

9 Rozruch i hamowanie silników asynchronicznych trójfazowych

Cel ćwiczenia

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

Program ćwiczenia

1. Wiadomości ogólne

- 1.1. Budowa i zasada działania silników asynchronicznych trójfazowych
- 1.2. Rozruch silników asynchronicznych zwartych
 - 1.2.1. Rozruch bezpośredni
 - 1.2.2. Rozruch za pomocą przełącznika λ/Δ
 - 1.2.3. Rozruch za pomocą autotransformatora
- 1.3. Rozruch silników asynchronicznych pierścieniowych
- 1.4. Hamowanie silników asynchronicznych zwartych
 - 1.4.1 Hamowanie przeciwwprądowe
 - 1.4.2 Hamowanie prądem stałym

2. Badania laboratoryjne

- 2.1. Dane znamionowe silników badanych
- 2.2. Rozruch silnika asynchronicznego zwartego
- 2.3. Rozruch silnika asynchronicznego pierścieniowego
- 2.4. Hamowanie silnika asynchronicznego zwartego

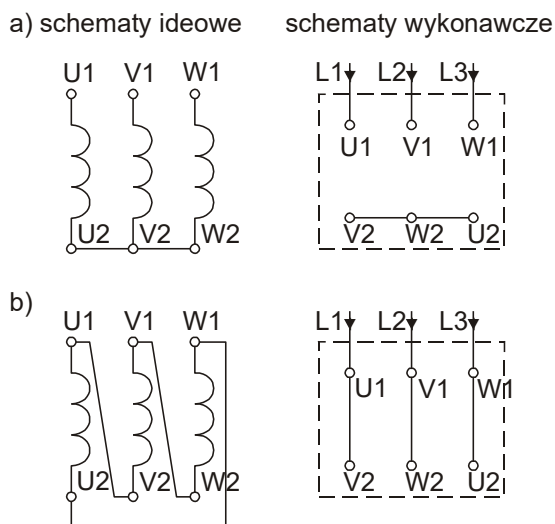
3. Uwagi i wnioski

1. Wiadomości ogólne

1.1. Budowa i zasada działania silników asynchronicznych trójfazowych

Silniki asynchroniczne są najbardziej rozpowszechnionymi maszynami elektrycznymi, zarówno z uwagi na ich względnie niską cenę, jak i prostotę 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 żłobki, w których umieszczone jest uzwojenie trójfazowe. Cewki każdej z faz są przesunięte względem siebie o 120° . Uzwojenie stojana może być połączone w gwiazdę lub trójkąt (rys. 2.7.1).

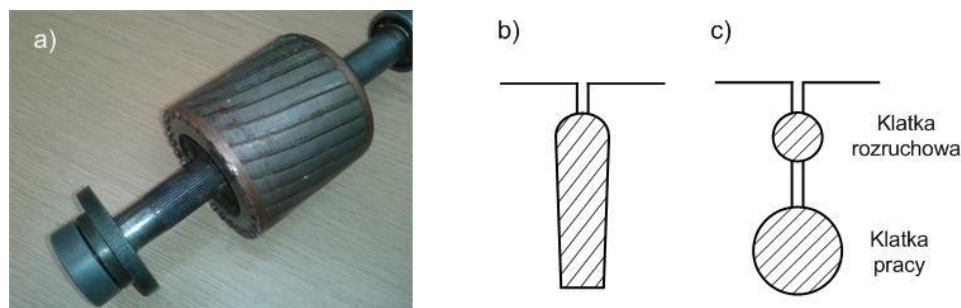


Rys. 2.7.1. Sposób łączenia uzwojeń stojana: a) w gwiazdę; b) w trójkąt
 U1, V1, W1 – początki uzwojeń; U2, V2, W2 – końce uzwojeń

W przypadku, gdy znamionowe napięcie fazowe stojana jest równe napięciu liniowemu trójfazowej sieci zasilającej, uzwojenie stojana silnika powinno być skojarzone w trójkąt (Δ), natomiast w przypadku, gdy napięcie liniowe sieci jest $\sqrt{3}$ razy większe niż napięcie fazowe silnika – w gwiazdę (Y). W obecnie produkowanych silnikach rozpoznanie prawidłowego sposobu skojarzenia

uzwojenia stojana jest łatwe, gdyż podawane jest w postaci zestawienia napięcia liniowego sieci i symbolu skojarzenia uzwojenia stojana, np. $400V\Delta$ lub $400V\text{Y}$.

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



Rys. 2.7.2. a) Uzwojony wirnik silnika klatkowego (zwarłego), b) żłobek wirnika głębokożłobkowego, c) żłobek wirnika dwuklatkowego

W silniku asynchronicznym zwarłym, w żłobkach wirnika znajdują się niez izolowane pręty wykonane z miedzi lub aluminium zwarłe na obydwu czołach wirnika (rys. 2.7.2a). Wirniki silników dużej mocy (nawet rzędu MW) wykonywane są jako klatkowe w rozwiązaniu tzw. głębokożłobkowym lub dwuklatkowym. Silniki tego typu mają korzystną charakterystykę rozruchową (mniejszy prąd rozruchu przy większym momencie rozruchowym).

W silniku asynchronicznym pierścieniowym uzwojenie wirnika wykonane jest przewodami izolowanymi (druty nawojowe izolowane emalią), podobnie jak uzwojenie stojana. Uzwojenie to jest najczęściej uzwojeniem trójfazowym skojarzonym trwale w gwiazdę bądź w trójkąt. Łączenie w trójkąt stosuje się dla silników dużych (o mocach większych niż 10 kW). Końce uzwojenia doprowadzone są do trzech odizolowanych pierścieni ślizgowych, do których przylegają szczotki węglowe. Do uzwojenia wirnika silnika pierścieniowego można przyłączyć rezystory zewnętrzne, które w zależności od tego, czy przewidziane są do pracy krótkotrwałej lub ciągłej, czyli zależnie od przekroju drutu oporowego, mogą służyć jako rozruszniki lub regulatory prędkości obrotowej. Silniki asynchroniczne pierścieniowe, jako bardziej kosztowne i skomplikowane w obsłudze, nie są tak często spotykane w eksploatacji jak silniki zwarłe. Mają one w porównaniu z klatkowymi mniejszą sprawność i niższy współczynnik mocy ($\cos\phi$), lecz wykazują lepsze właściwości rozruchowe (względnie mały prąd i duży moment rozruchowy).

Uzwojenie stojana silnika asynchronicznego jest połączone z siecią zasilającą, natomiast uzwojenie wirnika jest od tej sieci elektrycznie odseparowane. W wyniku zjawiska indukcji elektromagnetycznej energia

elektryczna pobierana z sieci jest przenoszona do uzwojenia wirnika drogą sprzężenia magnetycznego.

Po włączeniu uzwojenia stojana do sieci trójfazowej płynie w nim przemienny prąd elektryczny, który wytwarza **wirujące pole magnetyczne** będące wynikiem zsumowania zmiennego pola magnetycznego wzbudzonego przez każdą z faz stojana. Identyczne pole wytwarzałby magnes trwały poruszający się po obwodzie stojana (wokół wirnika). Odkrycie tego zjawiska zawdzięczamy Nikoli Tesli. Pole wirujące, przecinając pręty uzwojenia wirnika, indukuje w nich siłę elektromotoryczną (stąd inna nazwa silnika – silnik indukcyjny). Jeżeli obwód uzwojenia wirnika jest zamknięty, popłynie w nim prąd. **Oddziaływanie pola magnetycznego pochodzącego od stojana i prądu płynącego w wirniku wywołuje powstanie momentu elektromagnetycznego działającego na wirnik**, a w konsekwencji, momentu obrotowego M wywołującego jego ruch.

$$M = F r \quad (2.7.1)$$

gdzie F - siła elektrodynamiczna, r - ramię, czyli promień wirnika

$$F = B i l \quad (2.7.2)$$

gdzie B - indukcja magnetyczna pola wytworzonego w stojanie, i - prąd płynący w prętach klatki wirnika, l - długość pręta, czyli długość wirnika

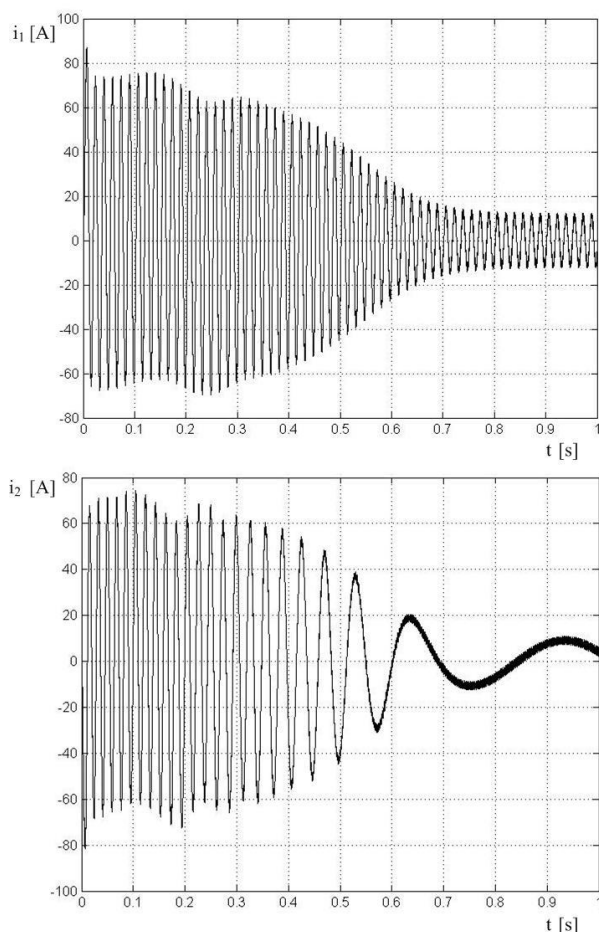
Aby było możliwe wytwarzanie momentu napędowego, pręty (druły nawojowe) uzwojenia wirnika muszą być stale przecinane przez linie sił wirującego pola magnetycznego, czyli prędkość wirowania wirnika n musi być mniejsza od prędkości pola wirującego (prędkości synchronicznej) n_1 . Względną różnicę tych prędkości nazywamy poślizgiem s i definiujemy worem (2.7.3)

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad \text{lub} \quad s_{\%} = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100\% \quad (2.7.3)$$

przy czym: n_1 – prędkość synchroniczna zdefiniowana wzorem:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} \quad (2.7.4)$$

gdzie: f_1 – częstotliwość sieci zasilającej, p – liczba par biegunów silnika.



Rys. 2.7.3. Przebieg prądu stojana $i_1(t)$ oraz wirnika $i_2(t)$ w czasie rozruchu silnika

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

$$f_2 = \frac{\Delta n \cdot p}{60} = \frac{s n_1 p}{60} = s f_1 \quad (2.7.5)$$

Ze wzoru (2.7.5) wynika, że w warunkach ustalonej pracy silnika (poślizg równy kilka procent) częstotliwość prądu wirnika jest nieznaczna, równa kilka herców. Sytuację tę ilustruje przykładowy przebieg prądu wirnika dla stanu ustalonego ($t > 0,7s$), pokazany na rys. 2.7.3.

Siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu stojana jest określona zależnością:

$$E_1 = 4,44k_1z_1f_1\Phi_m \quad (2.7.6)$$

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

Siłę elektromotoryczną indukowaną w uzwojeniu nieruchomego wirnika opisuje zależność

$$E_2 = 4,44k_2z_2f_1\Phi_m \quad (2.7.7)$$

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

Siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu wirnika obracającego się z poślizgiem s jest, przy uwzględnieniu zależności (2.7.5), określona wzorem

$$E_{2s} = 4,44k_2z_2f_2\Phi_m = sE_2 \quad (2.7.8)$$

Prąd płynący w uzwojeniu wirnika wirującego z poślizgiem s opisuje zależność

$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{(R_2)^2 + X_{2s}^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}} \quad (2.7.9)$$

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

$$M = kU^2 \frac{\frac{R'_2}{s}}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2} \quad (2.7.10)$$

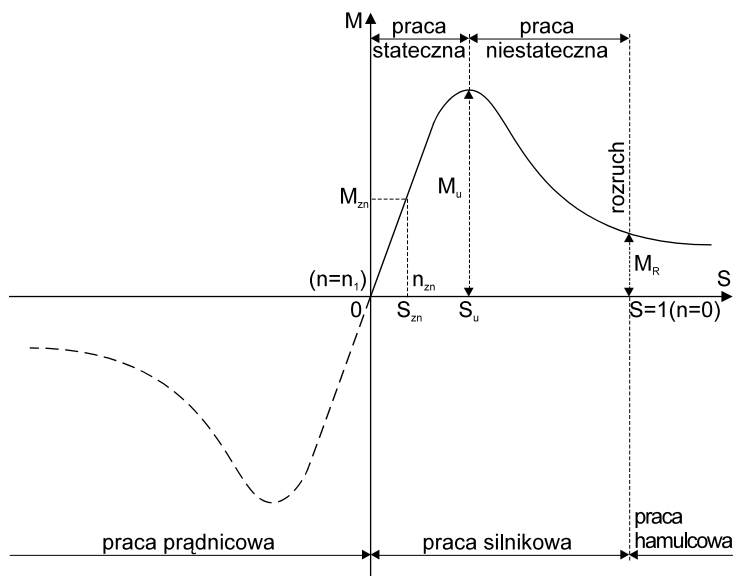
przy czym: k – stała, której wartość zależy m.in. od liczby par biegunów, liczby faz uzwojenia oraz częstotliwości prądu, U – wartość skuteczna liniowego napięcia sieci, R_1 , X_1 – rezystancja i reaktancja rozproszenia uzwojenia stojana, R'_2 , X'_2 – rezystancja i reaktancja rozproszenia uzwojenia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

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

$$P = \omega M \quad (2.7.11)$$

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

Graficzną ilustrację zależności momentu M od poślizgu przedstawiono na rys. 2.7.4.



Rys. 2.7.4. Wykres zależności $M = f(s)$

Moment maksymalny, zwany także momentem utyku określony jest wzorem

$$M_u \cong kU^2 \frac{1}{2(X_1 + X'_2)} \quad (2.7.12)$$

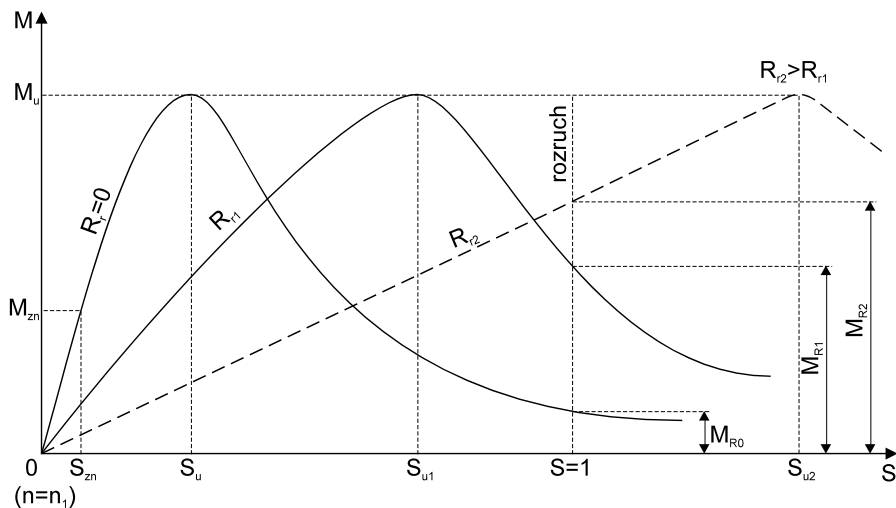
Moment maksymalny występuje przy poślizgu utyku s_u danym zależnością

$$s_u = \frac{R'_2}{X_1 + X'_2} \quad (2.7.13)$$

Poślizg utyku wynosi (10÷25)%, sięgając nawet 30%. Jeżeli moment obciążenia na wale silnika przekroczy wartość momentu maksymalnego, silnik przechodzi w obszar pracy niestatecznej i zatrzymuje się (utyka).

Momentem rozruchowym M_R nazywamy moment, jaki działa na wirnik w chwili, gdy $n=0$ ($s=1$). Oznacza to, że po uwzględnieniu w zależności (2.7.12), że $s=1$, dostajemy wzór opisujący moment rozruchowy w postaci

$$M_R = kU^2 \frac{R'_2}{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2} \quad (2.7.14)$$

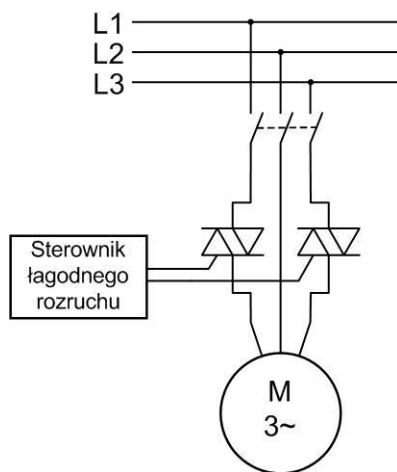


Rys. 2.7.5. Zmiana momentu rozruchowego M_R za pomocą rezystancji dodatkowej

Jak wynika z zależności (2.7.13) i (2.7.14), poślizg utyku s_u nie zależy od rezystancji wirnika R_2 , wywiera ona jednak wyraźny wpływ na moment maksymalny M_R . Wobec tego włączenie w obwód wirnika dodatkowej regulowanej rezystancji R_r (rozzrusznik) zmienia poślizg utyku, zmieniając

jednocześnie moment rozruchowy M_R (rys. 2.7.5). Rezystancja dodatkowa, o o odpowiednio dobranej wartości, może spowodować, że moment rozruchowy jest równy nawet momentowi maksymalnemu. Przy dalszym wzroście rezystancji R_r (np. R_{r2} na rys. 2.7.5) moment rozruchu będzie malał.

1.2. Rozruch silników asynchronicznych zwartych



Rys. 2.7.6. Schemat włączenia sterownika łagodnego rozruchu silnika asynchronicznego

Rozruch silnika obejmuje okres przejściowy od postoju do stanu pracy ustalonej. Rozruch jest możliwy tylko wtedy, gdy moment elektromagnetyczny silnika przewyższa moment hamujący na wale, czyli występuje tzw. moment dynamiczny. Przy określonym momencie bezwładności układu silnik-maszyna robocza, wartość momentu dynamicznego decyduje o czasie trwania rozruchu.

Praca silnika asynchronicznego przy nieruchomym wirniku, ze zwartym jego uzwojeniem, odpowiada przypadkowi, w którym poślizg $s = 1$. Jak wynika ze wzoru (2.7.9), ze wzrostem poślizgu wzrasta prąd w uzwojeniu wirnika a więc i stojana. Wobec tego w początkowej fazie rozruchu ($s = 1$) prąd przybiera znaczną wartość, która maleje w miarę rozpędzania się wirnika (patrz przebieg prądu stojana i wirnika pokazany na rys. 2.7.3). Prąd ten ma negatywny skutek zarówno dla samego silnika (nagrzewanie uzwojeń), jak dla sieci zasilającej (duże spadki napięć). Celem podejmowanych zabiegów technicznych jest zatem dążenie do zmniejszenia wartości prądu rozruchowego, przy jednoczesnym możliwym zwiększeniu momentu rozruchowego silnika. Zgodnie z wymaganiami normy PN-89E-05012 (*Urządzenia elektroenergetyczne – Dobór silników elektrycznych i ich instalowanie – Ogólne wymagania i ich odbiór techniczny*) urządzenia rozruchowe powinny być tak dobierane, aby prąd rozruchu silników o mocy do 5 kW nie przekraczał wartości $2,5I_{zn}$, a dla

silników o mocy (5÷100) kW – wartości $2,2I_{zn}$ lub prąd rozruchu nie przekraczał wartości 60 A przy napięciu 400 V.

Wraz z rozwojem elektroniki (triaki, tranzystory IGBT i mikroprocesory) stało się możliwe stosowanie układów łagodnego startu (soft-start controllers), umożliwiających optymalizację przebiegu fazy rozruchu, mającą szczególne znaczenie dla silników klatkowych. Na rys. 2.7.6 pokazano ogólny schemat włączenia sterownika łagodnego rozruchu z elektronicznymi z elektronicznymi elementami mocy w postaci triaków. Zastosowanie tego rodzaju układów nie jest przedmiotem badań laboratoryjnych w ramach niniejszego ćwiczenia.

1.2.1. Rozruch bezpośredni

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

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 połączone jest w gwiazdę, po czym po zwiększeniu prędkości obrotowej wirnika, następuje przełączenie w trójkąt. Jeżeli silnik zasilany jest z sieci o napięciu liniowym U , to przy połączeniu w gwiazdę, napięcie fazowe

wynosi $U_{f\lambda} = \frac{U}{\sqrt{3}}$, a przy połączeniu w trójkąt $U_{f\Delta} = U$. Wobec tego

$$U_{f\Delta} = \sqrt{3} U_{f\lambda}.$$

Prąd rozruchu przy połączeniu w gwiazdę wynosi

$$I_{R\lambda} = I_{f\lambda} = \frac{U_{f\lambda}}{Z_{fR}} = \frac{U}{\sqrt{3} Z_{fR}} \quad (2.7.15)$$

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 $I_{R\Delta}$ przy połączeniu w trójkąt może być wyznaczony zgodnie z następującą zależnością

$$I_{R\Delta} = \sqrt{3}I_{f\Delta} = \sqrt{3} \frac{U_{f\Delta}}{Z_{fR}} = \sqrt{3} \frac{U}{Z_{fR}} \quad (2.7.16)$$

Po podzieleniu stronami zależności (2.7.13) i (2.7.14) dostajemy relację

$$\frac{I_{R\lambda}}{I_{R\Delta}} = \frac{U}{\sqrt{3} Z_{fR}} \cdot \frac{Z_{fR}}{\sqrt{3} U} = \frac{1}{3} \quad (2.7.17)$$

Z powyższego wynika, że zastosowanie przełącznika λ/Δ powoduje około trzykrotne zmniejszenie prądu rozruchu. Relacja ta nie jest dokładna, gdyż impedancja Z_{fR} nie zachowuje stałej wartości i przy połączeniu w λ jest ona nieco większa. Wobec tego stosunek prądów $I_R/I_{R\Delta}$ wypada na ogół nieco mniejszy niż $1/3$.

Moment rozruchowy jest proporcjonalny do kwadratu napięcia (patrz wzór (2.7.12)), zatem stosunek momentu rozruchowego przy połączeniu w λ do momentu rozruchowego przy połączeniu w Δ jest równy

$$\frac{M_{R\lambda}}{M_{R\Delta}} = \left(\frac{U_{f\lambda}}{U_{f\Delta}} \right)^2 = \left(\frac{\frac{U}{\sqrt{3}}}{U} \right)^2 = \frac{1}{3} \quad (2.7.18)$$

Oznacza to, że moment rozruchowy maleje również 3-krotnie, 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 .

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 przyłożone do silnika wynosi

$$U_2 = \frac{U_1}{\vartheta} \quad (2.7.19)$$

gdzie: U_1 – napięcie sieci, ϑ – przekładnia autotransformatora ($\vartheta > 1$)

Prąd dopływający do silnika jest równy

$$I_2 = \frac{U_2}{Z_{fr}} = \frac{U_1}{\vartheta Z_{fr}} \quad (2.7.20)$$

natomiast zaś prąd w uzwojeniu pierwotnym autotransformatora

$$I_{1R} = \frac{I_2}{\vartheta} = \frac{U_1}{\vartheta^2 Z_{fr}} \quad (2.7.21)$$

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

$$I_{1Rb} = \frac{U_1}{Z_{fr}} \quad (2.7.22)$$

Dzieląc stronami równania (2.7.19) i (2.7.20) otrzymujemy relację określającą stopień zmniejszenia prądu sieci w postaci

$$\frac{I_{1R}}{I_{1Rb}} = \frac{1}{\vartheta^2} \quad (2.7.23)$$

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

$$\frac{M_R}{M_{Rb}} = \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = \left(\frac{U_1}{\vartheta U_1}\right)^2 = \frac{1}{\vartheta^2} \quad (2.7.24)$$

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

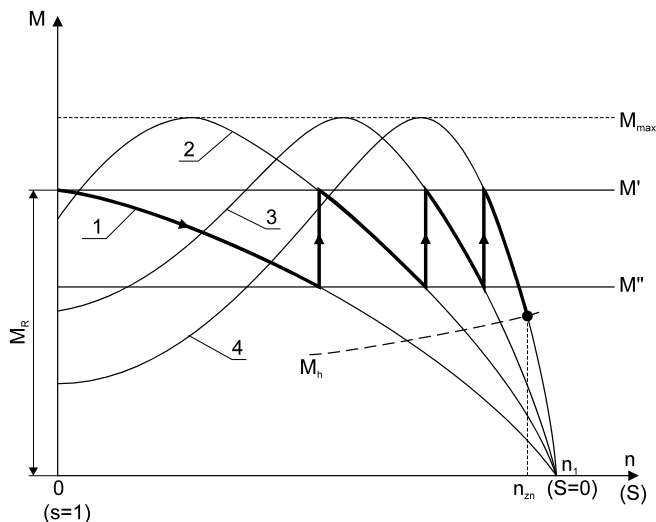
Przykładowo, obniżeniu napięcia do 50% wartości znamionowej ($\vartheta = 2$) towarzyszy zmniejszenie prądu rozruchu i momentu rozruchowego do 25% wartości odpowiadających rozruchowi bezpośredniemu.

1.3. Rozruch silników asynchronicznych pierścieniowych

Jak wynika z zależności (2.7.7), prąd płynący w uzwojeniu wirnika silnika w chwili rozruchu ($s = 1$) określa zależność

$$I_{2R} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} \quad (2.7.25)$$

Relacja (2.7.25) 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. 2.7.5). Podobny efekt (zmniejszenia prądu sieci) uzyskano by w wyniku włączenia dodatkowej reaktancji (zwiększenie reaktancji X_2), jednak w tym przypadku zmalałby również moment maksymalny (moment utyku) opisany wzorem (2.7.12), co spowodowałoby zmniejszenie momentu rozruchowego.



Rys. 2.7.7. Przebieg rozruchu silnika asynchronicznego pierścieniowego na tle charakterystyk $M=f(s)$

Rezystory włączone w obwód wirnika pracują w układzie tzw. rozrusznika trójfazowego. Na rys. 2.7.11 pokazano schemat włączenia rozrusznika. Wiele silników wyposażonych jest w urządzenie, które po dokonaniu rozruchu zwraca bezpośrednio uzwojenie wirnika i podnosi szczotki. Powoduje to zmniejszenie

zużycia pierścieni 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' i M'' (rys. 2.7.7) wynikają z narzuconych warunków rozruchu. Obliczając parametry rozrusznika do silników pierścieniowych, najczęściej wykorzystywane jest kryterium, aby podczas rozruchu prąd I_R zmieniał się w granicach od $I_{R\max}$ do $I_{R\min}$.

Silnik po włączeniu do sieci pracuje według charakterystyki 1 pokazanej na rys. 2.7.7 (odpowiada to położeniu rozrusznika w pozycji 1 – rys. 2.7.11). Gdy silnik osiągnie taką prędkość obrotową, przy której moment obrotowy zmaleje do wartości M'' zmniejszamy rezystancję rozrusznika (z pozycji 1 na pozycję 2). Silnik pracuje wówczas według charakterystyki 2, co związane jest ze skokową zmianą momentu do wartości M' . Następnego zmniejszenia rezystancji rozrusznika dokonujemy przy takiej prędkości obrotowej, przy której moment ponownie będzie równy M'' . Praca silnika odbywa się wówczas według charakterystyki 3. W ostatnim kroku następuje zwarcie rezystorów rozrusznika (położenie 4 – rys. 2.7.11) oznaczające przejście na charakterystykę 4, wzdłuż której odbywa się normalna praca silnika w jej punkcie, dla którego moment obrotowy równy jest momentowi hamującemu (obciążenia) M_h .

1.4. Hamowanie silników asynchronicznych zwartych

Najczęściej stosowanymi sposobami hamowania silników asynchronicznych zwartych są: hamowanie przeciwprądowe i hamowanie prądem stałym. Niekiedy jest stosowane również hamowanie prądnicowe (nadsynchroniczne).

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 poślizg wynosi

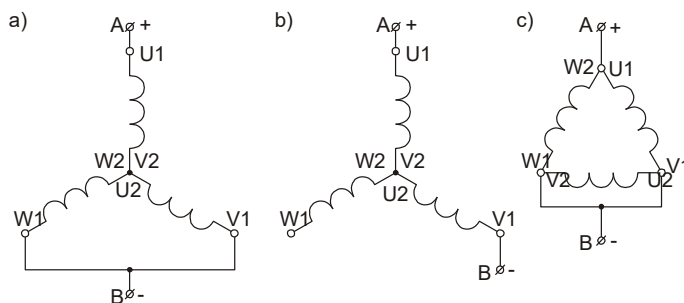
$$s = \frac{-n_1 - n}{-n_1} = \frac{n_1 + n}{n_1} > 1 \quad (2.7.26)$$

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 poślizg jest bliski wartości $s \approx 2$.

Z wyrażenia (2.7.9) wynika, że prąd płynący w czasie hamowania przeciwnieprądowego osiąga znaczną wartość, większą od prądu rozruchu bezpośredniego (dla $s = 2$ prąd wirnika jest większy aniżeli przy poślizgu $s = 1$). 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 ciepłą. 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. odśrodkowe), 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.

1.4.2. Hamowanie prądem stałym

Hamowanie prądem stałym 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. 2.7.8. układów.



Rys. 2.7.8. Sposoby łączenia faz stojana przy hamowaniu prądem stałym

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) płynie prąd, który wytwarza moment hamujący zmniejszający prędkość obrotową do zera.

Hamowanie prądem stałym jest mniej skuteczne w porównaniu z hamowaniem przeciwnieprądem, ale jest łagodne i po osiągnięciu prędkości

obrotowej równej zero 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.

2. Badania laboratoryjne

2.1. Oględziny i dane znamionowe silnika

Na tabliczce znamionowej silnika asynchronicznego zwartego podawane są następujące wielkości:

1. Moc w kW;
2. Napięcie fazowe i międzyprzewodowe w V (np. 230/400) lub 400/690);
3. Prąd przewodowy w A (lub prąd fazowy i przewodowy);
4. Częstotliwość w Hz;
5. Prędkość obrotowa w obr/min lub w obr/s;
6. Sprawność;
7. Współczynnik mocy.

Na tabliczce znamionowej silnika asynchronicznego pierścieniowego podawane są dodatkowo:

8. Napięcie uzwojenia wirnika w V (przy nieruchomym wirniku);
9. Prąd fazowy uzwojenia wirnika w A (przy obciążeniu znamionowym).

Na tabliczce bywa podany również rodzaj pracy silnika: praca ciągła S_1 , dorywcza S_2 (np. 30min) lub przerywana S_3 (np. 40%).

W sprawozdaniu należy podać dane znamionowe badanych silników.

2.2. Rozruch silnika asynchronicznego zwartego

Uwaga! Ze względu na możliwość przegrzania uzwojeń silnika we wszystkich punktach pomiaru prądu rozruchu (p.2.2 i 2.3), czas pomiaru powinien być możliwie krótki.

2.2.1. Rozruch bezpośredni

Po zapoznaniu się z napięciem znamionowym silnika oraz napięciem sieci zasilającej uzwojenie stojana silnika należy połączyć w gwiazdę lub trójkąt.

Przebieg rozruchu: Wirnik silnika zahamować i po zamknięciu wyłącznika w (rys. 2.7.9), odczytać wartość prądu rozruchu.

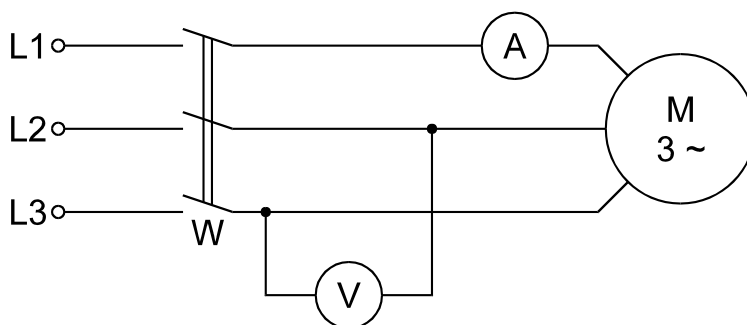
Protokół pomiaru:

$U = \dots\dots\dots V$

$I_R = \dots\dots\dots A$

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

Układ połączeń

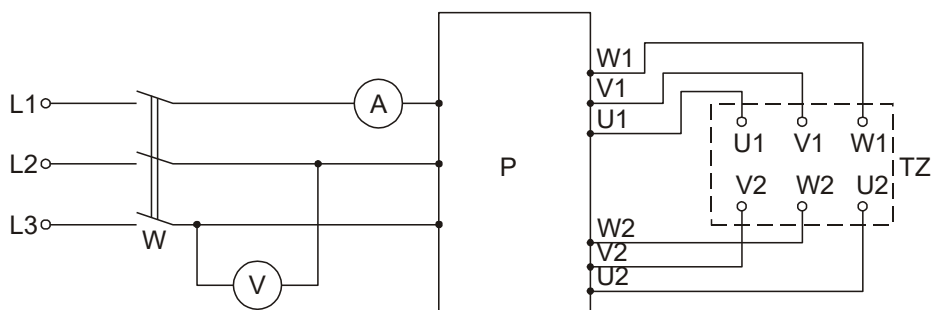


Rys. 2.7.9. Schemat układu do pomiaru prądu rozruchu w metodzie bezpośredniej.
Oznaczenia: A – amperomierz, V – woltomierz, M – badany silnik, w – wyłącznik

2.2.2. Rozruch za pomocą przełącznika \star/Δ

Przebieg rozruchu:

Układ połączeń



Rys. 2.7.10. Schemat układu do pomiaru prądu rozruchu przy zastosowaniu przełącznika gwiazda-trójkąt.

Oznaczenia: *A* – amperomierz, *V* – woltomierz, *P* – przełącznik $O-\star-\Delta$,
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 połączone w gwiazdę). Odczytać wartość prądu rozruchu. Przeszawić przełącznik w pozycję „0”.

2. Zwolnić hamulec klockowy. Przeszawić przełącznik *P* w położenie „ \star ”. Gdy silnik osiągnie ustaloną prędkość obrotową, przełączyć przełącznik *P* w położenie „ Δ ”. Przełączanie z \star w Δ powinno być wykonane szybko, aby okres pracy bez napięciowej był jak najkrótszy, a zredukowanie prędkości obrotowej silnika jak najmniejsze, gdyż w przeciwnym razie nastąpi nadmierny wzrost prądu (zwłaszcza, gdy silnik jest uruchamiany przy obciążeniu).

Protokół pomiaru:

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

2.2.3. Zestawienie wyników pomiarów przy różnych rodzajach rozruchów

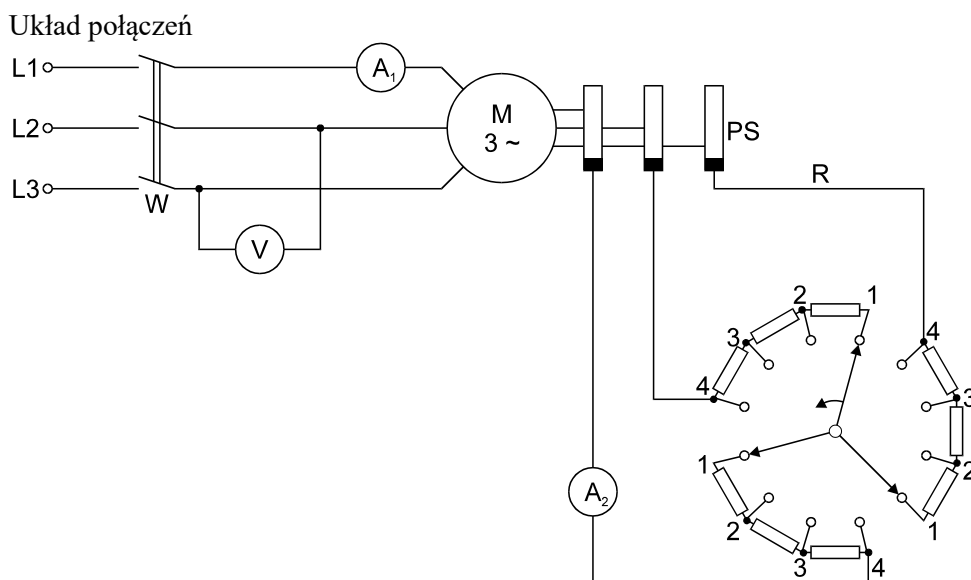
Wyniki pomiarów z punktów 2.2.1 oraz 2.2.2 należy zestawić w poniższej tabeli.

Lp.		U [V]	I_R A	$\frac{I_R}{I_{zn}}$
1	Rozruch bezpośredni			
2	Rozruch za pomocą przełącznika $\sphericalangle/\triangle$			

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 pośrednich ruchomego styku rozrusznika (2 i 3) oraz przy rozruszniku zwartym (położenie 4).



Rys. 2.7.11. Schemat układu do pomiaru prądu rozruchu silnika pierścieniowego
 Oznaczenia: A_1, A_2 – amperomierze, V – woltomierz, M – badany silnik,
 R – rozrusznik, w – wyłącznik

Protokół pomiaru:

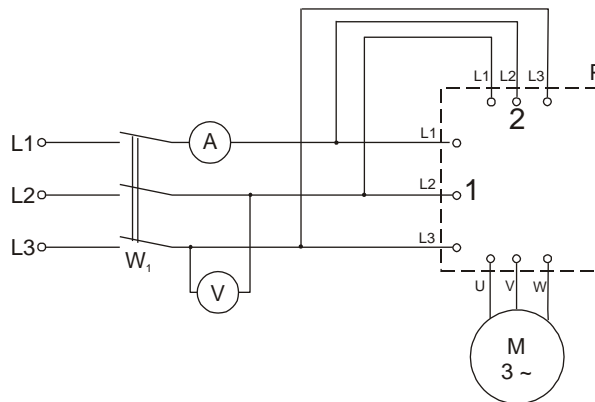
Wyniki pomiarów zestawień w tabeli.

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

2.4. Hamowanie silnika asynchronicznego zwartego

2.4.1. Hamowanie przeciwprądowe

Układ połączeń



Rys. 2.7.12. Schemat układu do pomiaru prądu hamowania przeciwprądowego
Oznaczenia: A – amperomierz, V – woltomierz, M – badany silnik, P - przelącznik dwupołożeniowy

Przebieg hamowania:

Zamknąć wyłącznik w, a następnie uruchomić silnik przez włączenie przelącznika P w położenie „1”. Po osiągnięciu przez wirnik silnika ustalonej prędkości obrotowej przestawić przelącznik P w położenie „2”. Należy odczytać i zanotować wartości prądu płynącego w pierwszej chwili po przelączeniu.

Protokół pomiaru:

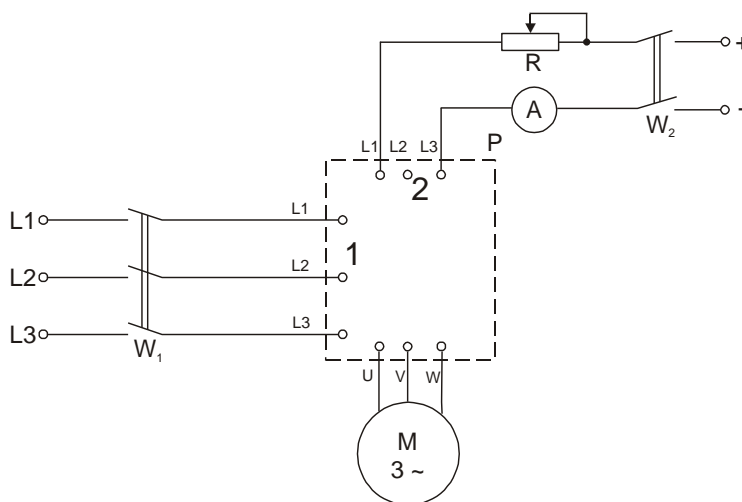
$$U = \dots\dots\dots V \quad I_H = \dots\dots\dots A \quad \frac{I_H}{I_{zn}} = \dots\dots$$

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

2.4.2. Hamowanie prądem stałym

Przed przystąpieniem do próby należy połączyć uzwojenie stojana według jednego ze sposobów podanych w p.1.4.2 (rys. 2.7.8).

Układ połączeń:



Rys. 2.7.13. Schemat układu do pomiaru czasu hamowania prądem stałym
Oznaczenia: A – amperomierz prądu stałego, V – woltomierz, M – badany silnik, w₁, w₂ – wyłączniki, R – opornik suwakowy, P – przełącznik dwupołożeniowy

Przełącznik *P* ustawić w położenie „2” i za pomocą opornika suwakowego *R*, przy zamkniętym wyłączniku *w₂* nastawić żądaną wartość prądu stałego. Następnie przestawić przełącznik *P* w położenie „1” i zamykając wyłącznik *w₁* dokonać bezpośredniego rozruchu silnika. Po osiągnięciu przez silnik ustalonej prędkości obrotowej przestawić 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 zestawień w tabeli

Lp.	I_h [A]	t_h [s]
1	Hamowanie swobodne $I_n=0$	
2	1	
3	2	
4	3	

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