

Zespół Szkół Technicznych im. J. i J. niadeckich w Grudzi dzu



Laboratorium Elektryczne . Pracownia Automatyki i
Robotyki (s.48)

Instrukcja Laboratoryjna: **6. Rozruch i hamowanie silników asynchronicznych trójfazowych**

Cel wiczenia

Celem wiczenia jest poznanie najczęściej stosowanych metod rozruchu i hamowania silników asynchronicznych (indukcyjnych) klatkowych i pierścieniowych.

9.1. Wiadomości ogólne

9.1.1. Budowa i zasada działania silników asynchronicznych trójfazowych

9.1.2. Rozruch silników asynchronicznych zwartych

9.1.2.1. Rozruch bezpośredni

9.1.2.2. Rozruch za pomocą przełącznika \star/Δ

9.1.2.3. Rozruch za pomocą autotransformatora

9.1.3. Rozruch silników asynchronicznych pierścieniowych

9.1.4. Hamowanie silników asynchronicznych zwartych

9.1.4.1 Hamowanie przeciwdławiczne

9.1.4.2 Hamowanie przez demontaż

9.2. Badania laboratoryjne

9.2.1. Dane znamionowe silników badanych

9.2.2. Rozruch silnika asynchronicznego zwartego

9.2.2.1. Rozruch bezpośredni

9.2.2.2. Rozruch za pomocą przełącznika \star/Δ

9.2.2.3. Zestawienie wyników pomiarów przy różnych rodzajach rozruchów

9.2.3. Rozruch silnika asynchronicznego pierścieniowego

9.2.4. Hamowanie silnika asynchronicznego zwartego

9.2.4.1. Hamowanie przeciwdławiczne

9.2.4.2. Hamowanie przez demontaż

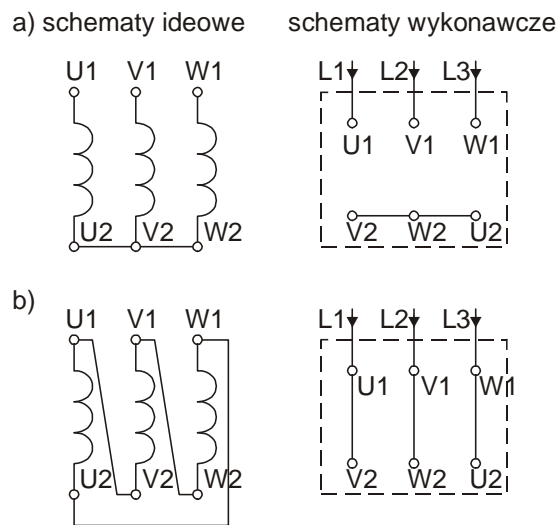
9.3. Uwagi i wnioski

9.1. Wiadomości ogólne

9.1.1. Budowa i zasada działania silników asynchronicznych trójfazowych

Silniki asynchroniczne są najbardziej rozpowszechnionymi maszynami elektrycznymi, zarówno z uwagi na ich względnie niskie ceny, jak i proste budowy i obsługi oraz łatwość konserwacji.

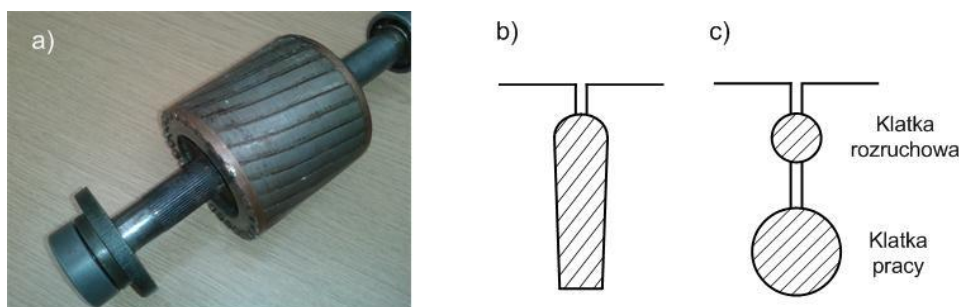
Silnik asynchroniczny składa się z dwóch podstawowych części: nieruchomego stojana i ruchomego wirnika. Zarówno stojan jak i wirnik mają obwody magnetyczne wykonane z cienkich izolowanych ferromagnetycznych blach elektrotechnicznych. Taka budowa obwodów magnetycznych umożliwia zmniejszenie strat od prądów wirowych. Na wewnętrznej powierzchni stojana wycięte są śluki, w których umieszczone jest uzwojenie trójfazowe. Cewki każdej z faz są przesunięte względem siebie o 120° . Uzwojenie stojana może być połączony w gwiazdę lub trójkąt (rys. 9.1).



Rys. 9.1. Sposób łączenia uzwojeń stojana: a) w gwiazdę; b) w trójkąt
U1, V1, W1 – początki uzwojeń; U2, V2, W2 – końce uzwojeń

W przypadku, gdy znamionowe napięcie fazowe stojana jest równe napięciu przewodowemu trójfazowej sieci zasilającej, uzwojenie stojana silnika powinno być skojarzone w trójkąt (Δ), natomiast w przypadku, gdy napięcie przewodowe sieci jest $\sqrt{3}$ razy większe niż napięcie fazowe silnika – w gwiazdę (\star). W obecnie produkowanych silnikach rozpoznanie prawidłowego sposobu skojarzenia uzwojenia stojana jest łatwe, gdy podawane jest w postaci zestawienia napięcia przewodowego sieci i symbolu skojarzenia uzwojenia stojana, np. $400V\Delta$ lub $400V\star$.

W zależności od rodzaju uzwojenia wirnika rozróżnia się silniki asynchroniczne klatkowe (zwarte) i pierścieniowe.



Rys. 9.2. a) Uzwojony wirnik silnika klatkowego (zwartego), b) śluczek wirnika głęboko śluczkowego, c) śluczek wirnika dwuklatkowego

W silniku asynchronicznym zwartym, w łóbkach wirnika znajduj si nieizolowane pr ty wykonane z miedzi lub aluminium zwarte na obydwu czóach wirnika (rys. 9.2a). Wirniki silników du ej mocy (nawet rz du MW) wykonywane s jako klatkowe w rozwi zaniu tzw. góbkowo óbkowym lub dwuklatkowym. Silniki tego typu maj korzystn charakterystyk rozruchow (mniejszy pr d rozruchu przy wi kszym momencie rozruchowym).

W silniku asynchronicznym pier cienowym uzwojenie wirnika wykonane jest przewodami izolowanymi (druty nawojowe izolowane emali), podobnie jak uzwojenie stojana. Uzwojenie to jest najcz ciej uzwojeniem trójfazowym skojarzonym trwale w gwiazd b d w trójk t./ czenie w trójk t stosuje si dla silników du ych (o mocach wi kszych ni 10 kW). Ko ce uzwojenia doprowadzone s do trzech odizolowanych pier cienilizgowych, do których przylegaj szczotki w glowe. Do uzwojenia wirnika silnika pier cienowego mo na przyćczy rezystory zewn trzne, które w zale no ci od tego, czy przewidziane s do pracy krótkotrwaćej lub ci gćej, czyli zale nie od przekroju drutu oporowego, mog sć y jako rozruszniki lub regulatory pr dko ci obrotowej. Silniki asynchroniczne pier cienowe, jako bardziej kosztowne i skomplikowane w obsćdze, nie s tak cz sto spotykane w eksploatacji jak silniki zwarte. Maj one w porównaniu z klatkowymi mniejsz sprawno i ni szy współćzynnik mocy ($\cos\phi$), lecz wykazuj lepsze wćciwo ci rozruchowe (wzgl dnie mać pr d i du y moment rozruchowy).

Uzwojenie stojana silnika asynchronicznego jest poćczone z sieci zasilaj c , natomiast uzwojenie wirnika jest od tej sieci elektrycznie odseparowane. W wyniku zjawiska indukcji elektromagnetycznej energia elektryczna pobierana z sieci jest przenoszona do uzwojenia wirnika drog sprz enia magnetycznego.

Po wćczeniu uzwojenia stojana do sieci trójfazowej pćnie w nim przemienny pr d elektryczny, który wytwarza **wiruj ce pole magnetyczne** b d ce wynikiem zsumowania zmiennego pola magnetycznego wzbudzonego przez ka d z faz stojana. Identyczne pole wytwarzaćy magnes trwaćy poruszaj cy si po obwodzie stojana (wokół wirnika). Odkrycie tego zjawiska zawdzi czamy Nikoli Tesli. Pole wiruj ce, przecinaj c pr ty uzwojenia wirnika, indukuje w nich sić elektromotoryczn (st d inna nazwa silnika ó silnik indukcyjny). Je eli obwód uzwojenia wirnika jest zamkni ty, popćnie w nim pr d. **Oddziaćwanie pola magnetycznego pochodz cego od stojana i pr du pćn cego w przewodzie wirnika powoduje powstanie momentu elektromagnetycznego dziaćaj cego na wirnik.** Poniewa przewody wirnika s rozćone na obwodzie to konsekwencji dziaćania par sićpowstaje moment M wywoćaj cego ruch obrotowy wirnika.

Moment dziaćaj cy na pojedynczy przewód

$$M = F r \quad (9.1)$$

gdzie F - sić elektrodynamiczna, r - rami , czyli promie wirnika

$$F = B i l \quad (9.2)$$

gdzie B - indukcja magnetyczna pola wytworzonego w stojanie, i - pr d pćn cy w pr cie klatki wirnika, l - dćgo pr ta, czyli dćgo wirnika

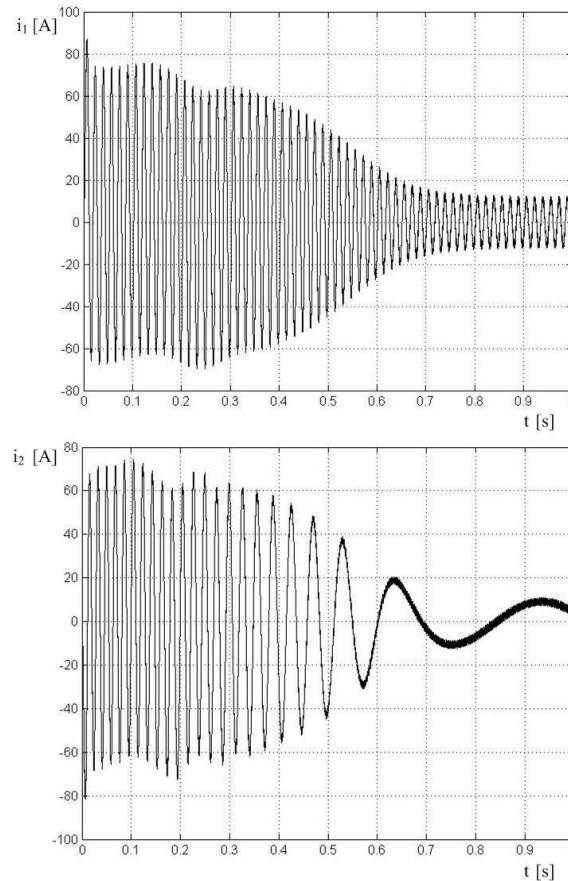
Aby być mo liwe wytwarzanie momentu nap dowego, pr ty (druty nawojowe) uzwojenia wirnika musz by stale przecinane przez linie sićwiruj cego pola magnetycznego, czyli pr dko wirowania wirnika n musi by mniejsza od pr dko ci pola wiruj cego (pr dko ci synchronicznej) n_1 . Wzgl dn ró nic tych pr dko ci nazywamy po lizgiem s i definiujemy worem (9.3)

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad \text{lub} \quad s_{\%} = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100\% \quad (9.3)$$

przy czym: n_1 ó pr dko synchroniczna zdefiniowana wzorem:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} \quad (9.4)$$

gdzie: f_1 ó cz stotliwo sieci zasilaj cej, p ó liczba par biegunów silnika.



Rys. 9.3. Przebieg prądu stojana $i_1(t)$ oraz wirnika $i_2(t)$ w czasie rozruchu silnika

Położenie silnika przy obciążeniu znamionowym wynosi kilka procent i jest tym mniejszy, im większa jest moc znamionowa. Przy przeciążeniu silnika położenie wynosi kilkanaście procent, a podczas biegu jałowego silnika, nawet poniżej 1%. W pierwszej chwili rozruchu, gdy wirnik pozostaje jeszcze w spoczynku, położenie jest równe 100% ($s=1$). W czasie ruchu wirnika z prędkością ω obrotów n , pole wirujące względem niego z prędkością $\Delta n = n_1 - n$. Częstotliwość prądu w uzwojeniach wirnika jest więc równa

$$f_2 = \frac{n \cdot p}{60} = \frac{s n_1 p}{60} = s f_1 \quad (9.5)$$

Ze wzoru (9.5) wynika, że w warunkach ustalonej pracy silnika (położenie równe kilka procent) częstotliwość prądu wirnika jest nieznaczna, równa kilka herców. Sytuację to ilustruje przykładowy przebieg prądu wirnika dla stanu ustalonego ($t > 0,7s$), pokazany na rys. 9.3.

Siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu stojana jest określona zależnością:

$$E_1 = 4,44 k_1 z_1 f_1 \Phi_m \quad (9.6)$$

gdzie: k_1 ów współczynnik uzwojenia stojana, z_1 ów liczba zwojów jednej fazy uzwojenia stojana połączonych szeregowo, Φ_m ów amplituda strumienia magnetycznego.

Siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu nieruchomego wirnika opisuje zależność

$$E_2 = 4,44 k_2 z_2 f_1 \Phi_m \quad (9.7)$$

gdzie: k_2 ów współczynnik uzwojenia wirnika, z_2 ów liczba zwojów uzwojenia wirnika, Φ_m ów amplituda strumienia magnetycznego.

Siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu wirnika obracającego się z położeniem s jest, przy uwzględnieniu zależności (9.5), określona wzorem

$$E_{2s} = 4,44 k_2 z_2 f_2 \Phi_m = s E_2 \quad (9.8)$$

Prąd płynący w uzwojeniu wirnika wirującego z poślizgiem s opisuje zależność

$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{(R_2)^2 + X_{2s}^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}} \quad (9.9)$$

gdzie: R_2 – rezystancja uzwojenia wirnika, $X_{2s} = 2\pi f_2 = s \cdot 2\pi f_1$ – reaktancja rozproszenia uzwojenia wirnika obracającego się z poślizgiem s , $X_2 = 2\pi f_1$ – reaktancja rozproszenia uzwojenia wirnika zatrzymanego.

Moment elektromagnetyczny silnika asynchronicznego powstaje w wyniku dynamicznego oddziaływania pola wirującego wytworzonego przez stojan i prądu indukowanego w uzwojeniach wirnika. Moment ten wyrażony jest następującą zależnością

$$M = kU^2 \frac{\frac{R'_2}{s}}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2} \quad (9.10)$$

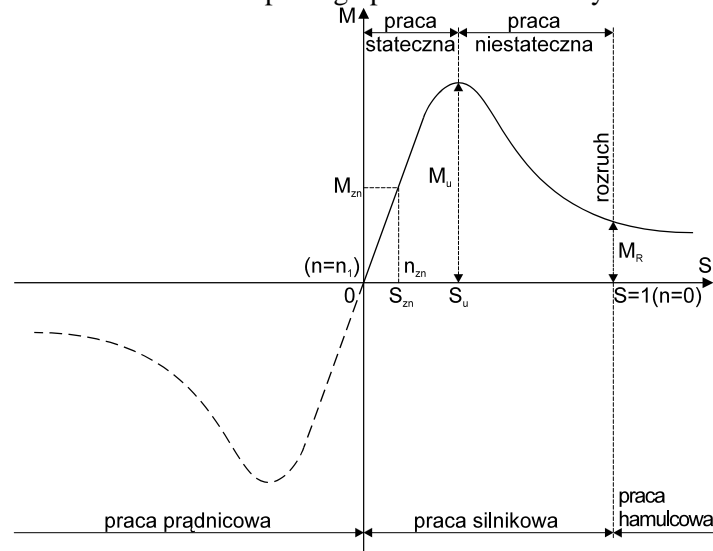
przy czym: k – stała, której wartość zależy m.in. od liczby par biegunów, liczby faz uzwojenia oraz częstotliwości prądu, U – wartość skuteczna przewodowego napięcia sieci, R_1 , X_1 – rezystancja i reaktancja rozproszenia uzwojenia stojana, R'_2 , X'_2 – rezystancja i reaktancja rozproszenia uzwojenia wirnika przeliczone na stronę stojana, s – poślizg.

Moc na wale silnika (moc mechaniczna) jest powiązana z momentem napędowym zależnością

$$P = M \omega \quad (9.11)$$

gdzie: ω – prędkość kątowa wirnika silnika wyrażona w [rad/s] lub [1/s], M – moment mechaniczny na wale silnika w niutonometrach [Nm].

Graficzną ilustracją zależności momentu M od poślizgu przedstawiono na rys. 9.4.



Rys. 9.4. Wykres zależności $M = f(s)$

Moment maksymalny, zwany także momentem utyku określony jest wzorem

$$M_u \cong kU^2 \frac{1}{2(X_1 + X'_2)} \quad (9.12)$$

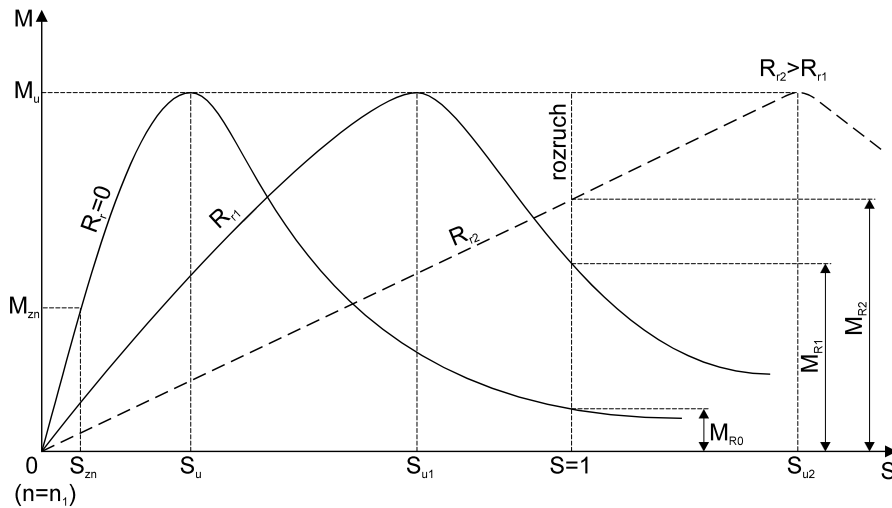
Moment maksymalny występuje przy poślizgu utyku s_u danym zależnością

$$s_u = \frac{R'_2}{X_1 + X'_2} \quad (9.13)$$

Po lizg utyku wynosi (10÷25)%, si gaj c nawet 30%. Je eli moment obci enia na wale silnika przekroczy warto momentu maksymalnego, silnik przechodzi w obszar pracy niestatecznej i zatrzymuje si (utyka).

Momentem rozruchowym M_R nazywamy moment, jaki dziaa na wirnik w chwili, gdy $n=0$ ($s=1$). Oznacza to, e po uwzgl dnieniu w zale no ci (9.12), e $s=1$, dostajemy wzór opisuj cy moment rozruchowy w postaci

$$M_R = kU^2 \frac{R'_2}{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2} \quad (9.14)$$



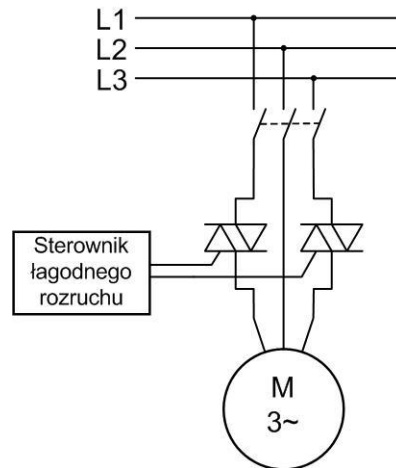
Rys. 9.5. Zmiana momentu rozruchowego M_R za pomoc rezystancji dodatkowej

Jak wynika z zale no ci (9.13) i (9.14), po lizg utyku s_u nie zale y od rezystancji wirnika R_2 , wywiera ona jednak wyra ny wpw na moment maksymalny M_R . Wobec tego wczenie w obwód wirnika dodatkowej regulowanej rezystancji R_r (rozrusznik) zmienia po lizg utyku, zmieniaj c jednocze nie moment rozruchowy M_R (rys. 9.5). Rezystancja dodatkowa, o odpowiednio dobranej warto ci, mo e spowodowa , e moment rozruchowy jest równy nawet momentowi maksymalnemu. Przy dalszym wzro cie rezystancji R_r (np. R_{r2} na rys. 9.5) moment rozruchu b dzie mala

9.1.2. Rozruch silników asynchronicznych zwartych

Rozruch silnika obejmuje okres przej ciowy od postoju do stanu pracy ustalonej. Rozruch jest mo liwy tylko wtedy, gdy moment elektromagnetyczny silnika przewy sza moment hamuj cy na wale, czyli wyst puje tzw. moment dynamiczny. Przy okre lonym momencie bezw adno ci uk udu silnik-maszyna robocza, warto momentu dynamicznego decyduje o czasie trwania rozruchu.

Praca silnika asynchronicznego przy nieruchomym wirniku, ze zwartym jego uzwojeniem, odpowiada przypadkowi, w którym po lizg $s = 1$. Jak wynika ze wzoru (9.9), ze wzrostem po lizgu wzrasta pr d w uzwojeniu wirnika a wi c i stojana. Wobec tego w pocz tkowej fazie rozruchu ($s = 1$) pr d przybiera znacz n warto , która maleje w miar rozp dziania si wirnika (patrz przebieg pr du stojana i wirnika pokazany na rys. 9.3). Pr d ten ma negatywny skutek zarówno dla samego silnika (nagrzewanie uzwoje), jak dla sieci zasilaj cej (du e spadki napi). Celem podejmowanych zabiegów technicznych jest zatem d enie do zmniejszenia warto ci pr du rozruchowego, przy jednoczesnym mo liwym zwi kszeniu momentu rozruchowego silnika. Zgodnie z wymaganiami normy PN-89E-05012 (*Urz dzenia elektroenergetyczne ó Dobór silników elektrycznych i ich instalowanie ó Ogólne wymagania i ich odbiór techniczny*) urz dzenia rozruchowe powinny by tak dobierane, aby pr d rozruchu silników o mocy do 5 kW nie przekracza warto ci $2,5I_{zn}$, a dla silników o mocy (5÷100) kW ó warto ci $2,2I_{zn}$ lub pr d rozruchu nie przekracza warto ci 60 A przy napi ciu 400 V.



Rys. 9.6. Schemat włączenia sterownika łagodnego rozruchu silnika asynchronicznego

Wraz z rozwojem elektroniki (triaki, tranzystory IGBT i mikroprocesory) stało się możliwe stosowanie układów łagodnego startu (soft-start controllers), umożliwiając optymalizację przebiegu fazy rozruchu, mającej szczególne znaczenie dla silników klatkowych. Na rys. 9.6 pokazano ogólny schemat włączenia sterownika łagodnego rozruchu z elektronicznymi elementami mocy w postaci triaków. Zastosowanie tego rodzaju układów nie jest przedmiotem badań laboratoryjnych w ramach niniejszego wiczenia.

9.1.2.1. Rozruch bezpo redni

Możliwość uruchomienia silnika asynchronicznego zwartego przez bezpo rednie jego przyłączenie do sieci stanowi jego ogromną zaletę, powoduje jednak przepływ znacznego prądu rozruchowego o wartości $I_R = (4\div 8) I_{zn}$. Z tego powodu przepisy ograniczają stosowanie rozruchu bezpo redniego w sieci miejskiej niskiego napięcia do silników o mocy do kilku kilowatów (najczęściej 5 kW).

9.1.2.2. Rozruch za pomocą przełącznika gwiazda-trójkąt

Przełącznik gwiazda-trójkąt stosowany jest w celu zmniejszenia prądu pobieranego z sieci w chwili rozruchu poprzez zmniejszenie napięcia na zaciskach uzwojenia stojana. W pierwszej chwili uruchamiania, uzwojenie stojana zostaje połączony w gwiazdę, po czym po zwiększeniu prędkości obrotowej wirnika, następuje przełączenie w trójkąt. Jeżeli silnik zasilany jest z sieci o napięciu przewodowym U , to przy połączeniu w gwiazdę, napięcie fazowe wynosi $U_f = \frac{U}{\sqrt{3}}$, a przy połączeniu w trójkąt $U_f = U$.

Prąd rozruchu (przewodowy) przy **połączeniu w gwiazdę** wynosi

$$I_R = I_f = \frac{U_f}{Z_{fR}} = \frac{U}{\sqrt{3} Z_{fR}} \quad (9.15)$$

gdzie: Z_{fR} – impedancja jednej fazy stojana w początkowej fazie rozruchu.

Można przyjąć, że impedancja Z_{fR} niezależnie od sposobu skojarzenia uzwojeń pozostaje w przybliżeniu niezmienna, dlatego prąd rozruchu (przewodowy) **przy połączeniu w trójkąt** może być wyznaczony zgodnie z następującą zależnością

$$I'_R = \sqrt{3} I_f = \sqrt{3} \frac{U_f}{Z_{fR}} = \sqrt{3} \frac{U}{Z_{fR}} \quad (9.16)$$

Po podzieleniu stronami zależności (9.15) przy **połączeniu w gwiazdę** i (9.16) przy **połączeniu w trójkąt** dostajemy relację

$$\frac{U}{\sqrt{3} Z_{fR}} \cdot \frac{Z_{fR}}{\sqrt{3} U} = \frac{1}{3} \quad (9.17)$$

Z powyższego wynika, że **zastosowanie przełącznika Δ/Δ powoduje około trzykrotne zmniejszenie prądu rozruchu**. Relacja ta nie jest dokładna, gdy impedancja Z_{fr} nie zachowuje stałej wartości i przy połączeniu w Δ jest ona nieco większa. Wobec tego stosunek prądów rozruchowych wypada na ogólnie nieco mniejszy niż $1/3$.

Moment rozruchowy jest proporcjonalny do kwadratu napięcia (patrz wzór (9.12)), zatem stosunek momentu rozruchowego przy połączeniu w Δ do momentu rozruchowego przy połączeniu w Δ jest równy

$$\left(\frac{U}{\sqrt{3}U}\right)^2 = \frac{1}{3} \quad (9.18)$$

Oznacza to, że **moment rozruchowy maleje równie 3-krotnie przy zastosowaniu przełącznika Δ/Δ** , czyli ten sposób rozruchu może być wykorzystywany wówczas, gdy rozruch odbywa się bez obciążenia lub przy niewielkim obciążeniu. Przełączników gwiazda-trójkąt używa się przy uruchamianiu silników średniej mocy (najczęściej do 15 kW) i tylko do silników, których uzwojenie stojana w czasie normalnej pracy powinno być połączone w Δ . Dotyczy to np. silnika o napięciu znamionowym 400/690 V w sieci 3x230/400 V lub silnika z oznaczeniem na tabliczce znamionowej w postaci 400V Δ .

9.1.2.3. Rozruch za pomocą autotransformatora

Ten sposób rozruchu stosuje się do silników dużej mocy. Zadaniem autotransformatora jest zmniejszanie napięcia doprowadzanego do silnika do wartości $(0,5 \div 0,7) U_{zn}$. Wobec tego obniżone napięcie U_2 przyłączone do silnika wynosi

$$U_2 = \frac{U_1}{g} \quad (9.19)$$

gdzie: U_1 – napięcie sieci, g – przekładnia autotransformatora ($g > 1$)

Prąd doprowadzany do silnika jest równy

$$I_2 = \frac{U_2}{Z_{fr}} = \frac{U_1}{gZ_{fr}} \quad (9.20)$$

natomiast za prąd w uzwojeniu pierwotnym autotransformatora

$$I_{IR} = \frac{I_2}{g} = \frac{U_1}{g^2 Z_{fr}} \quad (9.21)$$

Przy bezpośrednim włączeniu silnika do sieci prąd pobierany z sieci będzie równy

$$I_{IRb} = \frac{U_1}{Z_{fr}} \quad (9.22)$$

Dzielnymi stronami równania (9.19) i (9.20) otrzymujemy relację określającą stopień zmniejszenia prądu sieci w postaci

$$\frac{I_{IR}}{I_{IRb}} = \frac{1}{g^2} \quad (9.23)$$

Z powyższego wzoru wynika, że w wyniku zastosowania autotransformatora, prąd rozruchu pobierany z sieci zmniejsza się g^2 -krotnie, jednak w tym samym stopniu maleje moment rozruchowy, czyli

$$\frac{M_R}{M_{Rb}} = \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = \left(\frac{U_1}{gU_1}\right)^2 = \frac{1}{g^2} \quad (9.24)$$

gdzie: M_R – moment rozruchowy po wprowadzeniu autotransformatora, M_{Rb} – moment rozruchowy przy bezpośrednim włączeniu silnika.

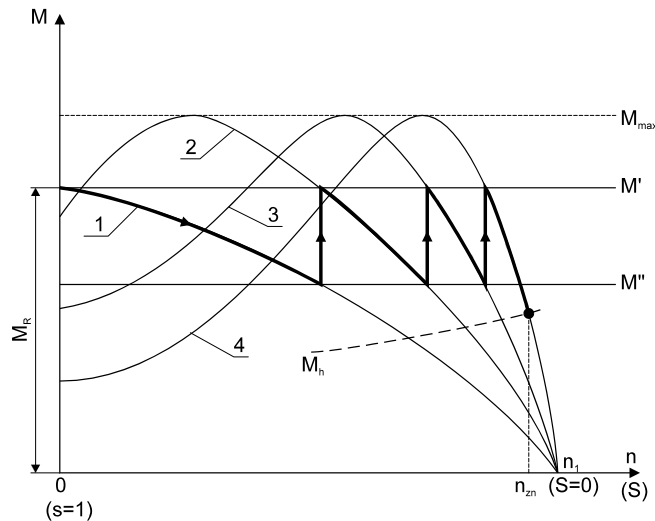
Przykądowo, obniżeniu napięcia do 50% wartości znamionowej ($U = 0.5 U_n$) towarzyszy zmniejszenie prądu rozruchu i momentu rozruchowego do 25% wartości odpowiadających rozruchowi bezpoładniemu.

9.1.3. Rozruch silników asynchronicznych pier cieniowych

Jak wynika z zależności (9.7), prąd początkowy w uzwojeniu wirnika silnika w chwili rozruchu ($s = 1$) określa zależność

$$I_{2R} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} \quad (9.25)$$

Relacja (9.25) pokazuje, że zwiększeniu rezystancji R_2 w obwodzie wirnika towarzyszy zmniejszenie prądu w uzwojeniu wirnika w pierwszej fazie rozruchu, a tym samym i zmniejszenie prądu I_1 pobieranego z sieci. Jednocześnie wzrasta wartość momentu rozruchowego (patrz rys. 9.5). Podobny efekt (zmniejszenia prądu w sieci) uzyskano by w wyniku włączenia dodatkowej reaktancji (zwiększenie reaktancji X_2), jednak w tym przypadku zmalałby również moment maksymalny (moment utyku) opisany wzorem (9.12), co spowodowałoby zmniejszenie momentu rozruchowego.



Rys. 9.7. Przebieg rozruchu silnika asynchronicznego pier cieniowego na tle charakterystyk $M=f(s)$

Rezystory włączone w obwód wirnika pracują w układzie tzw. rozrusznika trójfazowego. Na rys. 9.11 pokazano schemat włączenia rozrusznika. Wiele silników wyposażonych jest w urządzenie, które po dokonaniu rozruchu zwraca bezpoładnie uzwojenie wirnika i podnosi szczotki. Powoduje to zmniejszenie zużycia pier cieni i szczotek oraz pozwala na zastosowanie mniejszych przekrojów przewodów łączących wirnik silnika z rozrusznikiem.

Całkowitą rezystancję rozrusznika dobieramy tak, aby moment rozruchowy był mniejszy od momentu maksymalnego. Wartości momentów M_0 i M_0' (rys. 9.7) wynikają z narzuconych warunków rozruchu. Obliczając parametry rozrusznika do silników pier cieniowych, najczęściej wykorzystywane jest kryterium, aby podczas rozruchu prąd I_R zmieniał się w granicach od I_{Rmax} do I_{Rmin} .

Silnik po włączeniu do sieci pracuje według charakterystyki 1 pokazanej na rys. 9.7 (odpowiada to pośluzeniu rozrusznika w pozycji 1 ów rys. 9.11). Gdy silnik osiągnie taką prędkość obrotową, przy której moment obrotowy zmalał do wartości M_0' zmniejszamy rezystancję rozrusznika (z pozycji 1 na pozycję 2). Silnik pracuje wówczas według charakterystyki 2, co związane jest ze skokowymi zmianami momentu do wartości M_0 . Następnie zmniejszenia rezystancji rozrusznika dokonujemy przy takiej prędkości obrotowej, przy której moment ponownie będzie równy M_0' . Praca silnika odbywa się wówczas według charakterystyki 3. W ostatnim kroku następuje zwarcie rezystorów rozrusznika (pośluzenie 4 ów rys. 9.11) oznaczające przejście na charakterystykę 4, wzdłuż której odbywa się normalna praca silnika w jej punkcie, dla którego moment obrotowy równy jest momentowi hamującemu (obciążeniu) M_h .

9.1.4. Hamowanie silników asynchronicznych zwartych

Najczęściej stosowanymi sposobami hamowania silników asynchronicznych zwartych są: hamowanie przeciwprądowe i hamowanie przez stałą prędkość. Niekiedy jest stosowane również hamowanie przez dławienie (nadsynchroniczne).

9.1.4.1. Hamowanie przeciwprądowe

Hamowanie to polega na zmianie kierunku obrotów pola wirującego silnika. Zmianę tę dokonujemy przez przełączenie dwóch dowolnych faz uzwojenia stojana. Po zmianie kierunku pola wirującego jego prędkość wynosi

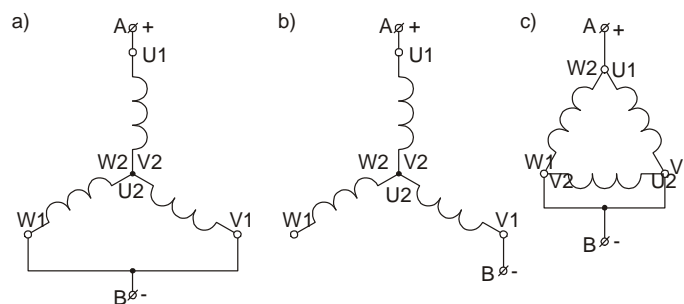
$$s = \frac{-n_1 - n}{-n_1} = \frac{n_1 + n}{n_1} > 1 \quad (9.26)$$

Z uwagi na fakt, że prędkość obrotowa wirnika n jest początkowo w przybliżeniu równa prędkości synchronicznej n_1 , a następnie, wskutek hamowania maleje, wobec tego w pierwszej fazie hamowania prędkość jest bliska wartości $s \approx 2$.

Z wyrażenia (9.9) wynika, że prędkość w czasie hamowania przeciwprądowego osiąga znaczną wartość, wiskaz od prędkości rozruchu bezpoziomego (dla $s = 2$ prędkość wirnika jest większa niż eli przy prędkości $s = 1$). Wniosek ten można wysnuć także na podstawie następującego rozumowania. W czasie hamowania, do silnika mającego energię kinetyczną nagromadzoną w wirniku i innych połączonych z nim masach wirujących dodawana jest również energia pola wirującego. Cała dostarczona energia zamienia się w wirniku na energię cieplną. Czas hamowania silnika jest bardzo krótki i silnik po zatrzymaniu się, może zmienić kierunek wirowania. W praktyce, wykorzystując tego rodzaju hamowanie stosuje się wyłączniki automatyczne (np. odrodkowe), odłączające silnik od sieci po jego zatrzymaniu. Hamowanie to jest najbardziej skuteczne ze znanych metod hamowania silnika asynchronicznego i bywa stosowane szczególnie tam, gdzie zachodzi niebezpieczeństwo utraty życia lub zdrowia obsługi.

9.1.4.2. Hamowanie przez stałą prędkość

Hamowanie przez stałą prędkość polega na tym, że po odłączeniu uzwojenia stojana od sieci trójfazowej zostaje ono podłączone do źródła prądu stałego, przy czym fazy stojana mogą być podłączone według jednego z podanych na rys. 9.8. układów.



Rys. 9.8. Sposoby łączenia faz stojana przy hamowaniu przez stałą prędkość

Prąd stały dołączony jest do zacisków A i B odpowiednio połączonych wyprowadzeń cewek uzwojenia stojana. Powstaje wówczas nieruchome w przestrzeni pole magnetyczne, które w obracającym się wirniku indukuje siłę elektromotoryczną proporcjonalną do prędkości obrotowej silnika. W zamkniętym obwodzie wirnika (zwarłym lub z rezystancją dodatkową) powstaje prąd, który wytwarza moment hamujący zmniejszający prędkość obrotów do zera.

Hamowanie przez stałą prędkość jest mniej skuteczne w porównaniu z hamowaniem przeciwprądowym, ale jest wygodne i po osiągnięciu prędkości obrotowej równej zeru nie zachodzi zmiana kierunku wirowania. W czasie hamowania, z sieci pobierana jest tylko energia potrzebna do wzbudzenia, zatem znacznie mniejsza jest ilość ciepła wydzielanego w uzwojeniach silnika.

9.2. Badania laboratoryjne

9.2.1. Dane znamionowe silników badanych

Na tabliczce znamionowej silnika asynchronicznego zwartego podawane s nast puj ce wielko ci:

1. Moc w kW;
2. Napi cie fazowe i mi dzyprzewodowe w V (np. 230/400) lub 400/690);
3. Pr d przewodowy w A (lub pr d fazowy i przewodowy);
4. Cz stotliwo w Hz;
5. Pr dko obrotowa w obr/min lub w obr/s;
6. Sprawno ;
7. Wspóczynnik mocy.

Na tabliczce znamionowej silnika asynchronicznego pier cieniowego podawane s dodatkowo:

8. Napi cie uzwojenia wirnika w V (przy nieruchomym wirniku);
9. Pr d fazowy uzwojenia wirnika w A (przy obci eniu znamionowym).

Na tabliczce bywa podany równie rodzaj pracy silnika: praca ci gła S₁, dorywcza S₂ (np. 30min) lub przerywana S₃ (np. 40%).

W sprawozdaniu nale y poda dane znamionowe badanych silników.

9.2.2. Rozruch silnika asynchronicznego zwartego

Uwaga! Ze wzgl du na mo liwo przegrzania uzwoje silnika we wszystkich punktach pomiaru pr du rozruchu (p.2.2 i 2.3), czas pomiaru powinien by mo liwie krótki.

9.2.2.1. Rozruch bezpo redni

Po zapoznaniu si z napi ciami znamionowym silnika oraz napi ciami sieci zasilaj cej uzwojenie stojana silnika nale y poćczy w gwiazd lub trójk t.

Przebieg rozruchu: Wirnik silnika zahamowa i po zamkni ciu wyćcznika w (rys. 9.9), odczyta warto pr du rozruchu.

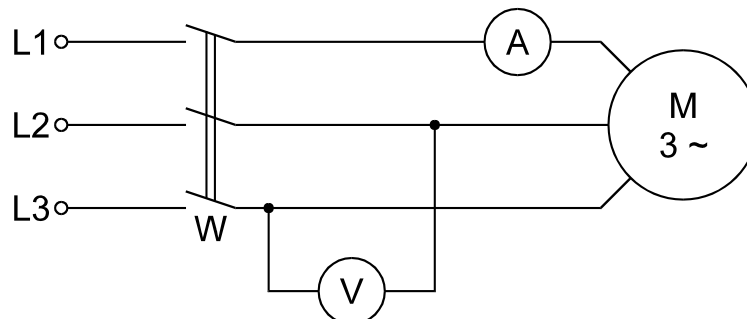
Protokół pomiaru:

$U = \dot{U} \dots\dots V$

$I_R = \dot{I} \dots\dots A$

$\frac{I_R}{I_{zn}} = \dot{I} \dot{I} \dots\dots$

Układ poćcze

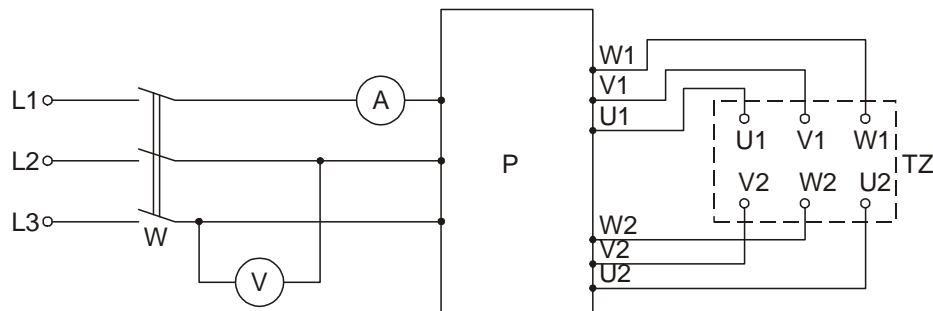


Rys. 9.9. Schemat układu do pomiaru prądu rozruchu w metodzie bezpo redniej.
Oznaczenia: : A ó amperomierz, V ó woltomierz, M ó badany silnik, w ó wyćcznik

9.2.2.2. Rozruch za pomoc przełącznika \star/Δ

Przebieg rozruchu:

Układ pomiarowy



Rys. 9.10. Schemat układu do pomiaru prądu rozruchu przy zastosowaniu przełącznika gwiazda-trójkąt.

Oznaczenia: A – amperomierz, V – woltomierz, P – przełącznik \star/Δ ,
TZ – tabliczka zaciskowa silnika, w – wyłącznik

1. Przełącznik P gwiazda-trójkąt należy ustawić w położeniu „0”. Przed pomiarem prądu (przy połączeniu w \star) wirnik zahamować. Zamknąć wyłącznik w i przełącznik P przestawić w położenie \star (uzwojenie stojana jest wówczas połączonych w gwiazdę). Odczytać wartość prądu rozruchu. Przestawić przełącznik w pozycję Δ .
2. Zwolnić hamulec klockowy. Przestawić przełącznik P w położenie \star/Δ . Gdy silnik osiągnie ustalony prędkość obrotową, przełączyć przełącznik P w położenie Δ . Przełączanie z \star w Δ powinno być wykonane szybko, aby okres pracy bez napięcia był jak najkrótszy, a zredukowanie prędkości obrotowej silnika jak najmniejsza, gdy w przeciwnym razie nastąpi nadmierny wzrost prądu (zwłaszcza, gdy silnik jest uruchamiany przy obciążeniu).

Protokół pomiaru:

$$U = \dots \text{V} \quad I_R = \dots \text{A} \quad \frac{I_R}{I_{zn}} = \dots$$

9.2.2.3. Zestawienie wyników pomiarów przy różnych rodzajach rozruchów

Wyniki pomiarów z punktów 2.2.1 oraz 2.2.2 należy zestawić w poniższej tabeli.

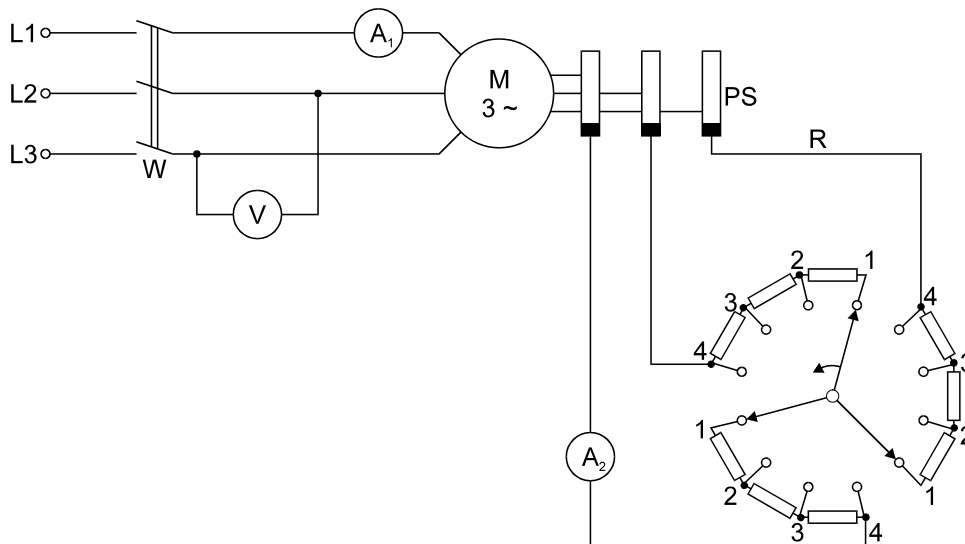
Lp.		U [V]	I_R A	$\frac{I_R}{I_{zn}}$
1	Rozruch bezpośredni			
2	Rozruch za pomoc przełącznika \star/Δ			

9.2.3. Rozruch silnika asynchronicznego pierścieniowego

Przebieg rozruchu:

Rozrusznik należy ustawić na maksimum rezystancji (położenie 1) i włączyć silnik do sieci (przez zamknięcie wyłącznika w). Odczytać wartość prądu rozruchu przy zahamowanym wirniku. W podobny sposób należy wykonać pomiar prądów rozruchu dla dwóch położenia poślizgu ruchomego styku rozrusznika (2 i 3) oraz przy rozruszniku zwartym (położenie 4).

Układ pomiarowy



Rys. 9.11. Schemat układu do pomiaru prądu rozruchu silnika pierścieniowego
Oznaczenia: A_1 , A_2 ó amperomierze, V ó woltomierz, M - badany silnik,
 R ó rozrusznik, w ó wycznik

Protokół pomiaru:

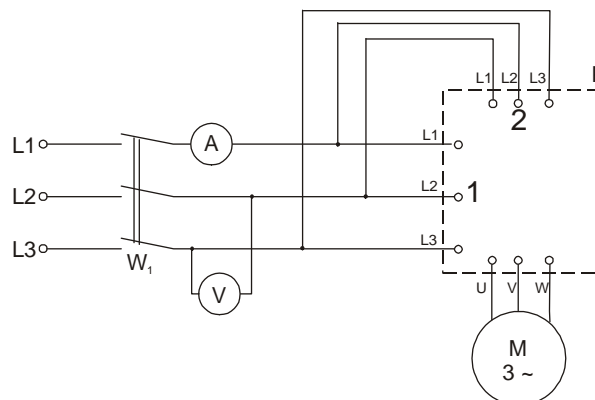
Wyniki pomiarów zestawisz w tabeli.

Lp	Położenie ruchomego styku rozrusznika	I_R [A]	$\frac{I_{1R}}{I_{zn}}$	I_{2R} [A]
1	Maksymalna rezystancja			
2	I położenie po rednie			
3	II położenie po rednie			
4	Rozrusznik zwarty			

9.2.4. Hamowanie silnika asynchronicznego zwartego

9.2.4.1. Hamowanie przeciwprądowe

Układ pomiarowy



Rys. 9.12. Schemat układu do pomiaru prądu hamowania przeciwprądowego
Oznaczenia: A ó amperomierz, V ó woltomierz, M ó badany silnik, P - przełącznik dwupołożeniowy

Przebieg hamowania:

Zamknij wyłącznik w , a następnie uruchom silnik przez włączenie przełącznika P w położenie „1”. Po osiągnięciu przez wirnik silnika ustalonej prędkości obrotowej przestawi przełącznik P w położenie „2”. Należy odczytać i zanotować wartość prądu początkowego w pierwszej chwili po przełączeniu.

Protokół pomiaru:

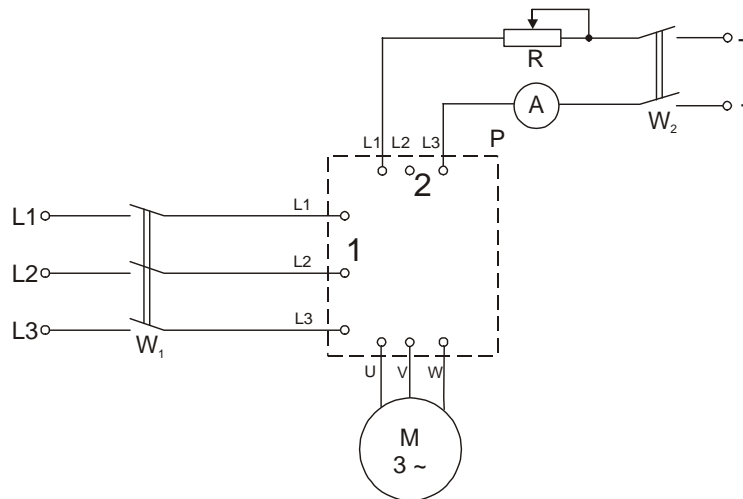
$$U = \dot{u} \dots\dots V \quad I_H = \dot{i} \dots\dots A \quad \frac{I_H}{I_{zn}} = \dots\dots$$

UWAGA: Oceń, czy odczytana na podstawie maksymalnego wychylenia wskazówki amperomierza wartość prądu rzeczywiście odpowiada ekstremalnej wartości skutecznej prądu w pierwszej fazie hamowania ($s \approx 2$). Wniosek opatrz odpowiednim komentarzem.

9.2.4.2. Hamowanie prądem stałym

Przed przystąpieniem do próby należy położyć uzwojenie stojana według jednego ze sposobów podanych w p.1.4.2 (rys. 9.8).

Układ połączeń:



Rys. 9.13. Schemat układu do pomiaru czasu hamowania prądem stałym
Oznaczenia: A – amperomierz prądu stałego, V – woltomierz, M – badany silnik,
 w_1 , w_2 – wyłączniki, R – opornik suwakowy, P – przełącznik dwupołożeniowy

Przełącznik P ustawij w położenie „2” i za pomocą opornika suwakowego R , przy zamknięciu tym wyłącznika w_2 nastaw daną wartość prądu stałego. Następnie przestawi przełącznik P w położenie „1” i zamykając wyłącznik w_1 dokonaj bezpośredniego rozruchu silnika. Po osiągnięciu przez silnik ustalonej prędkości obrotowej przestawi przełącznik P w położenie „2”. Należy wyznaczyć i zanotować w tabelce czasu hamowania dla kilku wartości natężenia prądu stałego.

Przebieg hamowania:

Protokół pomiaru

Wyniki pomiaru czasu hamowania zestawij w tabeli

Lp.	I_h [A]	t_h [s]
1	Hamowanie swobodne $I_h=0$	
2	1	
3	2	

4	3	
---	---	--

9.3. Uwagi i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów i otrzymanych wyników należy ocenić :

- wartość prądu pobieranego z sieci przy różnych sposobach rozruchu,
- wartość momentu rozruchowego przy różnych sposobach rozruchu,
- skuteczność hamowania silników asynchronicznych poznanymi metodami.

Dodatkowo: Zaproponuj sposób pomiaru wartości skutecznej prądu pierwszej fazy ($s \approx 2$) hamowania przeciwprądowego zapewniający zminimalizowanie błędów jego wyznaczenia.