

Ćwiczenie 5

Silnik obcowzbudny zasilany z nawrotnego prostownika sterowanego

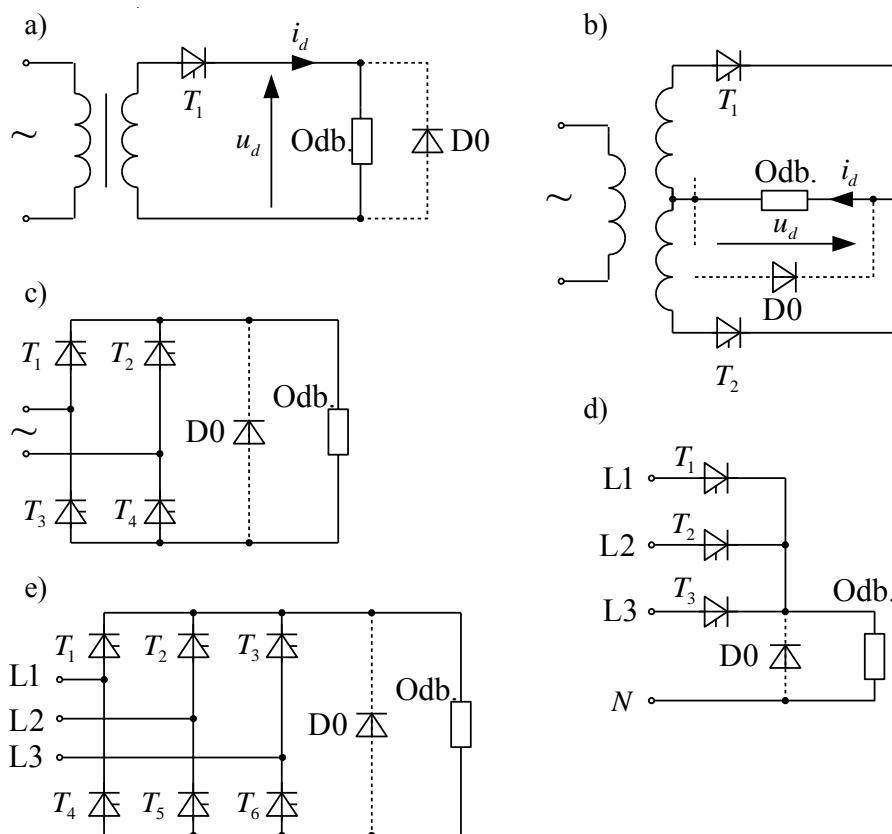
5.1. Program ćwiczenia

1. Zapoznanie się ze strukturą układu pomiarowego i budową prostownika mostkowego.
2. Pomiary charakterystyk elektromechanicznych silnika obcowzbudnego $\omega = f(I_t)$ dla obu kierunków obrotów, w otwartym i zamkniętym układzie regulacji, ze sprzężeniem od prędkości kątowej lub napięcia twornika.
3. Wyznaczenie sprawności i współczynnika mocy układu napędowego w funkcji obciążania silnika.
4. Pomiary oscylograficzne prądu sieciowego, napięcia wyjściowego z prostownika, przebiegu prądu twornika silnika przy nawrotach oraz wyznaczenie czasów trwania procesów dynamicznych.

5.2. Wiadomości teoretyczne

Z podstaw teorii maszyn prądu stałego wiadomo, że optymalną regulację prędkości kątowej silnika obcowzbudnego uzyskuje się przez zmianę napięcia twornika silnika. Spośród wielu układów regulacyjnych można przytoczyć tu tradycyjny układ Leonarda (zanikający już w zastosowaniach przemysłowych) lub prostownik sterowany (tranzystorowy lub tyrystorowy). Obecnie powszechnie jest stosowany standardowy układ napędowy, w którym silnik prądu stałego jest zasilany z sieci prądu przemiennego za pośrednictwem prostownika sterowanego nienawrotnego lub nawrotnego. Prostowniki należą do grupy przekształtników o komutacji sieciowej, w których pro-

ces przejmowania przewodzenia z jednego przez drugi zawór (komutacja zaworów) zależy od liczby faz i częstotliwości sieci. W zależności od liczby impulsów q w napięciu wyjściowym w okresie 2π , rozróżnia się układy np. 1-, 2-, 3-, 6-, 12-pulsowe. Prąd wyprostowany I_d zależy od napięcia wyprostowanego i parametrów odbiornika; może mieć przebieg ciągły (nie przyjmuje wartości zerowych) lub impulsowy (w pewnych przedziałach czasu w okresie 2π jest równy zero).



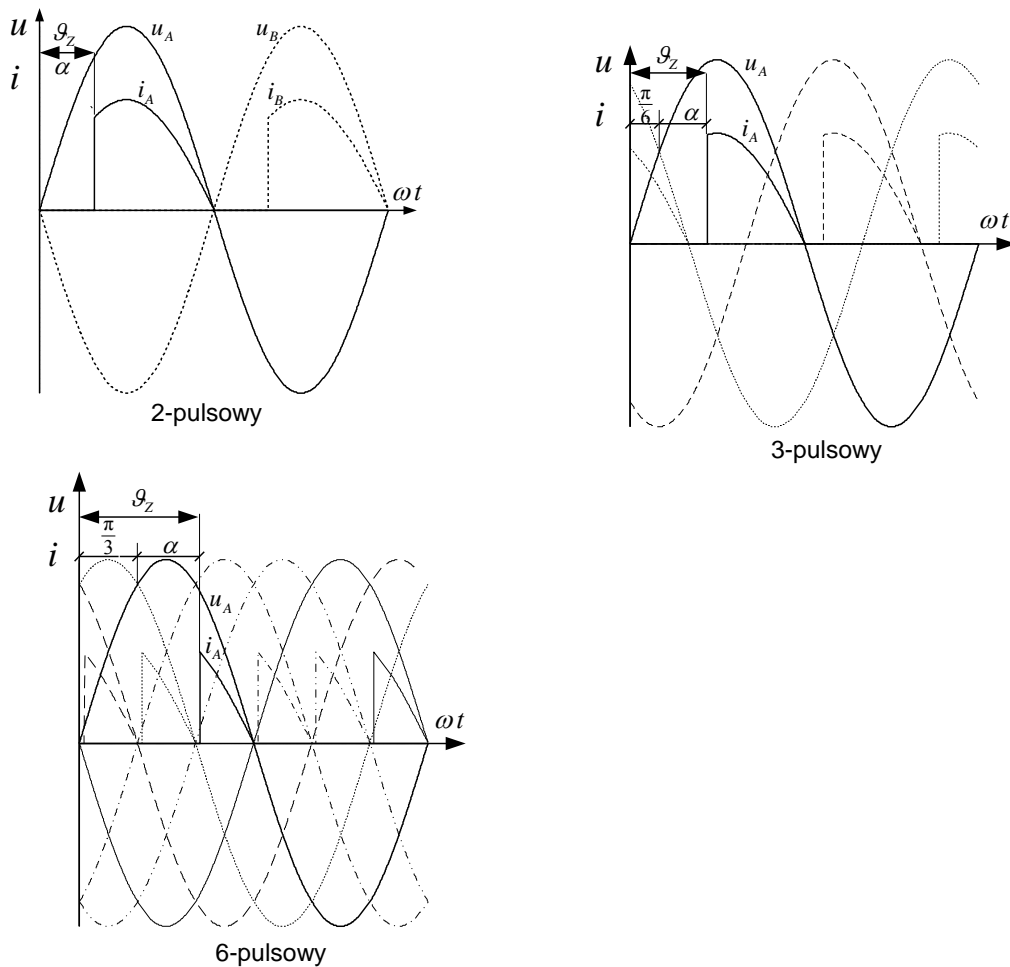
Rys. 5.1. Przykładowe struktury prostowników sterowanych:
 a) jednopulsowy, b) dwupulsowy (układ dwufazowy z transformatorem z wyprowadzonym punktem neutralnym), c) dwupulsowy mostkowy, d) trójfazowy w układzie gwiazdowym, e) trójfazowy mostkowy

Przekształtniki jedno- i dwukwadrantowe na ogół są zasilane bezpośrednio lub przez transformator z sieci jedno- lub trójfazowej prądu przemiennego. Najczęściej spotykane odmiany przekształtników 1-, 2-, 3- i 6-pulsowych pokazano na rysunku 5.1. Linią przerywaną zaznaczono w nich diodę zerową $D0$, która może być zasto-

sowana w danym prostowniku. Zmniejsza ona pulsację prądu wyjściowego prostownika i likwiduje wycinki napięcia wyprostowanego o ujemnej polaryzacji. Przez połączenie szeregowo lub równoległe przekształtników zasilanych z oddzielnych transformatorów można uzyskać większą liczbę pulsów napięcia wyprostowanego.

Właściwości prostowników w istotny sposób zależą od rodzaju odbiornika dołączonego do ich zacisków wyjściowych, np. silnik elektryczny prądu stałego stanowi obciążenie typu RLE.

W prostownikach wielopulsowych ($q > 2$) kąt załączenia zaworów określa się jako kąt mierzony od punktu naturalnej komutacji, czyli od chwili przecięcia się napięć fazowych zasilających prostownik (rys. 5.2).



Rys. 5.2. Zasada określania kątów załączenia α i γ_z w układach wielofazowych

Kąt ten, oznaczany symbolem α , jest nazywany kątem opóźnienia wysterowania zaworów:

- dla układu dwupulsowego $q = 2$, $\alpha = \vartheta_z$,
- dla układu trójpulsowego $q = 3$, $\alpha = \vartheta_z = \frac{\pi}{6} = \vartheta_z - 30^\circ$,
- dla układu sześciopulsowego $q = 6$, $\alpha = \vartheta_z = \frac{\pi}{3} = \vartheta_z - 60^\circ$.

Kątowi opóźnienia wysterowania tyrystorów $\alpha = 0$ odpowiada najczęściej maksymalna wartość napięcia i prądu wyprostowanego. Przy kącie $\alpha = 0$ prostownik sterowany ma parametry i cechy prostownika diodowego (niesterowanego). Średnią wartość napięcia wyprostowanego przy przewodzeniu ciągłym i pominięciu kąta komutacji zaworów ($\mu = 0$) określa wyrażenie

$$U_d = U_m \frac{q}{\pi} \sin \frac{\pi}{q} \cos \alpha = U_{d0} \cos \alpha, \quad (5.1)$$

przy czym wartość średnia napięcia wyprostowanego

$$U_{d0} = U_m \frac{q}{\pi} \sin \frac{\pi}{q}, \quad (5.2)$$

gdzie U_m – amplituda napięcia fazowego na wejściu prostownika.

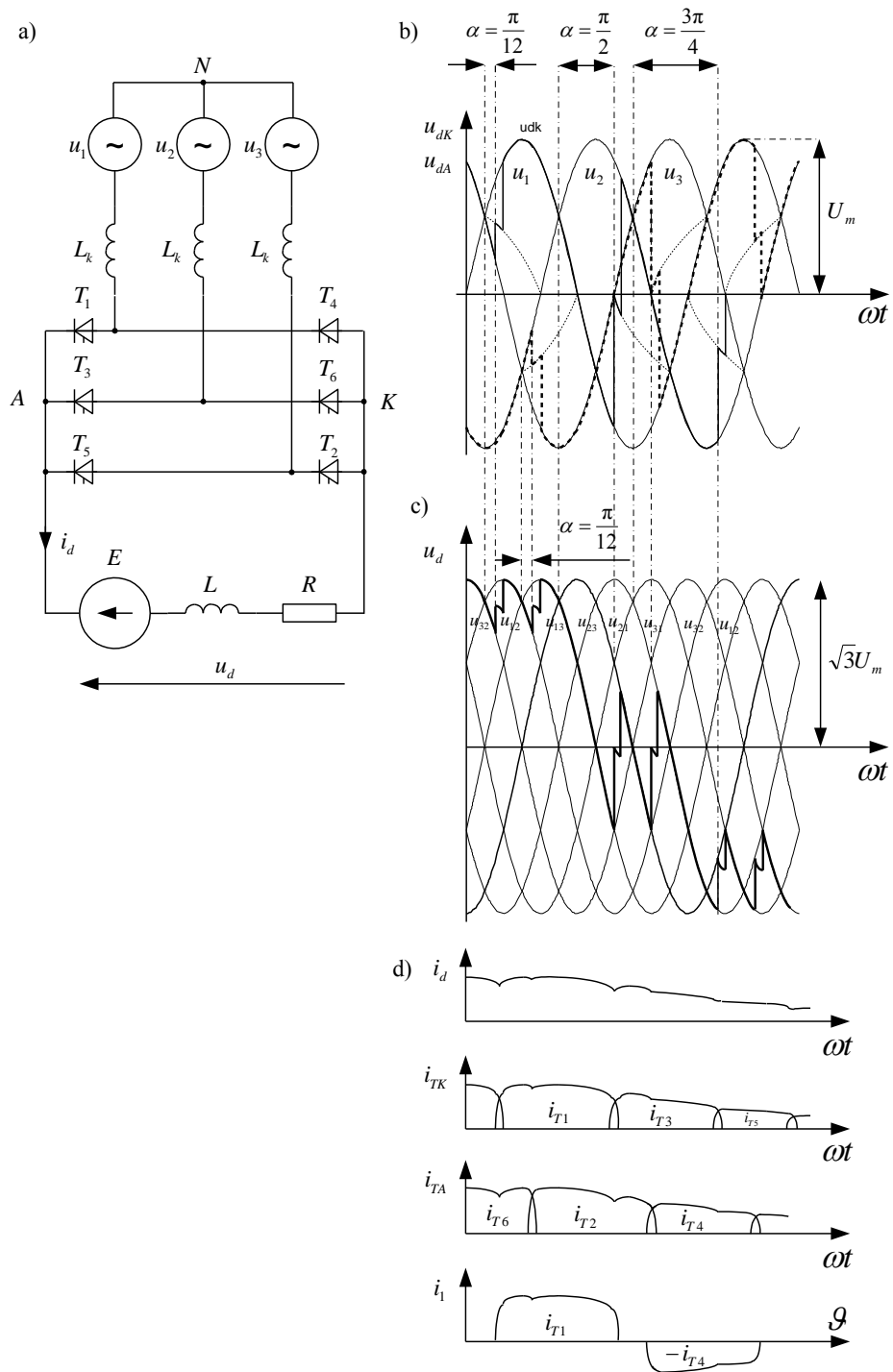
Na rysunku 5.3 przedstawiono schemat 3-fazowego prostownika sterowanego mostkowego sześciopulsowego oraz charakterystyczne przebiegi dla różnych kątów opóźnienia α wysterowania tyrystorów prostownika.

Zgodnie z wyrażeniem (5.1) wartość średnia napięcia na wyjściu tego prostownika wynosi

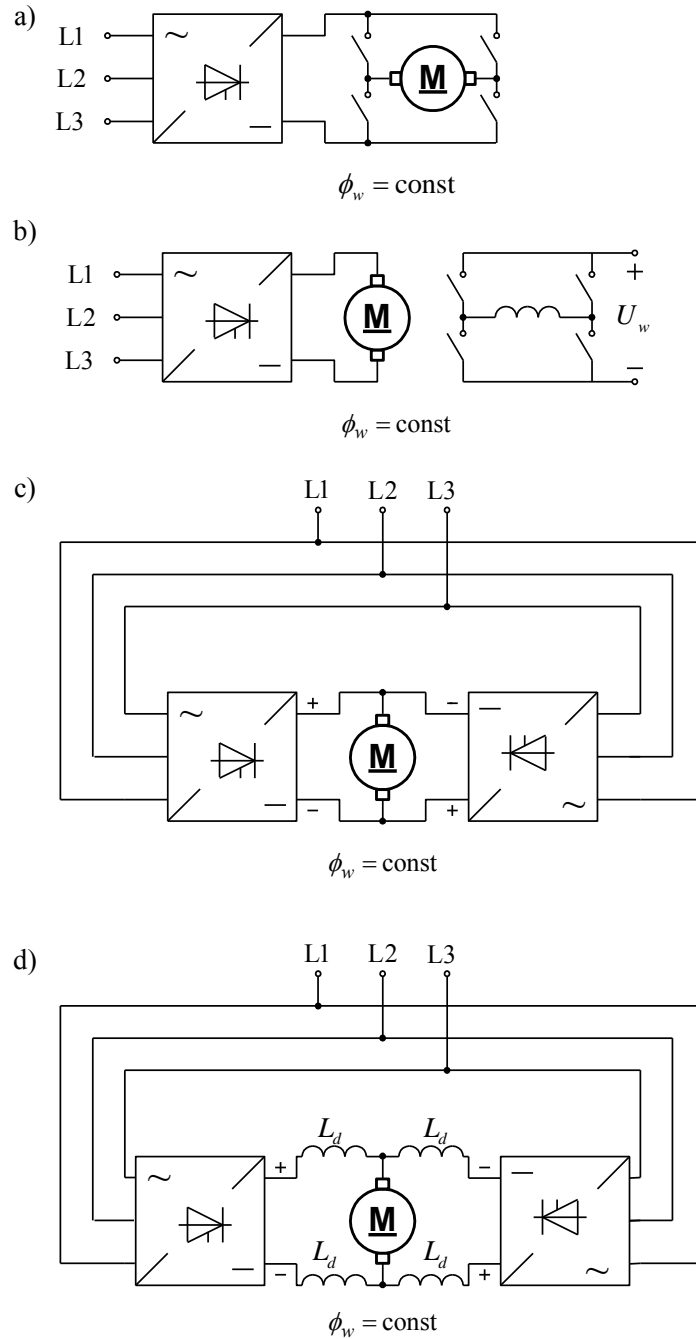
$$U_d = U_m \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} \cos \alpha = \sqrt{2} U \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} \cos \alpha \approx 1,35 U \cos \alpha, \quad (5.3)$$

gdzie U jest napięciem międzyprzewodowym zasilania prostownika.

Zależnie od przyjętej konfiguracji układu prostownika uzyskuje się różne zakresy pracy układu napędowego, a w szczególności dla napędu dwukierunkowego także różne czasy nawrotu. Przykładowe rozwiązania układu nawrotnego przedstawiono na rysunku 5.4. Układy nawrotne z rysunku 5.4a,b powinny być przełączane przy napięciu twornika $U_t = 0$. Czas przełączania przekracza na ogół 0,5 s. Układ nawrotny pokazany na rysunku 5.4c umożliwia przełączanie kierunku prędkości w czasie około 0,1÷0,2 s. Najkrótsze czasy nawrotu można uzyskać w układzie z dławikami dodatkowymi (ograniczającymi prądy wyrównawcze) (rys. 5.4d), mogą one być na poziomie elektromagnetycznej stałej czasowej twornika silnika napędowego.

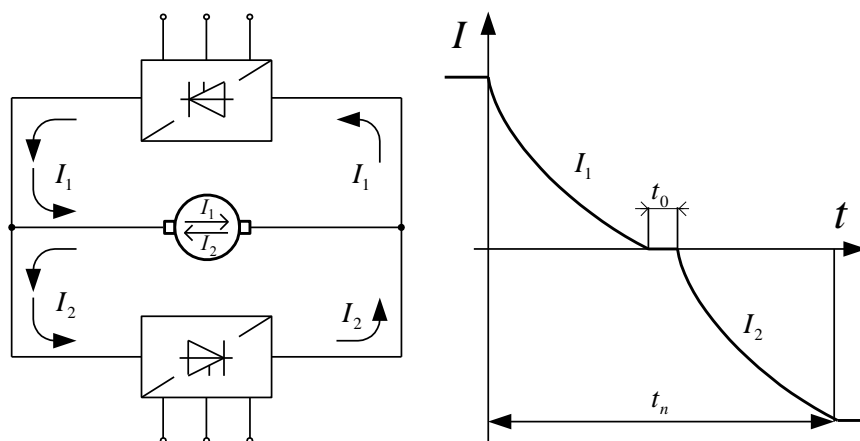


Rys. 5.3. Prostownik sześciopulsowy mostkowy: a) schemat zastępczy, b) napięcie wyprostowane w grupie katodowej i anodowej, c) napięcie wyprostowane przekształtnika, d) przebiegi prądu odbiornika, prądów tyrystorów i prądu w fazie zasilającej



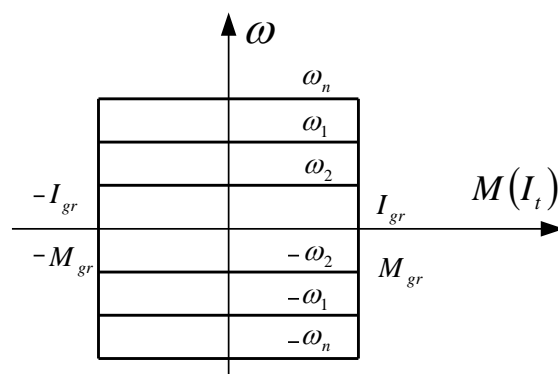
Rys. 5.4. Przykładowe realizacje napędu nawrotnego z silnikiem obcowzbudnym:
 a) zmiana biegunowości napięcia twornika, b) zmiana kierunku prądu wzbudzenia,
 c) dwa prostowniki z blokadą impulsów przy nawrocie, d) dwa prostowniki z dodatkowymi dławikami

Przykładowy (teoretyczny) przebieg prądu twornika przy nawrocie układu z rysunku 5.4c przedstawiono na rysunku 5.5.



Rys. 5.5. Zmiana kierunku prądu twornika w napędzie nawrotnym bez prądów wyrównawczych:
 t_0 – czas blokady impulsów, t_n – czas nawrotu

Teoretyczne charakterystyki mechaniczne napędu nawrotnego, pracującego w układzie zamkniętym ze sprzężeniem prędkościowym, mają przebiegi pokazane na rysunku 5.6.



Rys. 5.6. Charakterystyki mechaniczne napędu nawrotnego z prędkościowym sprzężeniem zwrotnym i ograniczeniem momentowym (prądowym)

Układy napędowe tego typu pracują na ogół z tak zwanym odcięciem prądowym (ograniczeniem prądowym), pozwalającym uzyskać charakterystykę „koparkową”.

W miarę wzrostu mocy tyrystorowych układów napędowych coraz większego znaczenia nabiera ich oddziaływanie na sieć zasilającą. Szczególnie ważny staje się

współczynnik mocy $\cos \varphi$ tych układów w różnych warunkach pracy. Współczynnik mocy definiowany jest zwykle jako stosunek mocy czynnej P pobieranej przez układ do mocy pozornej S . Przy odkształconym przebiegu prądu i napięcia pojęcie przesunięcia fazowego między tymi wielkościami nie istnieje. Można jedynie rozpatrywać przesunięcia fazowe między poszczególnymi harmonicznymi tych wielkości. Jeżeli impedancja wewnętrzna sieci zasilającej jest pomijalna (co występuje w praktyce), to można przyjąć, że napięcie zasilające ma tylko pierwszą harmoniczną. Prąd pobierany z sieci nie ma natomiast przebiegu sinusoidalnego i zawiera wyższe harmoniczne

$$I = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{n=\infty} I_n^2}. \quad (5.4)$$

Moc pozorna

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + P_h^2}, \quad (5.5)$$

przy czym:

P – moc czynna układu $P = UI \cos \varphi_1$,

Q – moc bierna układu $Q = UI \sin \varphi_1$,

P_h – moc odkształcenia układu $P_h = U \sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} I_n^2}$,

S – moc pozorna układu $S = UIk_h$.

$$k_h = \sqrt{1 + \sum_{n=2}^{n=\infty} \frac{I_n^2}{I_1^2}}, \quad (5.6)$$

gdzie:

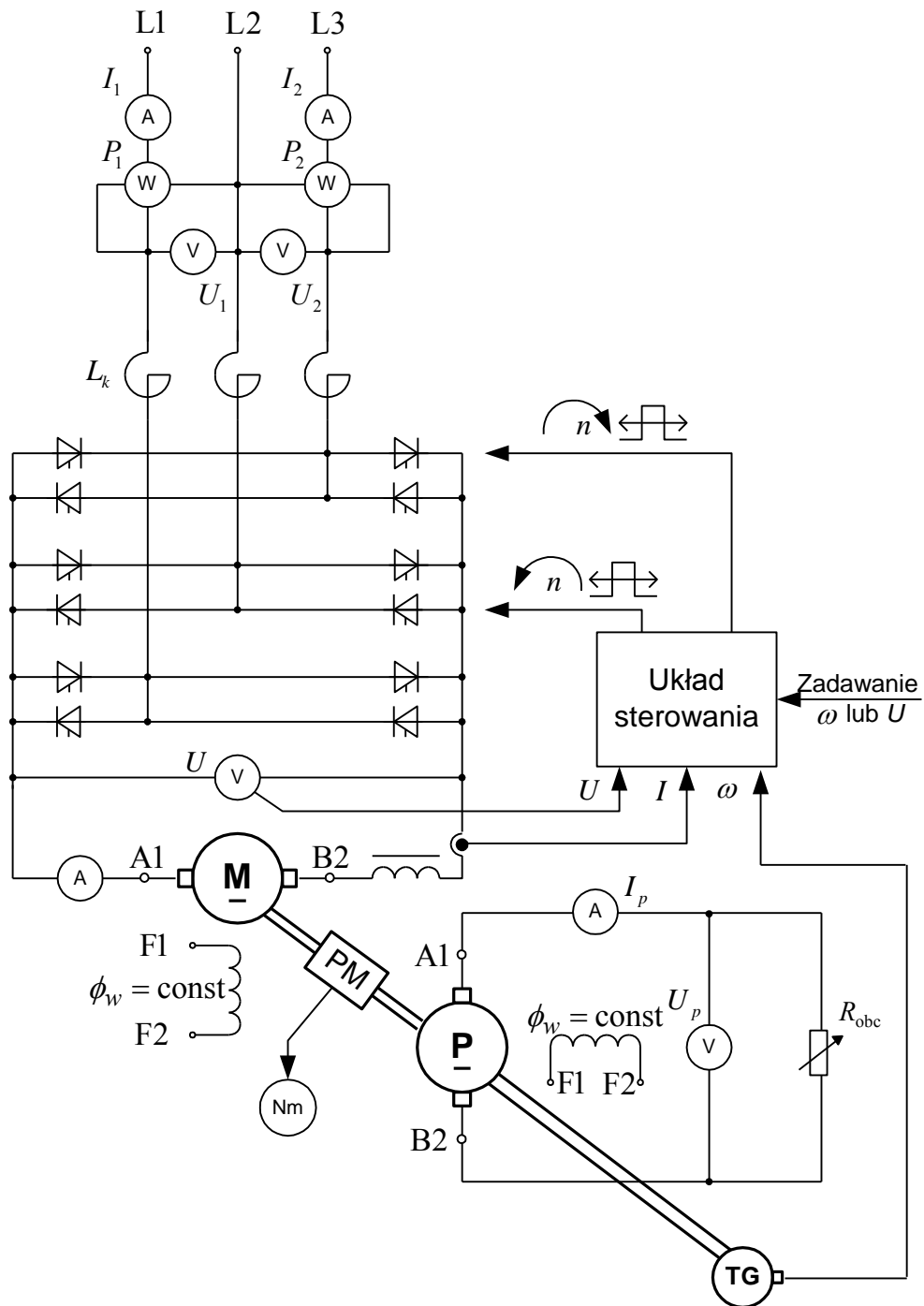
I_n – n -ta harmoniczna prądu,

I_1 – pierwsza harmoniczna prądu.

Współczynnik mocy układu przy prądzie odkształconym określa się następująco:

$$k_p = \frac{P}{S} = \frac{UI \cos \varphi_1}{UIk_h} = \frac{\cos \varphi_1}{k_h}. \quad (5.7)$$

Przesunięcie fazowe φ_1 zależy przede wszystkim od kąta wyzwalania ϱ_z tyrystorów i od kąta komutacji μ . Jeżeli pominie się kąt komutacji i przyjmie się, że prąd przekształtnika jest ciągły i wygładzony, to kąt φ_1 jest równy kątowi załączenia ϱ_z . Stąd wynika ważny wniosek, że obniżanie napięcia wyjściowego, a zatem i zmniejszanie prędkości silnika przez zwiększanie kąta wysterowania ϱ_z , jest związane z pogorszeniem współczynnika mocy układu, co z energetycznego punktu widzenia jest podstawową wadą napędu przekształtnikowego. Największy pobór mocy biernej występuje na dolnym poziomie prędkości przy pracy silnika z momentem obciążenia $M_N = \text{const}$.



Rys. 5.7. Schemat układu pomiarowego

5.3.3. Wyznaczenie sprawności η i współczynnika mocy $\cos \varphi$ układu napędowego

1. Wyznaczyć charakterystykę $\eta = f(M_0)$ dla znamionowej prędkości silnika.
2. Wyznaczyć charakterystykę $\cos \varphi = f(M_0)$ dla znamionowej prędkości silnika.
3. Potrzebne wyniki pomiarów (z p. 5.3.2) oraz wyniki obliczeń należy zestawić w tabeli 5.2.

Tabela 5.2

Lp.	I_1	U_1	P_{we}	ω	M	P_{wy}	η	$\cos \varphi$
	A	V	W	rad/s	Nm	W	–	–

5.3.4. Pomiary oscylograficzne

1. Zarejestrować przebieg prądu fazowego sieci dla zasilania silnika nieobciążonego i przy znamionowym obciążeniu.
 2. Zarejestrować przebieg prądu twornika w stanie pracy jak wyżej.
 3. Zarejestrować przebieg prądu twornika i napięcia twornika silnika przy nawrocie.
- Przy oscylograficznych pomiarach prądów należy korzystać z bocznika bezindukcyjnego lub z przetworników pomiarowych typu LEM.

5.4. Sprawozdanie

W sprawozdaniu należy umieścić:

1. Parametry badanego układu napędowego.
2. Wykaz aparatury pomiarowej.
3. Schemat układu pomiarowego.
4. Wyznaczone charakterystyki i oscylogramy.
5. Omówienie uzyskanych wyników i oscylogramów.

5.5. Zagadnienia i pytania kontrolne

1. Omówić charakterystyki mechaniczne układu napędowego z prostownikiem sterowanym w otwartym i zamkniętym układzie regulacji, przy sprzężeniu prędkościowym i napięciowym.

2. Jaki jest wpływ ograniczenia prądowego przekształtnika na stany dynamiczne napędu?

3. Omówić dobór przekształtnika do silnika napędowego obcowzbudnego prądu stałego.

Literatura

[1] Barlik R., Nowak M., *Technika tyrystorowa*, WNT, Warszawa 1997.

[2] Bisztyga K., *Sterowanie i regulacja silników elektrycznych*, WNT, Warszawa 1989.

[3] *Napęd elektryczny*, praca zbiorowa pod kierunkiem Z. Grunwalda, WNT, Warszawa 1987.