

Dr inż. JACEK GROCHOWALSKI
INSTYTUT ELEKTROTECHNIKI
POLITECHNIKI SZCZECIŃSKIEJ

Przyrząd do wyznaczania nierównomierności biegu i pulsacji prędkości wałów maszyn elektrycznych

Przedstawiono budowę i zasadę działania przyrządu do ciągłego wyznaczania położenia wału oraz pulsacji jego prędkości. W przyrządzie zastosowano transformator położenia kąowego (resolver) jako przetwornik położenia wału. Do zobrazowania przebiegów wykorzystano oscyloskop z pamięcią.

W układach napędowych z silnikiem elektrycznym prądu stałego zasilanym jednokierunkowym napięciem pulsacyjnym lub z silnikiem prądu przemiennego zasilanym niesinusoidalnym napięciem przemiennym, powstają momenty pasożytnicze powodujące nierównomierny bieg wału. Nierównomierny bieg wału jest szczególnie uciążliwy w regulowanych napędach prądu przemiennego z tyrystorowymi przekształtnikami statycznymi przy pracy z częstotliwością poniżej 5 Hz. Jest on jedną z podstawowych przyczyn ograniczających zakres regulacji przy małych prędkościach obrotowych. Duże i wciąż rosnące wymagania dynamiczne stawiane napędom nie pozwalają na zwiększanie równomierności biegu przez zwiększanie momentu bezwładności na wale silnika. Zjawisko nierównomierności ogranicza zastosowanie regulowanych napędów pracujących z niewielkimi prędkościami obrotowymi wszędzie tam, gdzie ma to decydujący wpływ na jakość produkcji: np. w przemyśle papierniczym, kablowym, w niektórych obrabiarkach. Prace nad optymalizacją regulowanych napędów z przekształtnikami statycznymi wymagają dokładnego wyznaczenia przebiegu nierównomierności.

Dotychczas do pomiarów stosowano prądnice tachometryczne prądu stałego [1,3]. Napięcie prądnicy jest proporcjonalne do chwilowej prędkości obrotowej, a zatem nierównomierny bieg powoduje pulsacje napięcia na jej zaciskach. Stosowanie prądnic do pomiarów przy małych i bardzo małych prędkościach obrotowych wykazuje wiele wad: na niewielkie wzbudzone napięcie rotacji nakładają się wyższe harmoniczne napięcia z komutatora, przebiegi komutacyjne oraz pulsacje napięcia pochodzące od niestabilnego styku szczotek i komutatora. Powoduje to trudności z rozdzieleniem napięcia pulsacji pochodzącego od nierównomiernego biegu wału od porównywalnych napięć zakłócających.

W pomiarach przy małych i bardzo małych prędkościach obrotowych znajdują również zastosowanie potencjometry o kącie obrotu 2π . Elementy te w wykonaniach o liniowości lepszej niż 1% są drogie, a także ulegają szybkiemu zużyciu przy pracy ciągłej.

Założenia konstrukcyjne przyrządu

W prowadzonych w Instytucie Elektrotechniki Politechniki Szczecińskiej badaniach nad optymalizacją regulowanych napędów z przekształtnikami częstotliwości podjęto prace nad przyrządem pozbawionym opisanych wad, a równocześnie spełniającym wymagania procesu badawczego.

Założono, że urządzenie powinno umożliwiać:

– wyznaczanie nierównomierności biegu wału w możliwie szerokim zakresie prędkości obrotowych, ze szczególnym uwzględnieniem prędkości małych i bardzo małych — zbliżonych do zera,

- wizualizację chwilowego położenia wału pozwalającą na ocenę przebiegu nierównomierności prędkości obrotowej,
- powiązanie położenia wału z kształtem przebiegów zasilających silnik,
- jednoczesne badanie wpływu różnych przebiegów zasilających silnik na aktualne położenie wału dla wybranej liczby obrotów,
- wyznaczenie przebiegu pulsacji prędkości obrotowej.

Przebieg ten pozwoli wykryć nierównomierność rozciągniętą na większą liczbę obrotów, powstającą przy obecności częstotliwości subharmonicznych w przebiegu zasilającym.

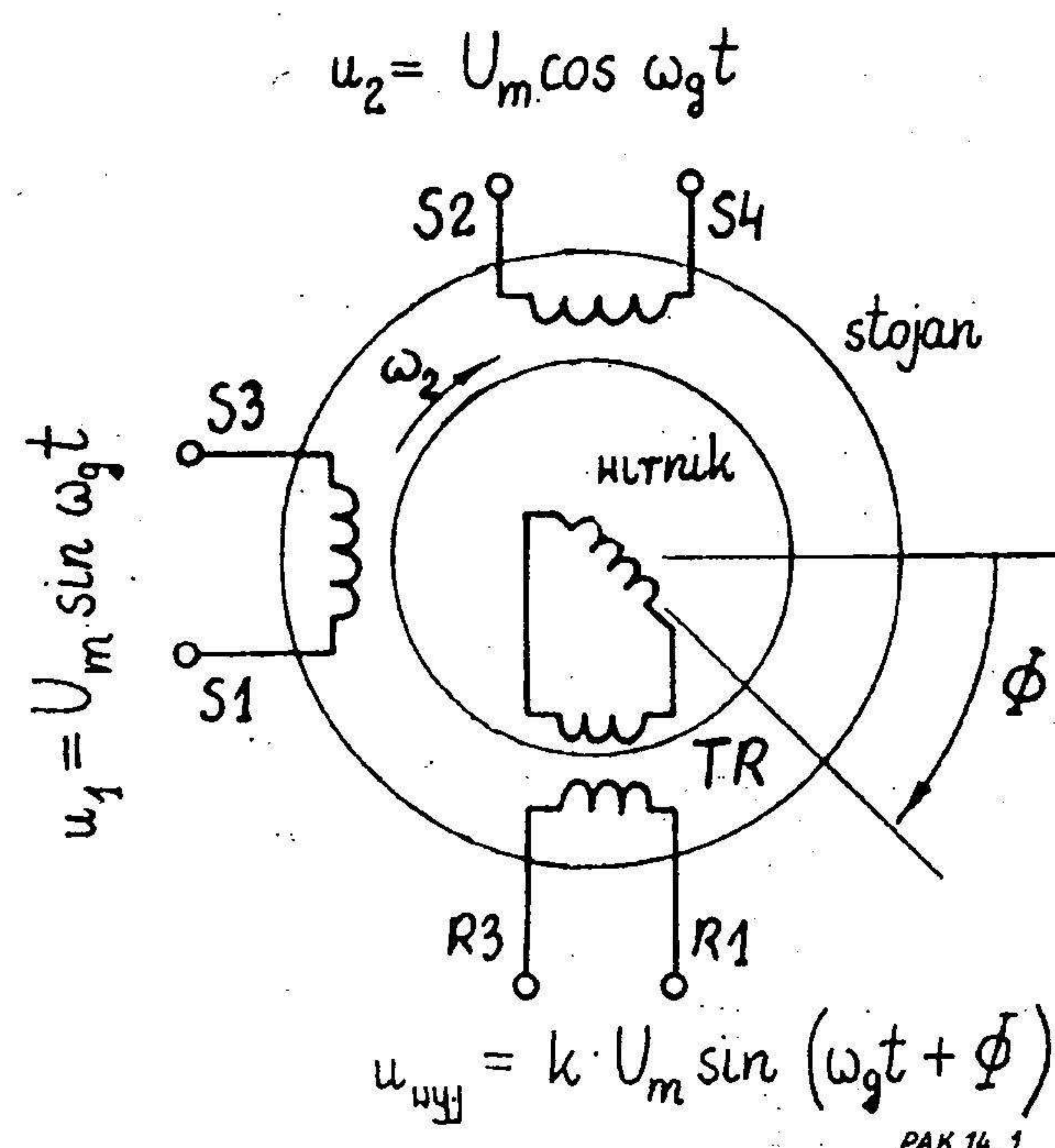
Transformator położenia kąowego – resolver

Jako przetwornik w urządzeniu zastosowano transformator położenia kąowego (*t.p.k.*) nazywany również — resolwerem. *T.p.k.* są małymi maszynami indukcyjnymi stosowanymi jako przetworniki [2, 4]:

- w precyzyjnych przesuwnikach kąta fazowego napięć,
- w precyzyjnych łączach typu selsynowego,
- w układach przeliczających współrzędne prostokątne na biegunowe,
- w układach do otrzymywania funkcji trygonometrycznych.

W konstruowanym urządzeniu wykorzystano *t.p.k.* typu TS-3-C2 produkcji Zakładu „Mikroma-Września”, pracujący jako przesuwnik kąta fazowego napięć.

Schemat ideowy *t.p.k.* przedstawiono na rys. 1. Stojan ma dwa dwubiegunowe uzwojenia przesunięte o 90° . Uzwojenia te zasila-



Rys. 1. Schemat ideowy transformatora położenia kąowego (*t.p.k.*) typu TS-3-C2 produkcji Zakładu „Mikroma-Września”

nie są napięciami przemiennymi o znamionowej wartości $U = 10V$ oraz częstotliwości $f_g = 2000$ Hz przesuniętymi również o 90° [4].

Wirujące kołowe pole magnetyczne wzbudza napięcie w pojedynczym uzwojeniu dwubiegunowym wirnika. Napięcie to jest przenoszone z wirnika w sposób bezstykowy — poprzez transformator pierścieniowy. Jedno z uzwojeń transformatora połączone jest z uzwojeniem wirnika i znajduje się na wirniku, a drugie otacza je i znajduje się w obudowie *t.p.k.* Obwód magnetyczny transformatora w kształcie kubka ferrytowego polepsza sprzężenie magnetyczne między uzwojeniami. Transformator pierścieniowy znajduje się poza zasięgiem pola magnetycznego stojana. Bezstykowe wyprowadzenie sygnału z wirującego wirnika eliminuje znane wady pierścieni ślizgowych i szczotek. Napięcie na wyjściu transformatora pierścieniowego wyraża się wzorem

$$U_{R1R3} = kU_m \sin(\omega t + \Phi)$$

gdzie: k — współczynnik zależny od przekładni zwojowej stojana i wirnika oraz transformatora pierścieniowego, Φ — kąt fazowy między napięciem uzwojenia stojana i wirnika zgodny z kątem położenia wirnika względem uzwojenia stojana.

Poprzez pomiar kąta fazowego między napięciem zasilającym jedno uzwojenie stojana a napięciem wyjściowym wyznacza się aktualne położenie wirnika. Właściwość ta została wykorzystana w budowanym przyrządzie.

Duża dokładność wykonania przetwornika, przez zastosowanie odpowiedniej technologii i materiałów, pozwala na jego stosowanie w precyzyjnych urządzeniach automatycznej regulacji oraz przyrządach pomiarowych.

Transformator położenia kąтового typu TS-3-C2 produkcji Zakładu „Mikroma-Września” charakteryzuje się w zależności od klasy dokładności następującymi własnościami [4]:

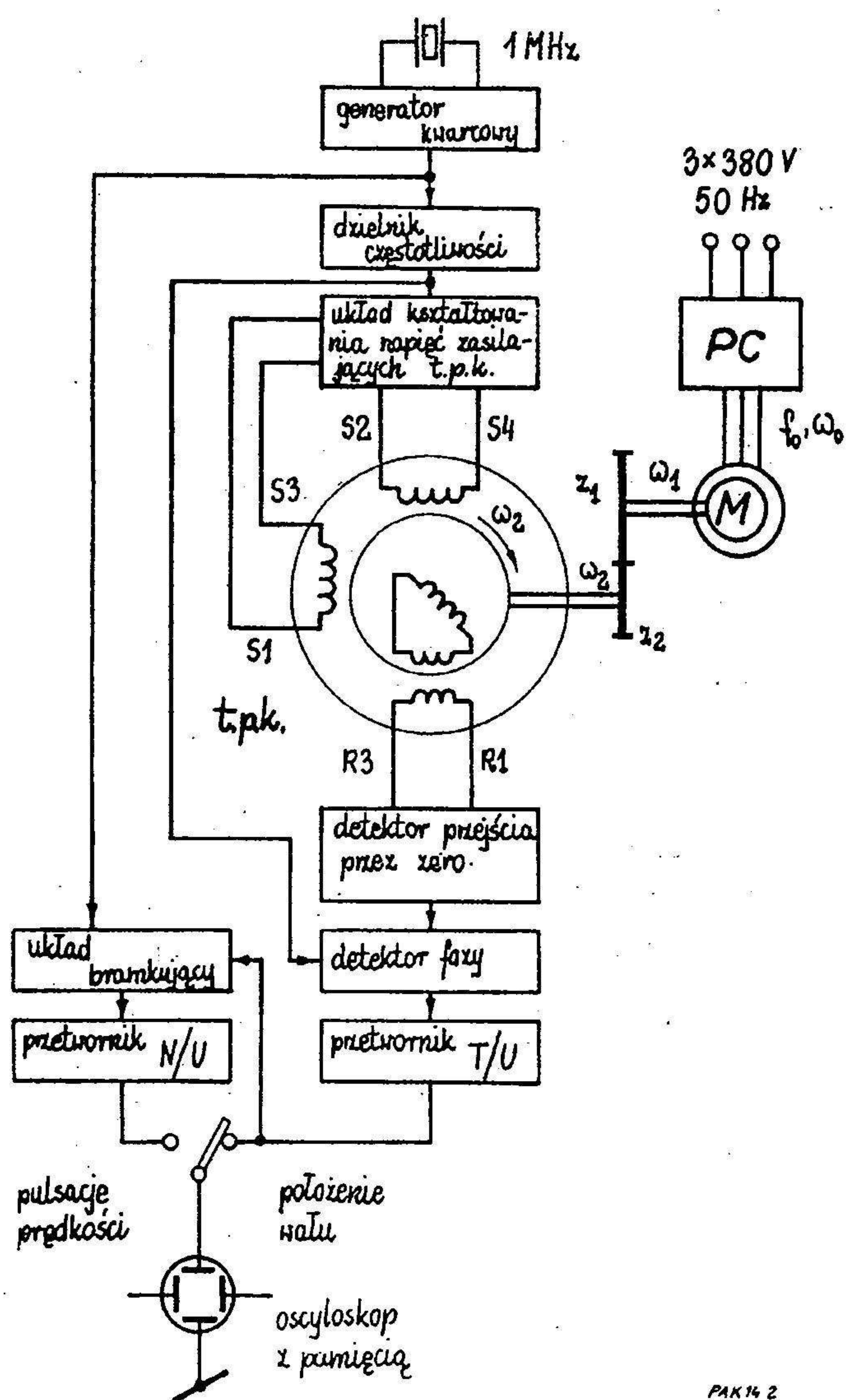
- błąd odwzorowania funkcji $0,2 \div 0,3\%$,
- asymetria uzwojeń $3 \div 5$ minut kątowych,
- maksymalne całkowite napięcie zerowe 10 mV.

Opis konstrukcji przyrządu

Schemat blokowy przyrządu przedstawiono na rys. 2. Wymagane sinusoidalne napięcia zasilające uzwojenia $S1/S3$ i $S2/S4$ *t.p.k.* otrzymywane są w układzie kształtowania napięć, który jest sterowany z generatora kwarcowego poprzez dzielnik częstotliwości na układach cyfrowych TTL małej i średniej skali integracji. Napięcie na uzwojeniu wyjściowym $R1/R3$ jest przesunięte względem wybranego napięcia wejściowego o kąt elektryczny Φ równy aktualnemu kątowi obrotu wałka *t.p.k.* względem rozpatrywanego uzwojenia stojana. Napięcie to jest kształtowane w układzie detektora przejścia przez zero i porównywane z napięciem z dzielnika częstotliwości. Na wyjściu detektora fazy otrzymywane są przebiegi prostokątne napięć. Szerokość tych impulsów jest proporcjonalna do kąta położenia wału Φ .

W przetworniku T/U czas trwania impulsu wyjściowego jest przetwarzany na proporcjonalne napięcie. Napięcie to jest aktualizowane 2000 razy na sekundę (jest to częstotliwość napięcia zasilającego). Czas przetwarzania wynosi zatem $0,5$ ms i jest podstawowym ograniczeniem dokładności wyznaczania położenia wału. Układ przetwornika T/U jest tak zestrojony, aby pełnemu kątowi obrotu wałka *t.p.k.* $2\pi = 360^\circ$ odpowiadało napięcie $U = 3,6$ V. Chwilowa wartość napięcia po prostym przeliczeniu wyznacza aktualne położenie wałka. Napięcie z przetwornika podane na płytki odchylenia pionowego oscyloskopu z pamięcią lub z lampą o przedłużonej poświacie daje przebieg piłokształtny w którym jeden „zab” odpowiada jednemu pełnemu obrotowi wałka *t.p.k.* Przy stałej wartości podstawy czasu przebieg jest linią prostą, a jej kąt nachylenia jest

tym większy im większa jest chwilowa prędkość wału. Nierównomierność biegu wału powoduje odkształcenie przebiegu od linii prostej. Liczba obrotów jednocześnie oglądanych na ekranie jest wybierana pokrętką podstawy czasu oscyloskopu. Do



Rys. 2. Schemat blokowy układu do wyznaczania położenia wału w przykładowym zastosowaniu do układu napędowego z maszyną prądu przemiennego i przekształtnikiem częstotliwości: *t.p.k.* — transformator położenia kąтового, *M* — silnik prądu przemiennego, *PC* — przekształtnik częstotliwości

wyznaczania pulsacji prędkości obrotowej wykorzystano przebieg wyjściowy z przetwornika T/U . Stanowi on, po przekształceniu w impuls prostokątny, bramkę czasową dla przebiegu z generatora o podwyższonej częstotliwości stabilizowanego kwarcem. Paczki o różnej liczbie impulsów podawane są do przetwornika N/U (liczba impulsów/napięcie). Zastosowano przetwornik, w którym napięcie wyjściowe jest odwrotnie proporcjonalne do liczby impulsów w bramce czasowej. Sygnał oglądany na oscyloskopie tworzy ciąg impulsów prostokątnych, których amplitudy są proporcjonalne do średniej prędkości wału badanej maszyny w czasie jednego obrotu wałka *t.p.k.* Wybór odpowiedniej podstawy czasu oscyloskopu pozwala wykryć okres ewentualnej pulsacji prędkości rozciągniętej na większą liczbę obrotów wału badanej maszyny.

Precyzyjne badanie wpływu różnych przebiegów zasilających silnik prądu przemiennego na aktualne położenie wału wymaga ścisłego powiązania przebiegów przy równoczesnej obserwacji na oscyloskopie wielostrumieniowym. Zrealizowano to przez zastosowanie przekładni mechanicznej o odpowiednim przełożeniu między wałem badanego silnika a wałkiem *t.p.k.* — rys. 2.

Jak wiadomo, prędkość wirowania pola magnetycznego silnika prądu przemiennego *M*, przy częstotliwości napięcia zasilającego f_0 , Hz i uzwojeniach wytwarzających $2p$ biegunów wynosi

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_0}{p}$$

gdzie: ω_1 , 1/s — pulsacja pola magnetycznego w szczelinie, p — liczba par biegunów, f_0 , Hz — częstotliwość napięcia zasilającego.

Zgodnie z wzorem przy większej liczbie par biegunów, jednemu pełnemu obrotowi wału odpowiada kąt elektryczny

$$\alpha_{el} = 2p\pi$$

Dla ścisłego powiązania chwilowego położenia wału z chwilowym kątem elektrycznym wirującego pola magnetycznego i przebiegów zasilających zastosowano przekładnię mechaniczną o przełożeniu

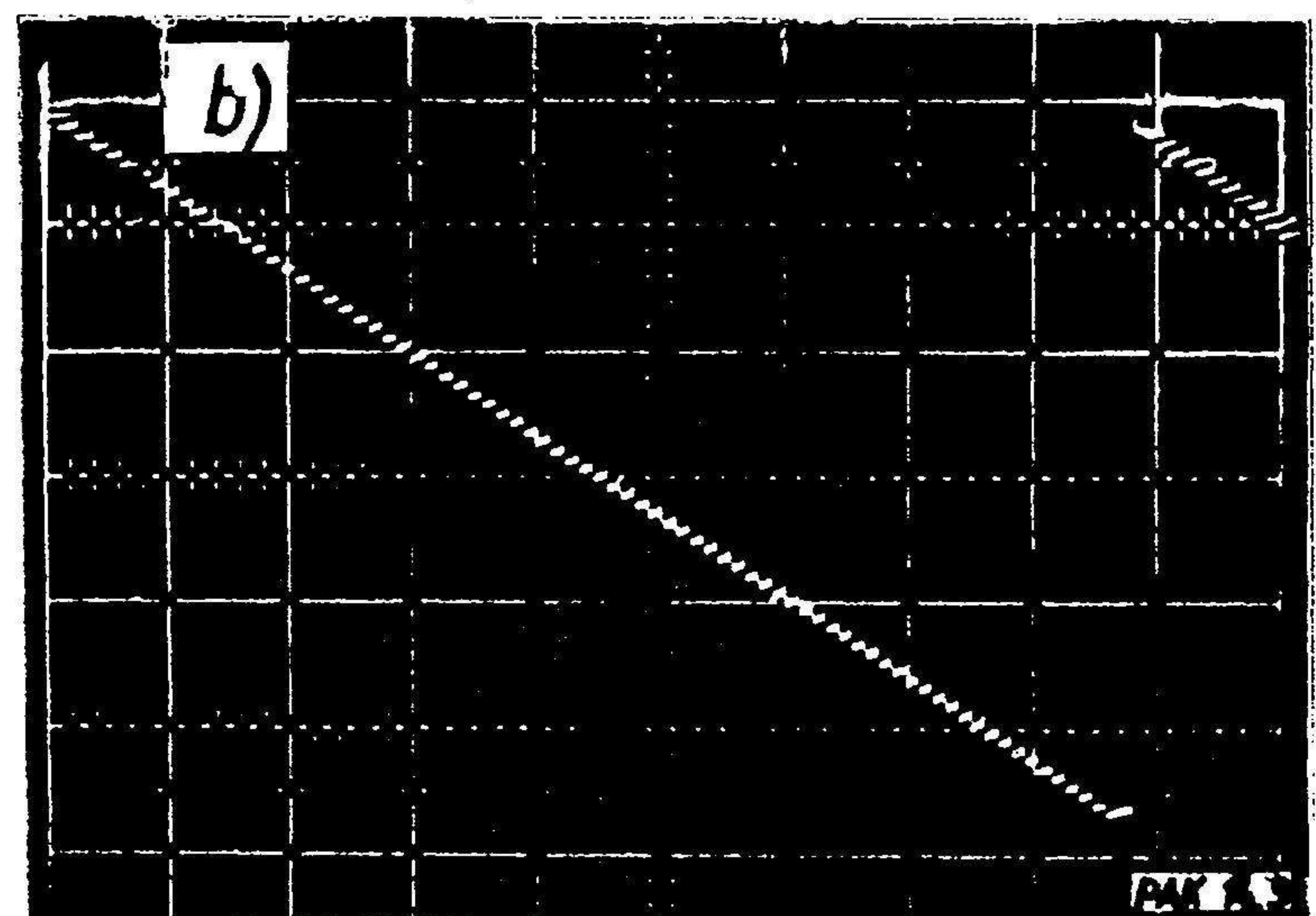
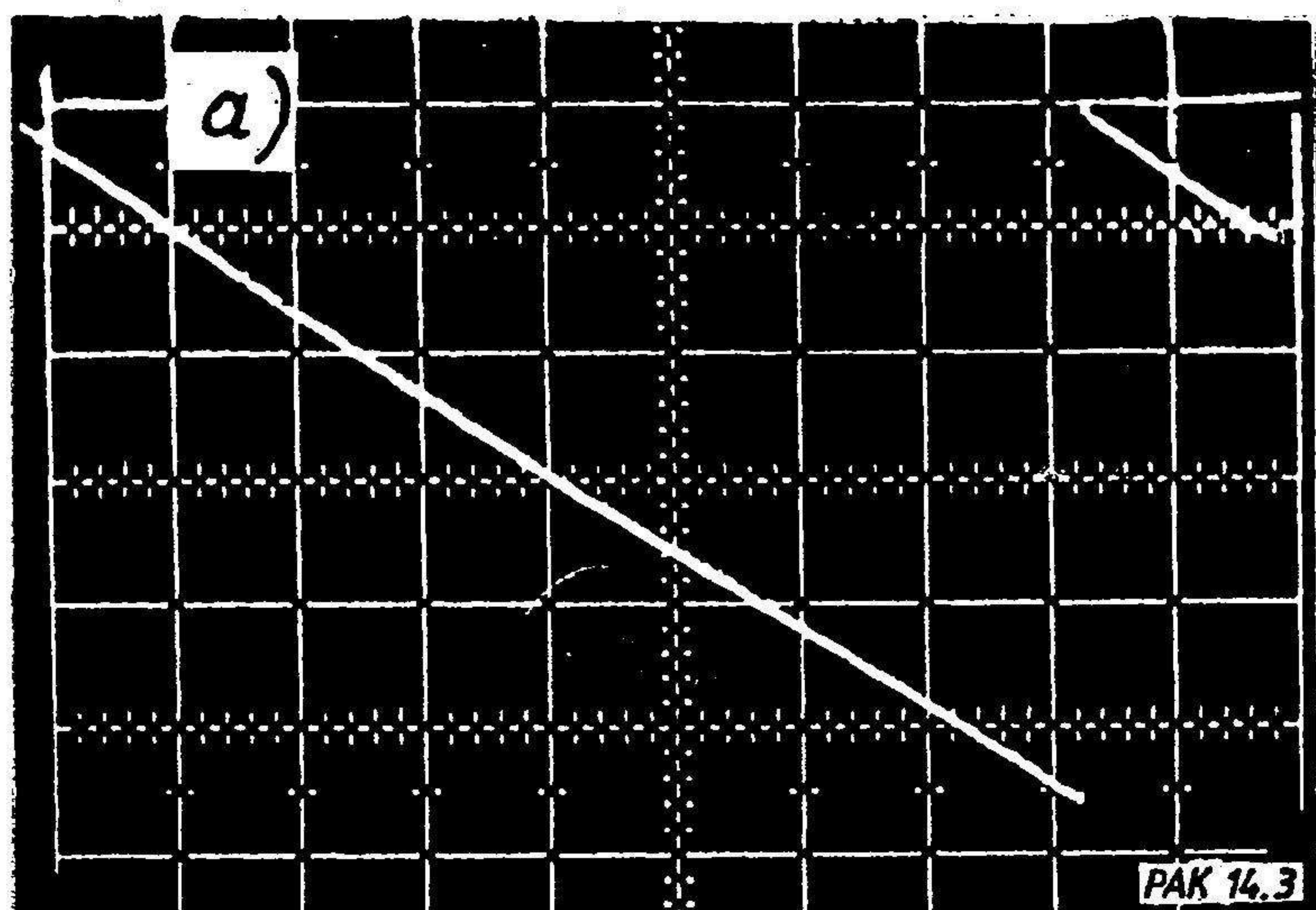
$$i = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{z_2}{z_1} = p$$

Przy zastosowaniu przekładni obserwowany na oscyloskopie przebieg położenia wału (1 ząb piły) odpowiada kątowi $2\pi/p$ przesunięcia w przestrzeni oraz pełnemu okresowi napięcia i prądu zasilającego.

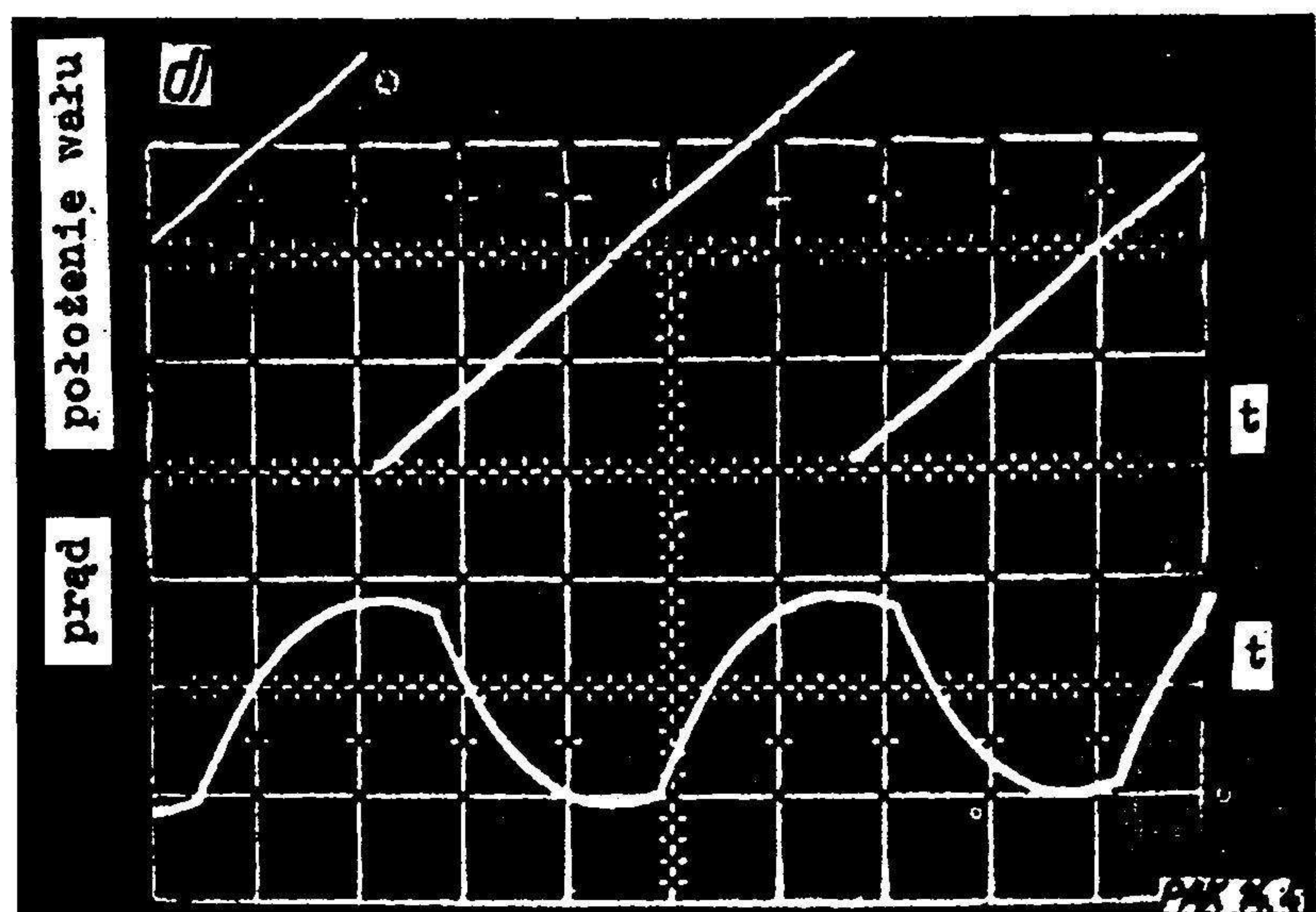
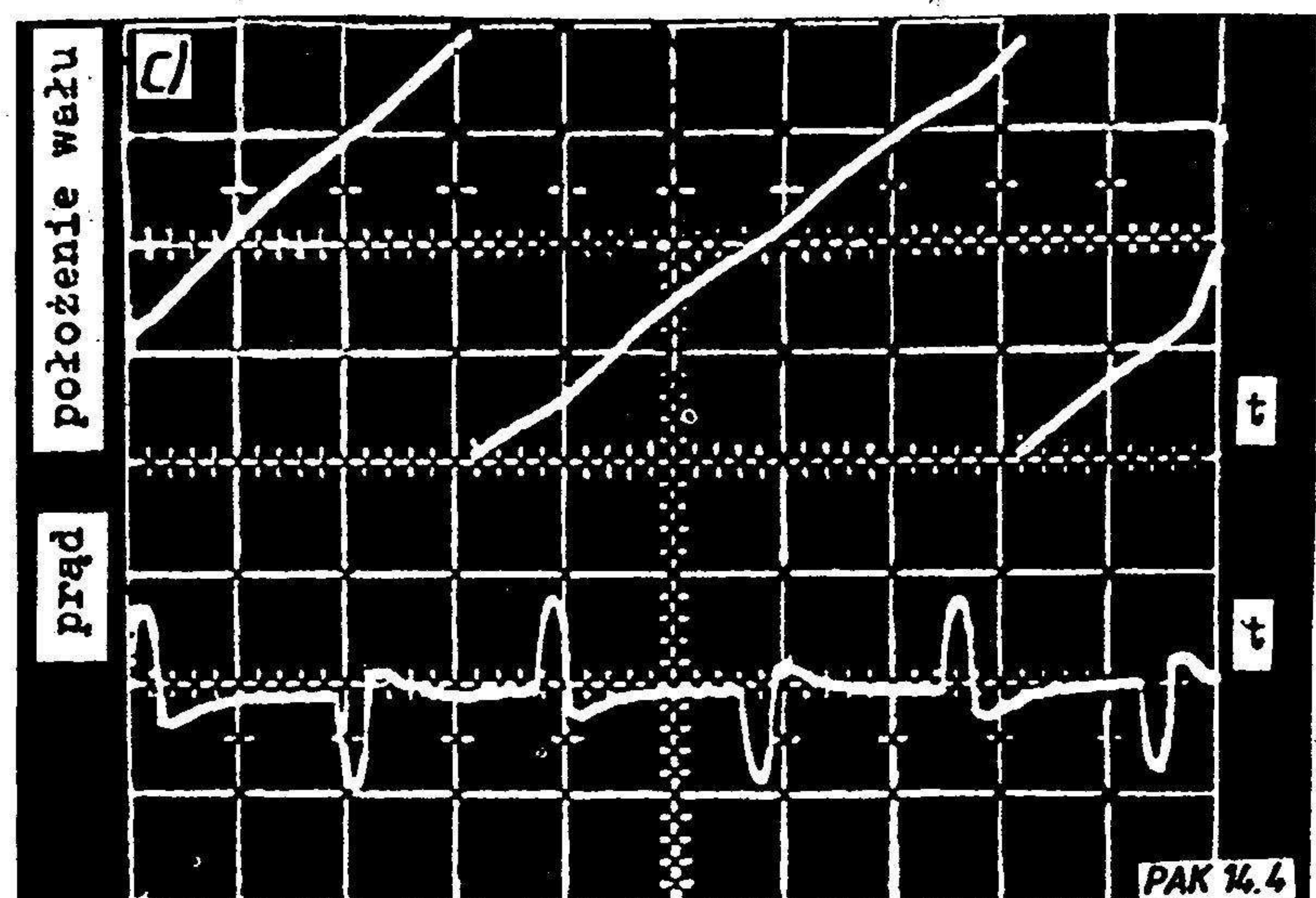
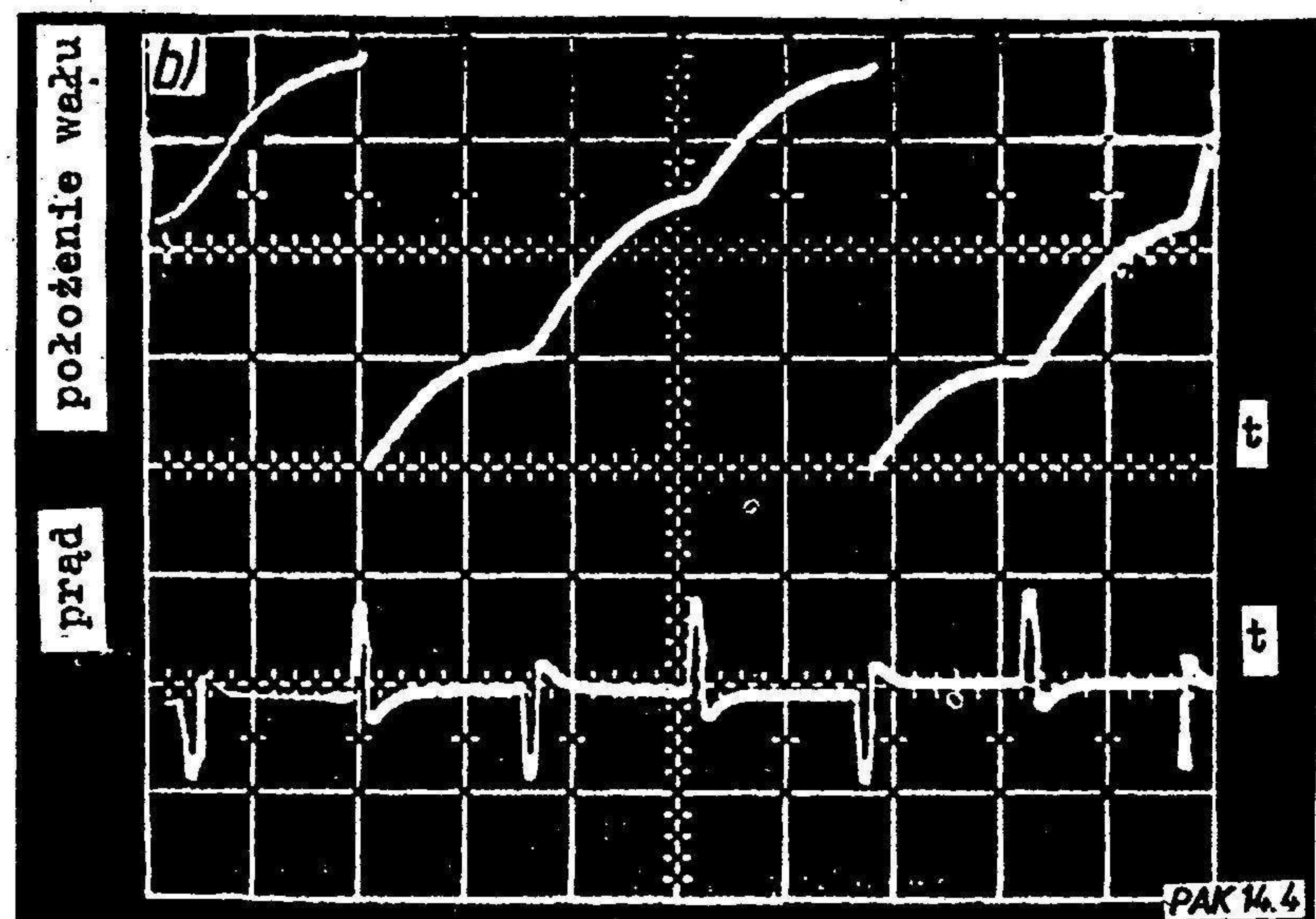
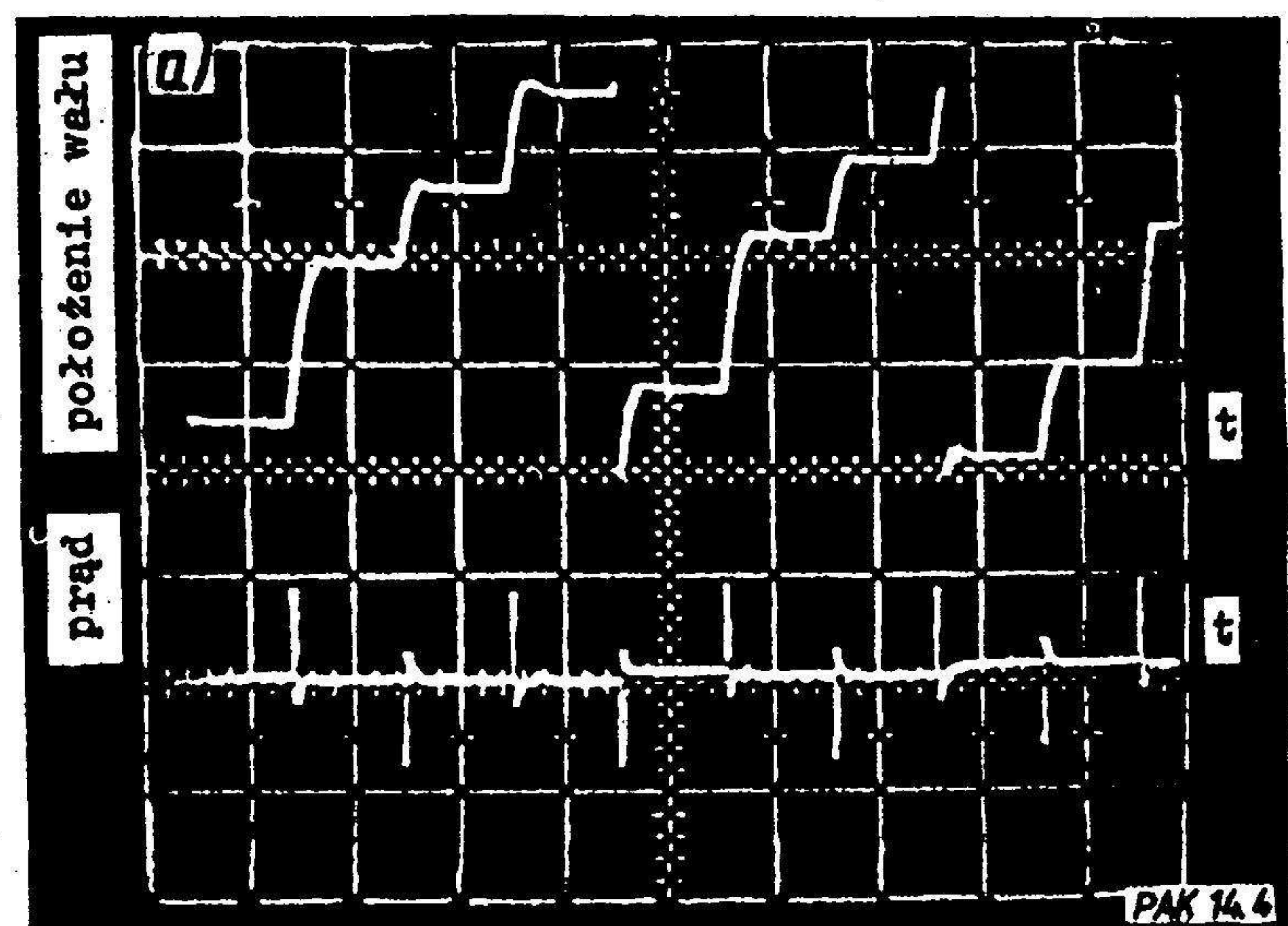
Przy obserwacji przebiegów w przypadku silnika asynchronicznego i synchronizacji podstawy czasu względem przebiegów zasilających, jest zauważalny powolny — z częstotliwością poślizgu — ruch obrazu położenia wału.

Wyniki badań

Badania dokładności przyrządu przeprowadzono w stanie statycznym, tzn. przez pomiar napięcia na wyjściu przy wałku t.p.k. sprzężonym z precyzyjnym kątomierzem pomiarowym. Przeprowadzona analiza dokładności wykazała, że maksymalny błąd graniczny wynosi 0,6%.



Rys. 3. Przebiegi chwilowego położenia wału dla jednego obrotu równomiernie obracającego się wału silnika; kierunek obrotów — lewy: a) $y = 65^\circ/\text{dz}$, $t = 50 \text{ ms/dz}$, $\omega_2 = 15,71 \text{ 1/s}$, $n_2 = 150 \text{ obr/min}$, b) $y = 65^\circ/\text{dz}$, $t = 5 \text{ ms/dz}$, $\omega_2 = 157,08 \text{ 1/s}$, $n_2 = 1500 \text{ obr/min}$



Rys. 4. Przebiegi chwilowego położenia wału i prądu fazowego silnika asynchronicznego zasilanego z falownika napięcia; kierunek obrotów — prawy. Położenie wału $y = 100^\circ/\text{dz}$, prąd fazowy $i = 30 \text{ A/dz}$: a) $t = 1 \text{ s/dz}$, $\omega_2 = 1,57 \text{ 1/s}$, $n_2 = 15 \text{ obr/min}$, b) $t = 0,2 \text{ s/dz}$, $\omega_2 = 7,85 \text{ 1/s}$, $n_2 = 75 \text{ obr/min}$, c) $t = 0,1 \text{ s/dz}$, $\omega_2 = 15,71 \text{ 1/s}$, $n_2 = 150 \text{ obr/min}$, d) $t = 0,01 \text{ s/dz}$, $\omega_2 = 157,08 \text{ 1/s}$, $n_2 = 1500 \text{ obr/min}$.

Przebiegi położenia wału badanej maszyny dla jednego obrotu, przy równomiernym biegu przedstawiono na rys. 3. Przy prędkości obrotowej $\omega_2 = 157,08 \text{ 1/s}$ ($n_2 = 1500 \text{ obr/min}$) wyraźnie jest widoczny schodkowy przebieg napięcia będący wynikiem czasu przetwarzania informacji. Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi chwilowego położenia wału i prądu fazowego silnika asynchronicznego zasilanego z falownika o prostokątnym napięciu wyjściowym. Fotografie wykonano w następujących warunkach: amplituda napięcia zasilającego: $U_m = 150 \text{ V} = \text{const}$, czas trwania impulsu napięcia zasilającego: $t_{on} = 30 \text{ ms} = \text{const}$, moment na wale silnika: $M_{wal} = \text{const}$, moment bezwładności: $J = \text{const}$, liczba par biegunów silnika: $p = 1$, przekładnia między wałkiem $t.p.k.$ i silnikiem: $i = 1$.

Do zobrazowania przebiegów zastosowano dwukanałowy oscyloskop DT-516A produkcji zakładu „Radiotechnika — Wrocław” z lampą o przedłużonej poświacie typu: P7. Fotografie uwidoczniają zmianę nierównomierności przy wzroście prędkości obrotowej i ściśle jej powiązanie z impulsami prądu zasilającego.

Zastosowanie źródła zasilającego z inną, bardziej skomplikowaną tzw. strategią modulacji pozwala zmniejszyć nierównomierność biegu wału. Poszukiwanie optymalnej strategii modu-

lacji przy minimalizowaniu liczby przełączeń półprzewodnikowych elementów mocy falownika jest sposobem zwiększenia zakresu regulacji po stronie prędkości minimalnej przy zachowaniu wymaganej jakości ruchu obrotowego.

Opisane urządzenie spełnia przyjęte założenia konstrukcyjne, umożliwia badanie nierównomierności biegu i pulsacji prędkości wałów również innych maszyn w zakresie prędkości do $\omega_2 = 314,16 \text{ 1/s}$ ($n_2 = 3000 \text{ obr/min}$).

Układ przyrządu jest chroniony zgłoszeniem patentowym [5].

LITERATURA

- [1] Küniger K., Schubert N.: Messeinrichtung für die Messung der Ungleichformigkeit der Drehbewegung elektrischer Maschinen. *Elektrie*. 1983, s. 75 + 76.
- [2] Praca zbiorowa p.k. J. Owczarka. Elektryczne maszynowe elementy automatyki. Warszawa, 1983, WNT, s. 142 + 180.
- [3] Rosenthal W., Zenkel D.: Gerät zur Messung der Ungleichformigkeit von Drehbewegungen. *Elektrie*, 1984, nr 3, s. 90 + 91.
- [4] Materiały informacyjne dotyczące transformatorów położenia kąowego firmy „Mikroma-Września”.
- [5] Grochowalski J.: Przyrząd do wyznaczania nierównomierności i pulsacji prędkości wałów maszyn elektrycznych. Zgłoszenie patentowe nr P 271560.

Otrzymano: 22.3.89.