

Ćwiczenie 2:

Napęd falownikowy silnika indukcyjnego (napęd AC).

1. Właściwości silnika indukcyjnego.

Silnik indukcyjny klatkowy IM jest maszyną elektryczną zasilaną napięciem prądu przemiennego. Prędkość kątowna Ω_s odpowiadająca częstotliwości f_s napięcia zasilającego nazywana jest prędkością synchroniczną i jest prędkością wirowania pola wytwarzanego w stojanie przez napięcie prądu przemiennego. Prędkość synchroniczna zależy również od liczny par biegunów p_b i jest wyrażona wzorem:

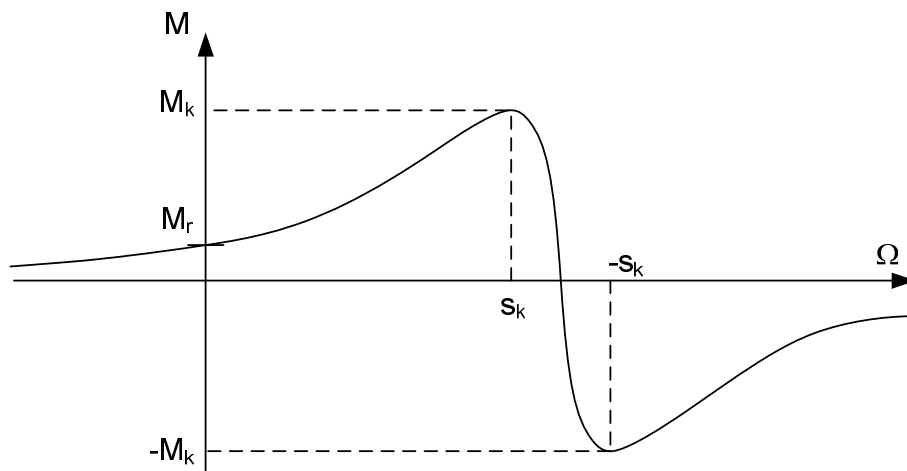
$$\Omega_s = \frac{2\pi f_s}{p_b}, \quad (1)$$

W stanie biegu jałowego silnik porusza się nieco wolniej od prędkości synchronicznej. Jest to wynikiem istnienia oporów ruchu i rezystancji wirnika. W wirniku silnika klatkowego wirującego z prędkością synchroniczną nie zaindukuje się prąd, gdyż nie będzie zmiany pola względem przewodnika (klatki wirnika). Opory ruchu sprawia, że wirnik zwolni do prędkości poniżej synchronicznej i zacznie płynąć w wirniku prąd, który oddziałując z polem wytwarzanym przez stojan powoduje napędzanie wirnika. Prąd wirnika ograniczony jest przez rezystancję klatki co nie pozwala na osiągnięcie takiego momentu napędzającego wirnik aby prędkość mechaniczna była równa synchronicznej. Różnicę między prędkością synchroniczną Ω_s a mechaniczną Ω_m opisujemy za pomocą wielkości zwanej poślizgiem s .

$$s = \frac{\Omega_s - \Omega_m}{\Omega_s} = 1 - \frac{\Omega_m}{\Omega_s} = \frac{n_s - n_m}{n_s}, \quad (2)$$

Poślizg dodatni występuje dla pracy silnikowej, natomiast poślizg ujemny dla pracy generatorowej. Charakterystykę maszyny indukcyjnej zasilanej ze źródła o stałej amplitudzie i częstotliwości przedstawiono na rysunku 1. Przy prędkości mechanicznej równej zero silnik indukcyjny zachowuje się jak transformator w stanie zwarcia. Moment rozruchowy M_r rozwijany przy zahamowaniu wirnika nie jest zbyt duży, natomiast wartość prądu, który ma głównie charakter bierny jest kilkukrotnie większa od prądu znamionowego. Jeżeli moment obciążenia jest mniejszy od momentu elektromagnetycznego rozwijanego przez silnik następuje wzrost prędkości wirnika z jednoczesnym wzrostem momentu elektromagnetycznego. Maksymalna wartość momentu silnika indukcyjnego M_k zwana momentem krytycznym jest w uproszczeniu proporcjonalna do kwadratu amplitudy napięcia zasilającego i odwrotnie proporcjonalna do sumy reaktancji rozproszenia stojana i wirnika.

$$M_k = \frac{3p_b}{2\Omega_s} \frac{U_s^2}{X_{s\sigma} + X_{r\sigma}}, \quad (3)$$



Rys. 1. Charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego.

Moment krytyczny M_k rozwijany jest przy poślizgu krytycznym s_k , określonym zależnością:

$$s_k = \pm \frac{R_r}{X_{s\sigma} + X_{r\sigma}}, \quad (4)$$

który może być również wyznaczony na podstawie danych znamionowych silnika:

$$s_k = s_N \left(k_M \pm \sqrt{k_M^2 - 1} \right), \quad (5)$$

przy czym s_N jest poślizgiem znamionowym, a współczynnik przeciążalności momentem k_M jest równy:

$$k_M = \frac{M_k}{M_N}, \quad (6)$$

Przebieg momentu silnika w funkcji prędkości mechanicznej (charakterystyka mechaniczna) można określić uproszczoną zależnością:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}, \quad (5)$$

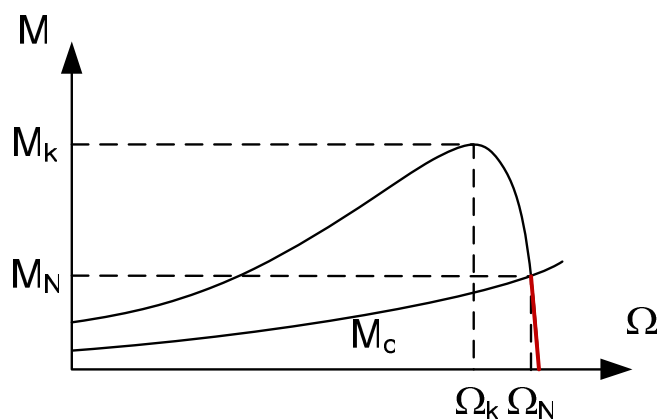
Można wyróżnić trzy zakresy pracy silnika indukcyjnego:

- 1) praca silnikowa od prędkości zero do synchronicznej (kierunek ruchu wirnika jest zgodny z kierunkiem wirowania pola, a prędkość silnika jest mniejsza od synchronicznej)
- 2) praca generatorowa powyżej prędkości synchronicznej (kierunek ruchu wirnika jest zgodny z kierunkiem wirowania pola, a prędkość silnika jest większa od synchronicznej).
- 3) praca w zakresie tzw. hamowania przeciwwłączeniem (kierunek ruchu wirnika jest przeciwny do kierunku wirowania pola).

W zakresie pracy silnikowej można wyróżnić dwie części charakterystyki:

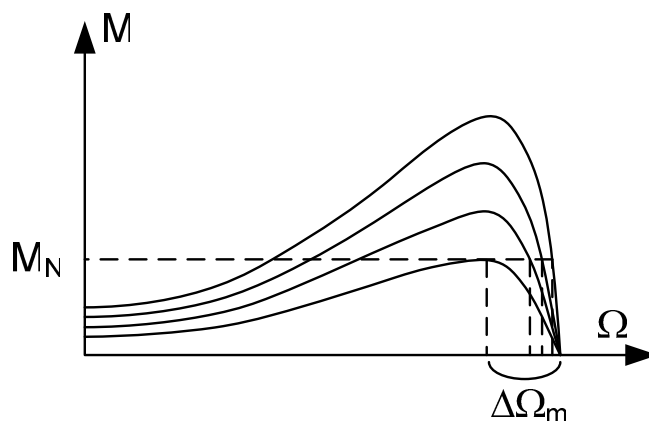
- 1) Stabilny – od prędkości dla której silnik osiąga moment krytyczny M_k do prędkości synchronicznej.
- 2) Niestabilny – od prędkości zerowej do prędkości w której silnik osiąga moment krytyczny.

Ustalony punkt pracy (punkt zrownania się momentu obciążenia M_o z momentem rozwijanym przez silnik) musi znajdować się na stabilnej części charakterystyki w pobliżu prędkości synchronicznej i jest ograniczony od góry znamionowym punktem pracy (M_N, Ω_N) – rys. 2. Równowaga momentów obciążenia i silnika w każdym innym punkcie powoduje przekroczenie wartości znamionowej prądu silnika co grozi jego przegrzaniem i uszkodzeniem izolacji. Zmiana momentu obciążenia powoduje nieznaczną tylko zmianę prędkości mechanicznej, a dla ustalonego momentu obciążenia nie można regulować prędkości za pomocą źródła napięcia o stałej amplitudzie i częstotliwości.



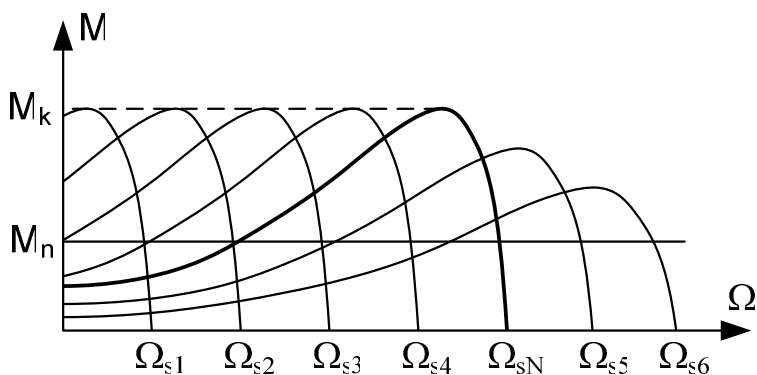
Rys. 2. Charakterystyka mechaniczna silnika i przykładowego obciążenia.

Dla ustalonego momentu obciążenia możliwa jest regulacja prędkości w ograniczonym zakresie za pomocą zmiany amplitudy napięcia zasilającego. Charakterystyki mechaniczne dla różnych napięć przedstawione są na rysunku 3, przy czym dla niższych wartości napięć uzyskujemy mniejszy moment rozwijany przez silnik indukcyjny. Dla danego momentu znamionowego jak na rysunku 3, silnik może wirować w zakresie $\Delta\Omega_m$ od prędkości znamionowej Ω_N do prędkości odpowiadającej poślizgowi krytycznemu s_k .



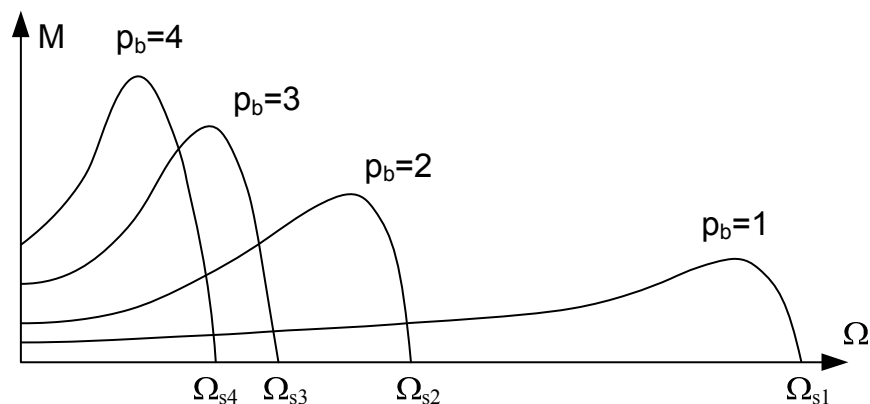
Rys. 3. Rodzina charakterystyk mechanicznych przy zasilaniu napięciami o stałej częstotliwości i różnych amplitudach.

Regulacja prędkości za pomocą jednoczesnej zmiany amplitudy i częstotliwości daje dużo lepsze efekty niż regulacja za pomocą zmiany samej amplitudy. Charakterystyki mechaniczne dla napięć zasilających o różnych częstotliwościach pokazano na rysunku 4. Podstawowa charakterystyka z odpowiadającą jej znamionową prędkością synchroniczną Ω_{sN} zaznaczona jest linią pogrubioną. Dla każdej częstotliwości poniżej częstotliwości znamionowej amplituda napięcia zasilającego jest proporcjonalna do częstotliwości aby spełnić warunek $U/f_s = const.$ Powyżej wartości częstotliwości znamionowej amplituda napięcia jest stała i równa wartości znamionowej, przez co obniża się wartość momentu krytycznego proporcjonalnie do stosunku między częstotliwością napięcia zasilania a częstotliwością znamionową.



Rys. 4. Charakterystyki mechaniczne przy zasilaniu silnika napięciem o różnej częstotliwości.

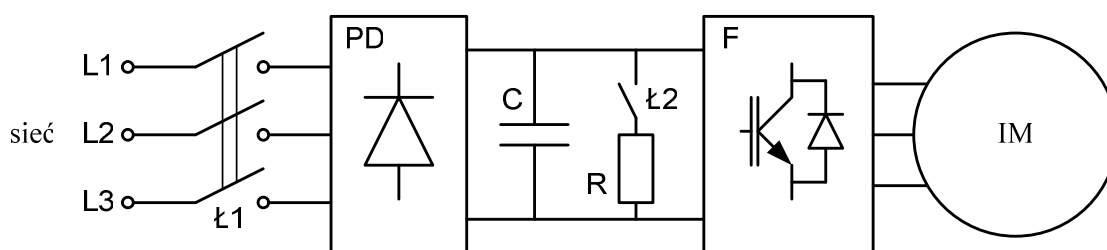
We wzorze (1) podano, że prędkość silnika zależy od liczby par biegunów. Rysunek 5 przedstawia rodzinę charakterystyk dla silnika o zmiennej liczbie par biegunów ($p_b=1,2,3,4$). Istnieją specjalne konstrukcje silników indukcyjnych (silniki wielobiegunowe) z przełączanymi uzwojeniami pozwalające na osiągnięcie zadanej ilości biegunów, przez co możliwa jest skokowa zmiana prędkości synchronicznej a zatem i prędkości mechanicznej. Silniki wielobiegunowe stosowane były m.in. w dźwigach osobowych.



Rys. 5. Charakterystyki mechaniczne silnika o regulowanej ilości par biegunów.

2. Napęd falownikowy silnika indukcyjnego

Płynną regulację prędkości i momentu zapewnia źródło o płynnie regulowanej częstotliwości i amplitudzie napięcia. Energoelektroniczne przyrządy półprzewodnikowe pozwalają na konstruowanie takiego źródła napięcia. Schemat blokowy podstawowego energoelektronicznego układu napędowego z silnikiem prądu przemiennego przedstawiony jest na rysunku 6. Silnik indukcyjny IM zasilany jest z falownika napięcia F przekształcającego napięcie stałe ze źródła obwodu pośredniego DC jakim jest kondensator, na napięcie impulsowe o zmiennym współczynniku wypełnienia. Obwód napięcia stałego zasilany jest najczęściej z trójfazowej sieci napięcia przemiennego za pomocą prostownika diodowego PD.



Rys. 6. Schemat blokowy układu napędowego z silnikiem prądu przemiennego.

Prostownik diodowy ma kilka wad. Przede wszystkim ma niekorzystne właściwości ze względu na niesinusoidalny prąd pobierany z sieci zasilającej. Ponadto układ z prostownikiem diodowym PD posiada ograniczone możliwości pracy generatorowej maszyny. Energia hamowania wymuszonego pracą falownika musi być rozpraszana na rezystorze R włączonym równolegle w obwód DC załączanym za pomocą łącznika Ł2. Najczęściej rezystor dobrany jest na wytracenie energii krótkotrwałego hamowania. Zaletą prostownika diodowego jest wyższa niezawodność i mniejsze koszty. W przypadku gdy istnieje potrzeba długotrwałej pracy generatorowej proponuje się układy jak na rysunku 7.

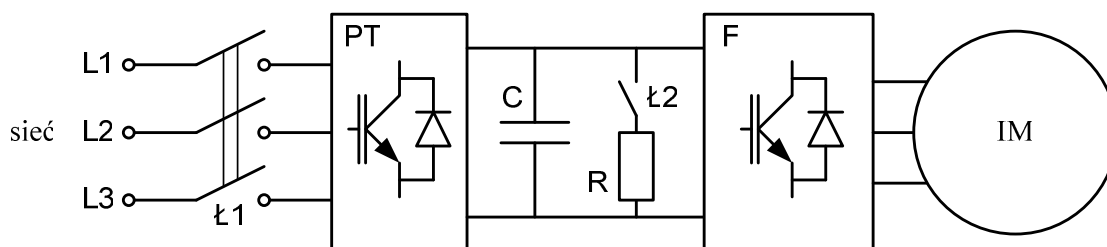
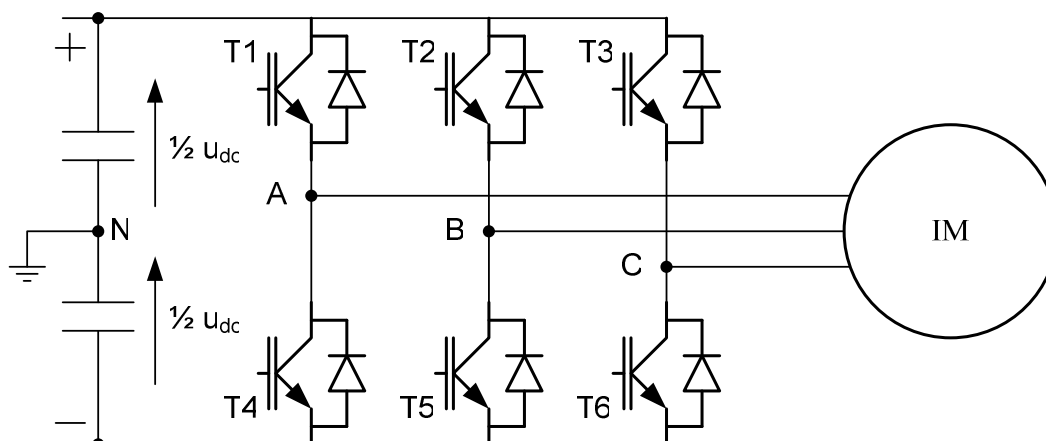


Fig. 7. Schemat blokowy układu pozwalającego na długotrwałą pracę generatorową silnika indukcyjnego.

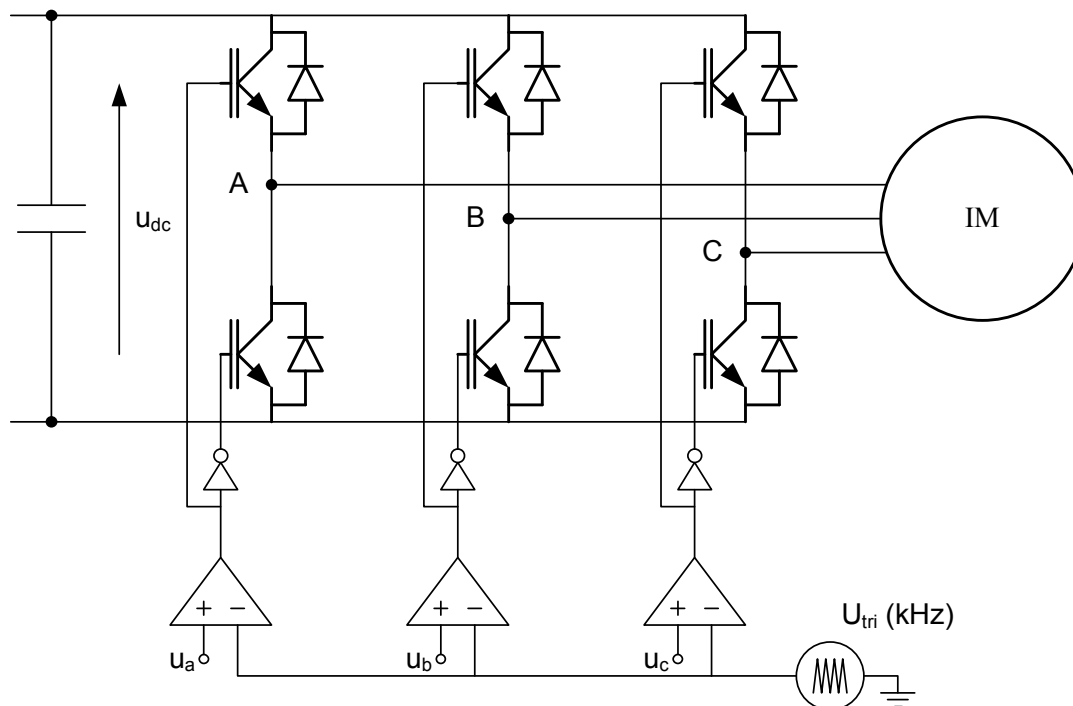
Prostownik diodowy PD zastąpiony jest sterowanym prostownikiem tranzystorowym PT umożliwiającym oddawanie energii hamowania silnika do sieci zasilającej. Układy prostowników aktywnych stosuje się również w układach napędowych dużej mocy, w celu wyeliminowania negatywnego oddziaływania na sieć zasilającą prostownika diodowego. Odpowiednie sterowanie prostownikiem aktywnym pozwala na pobieranie prądu sinusoidalnego prądu o jednostkowym współczynniku mocy. Układ prostownika nie jest celem omawianego ćwiczenia więc jego analiza zostanie pominięta w dalszych rozważaniach.

Struktura falownika tranzystorowego F zasilającego silnik indukcyjny IM przedstawiona jest na rysunku 8. Tranzystory falownika napięcia pracują dwustanowo (pełne zablokowanie bądź nasycenie), przy czym załączenie dwóch tranzystorów (górnego i dolnego) w danej gałęzi jest niedozwolone ze względu na zwarcie obwodu pośredniczącego.



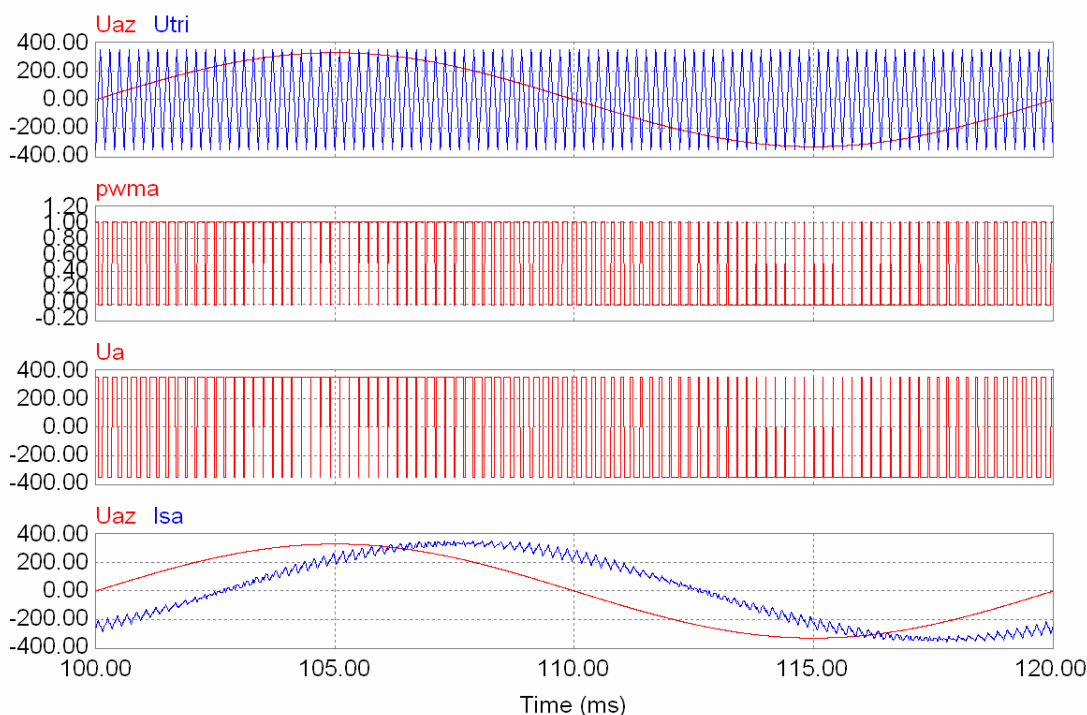
Rys. 8. Struktura układu przekształtnika tranzystorowego zasilającego silnik indukcyjny.

Silnik indukcyjny zasilany jest napięciami impulsowymi u_A , u_B , u_C przy czym potencjał punktów A, B i C jest zależny od stanów tranzystorów i jest odniesiony do wirtualnego punktu neutralnego N w połowie napięcia obwodu pośredniczącego. Załączenie i wyłączenie tranzystorów odbywa się przez podanie na bramki impulsów prostokątnych, przy czym czas trwania każdego ze stanów zależy od współczynnika wypełnienia sygnałów prostokątnych. Istnieje kilka sposobów na wygenerowanie prostokątnych sygnałów bramkowych. Jednym z nich jest porównanie na komparatorze sygnału zadanego napięcia i sygnału piłokształtnego bądź trójkątnego U_{tri} o częstotliwości kilku kHz (Rys. 9). Tranzystory jednej gałęzi sterowane są jednym sygnałem, a naprzemienne przełączanie jest realizowane za pomocą negatora.



Rys. 9. Przykładowy sposób generacji prostokątnych sygnałów bramkowych przekształtnika.

Zmiana współczynnika wypełnienia sygnału prostokątnego pwm jest zależna od sygnału modulującego (zadanego sygnału napięcia fazowego U_{az}). Prostokątny sygnał napięcia fazowego U_a odniesiony do punktu neutralnego obwodu pośredniczącego zawiera przede wszystkim składową o częstotliwości podstawowej (czyli częstotliwości napięcia fazowego) i składową o częstotliwości sygnału modulowanego (kilka kHz). Ze względu na to, że silnik indukcyjnym jest obciążeniem o dużej indukcyjności prąd stojana jest sinusoidalny z małą zawartością harmonicznymi o częstotliwości łączeń. Indukcyjność dla dużych częstotliwości stanowi dużą impedancję więc zachowuje się jak filtr tłumiący wyższe harmoniczne prądu. Przebiegi sygnału modulującego U_{az} (zadanego napięcia fazowego), trójkątnego sygnału nośnego U_{tri} , prostokątnego sygnału bramkowego fazy a pwma, prostokątnego sygnału napięcia fazowego U_a , oraz napięcia zadanego U_{az} i prądu mierzonego I_{sa} stojana pokazano na rysunku 10.



Rys. 10. Przebiegi sygnału modulującego U_{az} fali nośnej U_{tri} , sygnału bramkowego pwma, sygnału napięcia fazowego U_a , oraz napięcia zadanego U_{az} i prądu mierzonego I_{sa} stojana

W układach które nie wymagają dokładnej regulacji prędkości ani dużej dynamiki można przyjąć, że prędkość mechaniczna jest równa prędkości synchronicznej, że podanie napięcia o częstotliwości odpowiadającej tej prędkości synchronicznej i odpowiedniej amplitudzie jest wystarczająco dokładną metodą sterowania prędkością. W układach w których wymagana jest większa dokładność regulacji prędkości stosuje się regulator prędkości, który w najprostszym wykonaniu opiera się na pomiarze prędkości za pomocą prądnicy tachometrycznej. Regulator prędkości typu proporcjonalno-całkującego eliminuje uchyb związany z poślizgiem i podnosi nieznacznie sygnał zadany częstotliwości aby prędkość synchroniczna była odpowiednio wyższa do osiągnięcia zadanej prędkości mechanicznej.

Przebieg ćwiczenia

Na stanowisku laboratoryjnym wykorzystano przemysłowy falownik napięcia.

W trakcie ćwiczenia należy zapoznać się z przebiegami sygnałów prądów, napięć i prędkości napędu elektrycznego z falownikiem napięcia z wykorzystaniem oscyloskopu.

Należy zapoznać się z instrukcją obsługi urządzenia, jego możliwościami ustawiania parametrów do sterowania prędkością.

Instrukcja do falownika będzie udostępniona na zajęciach w trakcie wykonywania ćwiczenia.