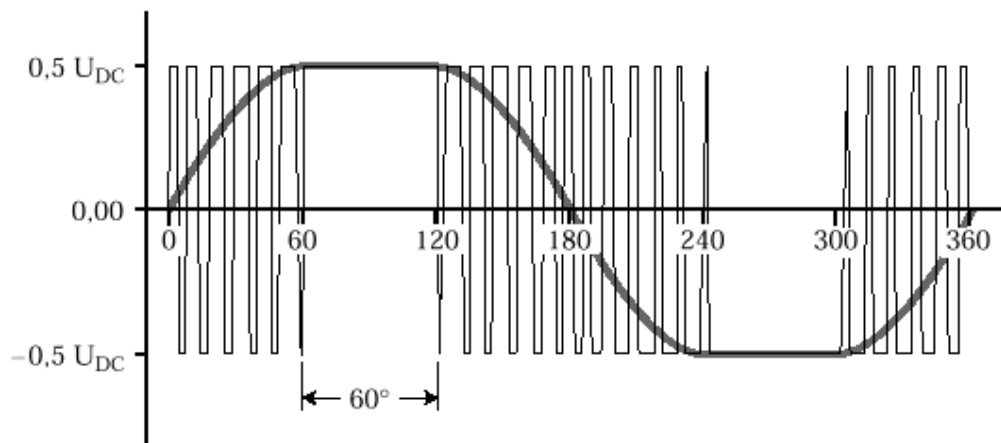
Dodatkowo rozwinięcie metody VVC do VVC^{plus} zapewnia:

- polepszenie własności dynamicznych przy małych prędkościach silnika tj. w zakresie częstotliwości 0-10Hz,
- polepszona magnetyzacja silnika,
- zakres regulacji prędkości silnika 1:100 bez sprzężenia zwrotnego,
- dokładność stabilizacji prędkości: $\pm 0,5\%$ prędkości znamionowej silnika bez sprzężenia zwrotnego,
- aktywne tłumienie rezonansu,
- sterowanie momentem silnika (w otwartej pętli sprzężenia),
- praca przy ograniczonej (zadanej wartości maksymalnej) prądu.

3.4.2 Podstawy sterowania metodą wektora napięcia VVC

Metoda VVC wykorzystuje matematyczny model silnika, na podstawie którego obliczany jest optymalny strumień magnetyczny silnika dla założonych zmian jego obciążenia przy wykorzystaniu parametrów do kompensacji poślizgu.

Ponadto przy synchronicznej metodzie modulacji - 60° PWM, zapisanej w specjalizowanym układzie scalonym ASIC, określone są optymalne czasy przełączeń dla zaworów półprzewodnikowych (IGBT's) falownika, rys.3.33.

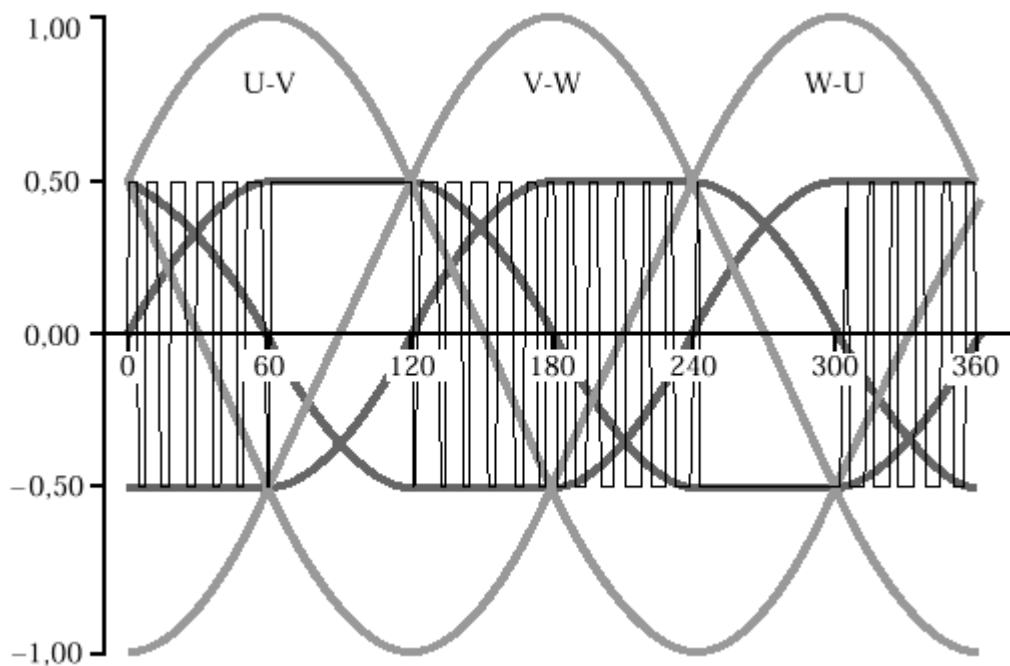


Rys. 3.33 Synchroniczna modulacja - 60° PWM jednej fazy (wg Danfoss - VVC).

Przełączanie zaworów trójfazowego falownika realizuje zasadę w której:

1. największa numerycznie faza przez 1/6 okresu sinusoidy (60°) ma stały potencjał napięcia (dodatni lub ujemny),

2. dwie pozostałe fazy zmieniają w tym czasie proporcjonalnie wartości napięć fazowych tak, aby uzyskane międzyfazowe napięcie na wyjściach mocy falownika było sinusoidą i osiągało pożądaną wartość amplitudy, rys. 3.34.



Rys. 3.34 Synchroniczna modulacja - 60° PWM dwóch faz: wzorzec przełączania dla fazy U, napięcie fazowe (między zerem i połową napięcia obwodu pośredniego), wynikowe napięcia międzyfazowe silnika.

Odmienne do metody PWM z sinusoidą modulującą, metoda VVC bazuje na cyfrowej generacji żądanego napięcia wyjściowego falownika. To zapewnia, że przemienne napięcie wyjściowe przemiennika częstotliwości osiąga wartość napięcia sieci zasilania. Prąd silnika jest sinusoidalny i praca silnika w warunkach nominalnej prędkości obrotowej jest taka sama jak przy zasilaniu bezpośrednio z sieci zasilania.

Uzyskiwany jest tutaj także optymalny strumień magnetyczny silnika, ponieważ przemiennik częstotliwości wyznacza rzeczywistą wartość rezystancji i indukcyjności stojana przy obliczaniu optymalnej wartości napięcia na wyjściach mocy falownika.

Ponieważ przemiennik częstotliwości mierzy prąd obciążenia, to może jednocześnie regulować wartość napięcia wyjściowego falownika dopasowując go do obciążenia. Napięcie wyjściowe przemiennika jest dopasowane zarówno do typu silnika jak i warunków obciążenia.

3.4.3 Podstawy sterowania metodą VVC^{PLUS}

Modulacja napięcia wg metody VVC^{plus} wykorzystuje zasadę modulacji wektorowej jako podstawę dla przemienników napięciowych typu PWM. Bazuje ona na ulepszonym modelu silnika. Powoduje to lepszą pracę przemiennika przy

zmiennym obciążeniu i lepszą kompensacją poślizgu, ponieważ oba prądy silnika - składowa czynna i składowa bierna prądu, są dostępne układowi sterowania. Określanie kąta wektora napięcia znacząco poprawia własności dynamiczne przemiennika w zakresie od 0-10Hz, gdzie standardowe napędy z przemiennikami o modulacji PWM U/F zwykle mają problemy ze sterowaniem silników.

Tablica przełączeń zaworów falownika jest tutaj wyznaczana w oparciu o zasadę sterowania wg modulacji SFAVM albo, 60° AVM co zapewnia bardzo małe pulsacje momentu w szczelinie powietrznej silnika (w porównaniu do przemiennika częstotliwości opartego na metodzie modulacji synchronicznego PWM).

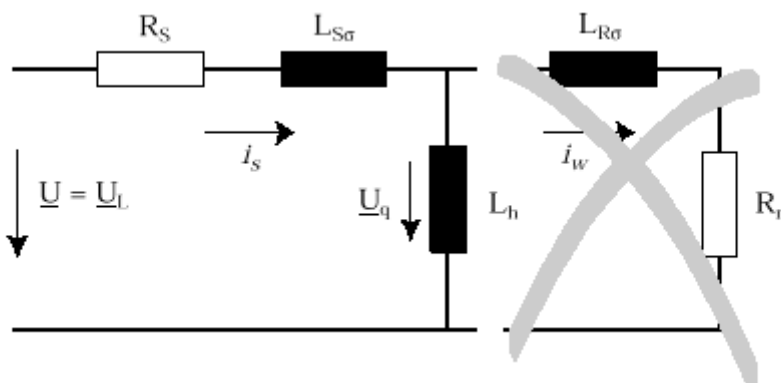
Użytkownik może wybrać preferowaną przez siebie podstawę modulacji (SFAVM lub 60° AVM) albo zezwolić na automatyczny wybór na podstawie temperatury radiatora przemiennika. Jeżeli temperatura jest poniżej 75° C wtedy do sterowania falownikiem jest stosowana metoda SFAVM, gdy temperatura wzrośnie powyżej 75° C stosowana jest modulacja 60° AVM.

Tabela. 3.02 Krótki przegląd własności obu metod modulacji:

METODA	MAKSYMALNA CZĘSTOTLIWOŚĆ KLUCZOWANIA	CECHY CHARAKTRYSTYCZNE
SFAVM	Maks. 8 kHz	<ul style="list-style-type: none"> • małe pulsacje momentu w porównaniu do synchronicznej modulacji 60°PWM (VVC), • brak przekładni silnika, • duże straty przełączania zaworów falownika.
60°AVM	Maks. 16 kHz	<ul style="list-style-type: none"> • małe pulsacje momentu w porównaniu do modulacji synchronicznej 60°PWM (VVC), • względnie duże pulsacje momentu w porównaniu do SFAVM • zmniejszenie strat przełączania zaworów falownika (o 1/3 w porównaniu z SFAVM)

Zasada modulacji jest wyjaśniona przy pomocy elektrycznego schematu zastępczego silnika, rysunki 3.35a i 3.35b oraz schematu blokowego przemiennika, rys.3.36. Należy pamiętać, że w stanie nieobciążonym żaden prąd nie dopływa do silnika: $I_w = 0$, co znaczy, że napięcie nieobciążonego silnika jest wyrażone wzorem:

$$\underline{U} = U_L = (R_s + j\omega_s L_s) \cdot i_s$$



Rys. 3.35 a Równoważny schemat zastępczy silnika trójfazowego (silnik nieobciążony).

Oznaczenia na schemacie zastępczym silnika:

R_s – rezystancja stojana,

i_s – prąd magnesujący silnika,

$L_{s\delta}$ – indukcyjna przenikalność stojana,

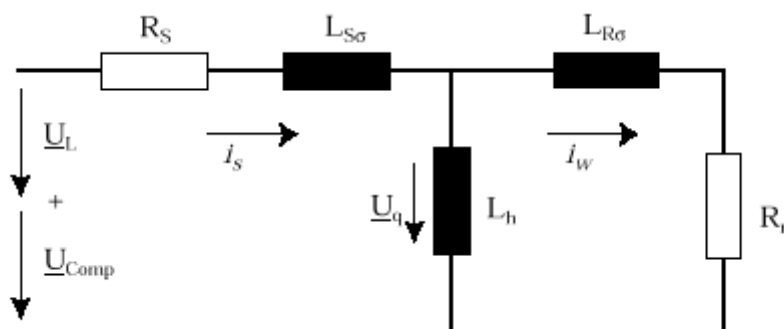
L_h – główna indukcyjność,

$L_s = (L_{s\delta} + L_h)$ – indukcyjność stojana,

$\omega_s = 2\pi f$ – prędkość obrotowa pola w szczelinie powietrznej.

Napięcie w stanie jałowym \underline{U}_L zależy od parametrów silnika (napięcie znamionowe, prąd i częstotliwość).

Przy silniku obciążonym składowa czynna prądu i_w płynie w wirniku. Dla umożliwienia przepływu tego prądu, należy zapewnić dodatkowe napięcie \underline{U}_{comp} , na zaciskach silnika.

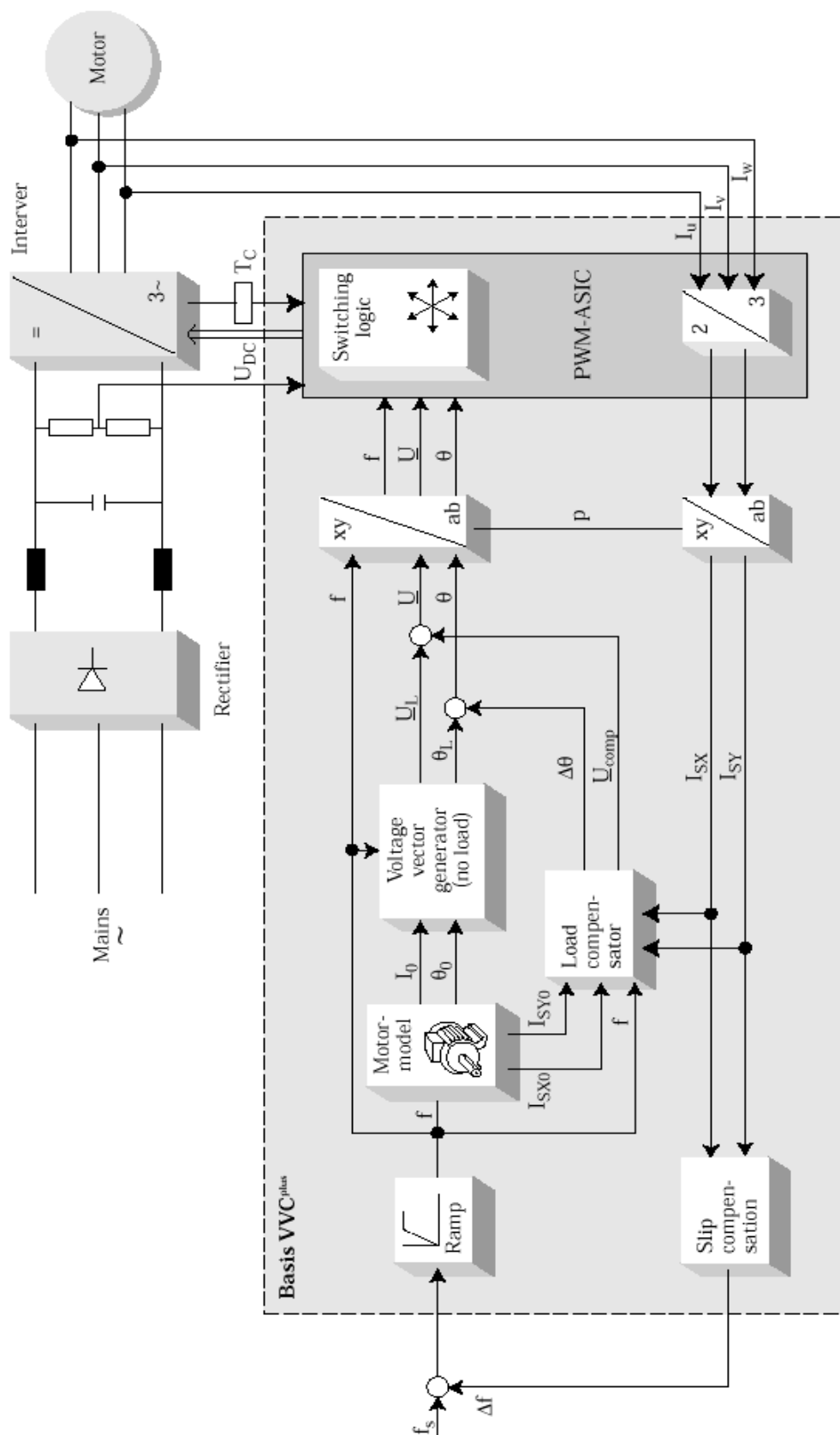


Rys. 3.35 b Równoważny schemat zastępczy silnika trójfazowego (silnik obciążony).

Dodatkowe napięcie \underline{U}_{comp} jest wykorzystywane w stanie jałowym silnika dla zapewnienia odpowiedniej wartości prądu jałowego przy niskich i wysokich prędkościach. Wartość napięcia i zakresy prędkości są zależne od danych znamionowych silnika.

Na schemacie blokowym przemiennika częstotliwości, rys. 3.36 (te same oznaczenia dla rysunków 3.35a i 3.35b) wprowadzono oznaczenia jak niżej:

f	częstotliwość wewnętrzna przemiennika,
f_s	zadana częstotliwość odniesienia (referencja),
Δ_F	obliczenie poślizgu częstotliwości,
I_{sx}	bierny prąd (obliczony),
I_{sy}	czynny prąd (obliczony),
I_{sxo}, I_{syo}	prądy w stanie jałowym dla osi x i y (obliczone),
I_U, I_W, I_V	prądy fazowe,
R_s	rezystancja stojana,
R_r	rezystancja wirnika,
θ	kąt wektora napięcia,
θ_0	wartość kąta wektora napięcia w stanie jałowym,
$\Delta\theta$	zależna od obciążenia zmiana kąta wektora napięcia (kompensacja),
T_c	temperatura na radiatorze falownika (w miejscu odprowadzania ciepła),
U_{DC}	napięcie stałe obwodu pośredniego,
\underline{U}_L	wektor napięcia w stanie jałowym,
\underline{U}_S	wektor napięcia stojana,
\underline{U}_{Comp}	napięcie kompensacji zależne od obciążenia,
U	napięcie zasilania silnika,
X_h	reaktancja,
X_1	reaktancja przenikania (upływu) stojana,
X_2	reaktancja przenikania (upływu) wirnika,
ω_s	częstotliwość stojana,
L_s	indukcyjność stojana,
L_{Ss}	indukcyjność przenikania (upływu) stojana,
L_{Rs}	indukcyjność przenikania (upływu) wirnika,
i_s	fazowy prąd pozorny silnika,
i_w	prąd czynny wirnika.



Rys. 3.36 Schemat blokowy przemiennika częstotliwości z kształtowaniem napięcia wg VVC^{plus}.

Jak pokazano na rys.3.36, model silnika obliczony dla nominalnych wartości prądów i kątów stanu jałowego, wykorzystywany jest do kompensacji obciążenia (I_{sx}, I_{syn}) i generowania wektora napięcia (I_0, Θ_0). Znajomość aktualnych parametrów silnika dla stanu jałowego umożliwia dużo dokładniejszą estymację momentu obciążenia wału silnika.

Generator wektora napięcia oblicza wektor napięcia w stanie jałowym \underline{U}_L i kąt θ_0 wektora napięcia w oparciu o częstotliwość stojana, prąd w stanie jałowym, rezystancję i indukcyjność stojana, rys.3.35a. W rezultacie amplituda wektora napięcia wynika z dodania wartości napięcia początkowego (startowego) i napięcia kompensacji obciążenia. Kąt wektora napięcia θ_L jest sumą czterech składowych czasowych i jego wartość bezwzględna definiuje położenie wektora napięcia. Jako że rozdzielczość składowych: kąta θ i częstotliwości napięcia stojana f określa rozdzielczość częstotliwości wejściowej, ich wartości są reprezentowane z 32 bitową rozdzielczością. Pierwszy składnik, kąt θ jest kątem wektora napięcia dla stanu jałowej pracy silnika i jest on uwzględniany, ażeby poprawić sterowanie tego wektora podczas przyspieszania silnika przy małych prędkościach. W efekcie uzyskuje się dobre własności sterowania bieżącym położeniem i amplitudą wektora, dlatego że bieżący prąd do wytworzenia momentu obrotowego, jest związany z aktualnym obciążeniem. Bez uwzględniania składowej wektora napięcia - kąta θ dla stanu jałowego silnika, wektor prądu ma tendencję nadmiernego wzrostu i przemagnesowywania silnika (tym samym przegrzewania), bez generowania momentu obrotowego.

Pomiar prądów przewodowych silnika I_U, I_W, I_V na wyjściach mocy falownika wykorzystywany jest do obliczenia składowej biernej prądu I_{sx} , i składowej czynnej I_{sy} .

Bazując w obliczeniach na faktycznych wartościach prądów i wartościach wektora napięcia, kompensator obciążenia wyznacza moment w szczelinie powietrznej i oblicza jak duża wartość napięcia U_{Comp} wymagana jest do utrzymania odpowiedniego pola magnetycznego przy określonym obciążeniu. Można oczekiwać kąta odchylenia wektora napięcia $\Delta\theta$ dlatego, że kompensowane jest obciążenie wału silnika. Napięcie wyjściowe jest przedstawione w formie polarnej jako p . To daje możliwość bezpośredniego przemodulowania i umożliwia powiązanie z układem PWM-ASIC.

Zastosowanie sterownia falownika metodą modulacji wektora napięcia (VVC) jest bardzo korzystne dla małych prędkości napędu, co znacznie poprawia jego osiągi dynamiczne w porównaniu do modulacji U/f dzięki bieżącej kontroli położenia kąta wektora napięcia. Ponadto znacznie poprawiają się warunki pracy stojana silnika dlatego, że układ sterowania lepiej estymuje wektor napięcia dla wymuszenia napięcia i prądu silnika przy danym obciążeniu wału silnika. To jest podstawowa różnica w porównaniu do sterowania sygnałami skalarnymi (wartości amplitudy).

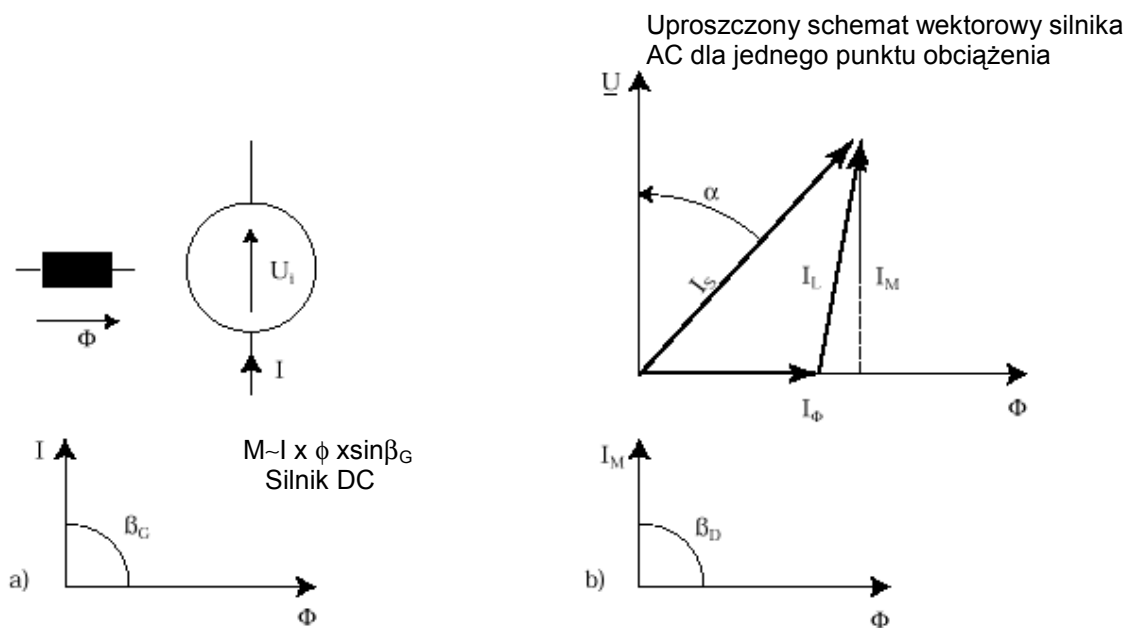
3.4.4 Polowo zorientowane sterowanie wektorowe silników

Sterowanie wektorowe może być realizowane różnymi rozwiązaniami technicznymi. Podstawowa różnica polega na kryterium obliczania wartości

składowej czynnej prądu, prądu magnesującego (strumienia) i wartości momentu obrotowego silnika.

Porównanie silnika prądu stałego DC i 3-fazowego asynchronicznego rys. 3.37, ukazuje problem określania prądów silnika. W silniku DC wielkości, które są istotne dla generowania momentu – strumień Φ i prąd twornika są sztywne pod względem wielkości i kąta względnego przesunięcia (90°). Wynika to ze zorientowania pola uzwojeń i pozycji szczotek komutatora, rys.3.37a.

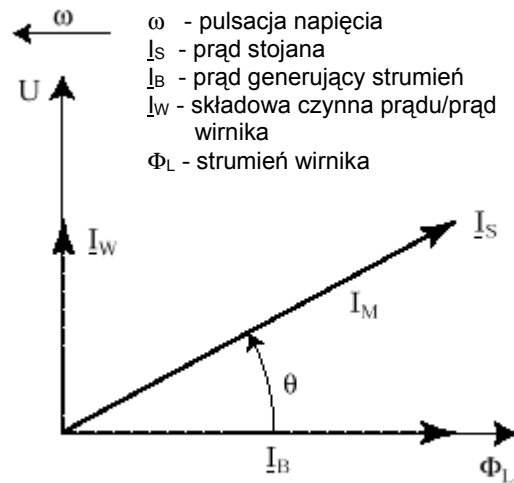
W silniku DC prąd twornika i strumień są pod kątem prostym, a żaden z nich nie osiąga zbyt dużych wartości. W silnikach asynchronicznych położenie strumienia Φ i prądu wirnika I_L zależą od obciążenia. Dalej w silnikach DC bezpośrednio nie da się wyznaczyć kąta fazowego i prądu na podstawie danych elektrycznych stojana.



Rys. 3.37 Porównanie silnika prądu stałego DC i asynchronicznego silnika 3-fazowego.

Używając matematycznego modelu silnika DC, moment może być obliczony na podstawie związku między strumieniem a prądem stojana.

Mierzony prąd silnika asynchronicznego I_s jest jednym ze składników prądu silnika, który generuje moment (prąd I_L). Wraz ze strumieniem Φ , przy kącie prostym ze składową prądu I_B generuje się moment obrotowy (I_L). Przy właściwym kącie między dwoma składowymi prądu silnika I_Φ i I_L , generowany jest odpowiedni strumień silnika, rys.3.38.



$$M \sim I_s \times \Phi_L \times \sin \Theta$$

Rys. 3.38 Obliczanie składników prądu silnika AC przy sterowaniu zorientowanym polowo.

Używając dwóch składowych prądu, na moment i strumień można oddziaływać niezależnie. Jednakże, jak przy obliczeniach z dynamicznym modelem silnika, procedura obliczeń jest dość skomplikowana i dlatego stosuje się ją w droższych cyfrowych przemiennikach napędowych.

Dlatego, że technika ta zapewnia możliwość rozdzielania sterowania obciążeniem silnika - niezależne sterowanie jego momentem na wale, jest tutaj możliwe takie sterowanie pracą silnika asynchronicznego w taki sposób, że dynamicznie zachowuje się on jak silnik prądu stałego, pod warunkiem zastosowania prędkościowego sprzężenia zwrotnego. Ta metoda sterowania 3-fazowym silnikiem asynchronicznym ma także następujące zalety:

- dobra reakcja na zmiany obciążenia,
- precyzyjna regulacja prędkości,
- pełny moment napędowy przy zerowej prędkości,
- osiągi (dynamika) porównywalne z napędami silników prądu stałego.

3.4.5 Charakterystyka U/f i sterowanie wektorem strumienia silnika

Sterowanie prędkością 3-fazowych silników rozwija się dynamicznie w ostatnich latach na bazie dwóch różnych zasad kształtowania napięcia w falowniku przemienników częstotliwości:

- typowe sterowanie U/f (sterowanie skalarne),
- sterowanie wektorem strumienia.

Obie te metody mają swoje zalety zależne od specyfiki wymagań napędu dla zapewnienia właściwej dynamiki i dokładności.

Sterowanie wg charakterystyki U/f ogranicza głębokość regulacji prędkości do zakresu w przybliżeniu 1:20 i przy niskich prędkościach wymagana jest inna (uzupełniająca) metoda sterowania. Stosowanie tej techniki jest względnie proste i polega na dopasowaniu przemiennika częstotliwości do silnika. Ta technika jest niewrażliwa na chwilowy wzrost obciążenia w całym zakresie prędkości - nie zapewnia utrzymania stałej prędkości przy zmianach obciążenia silnika.

W napędach sterowanych wektorem strumienia przemiennik częstotliwości musi być dokładnie dopasowany do danego silnika, potrzebne jest tutaj wprowadzenie precyzyjnych danych elektrycznego modelu tego silnika. Dodatkowe komponenty są wymagane przy stosowaniu sygnału sprzężenia zwrotnego.

Niektóre korzyści przy tej metodzie sterowania napędem są następujące:

- szybka reakcja dla potrzeb zmian prędkości napędu w szerokim zakresie regulacji prędkości,
- zwiększona dynamika napędu na wymuszenie zmiany kierunku wirowania,
- możliwość zastosowania tylko jednej metody sterowania napędem w całym zakresie regulacji prędkości.

Dla użytkownika optymalne rozwiązanie leży w technice, która łączy najlepsze właściwości obu metod sterowania napędem.

Cechy takie jak niewrażliwość przemiennika na skokowe zmiany obciążenia, - przeciążone lub niedociążenie silnika w całym zakresie regulacji prędkości, *to typowy bardzo ważny niekorzystny efekt sterowania wg metody U/f. Dobra i szybka reakcja przemiennika na prędkość zadaną (referencyjną), w przypadku jego sterowania metodą zorientowaną polowo*, musi być brana pod uwagę przy doborze przemiennika częstotliwości dla układu napędowego.

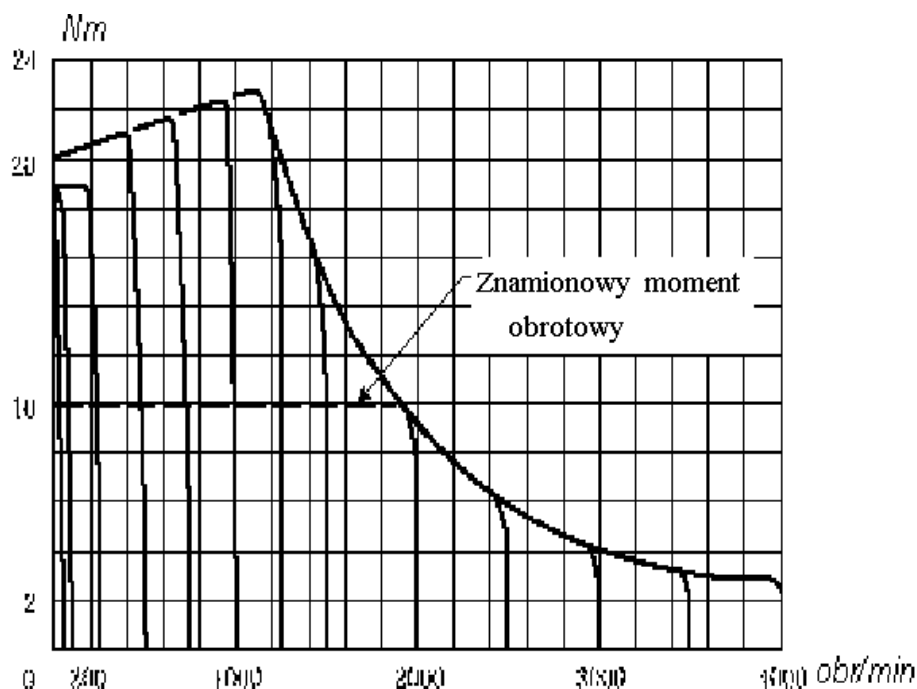
Zastosowane przez firmę Danfoss sterowanie wg metody VVC^{plus}, to kombinacja korzystnych cech sterowania napędem wg metody U/f, ze zwiększonymi osiąganymi dynamicznymi napędem uzyskiwanymi przy sterowaniu metody zorientowanej polowo. Ustawiło to nowe standardy dla napędów z regulowaną prędkością obrotową.

3.4.6 Modulacja VVC^{plus} i kompensacja poślizgu

Niezależnie od rzeczywistego momentu obciążenia, natężenie pola magnetycznego i prędkość obrotową wału napędowego silnika są utrzymane na zadanym poziomie. W tym celu są wykorzystywane dwie wyrównujące prędkość wału funkcje: kompensacja poślizgu i kompensacja obciążenia.

Kompensacja poślizgu powoduje dodanie obliczanej wartości poślizgu częstotliwości (Δf) do wartości wygaszanej przez układ sterowania, aby utrzymana była żądana wartość prędkości wirowania wału silnika, rys. 3.39. Szybkość narastania częstotliwości napięcia stojana silnika jest ograniczona przez wartość nastawy wprowadzonej przez użytkownika (ang. run up time, ramp). Estymowana wartość poślizgu – jest wyznaczana na podstawie szacowanego momentu obciążenia i

aktualnego natężenia pola magnetycznego - stąd zbyt słabe namagnesowanie silnika powinno też być uwzględniane.



Rys. 3.39 Charakterystyki zależności momentu od prędkości obrotowej wału silnika.

3.4.7 Automatyczne dopasowanie przemiennika do silnika (AMA)

Automatyczne dostrojenie wybranych funkcji przemiennika częstotliwości ułatwia instalację oraz obsługę, przez optymalizowanie parametrów zasilania silnika.

Ażeby identyfikacja dołączonego silnika i dostrojenie przemiennika przebiegły poprawnie należy przeprowadzić pomiary rezystancji stojana i indukcyjności uzwojeń silnika. Przed przeprowadzeniem operacji automatycznego pomiaru parametrów silnika przez przemiennik należy sprawdzić prawidłowość podłączenia silnika do zacisków przemiennika, aby zapewnić poprawność wprowadzanych danych pomiarowych.

Podsumowując, najnowsze metody AMA (ang. Automatic Motor Adaptation) stosowane do pomiarów parametrów stojana silnika przy nieruchomym wale napędowym, wyznaczają rezystancję i indukcyjność uzwojeń stojana. Dane wykorzystywane są w statycznym modelu silnika wprowadzanym przy uruchamianiu napędu do układu sterowania przemiennika. Automatyzacja pomiarów eliminuje straty czasu potrzebne na ręczne wprowadzanie parametrów kompensacyjnych, co czyni przemienniki częstotliwości urządzeniami łatwymi w obsłudze. Dodatkowo, dlatego że parametry dołączonego silnika są automatycznie i właściwie wprowadzone do przemiennika, uzyskuje się optymalną sprawność silnika zapewniającą wzrost efektywności i energooszczędność, a ostatecznie oszczędności.

Ponieważ parametry elektrycznego modelu dołączonego silnika są mierzone przy nieruchomym wale, dlatego w czasie wykonywania funkcji AMA wał silnika nie musi być odłączony od maszyny roboczej. Ta cecha ma oczywiste korzyści dla użytkownika przy rozruchu nowej instalacji, ponieważ prace mechaniczne są zwykle już zakończone. Przy konieczności obracania nieobciążonym wałem silnika, jak miało to miejsce w starszych rozwiązaniach funkcji AMA, rozsprzęglanie silnika w maszynie roboczej było czynnością często kosztowną i bardzo niechętnie wykonywaną.

3.4.8 Automatyczna optymalizacja zużycia energii (AEO)

Oszczędność energii jest dzisiaj decydująca w przemyśle. W wielu aplikacjach, gdzie napędy obsługują różne cykle obciążenia można oszczędzać energię, np. podczas pracy z małymi obciążeniami można zredukować natężenie pola magnetycznego w silniku.

W wielu napędach, w szczególności tam gdzie obciążenie rośnie w kwadracie w stosunku do prędkości np. wentylatory i pompy wirujące, specjalnie ukształtowane charakterystyki U/f też mogą przyczynić się do wzrostu oszczędności energii.

W przemiennikach częstotliwości stosuje się procedurę AEO (ang. Automatic Energy Optimization), która automatycznie optymalizuje zużycie energii silnika dla rzeczywistego obciążenia przy zadanej prędkości obrotowej. Jest to zapewnione poprzez wymuszenie natężenia pola magnetycznego dostosowanego do aktualnego obciążenia, co jest kompromisem między energooszczędnością i rzeczywistymi wymaganiami napędu dla zapewnienia minimalnego momentu napędowego silnika z wirnikiem klatkowym przy minimalnej, określonej przez użytkownika wartości tego momentu.

Nastawy przemiennika bazują na danych dostępnych dla układu sterowania przemiennika, dla przeprowadzania procedury AEO nie ma potrzeby wprowadzania dodatkowych parametrów regulacyjnych. W przeciwieństwie do normalnej regulacji prędkości obrotowej silnika z nominalną wartością natężenia strumienia magnetycznego, optymalizacja zużycia energii zabezpiecza silnik przed nadmiernymi stratami i stąd oszczędza się zużycie energii. Przeciętnie przy silnikach małych i średnich mocy pracujących z małym obciążeniem można oszczędzić od 3 do 5% energii. Ważnym ubocznym korzystnym efektem jest to, że silnik pracuje prawie bez wytwarzania szumu akustycznego przy małym obciążeniu w związku z małą lub średnią częstotliwością przełączania zaworów falownika.

3.4.9 Praca przy ograniczeniu prądowym

Napięciowe przemienniki częstotliwości PWM, które pracują z prostym sterowaniem wg charakterystyki U/f nie są w stanie pracować poprawnie przy prądzie w pobliżu wartości zadanego ograniczenia prądowego. Napięcie, a przez to i częstotliwość zostają zredukowane aż do uzyskania prądu o wartości ograniczenia prądowego. Jeżeli prąd ograniczania zostanie uzyskany, przemiennik częstotliwości próbuje ponownie wymusić wstępnie zadaną wartość prędkości silnika, ponownie napięcie i częstotliwość są powiększane. Prowadzi to do zwiększania lub redukcji prędkości silnika, co powoduje niepożądane wahania prędkości układu

napędowego, w szczególności negatywnie wpływa na pracę podzespołów mechanicznych napędu i może mieć istotny wpływ na pogorszenie jakości wytwarzanego produktu finalnego.

W pewnych sytuacjach może tutaj wystąpić nagle zatrzymanie silnika np., gdy:

- zadany w przemienniku czas przyspieszania / redukcji częstotliwości (ang. ramp up/down time) jest wykorzystywany do wymuszenia zmian napięcia i częstotliwości wyjściowej falownika,
- obciążenie silnika jest zmniejszane.

Dzisiejsze przemienniki częstotliwości PWM używają zadanego w przemienniku czasu przyspieszania / redukcji częstotliwości do wyznaczania punktu pracy falownika, przy którym wstępnie wyznaczona wartość ograniczenia prądowego nie będzie przekroczona i wtedy sterowanie pracą silnika jest płynne do tego punktu pracy. Sygnał ostrzeżenia powiadamia użytkownika, że ograniczenie prądowe zostało osiągnięte. Przemiennek częstotliwości nie będzie się wyłączał samoczynnie, jeżeli nieodpowiednia częstotliwość zostanie zadana.

3.4.10 Funkcje ochronne

Przemienniki częstotliwości VVC⁺ są wyposażone w układy zabezpieczeń, które powodują, że obwód mocy przemiennika jest inteligentny i odporny na zakłócenia. Dzięki temu uzyskuje się zabezpieczenie przemiennika i silnika przy możliwie najniższych kosztach. Wysoki poziom skuteczności zabezpieczeń jest uzyskiwany poprzez zastosowanie techniki cyfrowej bazującej na powtarzalnych pomiarach sygnałów potrzebnych układowi sterowania i zastosowaniu układu szybkiego cyfrowego ich przetwarzania - ASIC w miejsce pasywnych komponentów mocy, takich jak dławików AC na wyjściach mocy falownika.

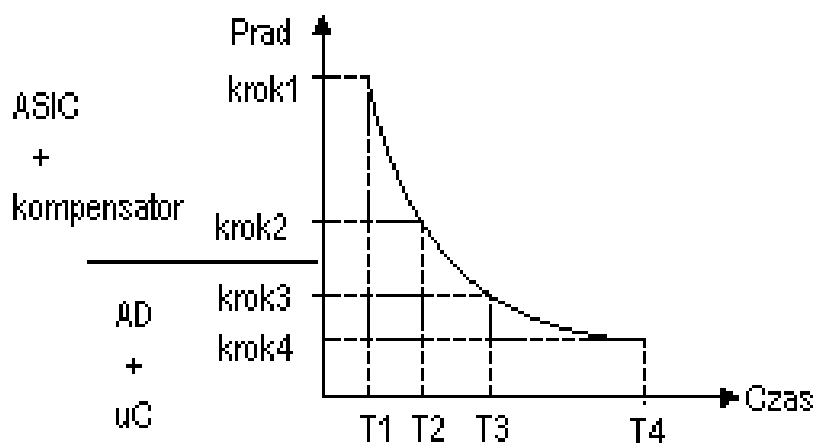
Przekształtnik jest chroniony przed wszystkimi przyczynami uszkodzeń włącznie ze zwarciami gałęziowymi falownika, jeśli czas martwy t_d gałęzi półmostka falownika jest właściwy i właściwie jest zaprojektowany układ sterowania bramką tranzystorów IGBT. Każdy tranzystor IGBT ma galwanicznie odseparowane napięcie obwodu mocy od napięcia sterowania, poprzez zastosowanie transformatorów pośrednich w obwodzie sterowania bramką.

Prąd i temperatura przemiennika są przesyłane do specjalizowanego układu scalonego ASIC przez przetwornik analogowo-cyfrowy lub komparator. Monitoring błędów lub stanów awaryjnych w procedurze ASIC generuje, jeśli jest konieczne odpowiednie sygnały uruchamiające właściwą funkcję ochronną, prąd - kroki 1 i 2 wg rys. 3.40. Ażeby ograniczyć rozmiar układu ASIC i tym samym wykonywanej w nim procedury ochronnej, do kontroli prawidłowości działania przemiennika w zakresie sygnałów poziomu drugiego, prąd - kroki 3 i 4 wg rys. 3.40, wykorzystywany jest wolniejszy główny mikroprocesor układu sterowania.

Ochrona nadprądowa

Ochrona przeciążeniowa jest zilustrowana na rys. 3.40. Przedstawia on różne "filtry czasowe", które określają czas, po jakim nastąpi samoczynne wyłączenie się

przebiegu prądu zależy od wartości prądów przeciążeniowych falownika. Poziom zadziałania układu wyłączającego i filtr czasowy może być dostosowywany indywidualnie by zapewniać maksymalną odporność przed zakłóceniami pracy falownika przebiegu prądu. Zakłócenia w tym sensie mogą być zarówno spowodowane przeciążeniem lub zwarcie wyjść mocy falownika, jak i krótkotrwałymi przeciążeniami, wynikającymi np.: z podłączenia przebiegu prądu długimi kablami silnikowymi. Aby uczynić przebiegu prądu bardziej odpornym na zakłócenia typu prądowego zastosowano dodatkowy filtr czasowy.



Rys. 3.40 Stopienie przeciążenia prądowego falownika przebiegu prądu napięciowego: poziom I - kroki 1 i 2 - szybka reakcja w ASiC, poziom II - kroki 3 i 4 - wolniejsza reakcja μP głównego.

Filtry czasowe określają, przy jakiej częstotliwości i jak często falownik przebiegu prądu będzie się samoczynnie załączał do pracy przed ostatecznym całkowitym zablokowaniem (prąd poziomu 1). Użytkownik zadaje parametry filtra czasowego T4 i wartość prądu poziomu 4.

Przykład:

Dla maszyny; 4–biegunowej, o mocy 1.5 kW, silnik ma być zasilany prądem $I=4A$ przez 5 sekund, to znaczy że $T4=5$ sekund, a poziom prądu $I4=4A$

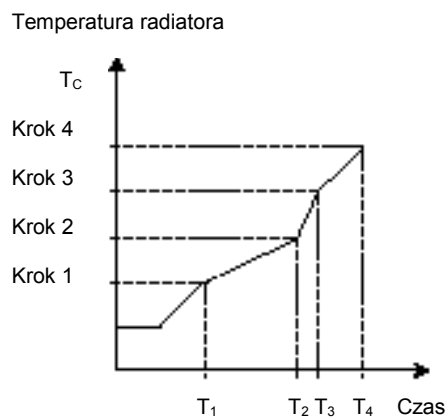
Pozostałe dane są określone przez układ sterowania i wartość sprzętowego ograniczenia prądowego przebiegu prądu częstotliwości (ang. hardware limits).

Taki układ zabezpieczenia nadprądowego falownika wykorzystuje zwiększoną odporność nowej generacji tranzystorów IGBT i gwarantuje wysoką skuteczność zabezpieczenia bez konieczności używania dodatkowych biernych komponentów, takich jak dławiki silnikowe, dołączane do wyjść mocy falownika przebiegu prądu częstotliwości (ang. motor coils).

Ochrona temperaturowa falownika

Temperatura radiatora falownika jest mierzona bezpośrednio T_C , rys.3.41 i straty w falowniku $P_{\text{loss,WR}}$ są obliczane z uwzględnieniem, że temperatura radiatora jest zależna od temperatury otoczenia, warunków chłodzenia i strat własnych falownika. Dokładne określenie strat falownika umożliwia właściwy dobór tranzystorów IGBT.

Poprzez analizę bezpośrednio mierzonej temperatury T_C i obliczonych strat falownika $P_{\text{loss,WR}}$ możliwe jest optymalne ustawienie parametrów przemiennikowego napędu do aktualnych warunków pracy. Zwykle problemem jest dobranie właściwej częstotliwości przełączania zaworów IGBT falownika i wartości prądu wyjściowego w relacji do warunków chłodzenia, napięcia zasilania i temperatury otoczenia.



Rys. 3.41 Poziomy przekrój temperatury radiatora falownika.

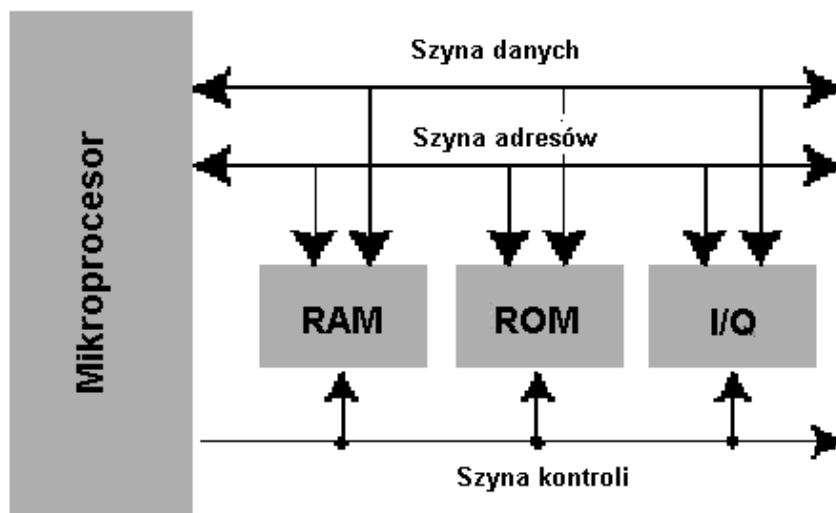
Na rys. 3.41 przedstawiono przykład, w którym sygnał temperaturowy jest przekazywany odpowiednio wcześniej do użytkownika dla zapewnienia czasu na uruchomienie wentylatora chłodzenia, przed wyłączeniem się falownika wskutek przegrzania.

W chwili T_1 częstotliwość przełączania zaworów falownika jest redukowana: szum elektromagnetyczny silnika wzrasta i sygnał ostrzeżenia jest podawany jako zwrotna informacja. W chwili T_2 redukowane jest napięcie wyjściowe falownika, wtedy ograniczany jest maksymalny moment silnika i wysyłany dodatkowy sygnał ostrzeżenia. W chwili T_3 prąd wyjściowy falownika jest ograniczany do zadanej wartości minimalnej i trzeci sygnał ostrzeżenia zostaje wysłany. W końcowej fazie wzrostu temperatury radiatora falownika użytkownik ma wybór: zatrzymać silnik w sposób kontrolowany lub pozwolić mu dalej pracować ryzykując, że w chwili T_4 przemiennik ostatecznie sam zatrzyma pracę falownika, a tym samym wyłączy napęd.

Takie inteligentne rozwiązanie zabezpieczenia termicznego falownika umożliwia efektywne wykorzystanie elementów mocy falownika i gwarantuje pewność działania napędu, oraz tolerancje przejściowych zakłóceń pracy falownika przemiennika częstotliwości. Dodatkowo użytkownik może zaprogramować rodzaj reakcji przemiennika przy wystąpieniu określonego zakłócenia.

3.4.11 Ogólne wiadomości o układzie z mikroprocesorem.

Układ scalony składa się z trzech podstawowych elementów, każdy z nich ma specjalne zadanie.



Rys. 3.42 Schemat i zasada działania układu scalonego z mikroprocesorem.

Mikroprocesor steruje pracą układu i jeżeli otrzymuje poprawną sekwencję instrukcji (programów), to jest zdolny wykonywać pewną liczbę funkcji w pamięci procesora i jednocześnie kontrolować pracę wszystkich innych podzespołów układu.

Pamięć komputera często wykorzystuje układ pamięciowy typu EPROM (ang. Erasable Programmable Read Only Memory). EPROM zachowuje zawartość pamięci nawet, gdy napięcie jest wyłączone. Informacja w EPROM może być programowana lub usuwana za pomocą promieni ultrafioletowych. Taką operację można wykonywać za każdym razem. Układ pamięciowy EPROM różni się tym od układu PROM, że ten układ można tylko raz programować. RAM (pamięć operacyjna) jest to pamięć, do której mikroprocesor zbiera i zapisuje dane. RAM traci informacje, jeżeli napięcie jest wyłączone. Po ponownym uruchomieniu wcześniej zapisane informacje, o ile nie zostały zapisane na dysku fizycznym to zostaną utracone.

Trzeci element oznaczony jako I/O, zawiera wejścia i wyjścia do komunikowania się z innymi elektronicznymi układami lub urządzeniami np.: drukarką. Magistrala danych (ang. bus) jest wiązką przewodów, która łączy indywidualne elementy elektroniczne z mikroprocesorem. Magistrala danych przesyła dane między poszczególnymi elementami układu, magistrala adresowa sygnalizuje, gdzie dane mają być przesyłane i monitoruje transmisję dla zapewnienia prawidłowości ich zapisu i odczytu.

3.4.12 Zastosowanie komputerów w przemiennikach częstotliwości

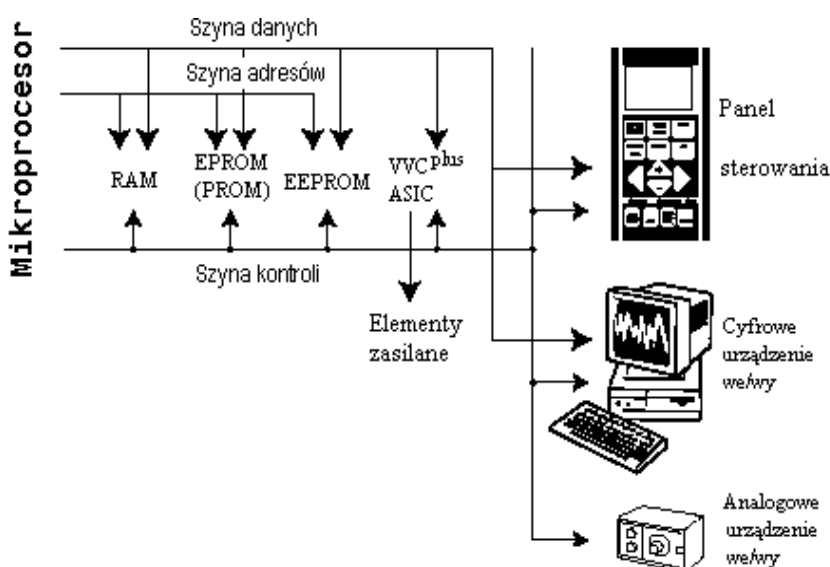
W stosunku do typowego układu z mikroprocesorem zawierającym RAM, ROM i I/O, chip mikroprocesorowy przemiennika częstotliwości zawiera pewną liczbę dodatkowych elementów, w tym EEPROM (Elektrycznie Kasowalny PROM), który umożliwia użytkownikowi wprowadzanie programu do komputera. EEPROM może być zaprogramowany lub rozprogramowany przy użyciu sygnału elektrycznego. Zastosowanie pamięci typu EEPROM jest konieczne dla wprowadzenia indywidualnych dla danego napędu nastaw programowych i kiedy programujemy przemiennik częstotliwości do specjalnych zadań.

Chip mikroprocesorowy przemiennika częstotliwości może dodatkowo zawierać układ ASIC. To jest specjalny cyfrowy układ scalony realizujący funkcje określone przez jego producenta, wykorzystywany do realizacji specyficznych zadań np. zawiera szczegółowy zapis zasady modulacji napięcia wyjściowego falownika.

Karta sterowania adresami wejść i wyjść

Układy sterowania regulowanych układów napędowych wykorzystujących przemienniki częstotliwości determinują ilość i rodzaj wejść i wyjść analogowych i cyfrowych karty sterującej przemiennika.

Przemiennik częstotliwości w zautomatyzowanych układach napędowych musi otrzymywać analogowe i cyfrowe sygnały sterowania. Analogowe sygnały sterowania mogą przyjmować wszystkie wartości zawarte w pewnych granicach, np. w zakresie 4-20 mA, 0-10 V. Cyfrowe sygnały sterujące są wartościami dwustanowymi - binarnymi 0/1 np. 0/24V, styki: zwarte / rozwarte.



Rys. 3.43 Typowy układ mikroprocesorowego sterowania przemiennika częstotliwości.



Rys. 3.44 Rodzaje sygnałów sterujących: a) sygnał analogowy, b) sygnał cyfrowy.

Sygnały te nie są standardem dla układów sterowania. Odkąd półprzewodniki są używane w cyfrowych układach sterowania, wejście cyfrowe musi otrzymywać pewne minimum prądu lub napięcia, żeby zapewnić niezawodne połączenie sygnałowe, zwykle są to sygnały o wartościach z zakresu 20-30V i 10-500mA. Pewne wartości sygnałów stały się standardem układów sterowania, jak np. 0 / 10V lub 0-20mA dla wejść i wyjść analogowych.

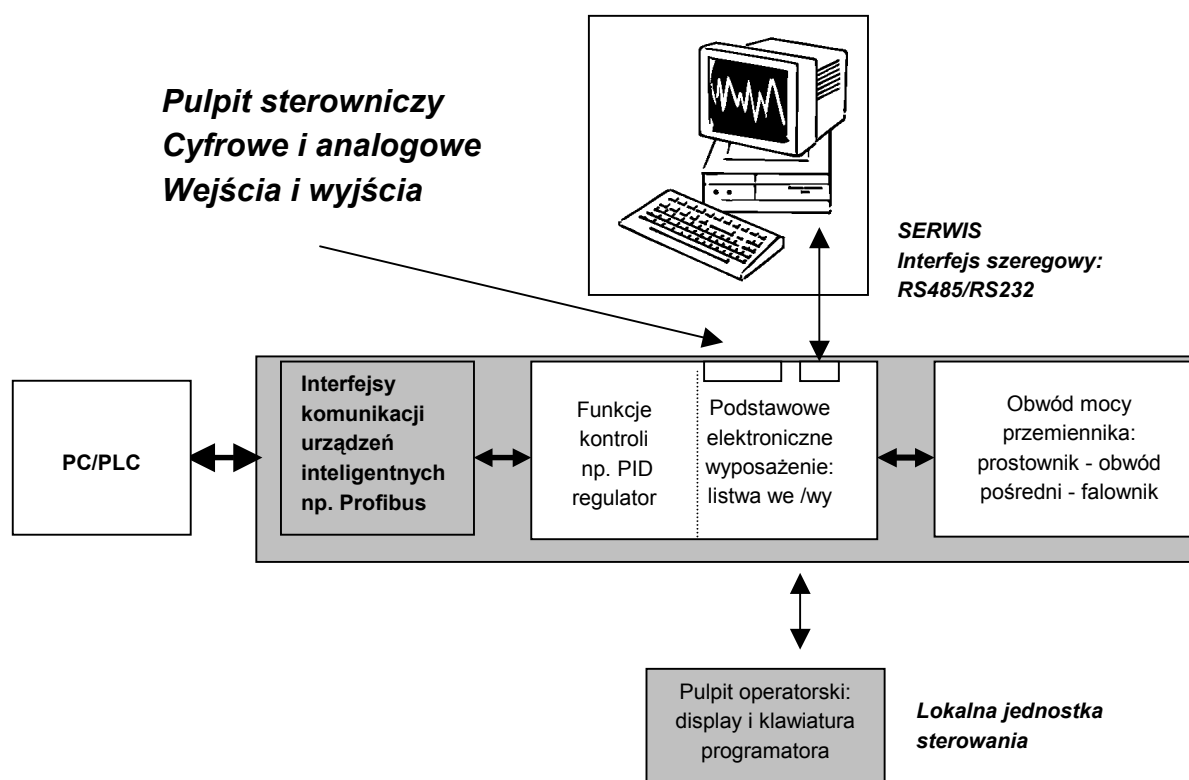
Cyfrowe wyjścia układów PLC (ang. Programmable Logic Controller) są dopasowane do cyfrowych wejść przemienników częstotliwości. Wartości znamionowe sygnałów cyfrowych zawierają się między 10 - 30V - sygnały napięciowe przy jednocześnie wpływającym do tego wejścia prądzie wynoszącym minimum 10mA przy 20V. Wewnętrzna rezystancja takiego wejścia sygnałowego może wtedy wynosić maksimum 2 kΩ.

3.5 Komunikacja

Zasadniczo, cyfrowe przemienniki częstotliwości są w stanie przetwarzać dane z urządzeń peryferyjnych przy użyciu trzech interfejsów komunikacyjnych:

1. Typowa listwa zaciskowa wejść i wyjść dla sygnałów cyfrowych i analogowych.
2. Pulpit sterowniczy z monitorem alfanumerycznym i klawiaturą.
3. Interfejs szeregowy dla zapewnienia realizacji cyfrowej funkcji sterowniczych i diagnostyki.

Zależnie od zastosowania, komunikacja może być uzupełniona przez inteligentny interfejs szeregowy o dużej szybkości transmisji danych jak np. PROFIBUS. To może mieć formę niezależnej grupy jednostek, które mogą zawierać własny pomocniczy mikroprocesor i urządzenia peryferyjne (ang. Dual Port Ram).

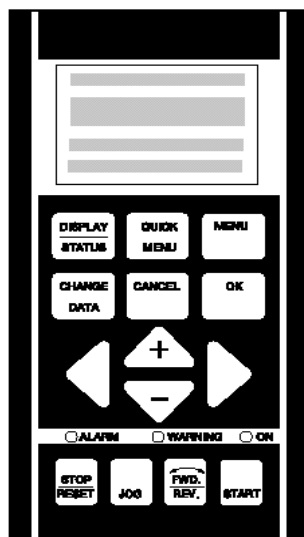


Rys. 3.45 Podstawowa koncepcja układów komunikacji przemiennika częstotliwości.

Pulpit operatorski z monitorem i klawiaturą jest integralnym podzespołem prawie każdego cyfrowego przemiennika częstotliwości. Listwa zaciskowa zawiera minimum tyle dołączonych przewodów sygnałowych, ile sygnałów jest do przemiennika dostarczanych i z niego otrzymywanych, plus masa odniesienia lub napięcie zasilania sygnałów sterujących np. +24V. Oznacza to, że liczba podłączonych do przemiennika przewodów sygnałowych zależy od rodzaju wykonywanych przez przemiennik zadań oraz liczby i rodzaju wejść i wyjść na listwie

sterowania. Indywidualne terminale sygnałowe mogą być oczywiście programowane do realizacji różnych zadań.

Monitor (ang. display) umożliwia monitorowanie pracy przemiennika częstotliwości i może być pomocny przy diagnozie błędów i uszkodzeń takich jak: odłączenie się przewodu sygnałowego, czy zanik sygnału sterującego.



Rys. 3.46 Panel LCP - lokalnego sterowania i monitorowania przemiennika częstotliwości.

W układzie napędowym przemiennik częstotliwości powinien być aktywnym jego komponentem i umożliwiać pracę ze sprzężeniem zwrotnym lub bez tj. pracować z zamkniętą pętlą regulacji lub pracować z pętlą otwartą.

Przy pracy w otwartej pętli regulacji układ napędowy z przemiennikiem częstotliwości może być sterowany przy użyciu jedynie potencjometru, ale w zamkniętej pętli regulacji sterowanie jest bardziej złożone i potrzebny jest sygnał sprzężenia zwrotnego i sygnał wartości zadanej - wartość referencji.

3.6 Sterowniki swobodnie programowane PLC

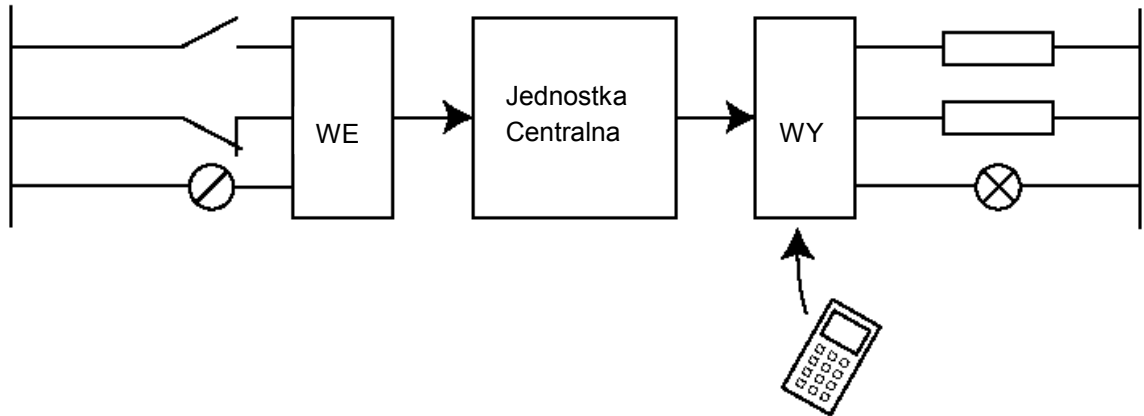
Sterowniki swobodnie programowane PLC (ang. Programmable Logic Controllers) są zdolne obsługiwać obydwa rodzaje sygnałów: sygnały analogowe (np. prędkość silnika, moc czy moment silnika) i sygnały cyfrowe (np. przekroczenie zakresu regulacji czy dopuszczalnego prądu obciążenia). Może także wydawać i reagować na rozkazy z innych urządzeń (np. start, stop, zmiana kierunku obrotów).

Jedną z głównych korzyści sterowników PLC jest to, że potrafią one odczytać i w sposób ciągły gromadzić sygnały wyjściowe – takie jak prąd i częstotliwość silnika – generowane przez przemiennik częstotliwości. Powoduje to znaczące ulepszenie zarządzania przeważaniem danych w stosunku do użycia prostego cyfrowego przyrządu z wizualizacją.

Sterownik PLC składa się z trzech podstawowych elementów:

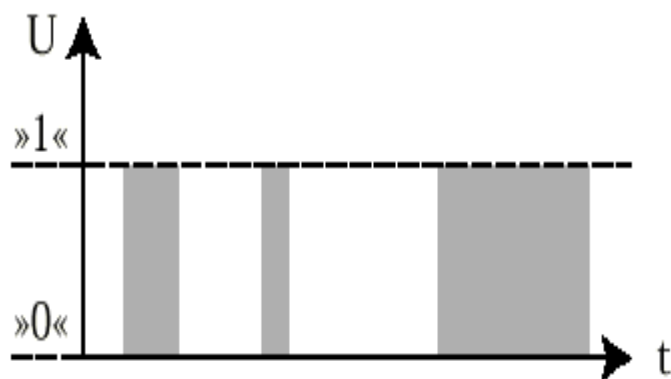
1. jednostki centralnej - mikroprocesora,

2. modułu wejść i wyjść,
3. jednostki programowania sterownika.



Rys. 3.47 Podstawowa struktura sterownika swobodnie programowanego PLC.

Jednostka programująca (programator sterownika) modyfikuje program sterowania dla jednostki sterującej, który sortuje sygnały wejściowe i aktywuje odpowiednie sygnały wyjściowe. Program ten jest uaktywniany przez jednostkę centralną. Jednostka centralna jest tylko zdolna pracować z cyfrowymi sygnałami, które zmieniają się pomiędzy dwiema wartościami napięć np. 24V i 0V, – wyższe napięcie odpowiada logicznemu 1 lub ZAŁ. (ang. ON) i niższe napięcie odpowiada logicznemu 0 lub (ang. Off).



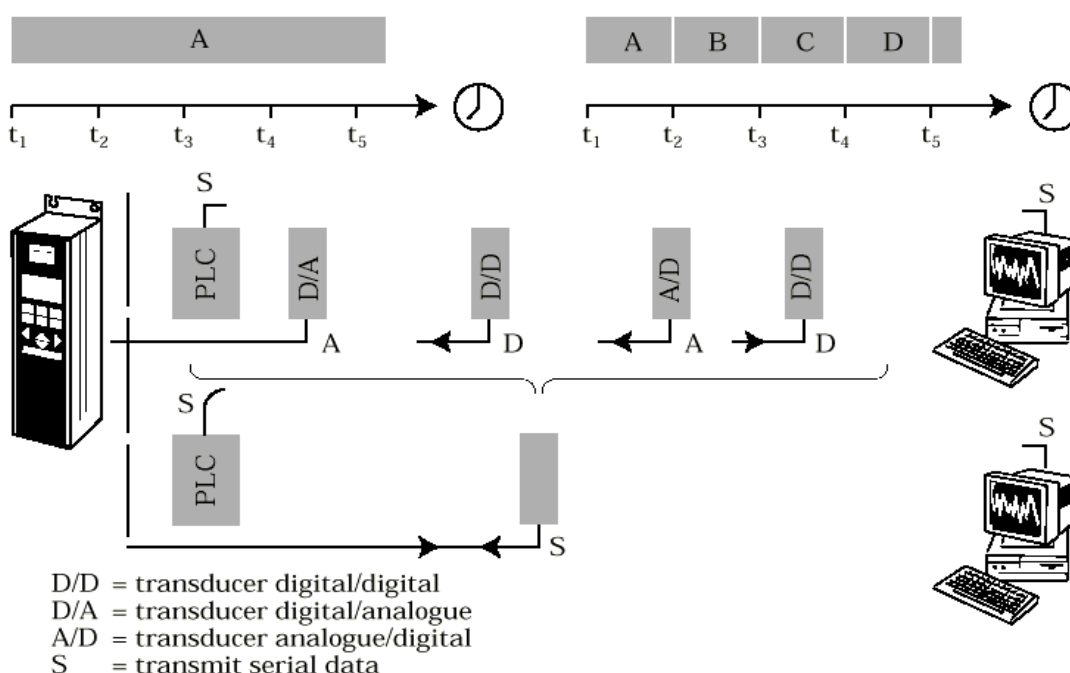
Rys. 3.48 Sygnały cyfrowe mogą przyjmować wartość ON lub OFF w krótszych lub dłuższych przedziałach czasowych.

Zwykle przemiennik częstotliwości i PLC są połączone w jeden z dwóch różnych sposobów – albo bezpośrednio poprzez listwę WE / WY, albo wykorzystując łącze komunikacji szeregowej. Kiedy bezpośrednio połączone są wejścia i wyjścia ze sterownika PLC do wyjść i wejść przemiennika częstotliwości, konieczne jest

stosowanie indywidualnych kabli sygnałowych między poszczególnymi wejściami i wyjściami. Wejścia i wyjścia sterujące PLC zastępują oddzielne elementy sterowania, takie jak: potencjometr, styki sterujące (kontrolni) i przyrządy wskazujące.

3.6.1 Komunikacja przez łącze szeregowe

Przy szeregowej komunikacji, sygnały są transmitowane przez jedną parę przewodów. W okresie t_1-t_2 , przesyłana jest informacja A; w okresie t_2-t_3 , przesyłana jest informacja B, itd. Ten typ transmisji danych informacji jest nazwany komunikacją szeregową, rys 3.49.



Rys. 3.49 Komunikacja szeregową zapewnia szybką transmisję danych i relatywnie prostą instalację.

Są trzy główne zasady szeregowej komunikacji, ale decydującym czynnikiem jest liczba jednostek, które muszą komunikować się nawzajem i szybkość działania.

Można używać dużej liczby przewodów do wysyłania i otrzymywania informacji do i od każdej jednostki w systemie lub można użyć tylko dwóch przewodów przy zastosowaniu transmisji szeregowej. W systemach dwu-przewodowych kilkanaście odbiorników może być połączonych do jednego nadajnika S lub wszystkie połączone jednostki mogą wysyłać i przyjmować dane. Takie rozwiązanie wykorzystuje szynę zbiorczą transmisji danych.

Dołączone do szyny danych jednostki sterowania muszą mieć ten sam poziom sygnału, aby zapewnić prawidłową komunikację i możliwość stosowania szeregowej transmisji danych.

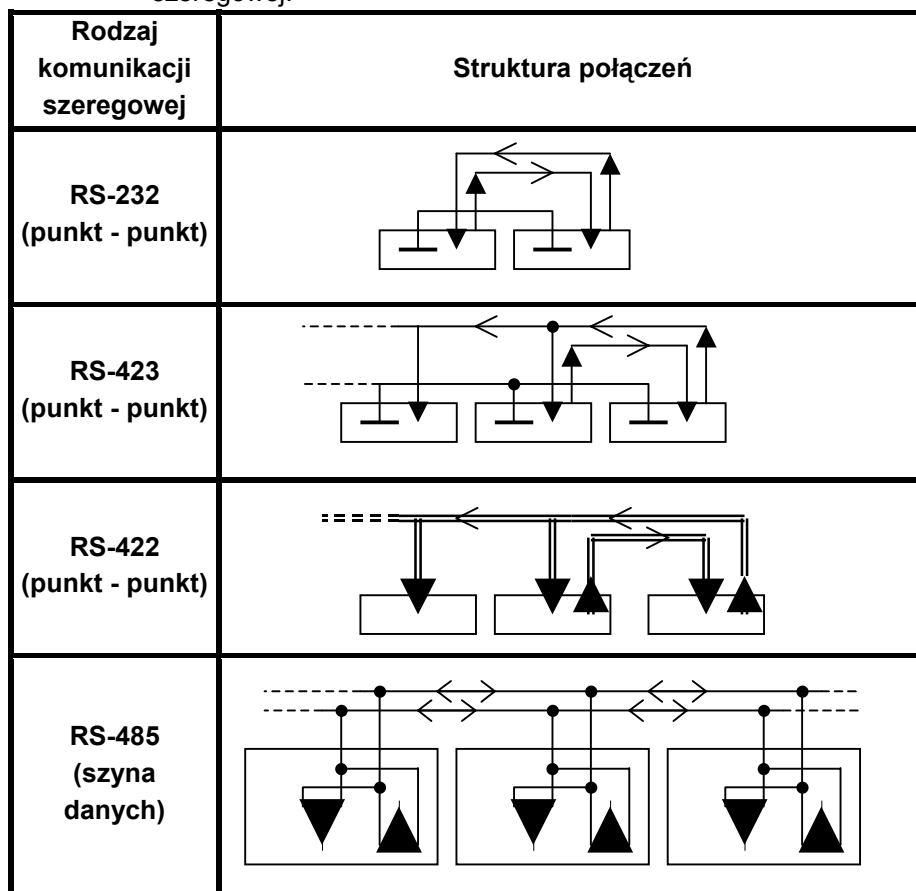
Ponadto jednostki sterujące pracujące w jednym systemie muszą mieć tę samą strukturę słowa danych aby odbiornik mógł je prawidłowo zidentyfikować. Struktura układu komunikacji szeregowej i struktura słowa danych podlegają wielu

szczegółowym standardom i normom. Wspólny poziom sygnału nie posiada ściśle określonej wartości. W konsekwencji oprogramowanie w jednostkach musi być dopasowane do ustalonego w danym rozwiązaniu poziomu sygnału.

Tabela. 3.03 Podstawowe własności wybranych standardów komunikacji szeregowej.

Rodzaj komunikacji szeregowej	RS-232 (punkt - punkt)	RS-423 (punkt - punkt)	RS-422 (punkt - punkt)	RS-485 (szyna danych)
Maks. liczba urządzeń w sieci - szyn danych	1 nadajnik 1 odbiornik	1 nadajnik 10 odbiorników	1 nadajnik 10 odbiorników	32 nadajniki 32 odbiorniki
Max odległość	15 m	1200 m	1200 m	1200 m
Liczba przewodów	Dupleks: min. 3 - plus opcjonalnie: status sygnałów	Dupleks: min. 3 - plus opcjonalnie: status sygnałów	Dupleks: 4	Semi dupleks: 2
Poziom sygnału	+/-5 V min. +/-15 V maks.	+/-3,6 V min. +/-6 V maks.	+/-2 V min	+/-1,5 V min
Maks. napięcie wspólne	± 25 V	± 6 V	+ 6 V - 0,25	+12 V - 7

Tabela. 3.04 Struktura układów przesyłania danych w wybranych standardach komunikacji szeregowej.



Nadajnik - ▲ Odbiornik - ▼

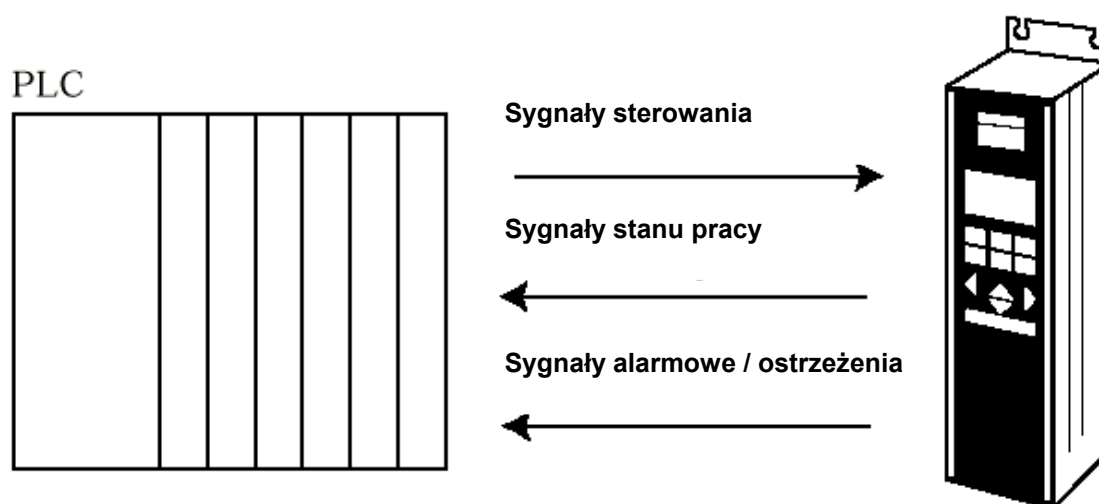
RS 232 jest powszechnie znanym standardem. Jego używanie jest ograniczone do krótkich odległości między komunikującymi się urządzeniami i niskiej szybkości przesyłania danych. RS-232 zwykle używany tam, gdzie wymiana danych odbywa się okazjonalnie. Np. do komunikacji szeregowej między komputerem, a urządzeniem zewnętrznym, takim jak: drukarka, modem, ploter lub mysz komputerowa.

RS 422 i 423 rozwiązują problem zwiększonej odległości i szybkości transmisji w stosunku do RS 232 i dlatego są często używane w układach automatyki do komunikacji z PLC, gdzie wymiana danych ma charakter ciągły.

RS 485 jest jedynym standardem, który umożliwia połączenie i właściwą współpracę dużej ilości jednostek, a także komunikację pomiędzy tymi jednostkami poprzez jedną parę przewodów sygnałowych. Ten typ połączenia wymaga tylko dwóch przewodów, aby umożliwić jednostkom dwukierunkowy przesył danych, tj. nadawanie i odbiór. Dwuprzewodowe połączenie między jednostkami jest nazywane szyłą transmisji danych, tab. 3.04.

Występują tutaj trzy rodzaje sygnałów od komunikowania się sterowników PLC/PC z przemiennikami częstotliwości:

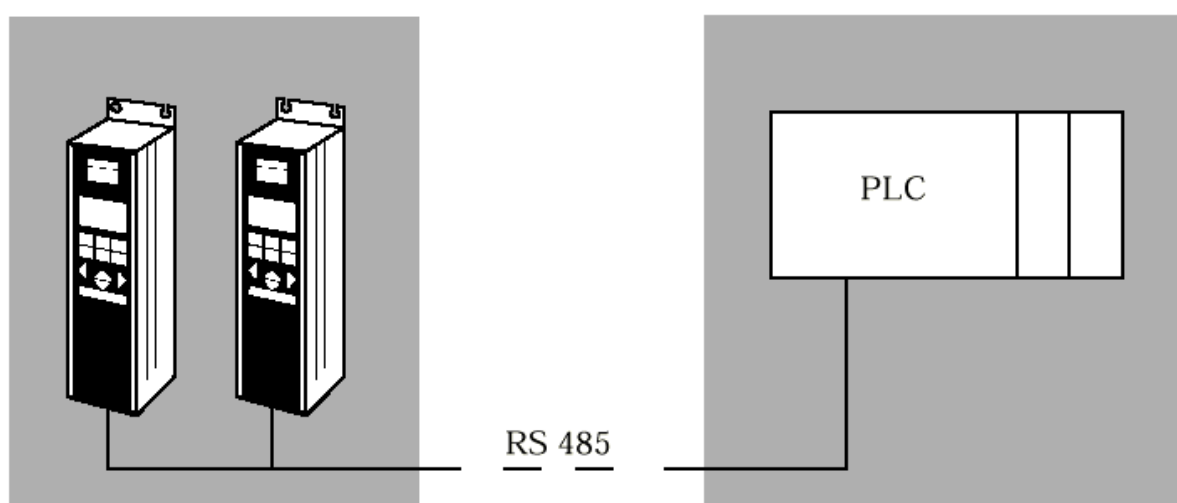
1. Sygnały sterowania przemiennikiem: szybkość, start / stop, zmiana kolejności faz napięcia wyjściowego falownika, dla zmiany kierunku wirowania silnika, itp.
2. Sygnały stanu pracy przemiennika: aktualny prąd silnika, aktualna częstotliwość napięcia zasilania silnika, maksymalna zadana częstotliwość napięcia zasilania silnika, itp.
3. Sygnały alarmowe i ostrzeżenia: zatrzymanie silnika, temperatura krytyczna, itp.



Rys. 3.50 Trzy rodzaje sygnałów komunikacyjnych pomiędzy sterownikiem PLC/PC i przemiennikiem częstotliwości.

Przebiegnik częstotliwości otrzymuje sygnały sterowania od sterownika PLC i w ten sposób steruje pracą silnika. Ponadto przebiegnik wysyła sygnały stanu pracy do sterownika PLC oraz na bieżąco dostarcza informację o wpływie sygnałów sterujących na pracę silnika czy układu napędowego. Jeżeli przebiegnik częstotliwości zatrzyma się z powodu nienormalnych warunków pracy, wtedy odpowiednie sygnały alarmowe przesyłane są do sterownika PLC.

RS 485 umożliwia jednoczesne połączenie różnych struktur układów sterowania i monitorowania procesu, np. możliwe jest zainstalowanie PLC w pulpicie sterowniczym, skąd można sterować pracą większej liczby przebiegników częstotliwości lub innymi odległymi urządzeniami umieszczonymi w innym pulpitych sterowniczych.



Rys. 3.51 Wykorzystanie szyny transmisji danych w standardzie RS485 umożliwia budowę różnych struktur układów sterowania.

Ze zmianą technologii analogowej na cyfrową szeregowo interfejsy sterowania stają się coraz powszechniej wykorzystywane w przebiegnikach częstotliwości do łączenia ich z innymi urządzeniami:

- wyposażeniem testującym,
- urządzeniami eksploatacji,
- urządzeniami serwisowymi,
- urządzeniami automatyki,
- urządzeniami wizualizacji i monitorowania,
- urządzeniami nadmiarowymi w układach redundancyjnych - dla zwiększenia niezawodności pracy układów napędowych.

Aby zapewnić wymianę informacji pomiędzy przebiegnikiem częstotliwości, a sterownikiem PLC lub komputerem PC poprzez interfejs szeregowy, wymagany jest określony protokół przesyłania danych. Protokół określa maksymalną długość

informacji (słowo danych) i indywidualne pozycje danych umieszczonych w łańcuchu informacji.

Ponadto protokół oferuje następujące podstawowe funkcje:

- wybór danej jednostki (adres jednostki),
- wymagania jednostki przy przesyłaniu danych np. nominalna wartość prądu / napięcia,
- wymagania parametrów elektrycznych do budowy słowa danych dla indywidualnych jednostek układu komunikacji szeregowej wynikające z własności portów adresowych (np. wartości nominalne, ograniczenia wartości prądu / częstotliwości),
- wymagania parametrów elektrycznych dla danych adresowanych jednocześnie do wszystkich jednostek (ang. broadcast), które umożliwiają funkcje takie jak równoczesny stop / start, jeśli sprzężenie zwrotne od poszczególnych jednostek nie jest wymagane.

Producenci do urządzeń przemysłowych stosują często swoje własne protokoły komunikacyjne, co może stwarzać problem dla użytkownika, który musi napisać program obsługi tych urządzeń przez posiadany już PC lub PLC. Także użytkownik nie może umieszczać sprzętu pochodzącego od różnych producentów w tej samej strukturze układu komunikacji, jeśli urządzenia nie będą w stanie współdzielić wspólnej struktury przesyłu danych, lub będą one działać przy różnych szybkościach.

3.6.2 Otwarte protokoły komunikacyjne

Główni producenci urządzeń przemysłowych współpracują ze sobą i opracowali otwarte, uniwersalne protokoły budowy układów przesyłu danych do komunikacji między poszczególnymi urządzeniami układów automatyki, dzięki czemu całe przemysłowe wyposażenie może komunikować się między sobą bez względu na pochodzenie.

Jeden z najlepiej opisanych w dokumentacjach technicznych i z dobrze rozwiniętą siecią połączeń dla wszystkich produktów, włącznie z programami obsługi jest PROFIBUS.

Inne znane protokoły transmisji danych to:

Modbus +	Device net
Interbus-S	Lonworks

Protokół PROFIBUS ma trzy różne odmiany, rozwinięte dla różnych zastosowań:

Protokół PROFIBUS FMS (ang. Fieldbus Message Service)

Jest to uniwersalne rozwiązanie dla komunikacji wieloadresowej. Z powodu jego wysokiej elastyczności komunikacja wg FMS jest w stanie rozwiązać obszerną komunikację wieloadresową przy średniej szybkości przesyłu danych. Protokół FMS używany jest w obszarach zastosowań takich jak: przemysł tekstylny, zarządzanie

budownictwem, technologia napędu - urządzenia rozruchowe i technologie czujników przemysłowych, a także jako niskonapięciowe elementy przełączające.

Protokół PROFIBUS DP (ang. Decentral Peripherals)

PROFIBUS DP jest odmianą zoptymalizowaną pod kątem zapewniania dużej szybkości transmisji danych i jest głównie wykorzystywany w układach automatyki przy rozproszonych urządzeniach peryferyjnych. Jest to właściwie tak jak zastąpienie kosztownej równoległej transmisji sygnałów analogowych napięciowych przez linie 0-24V i sygnałów prądowych wartości przez 0/4-20mA. Ten protokół jest głównie używany w instalacjach automatyki o dużej szybkości działania urządzeń produkcyjnych.

Protokół PROFIBUS PA (ang. Process Automation)

Profibus-PA jest odmianą wykorzystywaną w układach automatyki. Profibus-PA najbardziej bezpieczną technikę przesyłania przesyłu danych, opisaną w dyrektywie IEC 1158-2 oraz umożliwia zdalne zasilanie jednostek podzielonych przez szynę zasilania.