

Tadeusz ZAKRZEWSKI

Ryszard BARTŁOMIEJCZYK

IMPULSOWE METODY POMIARU NISKICH PRĘDKOŚCI OBROTOWYCH W ZASTOSOWANIU DO MASZYN GÓRNICZYCH

Streszczenie. W artykule opisano trzy różne metody pomiaru niskich prędkości obrotowych, na bazie których można zbudować czujniki pomiarowe stosowane w szeregu maszynach i urządzeniach górniczych. Omówiono krótko podstawowe własności tych zjawisk i pokazano następnie, w jaki sposób praktyczny mogą one być wykorzystane w różnego rodzaju maszynach, przy których ten problem występuje.

1. Wstęp

Istnieje wiele różnorodnych metod pomiaru prędkości obrotowej, jak np. metoda stroboskopowa czy też szeroko stosowana metoda wykorzystująca zjawisko indukcji elektromagnetycznej. Metody te stosowane są głównie do wyznaczania dużych prędkości obrotowych. Niejednokrotnie występuje problem dokładnych pomiarów niskich prędkości obrotowych (w granicach 0-10 obr./min) takich elementów, jak: wałów, kół, części wirujących maszyn itp. Zagadnienie to jest szczególnie ważne przy badaniu prędkości lub drogi pojazdów gąsienicowych służących do urabiania węgla. W tym przypadku podczas badania parametrów kinematycznych charakteryzujących ruch postępowy, wygodnie jest przekształcić wielkości tych parametrów na parametry ruchu obrotowego kół czy wałów, zwracając przy tym szczególną uwagę na odpowiednie dostosowanie zakresu mierniczego do przewidywanego przedziału zmian prędkości obrotowej.

Celowe wydaje się opracowanie przetwornika obrotowo-impulsowego charakteryzującego się prostotą budowy i niezawodnością działania w warunkach dużego zapylenia i zmiennej wilgotności, towarzyszących pracy różnych urządzeń urabiających. Przy opracowaniu takiego czujnika wykorzystano trzy podstawowe zjawiska fizyczne związane z różnymi procesami fizycznymi, a mianowicie:

- 1) z efektem elektretowym ciał stałych,
- 2) z efektem fotoelektrycznym światłoczułych elementów półprzewodnikowych,
- 3) z jonizacją właściwą korpuskularnego promieniowania jądrowego.

Indykatorami wyszczególnionych zjawisk fizycznych są odpowiednio: pole elektryczne, promieniowanie elektromagnetyczne oraz promieniowanie joni-

zujące, które następnie zostają przekształcone na impulsy prądowo-napięciowe, których liczba określa badany parametr kinematyczny.

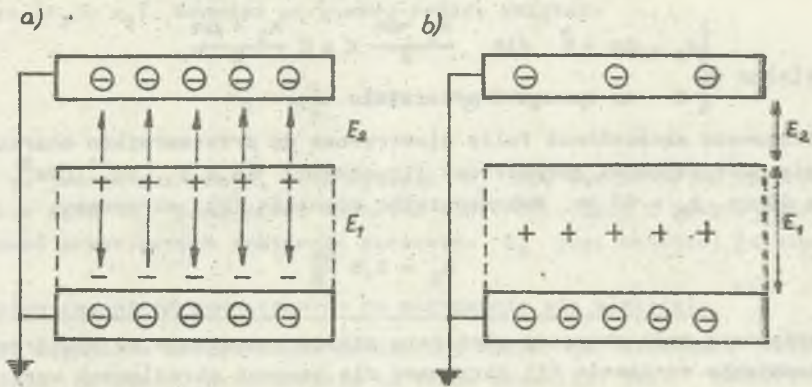
2. Ogólna charakterystyka fizyczna elektretów

Elektrety stanowią pewną grupę dielektryków stałych, charakteryzujących się stałą resztkową polaryzacją elektryczną. Na skutek występowania stałej polaryzacji elektrety przypominają w działaniu magnesy trwałe. Dzięki tej właśnie podstawowej własności elektrety są bardzo interesującymi materiałami nie tylko z punktu widzenia badań podstawowych, lecz także praktycznych ich zastosowań w wielu urządzeniach przemysłowych. Do najbardziej rozpowszechnionych należą przetworniki elektroakustyczne. Elektrety wytwarzają trwałe zewnętrzne pole elektryczne, które uwarunkowane jest obecnością w elektrecie nieekompensowanego ładunku elektrycznego powierzchniowego lub objętościowego. Jednym z podstawowych warunków, jakie muszą spełniać materiały, z których wytwarza się elektrety, jest ich małe przewodnictwo elektryczne. Membrany elektretowe, stosowane do przetworników elektroakustycznych, winny cechować się stabilnością czasową, dość znaczną wartością powierzchniowej gęstości ładunku elektrycznego (rzędu 10^{-4} C/m²), nie zmieniającą się w zakresie temperatur od -20°C do 80°C, jak również odpowiednimi własnościami mechanicznymi, a więc małą masę, dużą sztywność i wytrzymałość. Stabilne w czasie elektrety można wytworzyć z materiałów, które posiadają duży elektryczny opór właściwy, u niemożliwiający samorozładowanie się elektretu oraz są niehigroskopijne. Do wytwarzania elektretów z ładunkiem przestrzennym, a te głównie znalazły zastosowanie, nadają się niepolarne polimery. Elektrety foliowe stosowane w różnego rodzaju przetwornikach winny być wykonane z folii, których temperatury zeszklenia leżą poza zakresem temperatur użytkowania przetworników. Jest to głównie związane z tym, że w temperaturze zeszklenia występują ruchy konformacyjne segmentów łańcucha polimerowego, co prowadzi do rozładowania elektretu.

2.1. Charakterystyki polowe elektretów

Podstawową własnością elektretów jest wytwarzanie trwałego pola elektrycznego w otaczającej przestrzeni. Znaczna liczba zastosowań związana jest bezpośrednio lub pośrednio z wykorzystaniem tego pola w sposób zachowawczy. Otóż te właśnie skutki oddziaływania ładunku elektretu lub inaczey pola wytworzonego przez ładunki z otaczającymi ciałami można w różny sposób wykorzystać w praktyce [1]. Rozważmy dwie podstawowe konfiguracje pól elektrycznych wytworzonych przez jednostronnie metalizowany elektret (rys. 1).

W obu przedstawionych przypadkach, które spotykane są często w praktyce, elektret umieszczony jest między połączonymi i uziemionymi elektrodami metalicznymi, przy czym jedna z nich jest odsunięta od dielektryka,



Rys. 1. Schemat konfiguracji pól elektrycznych wytworzonych przez elektret natomiast druga przylega bezpośrednio do niego. Można wykazać, że natężenie pola elektrycznego E_2 panującego wewnątrz elektretu określa wyrażenie:

$$E_2(x) = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_1} \left(\int_0^x \rho(x') dx' - \hat{\sigma}_1 - \frac{\hat{\sigma}_2}{1 + x_1/\epsilon_1 x_2} \right) \quad (1)$$

gdzie x_1 i x_2 oznaczają grubości elektretu i szczeliny powietrznej, ϵ_1 oznacza względną przenikalność elektryczną dielektryka, $\rho(x)$ gęstość przestrzenną ładunku w elektrecie, a $\hat{\sigma}_1$ i $\hat{\sigma}_2$ efektywne gęstości ładunku na obu powierzchniach elektretu. Natomiast natężenie pola w szczelinie powietrznej wynosi:

$$E_2 = \frac{\hat{\sigma}_2}{\epsilon_0 (1 + \epsilon_1 x_2/x_1)} \quad (2)$$

W oparciu o równania (1) i (2) można oszacować wartości natężeń pól E_1 i E_2 , jakie występują w konkretnej sytuacji przedstawionej na rys. 1. Po przeprowadzeniu szczegółowych rozważań otrzymamy:

$$\int_0^x \rho(x') dx = \begin{cases} 0 & \text{dla } 0 \leq x \leq \frac{x_1 - \Delta x}{2} \\ \frac{\hat{\sigma}}{2\Delta x} (2x - x_1 + \Delta x) & \text{dla } \frac{x_1 - \Delta x}{2} \leq x \leq \frac{x_1 + \Delta x}{2} \\ \frac{\hat{\sigma}}{2} & \text{dla } \frac{x_1 + \Delta x}{2} < x \leq x_1 \end{cases}$$

gdzie:

$$\varrho(x)\Delta x = \begin{cases} \varrho_0 \cdot \Delta x = \hat{\varrho} & \text{dla } \frac{x_1 - \Delta x}{2} < x < \frac{x_1 + \Delta x}{2} \\ 0 & \text{na zewnątrz przedziału } \Delta x. \end{cases}$$

Stosowane powszechnie folie elektretowe do przetworników charakteryzuje się następującymi parametrami fizycznymi: $\hat{\varrho} = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ C/m}^2$, $\epsilon_1 = 2$, $x_1 = 20 \mu\text{m}$, $x_2 = 60 \mu\text{m}$. Wykorzystując równanie (2), otrzymamy:

$$E_2 = 3,5 \frac{\text{MV}}{\text{m}}$$

Natężenie pola wewnątrz elektretu zależy oczywiście od współrzędnej x . Na podstawie wyrażenia (1) otrzymamy dla pewnych określonych wartości x :

$${}^L E_1(x) = \begin{cases} -23 \text{ MV/m,} & \text{dla } 0 < x < \frac{x_1 - \Delta x}{2} \\ -10,5 \text{ MV/m,} & \text{dla } x = \frac{x_1}{2} \\ +1,8 \text{ MV/m,} & \text{dla } \frac{x_1 + \Delta x}{2} < x < x_1 \end{cases}$$

Napięcie równoważne, kompensujące pole elektryczne panujące w przestrzeni powietrznej można obliczyć w oparciu o wyrażenie:

$$U_0 = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_1} \int_0^{x_1} x \varrho(x) dx = \frac{\hat{\varrho}_2 x_1}{\epsilon_0 \epsilon_1} = 250 \text{ V} \quad (3)$$

Z powyższego przykładu wynika, jak duże natężenie pola elektrycznego można otrzymać na bazie elektretów foliowych oraz w jaki sposób w konkretnych przypadkach można wykorzystać ogólne równania opisujące stan elektretowy.

Należy tu zwrócić uwagę na pewne braki przedstawionej powyżej w formie bardzo uproszczonej teorii. Otóż w praktyce, tylko w szczególnych przypadkach znana jest z wystarczającą dokładnością funkcja rozkładu przestrzennego $\varrho(x)$. Natomiast wielkością, którą można bardzo prosto wyznaczyć doświadczalnie jest napięcie równoważne U_0 . Dzięki znajomości tego napięcia można dosyć precyzyjnie obliczyć natężenie E_2 pola elektrycznego panującego w szczeliny. Na podstawie równań (2) i (3) otrzymamy:

$$E_2 = \frac{\epsilon_1 \cdot U_0}{x_1 + \epsilon_1 x_2} \quad (4)$$

W przypadku gdy szerokość szczeliny jest znacznie większa od grubości elektretu ($x_2 \gg x_1$), wówczas otrzymamy prosty związek:

$$E_2 \approx \frac{U_0}{x_2}, \quad \text{gdy } x_2 \gg x_1 \quad (5)$$

Należy tu jednak zaznaczyć, że znajomość U_0 nie wystarczy do obliczenia natężenia pola E_1 panującego wewnątrz elektretu, lecz z punktu widzenia zastosowań praktycznych znajomość parametru E_2 jest bardziej istotna.

2.2. Wpływ czynników zewnętrznych na zachowanie się elektretu

Wiele czynników zewnętrznych ma istotny wpływ na własności fizyczne elektretów. Do dominujących należą tu takie czynniki, jak: temperatura, czy ciśnienie atmosferyczne, które w istotny sposób wpływają na wielkość ładunku samoistnego elektretów.

2.2.1. Zależność ładunku elektretów od ciśnienia atmosferycznego

Maksymalne natężenie pola w otaczającej elektret przestrzeni jest wprost proporcjonalne do gęstości powierzchniowej ładunku elektretu σ . Przyjmując, że gęstość tego ładunku wynosi $2,92 \cdot 10^{-9} \text{ C/cm}^2$, otrzymamy:

$$E = k \cdot \sigma = 1,13 \cdot 10^{13} \text{ W.cm/C} \cdot 2,92 \text{ C/cm}^2 = 33 \text{ kV/cm}$$

W jednorodnym polu elektrycznym powietrze ulega przebiciu przy natężeniu pola $E_p = 33 \text{ kV/cm}$. Z drugiej strony napięcie przyłożone do elektrod podczas przebicia elektrycznego jest funkcją iloczynu ciśnienia atmosferycznego p i odległości l między elektrodami:

$$V_p = f(p \cdot l)$$

W ten sposób, przy niezmięionej odległości między elektrodami, napięcie i natężenie pola przebicia E_p zależą od ciśnienia atmosferycznego. Podczas zmniejszenia ciśnienia E_p zmniejsza się, przechodząc przez minimum, a następnie zaczyna zwiększać się. Położenie punktu minimum warunkowane jest odległością między elektrodami. Jeśli gęstość ładunku powierzchniowego będzie większa od $2,92 \cdot 10^{-9} \text{ C/cm}^2$, to maksymalne natężenie pola E będzie większe od wartości 33 kV/cm , czyli większe od E_p przy normalnym ciśnieniu atmosferycznym. W tych punktach, w których $E > E_p$ nastąpi przebicie, co spowoduje, że ładunek elektretu zmniejszy się. Przebicie będzie występowało tak długo, aż ładunek elektretu nie stanie się mniejszy od 33 kV/cm .

Przy zmianie ciśnienia atmosferycznego zmienia się E_p , co powoduje także zmianę ładunku elektretu. Wynika stąd zatem, że maksymalny ładunek

elektretu nie może być większy od E_p/k , oznacza to, że ładunek elektretu określony jest przez wartość ciśnienia atmosferycznego.

2.2.2. Wpływ temperatury środowiska na własności elektretów

Elektrety są bardzo czułe na zmiany temperatury. Wzrost temperatury elektretu prowadzi do reorientacji uporządkowanych dipoli molekularnych, wzrostu intensywności ruchu ładunków rzeczywistych oraz do zwiększenia przewodnictwa omowego elektretu. Reorientacja dipoli wywołana zaburzeniami termicznymi prowadzi do zaniku wypadkowej polaryzacji dipolowej elektretu. W wyniku intensywności dryfu ładunku w polu wewnątrz elektretu może wystąpić również częściowa rekombinacja ładunków przeciwnego znaku. Wszystkie te procesy termiczne prowadzą do zaniku ładunku elektretu, a zatem do obniżenia natężenia pola elektrycznego.

2.3. Proces starzenia elektretów foliowych

Efektywna gęstość powierzchniowa ładunku elektretów zmniejsza się w czasie, szybkość tego zaniku zależy od stanu zesterzenia. Czasowe zmiany gęstości powierzchniowej $\sigma(t)$ ładunku w początkowej fazie samorzutnej depolaryzacji elektretów w warunkach normalnych są szybkie, natomiast w późniejszej fazie procesu starzenia są powolne. Na proces starzenia mają istotny wpływ takie czynniki, jak: wnikanie ładunków kompensacyjnych z otoczenia oraz warunki przechowywania, a w szczególności rodzaj metalizacji i geometria próbki [2].

2.4. Impulsowy czujnik elektretowy

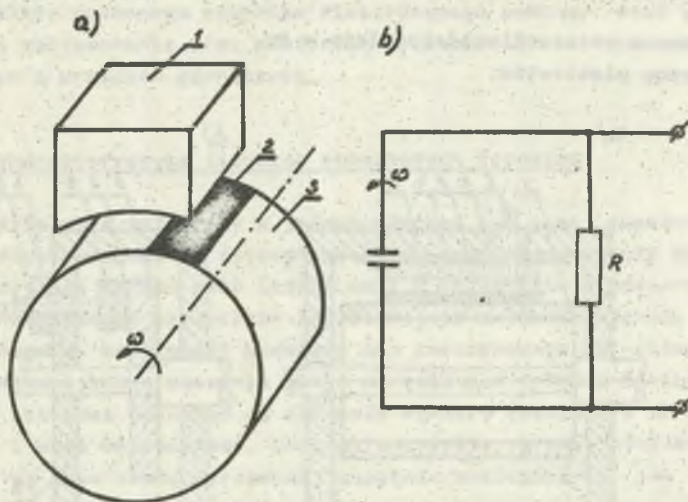
Podstawowa cecha elektretów, jaką jest wytwarzanie pola elektrycznego, umożliwia ich zastosowanie w charakterze różnego rodzaju przetworników [3], a w szczególności do pomiaru prędkości obrotowej. Zasada działania takiego czujnika opierać się zatem winna na tej jego podstawowej własności. Elektret naklejony na obracający się element lub wirnik maszyny przechodząc obok nieruchomej elektrody metalicznej indukuje na niej odpowiedni ładunek elektryczny (rys. 2a). Ten indukowany ładunek w postaci impulsu napięciowego odbierany z wyjścia czujnika podawany może być następnie do urządzenia pomiarowego lub rejestrującego. Prędkość obrotową można wówczas wyznaczyć albo na podstawie wartości napięcia wyjściowego U_w , lub na podstawie znajomości częstotliwości impulsów f .

Z uproszczonego schematu elektretu wynika (rys. 2b), że:

$$U_w(t) = I(t) \cdot r = \frac{dq(t)}{dt} \cdot r = \frac{dS(t)}{dt} \cdot r = \sigma \cdot \omega \cdot S_0 \cdot r \frac{df(t)}{dt}, \quad (6)$$

gdzie:

$$S(t) = S_0 \cdot f(t) - \text{zmienny rzut powierzchni elektretu na elektrodę,}$$



Rys. 2. Schemat elektretowego czujnika prędkości (a) i jego obwód równoważny

1 - elektroda potencjalna, 2 - elektret, 3 - wałek napędowy

- $f(t)$ - pewna funkcja periodyczna, której postać zależy od kształtu elektretu (S_0 - powierzchnia elektrody),
- $q(t) = \delta \cdot S(t)$ - ładunek indukowany na elektrodzie (δ - powierzchniowa gęstość ładunku indukowanego),
- ω - prędkość kątowa obrotu,
- r - opór wejściowy układu pomiarowego.

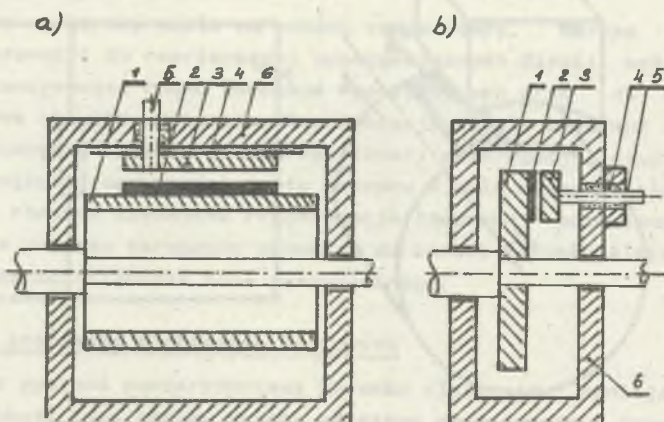
Z równania (6) wynika, że napięcie wyjściowe U_w jest proporcjonalne do ω i zależy od δ i S . Wyznaczenie prędkości kątowej tą metodą jest związane z pewnymi trudnościami praktycznymi, ponieważ gęstość powierzchniowa δ niekiedy może zmieniać się z czasem (proces starzenia elektretu, wpływ temperatury itp.). Praktycznie wygodniejszy jest pomiar prędkości obrotowej na podstawie wyznaczenia częstotliwości indukowanych impulsów napięciowych. Przy tego rodzaju pomiarach błąd pomiaru sprowadza się do minimum. W tym przypadku nawet po zmniejszeniu gęstości ładunku powierzchniowego o rząd wielkości, wartość napięcia wyjściowego U_w jest dostatecznie duża i może być podana bezpośrednio na wejście układu rejestrującego, nawet bez uprzedniego wzmacnienia. Prędkość obrotową można wówczas wyznaczyć z prostego wzoru:

$$n = \frac{60}{k} \cdot f \left[\frac{\text{obr}}{\text{min}} \right], \quad (7)$$

gdzie:

f - oznacza częstotliwość impulsów w Hz,

k - liczbę elektretów.



Rys. 3. Model elektretowego czujnika pomiarowego

1 - wałek napędowy, 2 - elektret, 3 - elektroda potencjalna, 4 - podkładka izolacyjna, 5 - przewód, 6 - korpus

Jedną z wersji konstrukcyjnych czujnika elektretowego pokazano na rys. 3. Na boczną (3a) lub czołową (3b) powierzchnię wirnika 1 przyklejony zostaje elektret 2. Elektroda pomiarowa 3 umieszczona zostaje w pobliżu elektretu, winna ona być bardzo dokładnie izolowana od korpusu czujnika 6 za pomocą izolacyjnej podkładki 4. Połączenie z urządzeniem pomiarowym następuje za pomocą przewodu 5. Czujnik elektretowy może być wykonany w postaci oddzielnego przyrządu, który należy połączyć z odpowiednim mechanizmem obrotowym o nieznannej prędkości obrotowej. Można też nakleić elektret na odpowiedni element wirujący, którego prędkość należy wyznaczyć. Wydaje się jednak, że ten sposób w warunkach dużego zapylenia i zmiennej wilgotności występujących przy urabianiu węgla nie może być stosowany.

Podczas pomiaru prędkości obrotowej elementów wykonanych z materiałów dielektrycznych można stosować folię elektretową z napyłoną na niej elektrodą metaliczną. Częstotliwość indukowanych impulsów elektrycznych będzie wówczas proporcjonalna do liczby obrotów wirnika. Odpowiedni i dogodny przedział pomiaru częstotliwości można otrzymać, stosując odpowiednią liczbę elektretów. Błąd pomiaru nie powinien wówczas przekroczyć 2%, tzn. powinien mieścić się w granicach dokładności stosowanych przyrządów pomiarowych.

Do podstawowych zalet takiego czujnika elektretowego należy zaliczyć: niewielkie rozmiary gabarytowe, nieznaczna masa, prostota konstrukcji oraz co jest bardzo istotne - zbędność zewnętrznych źródeł zasilania. Wyszczu-

gólnione zalety opisanego czujnika elektretowego powinny stać się przedmiotem jego zastosowania przy pomiarach prędkości obrotowych różnego rodzaju maszyn i urządzeń górniczych.

3. Ogólna charakterystyka fizyczna stożkowych fotodiod

Zasada działania fotodiody z jednym złączeniem p-n jest zupełnie analogiczna do zasady działania fotoogniwa, przy czym powierzchnia światłoczuła fotodiody jest bardzo mała (kilka mm^2) w porównaniu z powierzchnią fotoogniwa. Rezystancja wewnętrzna fotodiod jest znacznie większa od rezystancji fotoogniw, co stanowi podstawę ich zastosowania w układzie jako opornika zmieniającego znacznie swoją wartość pod wpływem oświetlenia. Zasadniczymi zaletami fotodiod są ich małe wymiary (około $3 \times 10 \text{ mm}$), znaczna czułość i mała bezwładność. Obecnie wszystkie prawie fotodiody wykorzystywane są jako diody warstwowe, zupełnie analogicznie jak diody detekcyjne lub prostownicze małej mocy. Istotną różnicą polega na dostosowaniu geometrii diody do najbardziej efektywnego odbioru promieniowania zewnętrznego, co realizuje się przez odpowiednie usytuowanie złącza oraz zastosowanie obudowy z przezroczystym oknem.

3.1. Charakterystyki prądowo-napięciowe fotodiod

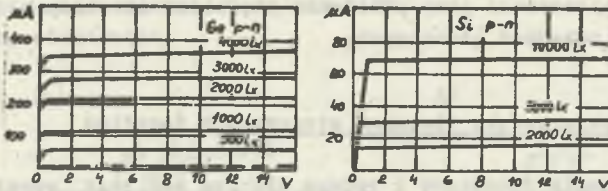
Charakterystyka prądu samoistnego (ciemnego) jest identyczna jak charakterystyka statyczna diod prostowniczych i określona jest przez zależność:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{e \cdot U}{k \cdot T}\right) - 1 \right], \quad (8)$$

gdzie:

- I_0 - prąd nasycenia,
- e - ładunek elektronu,
- k - stała Boltzmanna,
- U - napięcie zewnętrzne,
- T - temperatura bezwzględna.

Wartość prądu samoistnego osiąga nasycenie dla napięcia rzędu kilkuset miliwoltów. Niewielki wzrost prądu ciemnego wraz z napięciem wywołany jest obecnością zakłóceń siatki krystalicznej w pobliżu złącza. Dalszy wzrost napięcia powoduje wyraźny wzrost prądu, a po przekroczeniu pewnej wartości granicznej następuje rozerwanie wiązań sieci krystalicznej i przebiecie. Oświetlenie fotodiody wywołuje generację nośników mniejszościowych, co związane jest z wytworzeniem dodatkowego prądu wzbudzonego (jasnego) I_w . Zależność określająca wzbudzone charakterystyki prądowo-napięciowe ma postać:



Rys. 4. Charakterystyki prądowo-napięciowe dla fotodiod: germanowej p-n i krzemowej p-n

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{e}{k} \cdot \frac{U}{T}\right) - 1 \right] - I_w \quad (9)$$

Typowe charakterystyki prądowo-napięciowe dla fotodiod germanowej p-n i krzemowej p-n przedstawiono na rys. 4 [4]. Istotną cechą fotodiody jest liniowe zależności prądu wzbudzonego od natężenia oświetlenia w szerokim zakresie jego zmian. Zależność tę można wyrazić następująco:

$$I_f = c \cdot \Phi \quad (10)$$

$$I_f = c' \cdot E,$$

gdzie:

c - jest to czułość świetlna fotodiody wyrażona w mA/lm,

c' - czułość wyrażona w mA/lx,

E - natężenie oświetlenia w lx.

Z przedstawionych charakterystyk prądowo-napięciowych wynika, że rezystancja fotodiody maleje wyraźnie wraz ze wzrostem natężenia oświetlenia. Również ze wzrostem oświetlenia maleje rezystancja dynamiczna fotodiody. Efekt ten związany ze zmianą temperatury półprzewodnika w wyniku nagrzania złącza na skutek wzrastającej wartości prądu wywołuje wzrost prądu ciemnego, a także pozorne zwiększenie czułości fotodiody, występujące przy podwyższeniu napięcia polaryzacji.

Istotnym parametrem charakteryzującym fotodiode jest efektywność K wyrażona jako stosunek:

$$K = \frac{I_f}{I_0} \quad (11)$$

W oparciu o powyższe charakterystyki określa się warunki pracy fotodiody [5].

3.2. Zależności termiczne parametrów fotodiod

Za wzorów (8) i (9) wynika silna zależność prądu nasycenia od temperatury. Prąd ten dla fotodiod germanowych zmienia się wg zależności:

$$I_T = I_{T_0} \left[\exp 0,076(T - T_0) \right], \quad (12)$$

która jest słuszna w zakresie temperatur od -30° do 50°C .

Zmiany prądu ciemnego są funkcją zmian własności półprzewodnika, takich jak koncentracja, czy ruchliwość nośników. W porównaniu z prądem samistnym zmieniającym się dla fotodiod germanowych 6-10% na $^{\circ}\text{C}$ zmiany prądu fotoelektrycznego wraz z temperaturą są niewielkie, rzędu 0,5% na $^{\circ}\text{C}$ [6]. Ze względu jednak, że charakter obu prądów jest jednakowy, wypadkowy prąd fotodiody germanowej zależy w silnym stopniu od temperatury. Należy podkreślić, że zmiana temperatury wywołuje równoległe przesunięcie całego pola charakterystyk prądowo-napięciowych fotodiody. W przypadku fotodiod krzemowych wartość prądu ciemnego jest znacznie mniejsza niż dla germanu, co powoduje, że zmiany charakterystyk prądu fotoelektrycznego są przynajmniej o rząd wielkości mniejsze od zmian charakterystyk diod germanowych.

3.3. Zależności czasowe i częstotliwościowe

Mała bezwładność czasowa stanowi podstawową zaletę fotodiod, umożliwiającą ich szerokie zastosowanie w impulsowej technice pomiarowej. W zależności od wykonania fotodiody mogą pracować w szerokim pasmie częstotliwości, które dla powszechnie stosowanych fotodiod wynoszą kilkaset kHz. Zmiany prądu fotoelektrycznego fotodiody są proporcjonalne do zmian koncentracji nośników mniejszościowych w złącze p-n. Proces zaniku tych nośników, od chwili włączenia oświetlenia w fotodiodach, w których $L_d \gg w$ (gdzie w jest szerokością złącza) jest określony nie czasem rekombinacji, a czasem t_0 przejścia nośników przez złącze p-n. Czas ten określa się zależnością:

$$t_0 = \frac{w^2}{D},$$

gdzie:

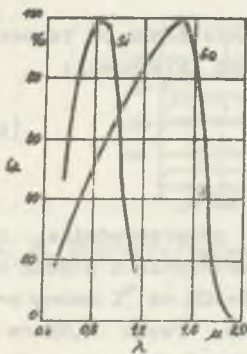
w - szerokość złącza,

D - stała dyfuzji.

Na przykład dla diody o $w = 2 \cdot 10^{-2}$ cm oraz $D = 50$ cm²/s wartość $t_0 = 10^{-5}$ s. Wartość ta określa wewnętrzną stałą czasową diody uwarunkowaną własnościami przewodnika oraz geometrią złącza p-n.

3.4. Charakterystyki widmowe fotodiod

Podstawowe charakterystyki widmowe fotodiody germanowej i krzemowej przedstawiono na rys. 5. Granica występowania zjawiska fotoelektrycznego

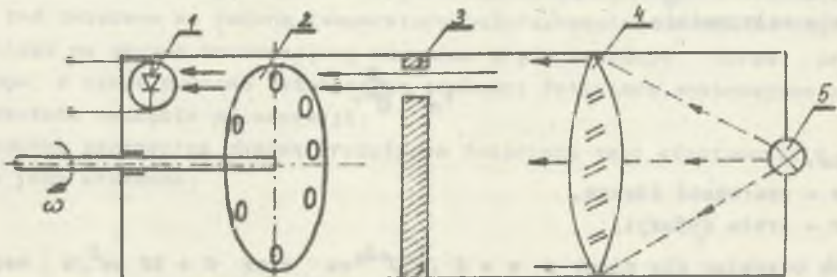


Rys. 5. Charakterystyki widmowe fotodiody germanowej i krzemowej

w zakresie podczerwieni zależy od szerokości strefy wzbronionej, jaką charakteryzuje się dany typ półprzewodnika. Postać przebiegu charakterystyki widmowej zależy od kształtu i wymiarów złącza oraz od kierunku padania promieniowania, ponieważ współczynnik pochłaniania elementów półprzewodnikowych zależy w znacznym stopniu od długości fali. Promieniowanie elektromagnetyczne wnika na różną głębokość w płytkę półprzewodnika, uzależnioną od długości fali tego promieniowania. W wyniku takiego współdziałania nośniki wytwarzają się także na różnych głębokościach zależnie od absorbowanej długości fali, której zmiana wpływa na zmianę wielkości prądu fotoelektrycznego. W zależności od temperatury otoczenia zmienia się nieznacznie kształt charakterystyki widmowej. Maksimum czułości widmowej przesunęło się nieznacznie w kierunku fal krótkich w miarę zmniejszania się temperatury. Przesunięcie to wynosi w przybliżeniu 0,03 jednostek względnych na $^{\circ}\text{C}$, oznacza to, że przy nieznacznych wahaniach temperatury (około $15\text{--}20^{\circ}\text{C}$) efekt związany z przesunięciem widmowym można pominąć. W fotodiodach germanowych występują odwracalne efekty zmęczenia oraz nieodwracalne wpływy starzenia, lecz zmiany te w prawidłowo wykonanych egzemplarzach mogą być praktycznie pominięte.

3.5. Impulsowy czujnik fotodiodowy

Na rys. 6 przedstawiono schemat impulsowego czujnika obrotów z fotodiody. Zasada działania czujnika jest bardzo prosta i polega na wytworze-



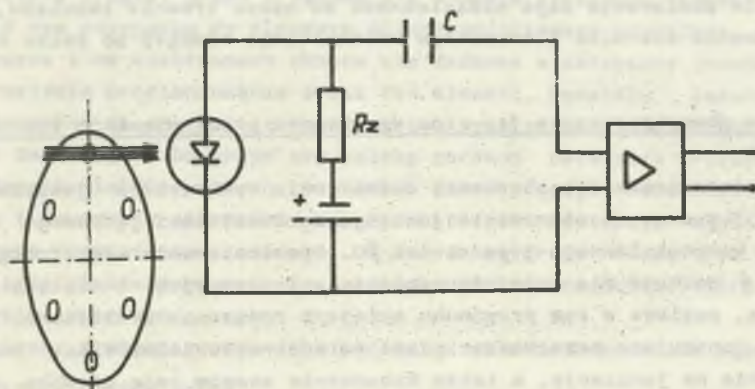
Rys. 6. Schemat impulsowego czujnika fotodiodowego

1 - fotodioda, 2 - tarcza obrotowa, 3 - diafragma, 4 - soczewka skupiająca, 5 - żarówka

niu w obwodzie pomiarowym zewnętrznym impulsów elektrycznych zależnych od prędkości obrotowej poruszającego się elementu. Tarcza obrotowa 2 połą-

czona z zewnętrznym elementem obrotowym powoduje powstanie gwałtownych zwarc i przerw w przepływie prądu w zewnętrznym obwodzie pomiarowym, w zależności od położenia poruszającego się badanego obiektu. Miarę wielkości mierzonej, a więc prędkości obrotowej, może być w tym przypadku częstotliwość impulsów, czas ich trwania lub stosunek wartości prądów maksymalnego i minimalnego. Dokładność czujnika impulsowego zależy od liczby impulsów w ciągu jednego obrotu. Aby więc uzyskać wartość prędkości chwilowej, należy doprowadzić impulsy do specjalnego odbiornika impulsów, odpowiedniego do rejestracji bardzo krótkiego czasu trwania impulsu i możliwie zwiększyć liczbę impulsów przypadających na jeden obrót.

Na rys. 7 zamieszczono uproszczony schemat obwodu zewnętrznego diody fotoelektrycznej [7].



Rys. 7. Uproszczony schemat obwodu zewnętrznego diody fotoelektrycznej

Przytoczona metoda impulsowa polegająca na pomiarze liczby i częstotliwości impulsów związana jest następnie z ich transformacją fotoelektryczną na proporcjonalną wielkość elektryczną, które może po uprzednim zarejestrowaniu na taśmie magnetycznej być poddana szczegółowej analizie, umożliwiającej wyznaczenie prędkości średniej i chwilowej.

Ze względu na możliwość powstawania pewnych błędów pomiaru spowodowanych starzeniem się czujnika, wahaniami natężenia promieniowania wskutek zmian napięć zasilających, starzeniem się żarówek itp. wskazane jest stosowanie odpowiednich metod pomiarowych, pozwalających na minimalizację tych błędów. W celu pomiaru wartości chwilowej prędkości używa się układu kondensatorowego, który obrazuje liczbę impulsów przez wartość prądu. Można np. użyć miernika ilorazowego. W układzie miernika ilorazowego przekładnik odbiorczy na przemian łączy ze źródłem napięcia dwa kondensatory albo zwiiera je przez opory. W tych warunkach średnia wartość prądów ładowania kondensatorów jest miarą częstotliwości impulsów, a zatem -

miarę prędkości wywołującego ja ruchu obrotowego. Łatwo wykazać, że wartość prądu w cawce napędowej miernika ilorazowego wynosi:

$$I = 2fCU,$$

gdzie:

- f - częstotliwość impulsów,
- C - pojemność kondensatora,
- U - napięcia pomiarowe.

W cawce zwrotnej prąd jest proporcjonalny do napięcia, a więc wychylenie wskaźnika miernika jest bezpośrednio zależne jedynie od liczby impulsów na sekundę. W tym przypadku przyrząd może być wyskalowany bezpośrednio w jednostkach prędkości kątowej $\omega = 2\pi f$. Zastosowania kondensatorów w układzie pomiarowym daje niezależność od czasu trwania impulsów, ponadto stosowania miernika ilorazowego uniezależnia również od zmian napięcia.

4. Ogólna charakterystyka fizyczna detektorów promieniowania jądrowego

Do pomiaru prędkości obrotowej można także wykorzystać jeszcze jedno zjawisko fizyczne, a mianowicie jonizujące właściwości jądrowego promieniowania korpuskularnego typu α lub β . Promieniowanie elektromagnetyczne typu γ cechuje się mniejszą zdolnością jonizacyjną i większą przenikliwością, posiada w tym przypadku mniejsze znaczenie praktyczne. Promieniowanie jonizujące przechodząc przez ośrodek materialny traci swą energię głównie na jonizację, a także wzbudzenie atomów tego ośrodka. Zjawisko jonizacji jest podstawowym procesem umożliwiającym wykrywanie promieniowania jądrowego. Wielkością określającą energetyczną właściwość procesu jonizacji jest praca jonizacji, czyli średnia energia, jaka jest potrzebna do wytworzenia jednej pary jonów. Praca jonizacji zależy od rodzaju ośrodka, natomiast dla danego ośrodka - od rodzaju i energii promieniowania jonizującego. Dla promieniowania α o energii od 10 do 100 keV praca jonizacji jest w przybliżeniu stała i wynosi około 33 eV. Częstki lekkie jądra helu mają dużą wartość jonizacji właściwej ze względu na dużą masę i ładunek pomiaru jonizacji gazu przez promieniowanie jonizujące dokonuje się za pomocą specjalnych układów pomiarowych, których głównym elementem jest detektor. Istnieje obecnie bardzo duża ilość różnych detektorów promieniowania jonizującego, głównie wykorzystujących własności jonizujące i fluorescencyjne tego promieniowania. Należą do nich takie detektory promieniowania, jak: komory jonizacyjne, liczniki proporcjonalne, liczniki G-M, liczniki scyntylicyjne oraz ostatnio coraz szerzej stosowane liczniki półprzewodnikowe.

Do detekcji promieniowania jądrowego przy pomiarze prędkości obrotowej mogą być głównie wykorzystane ciągle ostatnio doskonalona detektory półprzewodnikowe.

4.1. Własności detektorów półprzewodnikowych

Do detekcji promieniowania jonizującego wykorzystuje się także różnego rodzaju kryształy oraz elementy półprzewodnikowe. Ze względu na zasadę działania detektory te można podzielić na dwie grupy:

- 1) detektory, w których promieniowania jonizujące wywołuje emisję wtórnego promieniowania świetlnego,
- 2) detektory, w których w wyniku oddziaływania promieniowania wytworzony zostaje ładunek elektryczny lub zmienia ulega oporność detektora.

Zasada działania detektorów pierwszej grupy jest zupełnie podobna jak liczników scyntylacyjnych i z uwagi na konieczność współpracy z powielaczem elektronowym trudno jest ją stosować w warunkach przemysłowych.

Detektory drugiej grupy przypominają w swoim działaniu komory jonizacyjne. W tym przypadku do elementu półprzewodnikowego przykładają się pole elektryczne i na elektrodach zbiera się ładunek elektryczny, powstały podczas przejścia promieniowania przez ten element. Powstały ładunek jest proporcjonalny do energii straconej przez promieniowanie przechodzące przez element detekcyjny. Do grupy tej należą zarówno detektory krystaliczne o własnościach dielektrycznych, w których nie występuje wzmocnienie ładunku, jak i kryształy półprzewodnikowe, w których występuje zjawisko wewnętrznego wzmocnienia prądowego. Do omawianej grupy należą też elementy zawierające złącze typu p-n. Są to diody półprzewodnikowe, które pracują w zakresie zaporowym.

Detektory drugiej grupy można podzielić na dwie zasadnicze podgrupy:

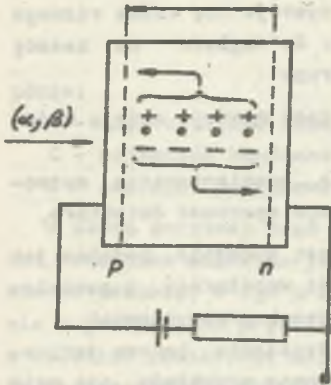
- a) detektory krystaliczne,
- b) półprzewodnikowe detektory złączowe.

Jako materiał do produkcji detektorów krystalicznych stosuje się: siarczek kadmu, siarkę, diament, german, krzem i szereg innych kryształów. W praktyce najszersze zastosowanie znalazł jako detektor promieniowania jonizującego siarczek kadmu, a ostatnio tellurek kadmu [8].

Możliwość wykonania detektora z ciała stałego w istotny sposób ograniczyła ich wymiary geometryczne, co ma niekiedy duże znaczenie praktyczne.

Główną zaletą, która decyduje o przewadze półprzewodnikowych detektorów złączowych nad komorami jonizacyjnymi, licznikami gazowymi i scyntylacyjnymi jest wysoka sprawność przetwarzania energii promieniowania jonizującego na odpowiedni sygnał elektryczny. Drugą nie mniej ważną zaletą w układzie detektor-obwód pomiarowy jest wysoki stosunek wartości sygnału detektora do wartości sygnału zakłóceń (szumów). Obie te zalety zdecydowały o szybkim rozwoju badań nad ich właściwościami, technologią i zastosowaniem.

Półprzewodnikowy detektor złączowy jest diodą spolaryzowaną w kierunku zaporowym. Do wytworzenia tych detektorów stosuje się głównie krzem i german. Promieniowanie jonizujące przechodząc przez obszar czynny półprzewodnikowego detektora złączowego traci swą energię w kolejnych aktach



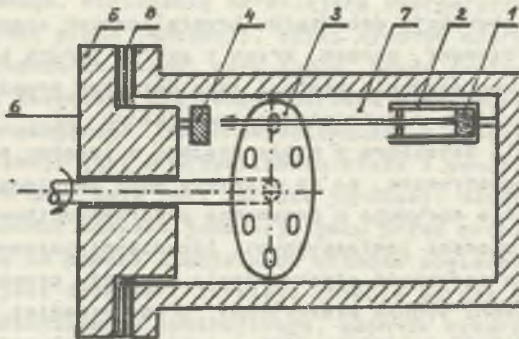
Rys. 8. Schemat oddziaływania promieniowania jądrowego z detektorem półprzewodnikowym

tworzenie par elektron - dziura (rys. 8). Energia jaką traci cząstka naładowana w ciele stałym podczas jednego aktu zderzenia, jest dziesięć razy mniejsza od energii traconej w powietrzu, stąd też liczba wytworzonych nośników ładunku będzie większa. Silne pole elektryczne panujące w warstwie zaporowej (ze względu na jej stosunkowo małą szerokość) rozdzieli powstałe ładunki.

Do detekcji promieniowania korpuskularnego typu α lub β stosuje się detektory barierowe, których powierzchnia czynna ma kształt okrągły. Energia cząstki bombardującej ulega całkowitej absorpcji w obszarze czynnym. Do pomiarów impulsowych detektory barierowe wytwarza firma Schlumberger, ich powierzchnia czynna wynosi 20-25 mm², a grubość warstwy czynnej 20-3000 μ m.

4.2. Impulsowy czujnik izotropowy

Ze względu na stosunkowo niewielki zasięg jonizującego promieniowania korpuskularnego w powietrzu oraz zmienną fluktuację liczby cząstek rejestrowanych przez detektor, spowodowaną ruchami powietrza w objętości czyn-



Rys. 9. Zasada działania impulsowego czujnika izotopowego

1 - izotop, 2 - ogranicznik promieniowania (kolimator), 3 - tarcza obrotowa, 4 - czujnik izotopowy, 5 - korpus, 6 - wyjście elektryczne, 7 - obszar próżniowy, 8 - uszczelnienie próżniowe

nej, najlepiej usunąć powietrze (przez odpompowanie) z całej objętości czujnika pomiarowego. W tym celu trzeba zastosować specjalny rodzaj usz-

czelnienia, zgodnie z wymogami techniki próżniowej. Zasada działania takiego czujnika będzie analogiczna do zasady działania czujnika fotodiodowego, z tą jednak różnicą że element fotoelektryczny zostanie zastąpiony detektorem półprzewodnikowym, a wewnątrz czujnika należy wówczas odpompować do ciśnienia rzędu 10^{-4} - 10^{-5} Tr. Zasada działania czujnika została przedstawiona na rys. 9. Zachodzi tu konieczność przekazania ruchu obrotowego do obszaru próżniowego 7. W przypadku niezbyt wysokiej próżni można stosować uszczelnienie dławikowe pręta przenoszącego ruch. W tym przypadku na uszczelki dobrze nadaje się teflon, który jest znacznie lepszy od gumy. W przypadku wysokiej próżni przy uszczelnieniu ruchu obrotowego stosowane są harmonijki [9]. Konstrukcje urządzenia przenoszącego ruch muszą uwzględniać siłę ciśnienia atmosferycznego działającego na harmonijkę, jak również mieć na uwadze, aby od strony wysokiej próżni znajdowało się jak najmniej mechanizmów, w których występuje tarcie. Przenoszenie ruchu może się odbyć również za pomocą pola magnetycznego, przenikającego przez niemagnetyczną ściankę, oddzielającą obszar wysokiej próżni.

Podczas generacji ładunku ważne jest, aby powstałe w detektorze nośniki ładunku zostały zebrane zanim ulegną rekombinacji w czasie ruchu do odpowiedniej elektrody. Czas zbierania jest określony wyrażeniem:

$$t = \frac{D^2}{\mu U}$$

gdzie:

- μ - jest rekombinacją nośników,
- D - szerokość warstwy zaporowej,
- U - napięcie przyłożone w kierunku zaporowym.

Czas t musi być większy od czasu życia nośników ładunku i w praktyce jest rzędu 10^{-9} - 10^{-8} s. W wyniku przejścia przez detektor cząstki o energii E powstaje ładunek o wartości:

$$Q = \frac{E \cdot e}{W}$$

gdzie W jest energią potrzebną do powstania pary elektron-dziura. Wywołana ona na pojemności C_d różnicę potencjałów ΔU

$$\Delta U = \frac{Q}{C_d}$$

która jest proporcjonalna do energii straconej przez cząstkę.

Jeśli przyjąć, że cząstka α , która trafiła do objętości czynnej detektora ma energię 5,3 MeV (^{210}Po), to na wyjściu pojawi się impuls napięcia o wartości $U = 12$ mV. Dla szacunkowych obliczeń orientacyjnych impulsu napięciowego można przyjąć następującą przesłankę, że amplituda impulsu wynosi 0,75 do 1 mV na 1 MeV energii cząstki α .

Na zakończenie należy stwierdzić, że półprzewodnikowe detektory złączone mają szereg istotnych zalet, jak np. małe wymiary, dużą szybkość zbierania ładunku, możliwość zastosowania małych napięć zasilających. Zalety te przyczyniły się do ich szerokiego zastosowania podczas rejestracji zarówno promieniowania korpuskularnego, jak również γ .

5. Podsumowanie

W artykule opisano trzy podstawowe metody pomiarów prędkości obrotowej, na bazie których można zbudować czujniki pomiarowe umożliwiające wyznaczenie parametrów kinematycznych ruchu obrotowego. Zasada działania tych czujników jest podobna, przetworzeniu ulega ruch obrotowy na odpowiedni ciąg sygnałów elektrycznych. Aby wyznaczyć średnią prędkość obrotową, zarejestrowany sygnał elektryczny należy poddać odpowiedniej analizie matematycznej. W tym celu można zastosować dwie metody:

- a) metodę impulsową,
- b) metodę impulsowo-analogową.

Pierwsza z tych metod polega na przetworzeniu bezpośrednio obrotów na ciąg impulsów elektrycznych i ich zarejestrowaniu na taśmie. W oparciu o znaną odległość między tymi impulsami można wówczas wyznaczyć wartość średnią prędkości obrotowej. W oparciu o tę metodę wyznacza się również liczbę obrotów w funkcji czasu $n = f(t)$.

Metoda impulsowo-analogowa polega na przetworzeniu liczby obrotów w czasie na czasową funkcję sinusoidalną, którą następnie transformuje się na odpowiedni przebieg analogowy stanowiący obraz prędkości obrotowej, po powtórny zarejestrowaniu na taśmie magnetycznej można następnie poddać analizie amplitudowej. Podane wyżej przykłady pomiaru prędkości obrotowej nie wyczerpują zakresu stosowanych metod i pomiarów. Nie podają również szczegółów technicznych tych urządzeń. Umożliwiają one jednak zorientowanie się w istniejących możliwościach pomiarowych i na ich bazie zbudowanie optymalnego dla danych warunków czujnika pomiarowego.

LITERATURA

- [1] Sessler G.: Electric Fields and Forces due to charged Dielectrics, J. Appl. Phys. 43, 405, 1972.
- [2] Collins R.: Distribution of Charge in Electrets.
- [3] Gubkin A.: Elektrety, Moskwa 1978.
- [4] Ambroziak A.: Miniaturowa fotodioda krzemowa, Przegląd Elektroniki Nr 4, 181, 1961.
- [5] Strutt M.: Berechnungen der Rauschzahl und der Leistungsverstärkung von Photodioden. Archiv. Elektr. Übertragung, Nr 3, 1962.
- [6] Schmaier G.: Germanium Fotodioden, Nachrichtentechnik, Nr 2, 77, 1961.

- [7] Łapiński M.: Miernictwo teletelektryczne, Warszawa 1966.
[8] Kazimieraki A.: Detektory promieniowania jądrowego, Warszawa 1962.
[9] Groszkowski J.: Technika wysokiej próżni, Warszawa 1978.

Recenzent: Prof. dr hab. Aleksander OPILSKI

Wpłynęło do Redakcji w styczniu 1983 r.

ИМПУЛЬСНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ НЕБОЛЬШИХ СКОРОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ
ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ МАШИН

Р е з ю м е

В статье описано три метода измерения скорости вращения на основе которых можно построить измерительные преобразователи для ряда горнопромышленных машин. Представлено основные свойства методов и способы практического применения.

IMPULSE MEASUREMENTS METHODS FOR LOW ROTATIONAL SPEED APPLIED
TO MINING MACHINES

S u m m a r y

Three different methods for low rotational speed are presented, which may be used to design measurement sensors applied in different mining machines. Basic properties of the phenomena are presented and practical way of their application are given.