

Ćwiczenie 4:

Napęd prądu przemiennego z falownikiem napięcia.

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 liczby par biegunów p_b i jest wyrażona wzorem:

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

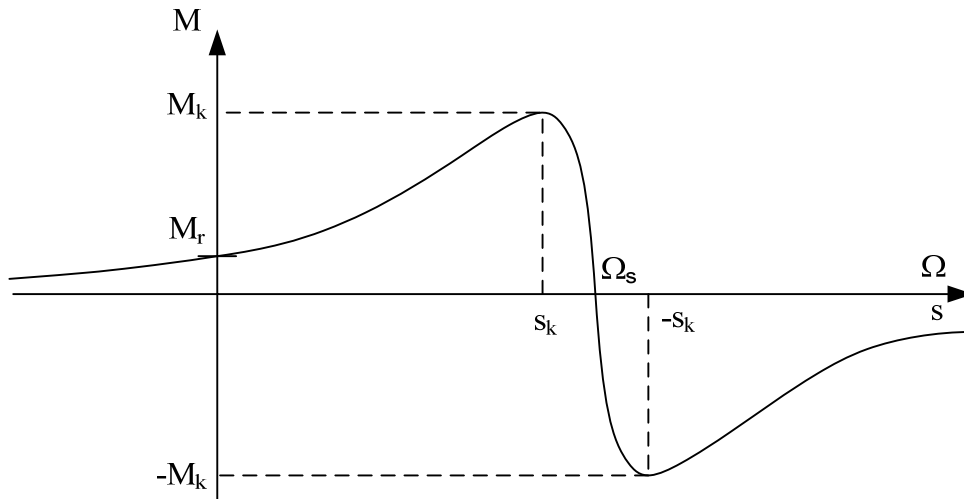
Po podłączeniu silnika indukcyjnego do napięcia prądu przemiennego wirnik wiruje z prędkością mechaniczną Ω_m mniejszą od prędkości synchronicznej Ω_s . Jest to wynikiem istnienia oporów ruchu, a wpływ na tę prędkość ma rezystancja wirnika. W wirniku silnika klatkowego wirującego z prędkością synchroniczną Ω_s nie może zaindukować się prąd, gdyż nie będzie zmian pola względem przewodnika (prętów klatki wirnika). Opory ruchu sprawiają, 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 .

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

gdzie, Ω_m jest prędkością kątowną mechaniczną a n_s i n_m są odpowiednio prędkością obrotową synchroniczną i mechaniczną. Prędkości kątowe wyrażone są w rad/s, a obrotowe w obr/min.

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. W typowym silniku moment rozruchowy M_r rozwijany przy zahamowanym wirniku jest niezbyt duży, natomiast wartość prądu, który ma głównie charakter bierny jest kilkakrotnie 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 przybliżeniu proporcjonalna do kwadratu amplitudy napięcia zasilającego i odwrotnie proporcjonalna do sumy reaktancji rozproszenia stojana i wirnika.

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



Rys. 1. Charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego.

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

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

i może być również wyznaczony na podstawie danych katalogowych silnika indukcyjnego:

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

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:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s_k + s}{s} + \frac{s}{s_k}}, \quad (7)$$

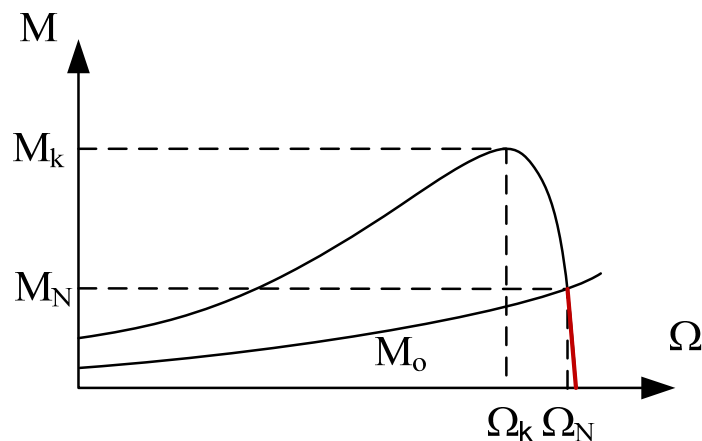
Można wyróżnić trzy zakresy pracy silnika indukcyjnego:

- 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:

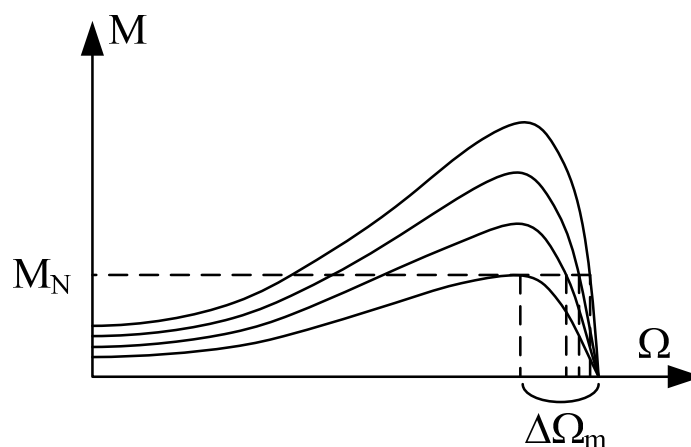
- 1) Stabilny – od prędkości dla której silnik osiąga moment krytyczny M_k do prędkości synchronicznej.
- 2) Niestabilny – od prędkości zerowej do prędkości w której silnik osiąga moment krytyczny.

Ustalony punkt pracy (punkt zrównania się momentu obciążenia M_o z momentem rozwijanym przez silnik) musi znajdować się na stabilnej części charakterystyki poniżej znamionowego punktu 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.

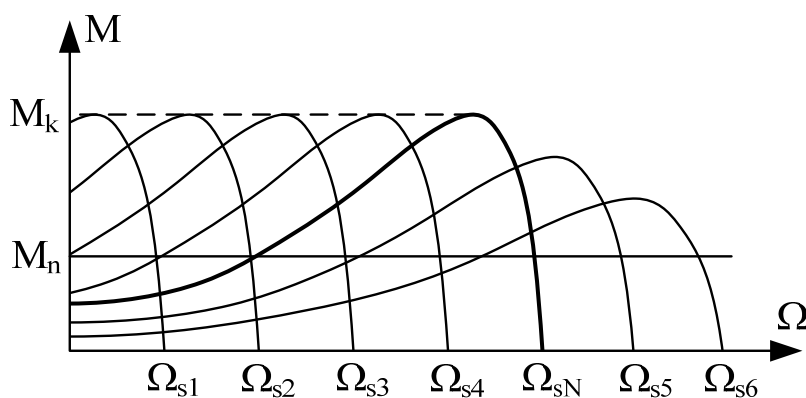
Dla ustalonego momentu obciążenia możliwa jest regulacja prędkości w wąskim zakresie za pomocą zmiany amplitudy napięcia zasilającego. Charakterystyki mechaniczne dla różnych napięć przedstawione są na rysunku 3, przy czym dla niższych wartości napięć uzyskujemy mniejszy moment rozwijany przez silnik indukcyjny. Dla danego momentu znamionowego jak na rysunku 3, silnik może poruszać się z prędkością 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.

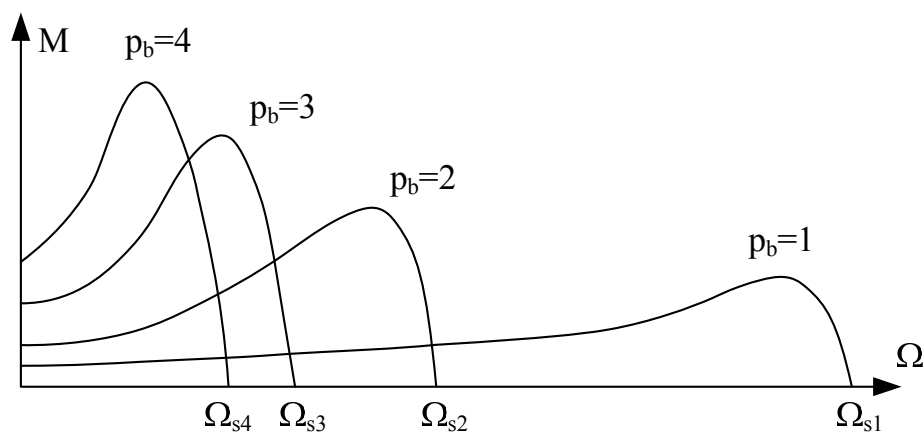
Regulacja prędkości za pomocą jednoczesnej zmiany amplitudy i częstotliwości daje dużo lepsze efekty niż regulacja za pomocą zmiany samej amplitudy. Charakterystyki mechaniczne dla napięć zasilających o różnych częstotliwościach pokazano na rysunku 4. Podstawowa charakterystyka z odpowiadającą jej znamionową prędkością synchroniczną Ω_{sN} zaznaczona jest linią pogrubioną. Dla każdej częstotliwości poniżej częstotliwości znamionowej amplituda napięcia zasilającego jest proporcjonalna do częstotliwości aby spełnić warunek $U/f_s = const$. Dla źródła zasilania o regulowanej częstotliwości i amplitudzie napięcia nie większej niż osiągana w warunkach znamionowych, moc maszyny jest ograniczona do wartości znamionowej. W konsekwencji obniża się charakterystyka mechaniczna silnika jak na Rys. 4. Zmniejsza się również moment osiągnięty przez maszynę, gdyż przy stałej mocy i zwiększającej się prędkości moment musi maleć zgodnie z zależnością:

$$M_m = \frac{P_m}{\Omega_m}, \quad (8)$$



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

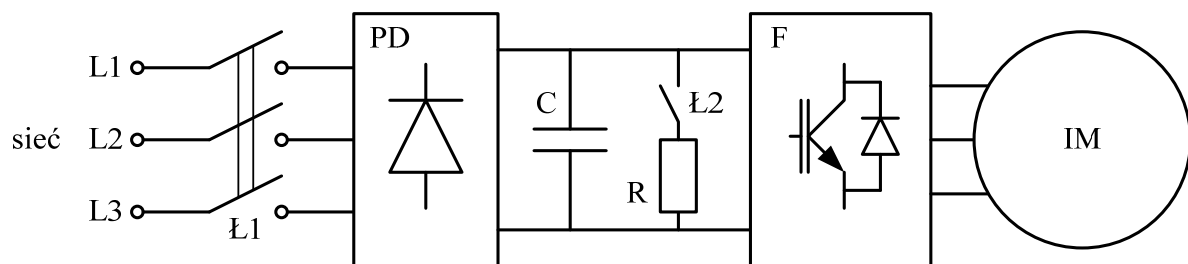
We wzorze (1) podano, że prędkość silnika zależy od liczby par biegunów. Rysunek 5 przedstawia rodzinę charakterystyk dla silnika o zmiennej liczbie par biegunów ($p_b=1,2,3,4$). Istnieją specjalne konstrukcje silników indukcyjnych (silniki wielobiegunowe) z przełączanymi uzwojeniami, pozwalające na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



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

Napęd falownikowy silnika indukcyjnego

Płynną regulację prędkości i momentu silnika indukcyjnego zapewnia źródło o płynnie regulowanej częstotliwości i amplitudzie napięcia. Energoelektroniczne przyrządy półprzewodnikowe pozwalają na skonstruowanie 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 lub częstej pracy generatorowej, w szczególności przy dużych mocach, proponuje się układy jak na rysunku 7.

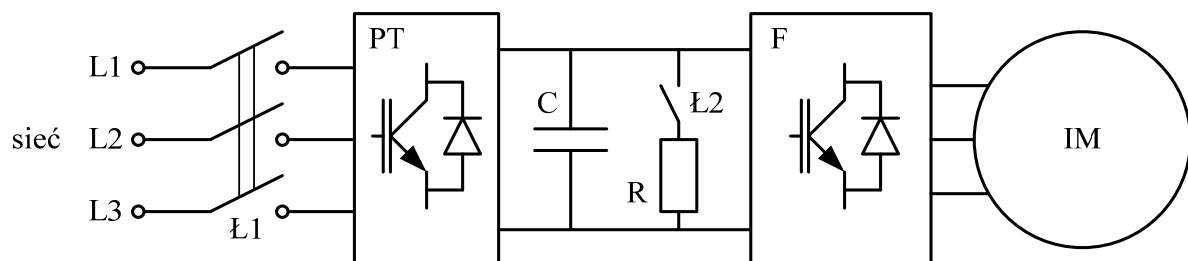
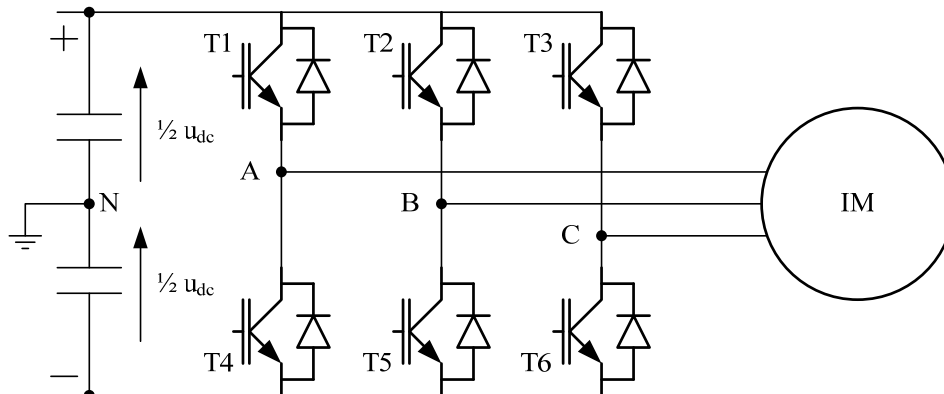


Fig. 7. Schemat blokowy układu pozwalającego na długotrwałą pracę generatorową silnika indukcyjnego.

Prostownik diodowy PD zastąpiony jest sterowanym prostownikiem tranzystorowym PT umożliwiającym oddawanie energii hamowania silnika do sieci zasilającej. Prostowniki aktywne 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 o współczynniku mocy zbliżonym do jedności. Układ prostownika nie jest celem omawianego ćwiczenia więc opis jego właściwości zostanie pominięty w niniejszej instrukcji.

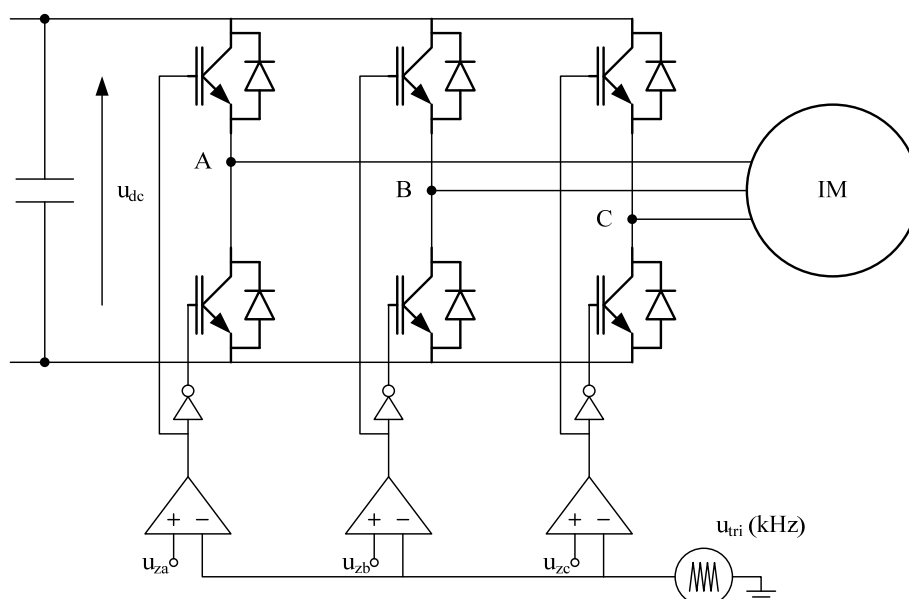
Struktura falownika tranzystorowego F zasilającego silnik indukcyjny IM przedstawiona jest na Rys. 8. Tranzystory falownika napięcia pracują dwustanowo (pełne zablokowanie bądź nasycenie), przy czym załączenie dwóch tranzystorów (górnego i dolnego) w danej gałęzi jest niedozwolone ze względu na zwarcie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



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

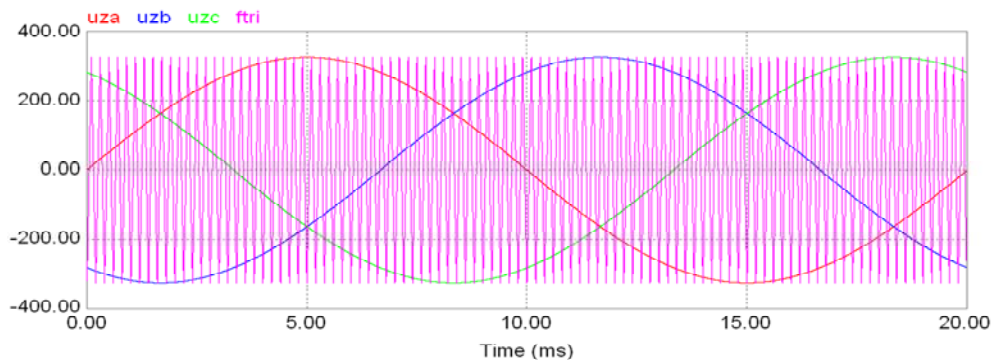
Silnik indukcyjny zasilany jest napięciami impulsowymi u_A , u_B , u_C przy czym potencjał punktów A, B i C jest zależny od stanów pracy tranzystorów. Przedstawiony na Rys. 8 punkt neutralny N, rozdzielający obwód DC na dwa równe napięcia, w praktyce nie jest dostępny w falownikach przeznaczonych do zasilania silników indukcyjnych. Do analizy przebiegów prostokątnych wykorzystuje się wirtualny punkt neutralny obwodu DC.

Załączanie i wyłączenie tranzystorów odbywa się przez podanie na bramki impulsów prostokątnych, a 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 rzędu kHz (Rys. 9). Jest to tzw. modulacja z trójkątną falą nośną. Tranzystory poszczególnych gałęzi sterowane są niezależnymi sygnałami prostokątnymi wytworzonymi przez trzy sygnały zadane u_{za} , u_{zb} , u_{zc} porównane na komparatorach z sygnałem trójkątnym, a naprzemienne przełączanie tranzystorów górnego i dolnego w każdej gałęzi jest realizowane za pomocą negatora.



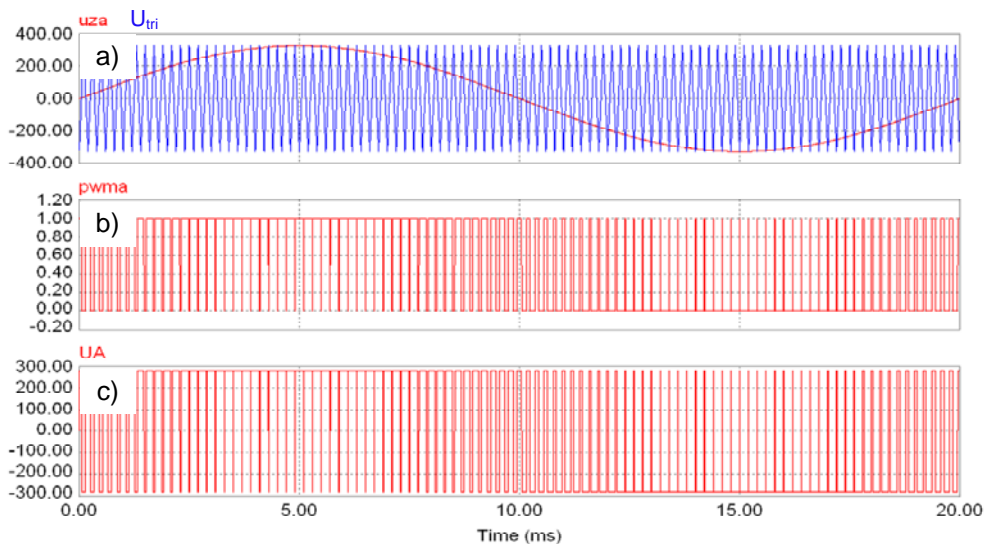
Rys. 9. Przykładowy sposób generacji prostokątnych sygnałów bramkowych przekształtnika.

Sygnaly napięć zadanych u_{za} , u_{zb} , u_{zc} w poszczególnych fazach są sygnałami sinusoidalnymi przesuniętymi względem siebie o 120 stopni i porównywane są z tym samym trójkątnym sygnałem nośnym. Na rysunku 10 przedstawiono sygnały napięć zadanych u_{za} , u_{zb} , u_{zc} o częstotliwości 50Hz oraz sygnał trójkątny o częstotliwości 5kHz.



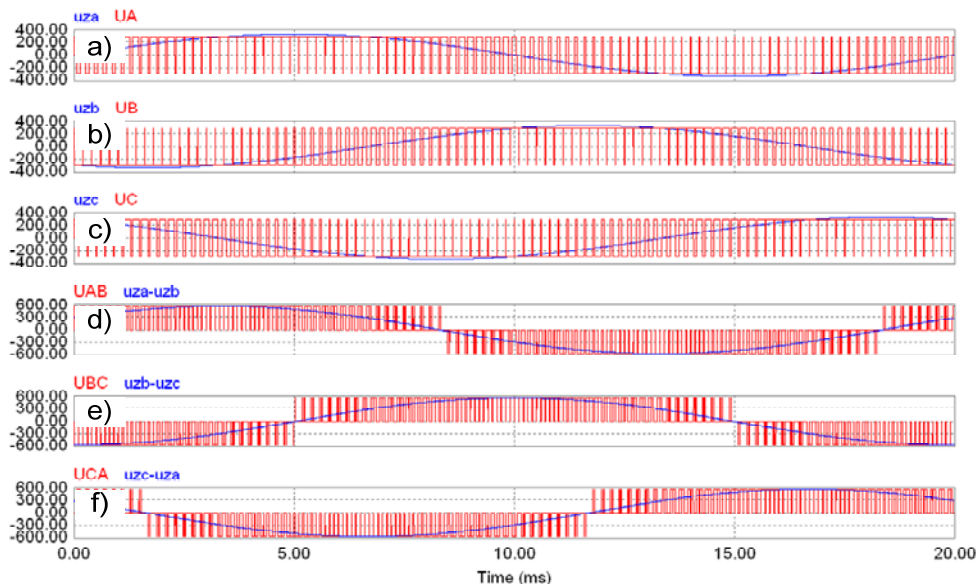
Rys. 10. Przebiegi sygnałów modulujących kolejnych faz u_{az} , u_{bz} , u_{zc} oraz fali nośnej U_{tri} .

Każda gałąź falownika sterowana jest osobnym sygnałem prostokątnym. Dla gałęzi a sygnał napięcia zadanego u_{za} jest porównywany na komparatorze z przebiegiem piłokształtnym U_{tri} (Rys. 11a). Sygnał wyjściowy z komparatora pwma jest sygnałem logicznym (Rys. 11b). Poziom górny powoduje załączenie tranzystora górnego i wyłączenie dolnego. Poziom dolny sygnału pwma powoduje wyłączenie tranzystora górnego i załączenie dolnego. W efekcie potencjał punktu A w gałęzi a jest przełączany między potencjałem górnym i dolnym napięcia DC. Napięcie u_A w punkcie A odniesione do neutralnego punktu obwodu DC przedstawiono na Rys. 11c. Poziomy napięcia fazowego to $\frac{1}{2} U_{dc}$ i $-\frac{1}{2} U_{dc}$. Prostokątny przebieg napięcia fazowego u_A , zawiera składową o częstotliwości podstawowej (czyli częstotliwości napięcia zadanego u_a) i składową o częstotliwości sygnału modulowanego (kilka kHz).



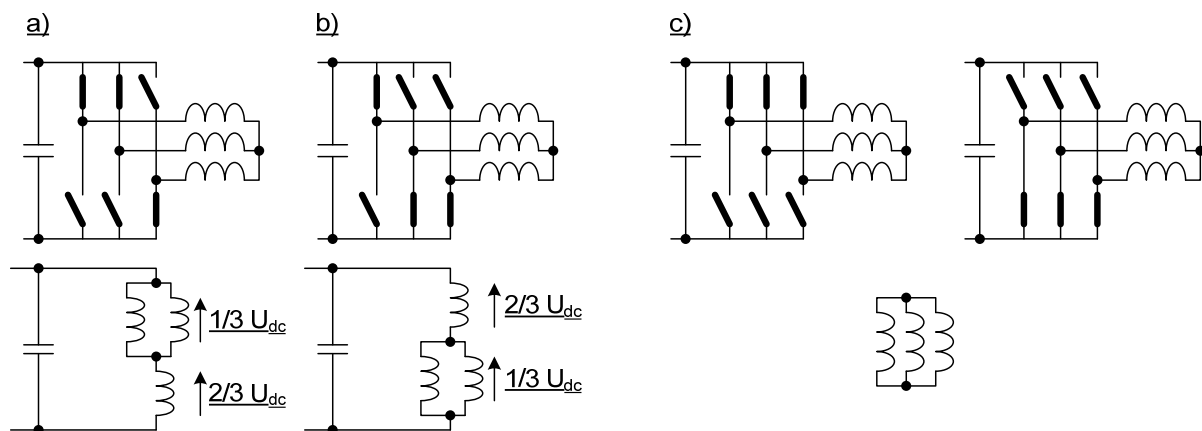
Rys. 11. Przebiegi: a) sygnału modulującego u_{za} , fali nośnej U_{tri} , b) sygnału bramkowego $pwma$, c) sygnału napięcia fazowego u_A , dla jednej gałęzi falownika.

Współczynnik wypełnienia sygnałów prostokątnych zmienia się zgodnie z zadanymi sygnałami modulującymi (Rys. 12a,b,c). Napięcia przewodowe są trzypoziomowe o poziomach równych U_{dc} , 0 i $-U_{dc}$ (Rys. 12d,e,f). Poziom zerowy występuje, gdy załączone są dwa górne lub dwa dolne tranzystory w gałęziach do których odnosi się analizowane napięcia przewodowe. Poziomy U_{dc} i $-U_{dc}$ występują przy naprzemiennym załączeniu tranzystorów w gałęziach, do których odnoszą się napięcia przewodowe.

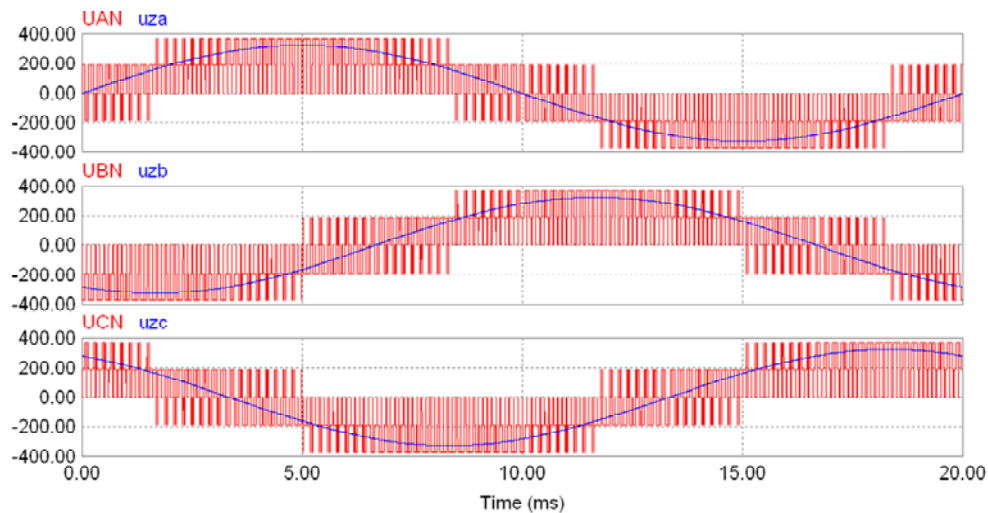


Rys. 12. Przebiegi, a,b,c) sygnału modulującego u_{za} , u_{zb} , u_{zc} , oraz napięcia fazowych u_A , u_B , u_C , oraz d,e,f) napięć przewodowych u_{AB} , u_{BC} , u_{CA} , na tle zadanych napięć przewodowych.

W układzie falownika zasilającego silnik połączony w gwiazdę, poza napięciem fazowym odniesionym do wirtualnego punktu obwodu DC można wyróżnić napięcie fazowe względem punktu neutralnego stojana silnika. Chwilowa wartość tego napięcia zależy od aktualnej konfiguracji stanów tranzystorów. W konfiguracji w której załączone są dwa górne i jeden dolny bądź dwa dolne i jeden górny (Rys. 13a i Rys. 13b), dwa z uzwojeń chwilowo połączone są równolegle. W takiej konfiguracji poziomy napięć fazowych względem punktu zerowego gwiazdy stojana wynoszą $1/3 U_{dc}$ i $2/3 U_{dc}$. W układzie, w którym załączone są trzy górne albo trzy dolne tranzystory (Rys. 13b) poziomy napięcia fazowego względem punktu neutralnego gwiazdy wynosi zero. Przebieg tego napięcia pokazano na Rys. 14abc.



Rys. 13. Przykładowe konfiguracje załączeń tranzystorów falownika i odpowiadające im rozkłady napięć na uzwojeniach stojana silnika indukcyjnego.



Rys. 14. Przebiegi sygnału modulującego u_{za} , u_{zb} , u_{zc} , oraz napięć fazowych u_A , u_B , u_C .

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.