

ANTONI NIEDERLIŃSKI

Katedra Elektryfikacji Zakładów Przemysłowych  
Politechniki ŚląskiejCYFROWE UKŁADY  
AUTOMATYCZNEJ REGULACJI PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ  
SILNIKÓW PRĄDU STAŁEGO

Streszczenie: W referacie omówiono wady układów analogowych, stosowanych do automatycznej regulacji prędkości oraz wyjaśniono zasadę działania i przeanalizowano dokładność i zakres stosowalności układu cyfrowego z tranzystorowym licznikiem impulsów.

Typowy analogowy układ automatycznej regulacji prędkości obrotowej (rys.1) posiada pewne poważne wady, ograniczające zakres jego zastosowań. Wady te są następujące:

a) Analogowa metoda pomiaru prędkości obrotowej przy pomocy tachogeneratora ma stosunkowo małą i ograniczoną dokładność. Na wskazanie tachogeneratora ma wpływ temperatura otoczenia, stałość magnesów trwałych, wielkość obciążenia. Istniejące w napięciu wyjściowym wyższe harmoniczne mogą być bardzo niebezpiecznym sygnałem pasożytniczym w układzie regulacji. Poza tym - w napięciu wyjściowym jest składowa szumu wysokiej częstotliwości, wywołana procesem komutacji. W czasie przyspieszeń w tachogeneratorze indukują się dodatkowe niepożądane napięcia i powstaje pewne opóźnienie w przekazywaniu sygnału, co znacznie obniża dokładność pomiaru w stanach przejściowych napędu. Wszystkie te czynniki powodują, że dokładność pomiarów statycznych wykonanych tachogeneratorami nie przekracza 0%, a dokładność pomiarów dynamicznych jest znacznie gorsza.

b) Nastawienie wartości zadanej prędkości obrotowej odbywa się w sposób analogowy, tzn. poprzez nastawienie wartości napięcia sterującego. Między prędkością obrotową a nastawianym napięciem sterującym istnieje zależność silnie nieliniowa, zmieniająca się poza tym ze zmianą warunków otoczenia (nagrzewanie się maszyn w czasie pracy). Stąd nastawianie prędkości obrotowej musi się odbywać metodą kolejnych prób i pomiarów, i nie daje gwarancji, że po upływie pewnego czasu, mimo stałej wartości napięcia sterującego, prędkość zadana będzie jeszcze taka, jak w momencie nastawiania. Jest to oczywiście bardzo kłopotliwe dla obsługi.

c) Układ wg rys. 1 jest układem statycznym i jako taki posiada błąd statyczny, zależny od wielkości sygnału zaburzeniowego, którym jest moment obciążenia. Próby zbudowania układów astatycznych regulacji prędkości obrotowej, w których błąd statyczny jest równy zeru, nie dały w przypadku układów analogowych żadnych praktycznie godnych uwagi rozwiązań.

b) Szumy powstające na szczotkach komutatorów maszyn uniemożliwiają praktycznie wprowadzenie do zautomatyzowanego układu napędowego pochodnej błędu regulacji, a tym samym uniemożliwiają poprawę własności dynamicznych układu.

e) Próby zbudowania analogowych układów automatycznej regulacji prędkości obrotowej o dużej dokładności (statycznej i dynamicznej, na przestrzeni długiego czasu nieprzerwanej pracy układu) pociągają za sobą nieproporcjonalnie wysokie nakłady finansowe. Na przykład z danych opublikowanych przez firmę Siemens wynika, że przejściu od układu regulacji prędkości obrotowej z błędem 1% do układu regulacji z błędem 0,1% towarzyszy 10-krotny wzrost kosztów układu.

f) Zbyt wyśrubowanych wymagań dokładności zupełnie już nie można realizować przy pomocy środków analogicznych. A wymagania tego rodzaju stawia nie tylko cały szereg nowych dziedzin zastosowanie napędu elektrycznego, jak np. technika jądrowa. Wzrosły także wymagania stawiane pewnym bardziej tradycyjnym napędem, np. napędem obrabiarek precyzyjnych, napędem walcowniczym i papierniczym.

Omówione powyżej słabe punkty analogowego układu regulacji prędkości obrotowej są w układzie cyfrowym rozwiązane w sposób następujący:

a) Zasady cyfrowego pomiaru prędkości obrotowej jest następująca: Na wale silnika jest przymocowana tarcza posiadająca na obwodzie  $q_1/2$  równomiernie rozmieszczonych szczelin. Tarcza ta wirując przerywa strumień świetlny padający na fotokomórkę i daje  $q_1$  impulsów świetlnych na obrót, które wzmacniacz fotoelektryczny zamienia na  $q_1$  impulsów elektrycznych (por. rys.2). Przy prędkości obrotowej silnika  $n_1$  [obr/min] impulsy te mają częstotliwość  $f_1 = q_1 n_1 / 60$  [sek]. Impulsy te poprzez bramkę B wchodzi na licznik impulsów  $L_1$ . Bramkę realizuje się przy pomocy przełącznika elektronowego sterowanego generatorem kwarcowym Q. Generator ten periodycznie otwiera i zamyka bramkę. Czas otwarcia bramki wynosi  $t_2$  [sek]. W ciągu tego czasu impulsy z wzmacniacza fotoelektrycznego mogą wchodzić na licznik  $L_1$ . Po upływie czasu  $t_2$  bramka jest zamknięta przez czas  $t_1$ , w ciągu tego czasu wskazanie licznika jest kasowane, a po upływie czasu  $t_1$  bramka ponownie się otwiera i rozpoczyna się od nowa liczenie impulsów. Ilość impulsów, które licznik liczy w czasie  $t_2$  jest równa  $z_1 = t_2 f_1 = t_2 q_1 n_1 / 60$  impulsom. Jest ona proporcjonalna do prędkości obrotowej silnika:  $z_1 = k n_1$ . Można tak dobrać wielkości  $t_2$  i  $q_1$ , by licznik wskazywał wprost ilość obrotów na minutę. Maksymalnym błędem pomiaru statycznego będzie taka liczba obr/min  $\Delta n$ , która spowoduje wzrost ilości przeliczonych w czasie  $t_2$  impulsów o jeden impuls. A więc  $z_1 + 1 = k / n_1 + \Delta n$ , a ponieważ  $z_1 = k n_1$ , to  $\delta_{\text{maks}} = \Delta n = 1/k = 60 / t_2 q_1$ . A więc błąd pomiaru statycznego będzie tym mniejszy, im dłuższy czas liczenia impulsów i większa ilość szczelin na obwodzie tarczy. Jak widać z wyżej powiedzianego pomiar odbywa się nie w sposób ciągły, lecz w pewnych dyskretnych momentach czasu, oddalonych od siebie o czas przerwy w liczeniu impulsów  $t_1$ . Jaka będzie dokładność pomiaru, gdy prędkość obrotowa będzie się zmieniać w czasie? Czy to, że pomiaru dokonujemy tylko w pewne dyskretnie momenty czasu nie zuboży naszej informacji o przebiegu prędkości obrotowej? Jaki ma być odstęp  $t_1$  między kolejnymi pomiarami i od czego on zależy? Na wszystkie te zagadnienia odpowiada pewne twierdzenie teorii informacji, znane pod nazwą

twierdzenia Shannona-Kotelnikowa. Można je sformułować następująco: Niech  $f(t)$  (rys.3) będzie funkcją czasu o ograniczonym widmie częstotliwości  $B(\omega)$ . Jeżeli maksymalna częstotliwość drgań składowych harmonicznych funkcji  $f(t)$  jest równa  $\omega_{\text{maks}}$ , wówczas dyskretne wartości funkcji  $f(t)$  w momentach odległych od siebie o czas  $\Delta t = \pi/\omega_{\text{maks}}$  jednoznacznie wyznaczają przebieg funkcji  $f(t)$  dla wszystkich momentów czasu. Ponieważ przebiegi czasowe wszystkich wielkości fizykalnych w układach rzeczywistych mają ograniczone widmo częstotliwości (przyczyną tego jest inercja układów), możemy przedstawić przebieg ciągły przez podanie dyskretnych wartości tego przebiegu, pomierzonych w odstępach czasu uzależnionych od szerokości pasma przepuszczania.

Licznik impulsów  $L_1$  jest zbudowany z bistabilnych układów przeskokowych - trygierów. Schemat układu przeskokowego zbudowanego na tranzystorach i odpowiadającą mu charakterystykę statyczną polazano na rys.4. Układ przeskokowy posiada tylko dwa stabilne położenia równowagi, w których może się znajdować. W jednym z tych położen tranzystor  $T_1$  jest odetkany i jego punkt pracy znajduje się w punkcie A charakterystyki statycznej, a tranzystor  $T_2$  jest zatkany i jego punkt pracy znajduje się w punkcie B charakterystyki. Położenie to nazywamy położeniem 0. W drugim stabilnym położeniu równowagi - na odwrót: tranzystor  $T_1$  jest zatkany, a tranzystor  $T_2$  odetkany. Położenie to nazywamy położeniem 1. W każdym z tych dwóch stabilnych położen równowagi układ może się znajdować nieskończenie długo, tak długo, dopóki na wejście układu nie zostanie podany impuls dodatni. Wówczas układ przeskoczy do przeciwnego położenia równowagi niż to, w którym się znajdował. Skoro na wejście układu zostanie podana seria impulsów dodatnich, układ będzie przeskakiwał z jednego położenia do drugiego, a na wyjściu układu będą się na zmianę pojawiały impulsy dodatnie i ujemne. Gdy punkt pracy tranzystora przeskoczy z punktu A do punktu B, na wyjściu pojawi się dodatni skok napięcia, a gdy punkt pracy tranzystora  $T_1$  przeskoczy z punktu B do punktu A, na wyjściu pojawi się ujemny skok napięcia. Łącząc kaskadowo szereg tego rodzaju układów przeskokowych otrzymuje się pewnego rodzaju dzielnik impulsów dodatnich: każdy ze stopni tej kaskady będzie zmniejszał ilość wejściowych impulsów o połowę, gdyż każdym dwom: impulsom dodatnim na wejściu trygiera odpowiada

tylko jeden impuls dodatni na wyjściu. Jeżeli połączyć kaskadowo  $n$  układów przeskokowych i każdy z nich spowodować do położenia 0 (a więc prawy tranzystor każdego trygiera będzie zatkany), to po przyłożeniu  $2^n$  impulsów dodatnich na wejście, pojawi się impuls dodatni na wyjściu. Jeżeli ilość impulsów przyłożonych na wejście będzie mniejsza od  $2^n$ , na wyjściu układu impuls się nie pojawi, a ilość impulsów podanych na wejście można obliczyć ze znajomości stanów, w których znajdują się poszczególne trygiery. Będzie ona równa

$$\sum_{i=1}^n a_i 2^{i-1}$$

gdzie  $i$  - numer porządkowy trygiera w dekadzie,  $a_i$  - położenie  $i$ -tego trygiera (0 lub 1). Układ taki będzie więc układem liczącym w systemie dwójkowym o pojemności  $2^n$  impulsów. Uzupełniając ten układ pewnymi dodatkowymi sprzężeniami zwrotnymi, można otrzymać bardziej wygodny układ liczący w systemie dziesiętnym. Schemat jednej dekady układu liczącego w systemie dziesiętnym jest pokazany na rys.5.

Ponieważ w przerwie między pomiarami wynik pomiaru w liczniku  $L_1$  musi zostać skasowany, uzupełnia się licznik  $L_1$  układem zapamiętującym - rejestrem  $R_1$ , zbudowanym z identycznych układów przeskokowych co licznik  $L_1$ . W rejestrze tym wynik każdego pomiaru jest przechowywany do momentu ukończenia następnego pomiaru. Schemat połączeń trygiera rejestru z trygierem licznika pokazano na rys.6. Rejestr ten zaopatrzony jest w specjalny wskaźnik położenia poszczególnych trygierów, umożliwiający odczyt prędkości obrotowej.

Dokładność tego typu pomiaru jest w każdym punkcie zakresu pomiarowego stała i teoretycznie nieograniczona. W rozpatrywanym przypadku zwiększenie dokładności pomiaru można uzyskać bardzo tanim kosztem - zwiększając ilość dekad licznika  $L_1$  i ilość szczelin wirującej tarczy. Praktycznym ograniczeniem dokładności pomiaru jest częstotliwość graniczna tranzystorów stosowanych w liczniku. Istniejącymi w chwili obecnej licznikami można dokonać pomiaru prędkości obrotowej w zakresie od 0 do 8000 obr/min z dokładnością do 0,1 obr/min.

b) Porównywanie wyniku pomiaru z wartością zadaną odbywa się w sposób następujący: liczba równa wartości zadanej prędkości obrotowej zostaje nastawiona w liczniku  $L_2$  (rys.7), identycznym jak licznik  $L_1$  i zaopatrzonym w rejestr  $R_2$ . Z chwilą gdy licznik  $L_1$  ukończył pomiar i wynik pomiaru jest już w rejestrze  $R_1$ , zostaje uruchomiony specjalny generator impulsów  $G$ , który serią impulsów równocześnie kasuje zawartość obu rejestrów  $R_1$  i  $R_2$ . Z chwilą gdy zawartość jednego z rejestrów stanie się równa zero, rejestr ten przesyła impuls do unieruchomienia generatora. Zawartość drugiego rejestru jest wówczas wprost równa błędowi regulacji. Znak błędu zależy od tego, który z rejestrów został sprowadzony do zera. Tego rodzaju rozwiązanie węzła sumacyjnego układu regulacji czyni wielkość zadaną zupełnie niezależną od zmian otoczenia i ułatwia szybkie i dokładne nastawienie jakiegokolwiek prędkości obrotowej z przedziału regulacji.

c,d) Ponieważ błąd regulacji jest dany w postaci dyskretnej, można poddawać go bardzo skomplikowanym przekształceniom funkcjonalnym, zawsze dającym się sprowadzić do odpowiedniego dodawania i odejmowania impulsów. Operacje te w zasadzie wykonują takie same liczniki i rejestry, jak wyżej opisany. Na przykład, wielkość proporcjonalną do całki błędów można uzyskać sumując w odpowiednim liczniku wartości błędów z każdego pomiaru. Wielkość proporcjonalną do pochodnej błędów uzyskuje się przez odejmowanie błędów dwóch kolejnych pomiarów. W przypadkach, gdy to jest potrzebne, można zrealizować jeszcze bardziej skomplikowane przekształcenia.

Ponieważ nastawienie prądu wzbudzenia generatora musi się już odbywać w sposób analogowy, w pewnym miejscu układu regulacyjnego wielkości dyskretne muszą zostać przetworzone na wielkości analogowe. W rozpatrywanym przypadku przetwornikami są rejestry, w których znajdują się wartości błędów, całki błędów i pochodnej błędów. W szereg z prawymi tranzystorami ich układów przeskokowych włączone są pewne oporniki o tak dobranej wartości, by prądy płynące przez nie, gdy tranzystory te są odetkane, były proporcjonalne do cyfr dziesiętnych stanowiących pojemność liczbowa danego trygiera w liczniku. Sumując te prądy otrzymuje się prąd wypadkowy, proporcjonalny do ilości impulsów znajdujących się w liczniku. Otrzymany w ten sposób analogowy sygnał regulacyjny wpływa na wartość nastawianą - prąd wzbudzenia generatora.

W układach regulacji prędkości obrotowej z automatyką cyfrową przy mocach silnika do 100 kW stosowane są, ze względu na swoje bardzo dobre własności dynamiczne, tranzystorowe wzmacniacze mocy, pracujące impulsowo.

Jakie są wady cyfrowych układów regulacji prędkości obrotowej? Należy tu wymienić przede wszystkim ograniczoną i niezbyt wysoką (zależną zresztą od programu przekształcenia funkcjonalnego) szybkość działania regulatora cyfrowego. Gdy zmiany zachodzące w układzie regulacji są bardzo szybkie, częstotliwość pomiarów musi być duża, przerwa między pomiarami staje się krótka i regulator cyfrowy może nie zdążyć z przeprowadzeniem wszystkich koniecznych operacji. Z tego powodu w istniejących w tej chwili przemysłowych układach napędowych z automatyką cyfrową (napędy walcownicze i papiernicze Siemens, precyzyjne napędy do układów pomiarowych f-y AEG) stosuje się równolegle z cyfrowym układem automatyki układ analogowy. Ten ostatni jako szybszy służy do usuwania wpływu zaburzeń szybkich, natomiast układ cyfrowy jako bardziej dokładny koryguje pracę układu analogowego przy małych i powolnych zaburzeniach.

#### LITERATURA

1. Anke - Kessler - Müller - Digitale Drehzahlregelung Siemens Zeitschrift, 10/1960.
2. A.A.Feldbaum - Wycisłitelnyje ustrojstwa w awtomatycznych sistemach, Fizmatgiz, Moskwa, 1959 r.
3. Fritzsche W. - Genaue und schnelle Regelungen von Drehzahlen durch digitale Methoden, AEG - Mitteilungen, 8/9, 1960 r.
4. J.Truxal - Control Engineers Handbook, McGraw-Hill, N.York, 1958 r.

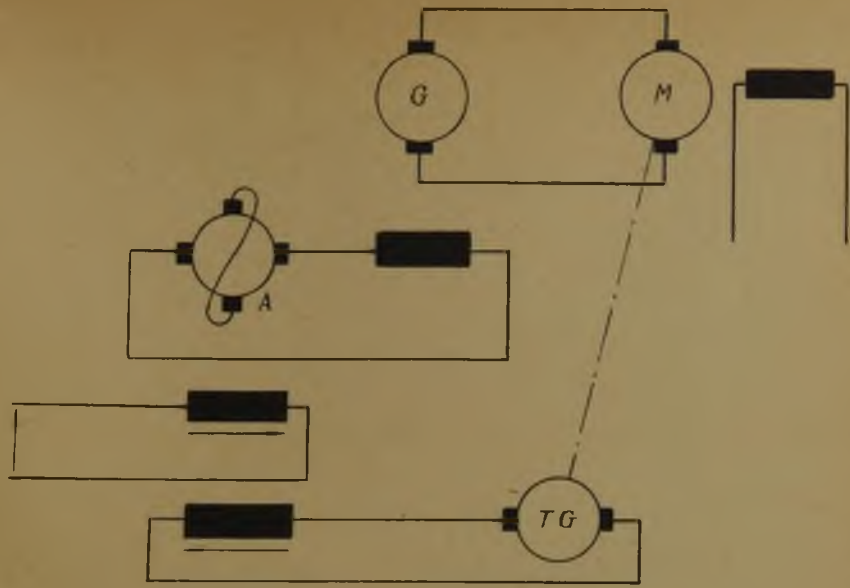
Дискретные цифровые системы автоматической регулировки  
скорости машин постоянного тока

В статье представлены недостатки систем непрерывного действия в применении к автоматическому регулированию скорости и рассмотрена точность схем дискретного действия с транзисторным счетчиком импульсов.

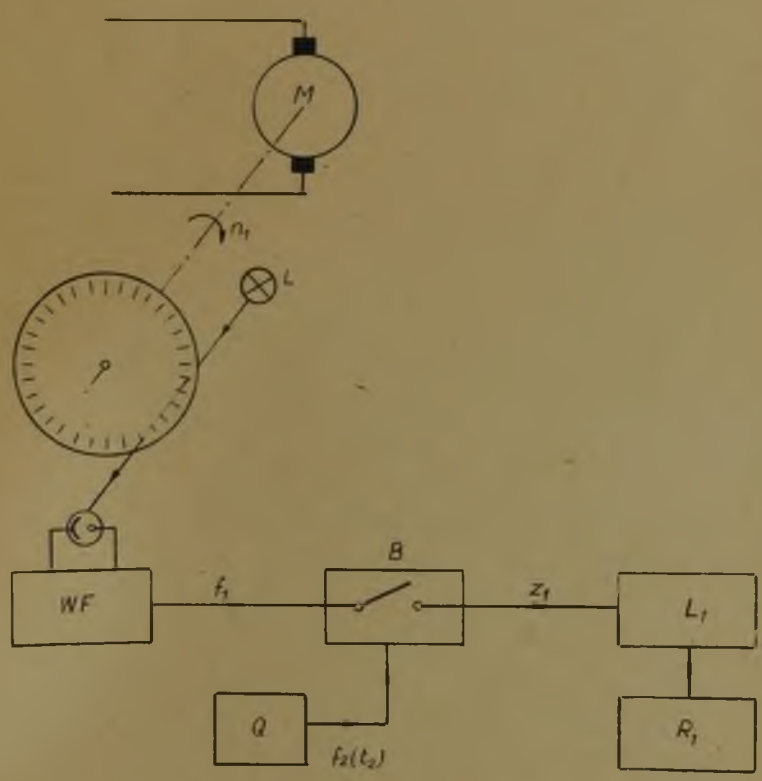
Les systèmes digitales pour la regulation automatique de la vitesse  
des moteurs á courant continu

L'auteur montre les défauts des systèmes analogiques et la précision aussi que le domaine d'applications des systèmes digitales avec les compteurs des impulsions aux transistors.

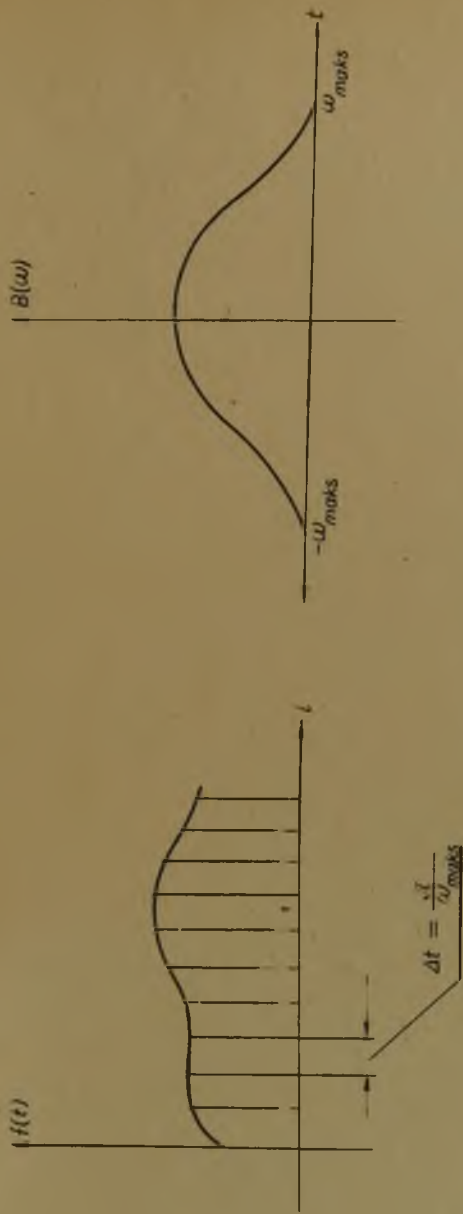




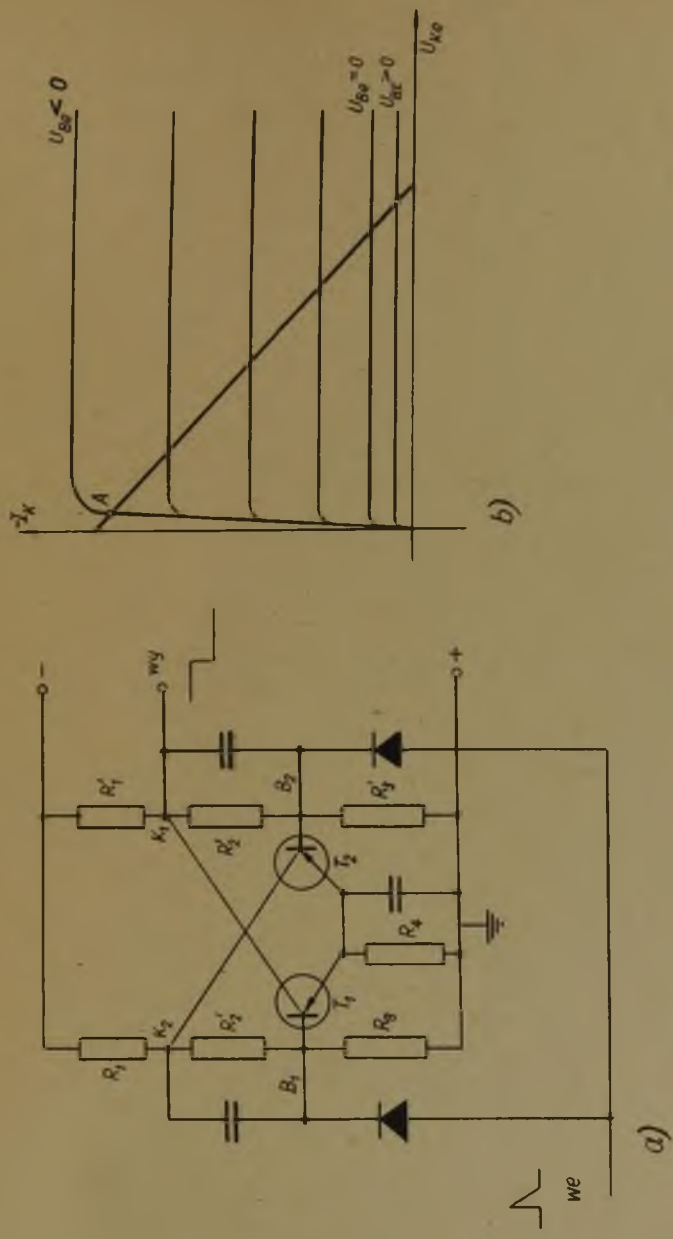
Rys.1. Typowy analogowy układ regulacji prędkości obrotowej



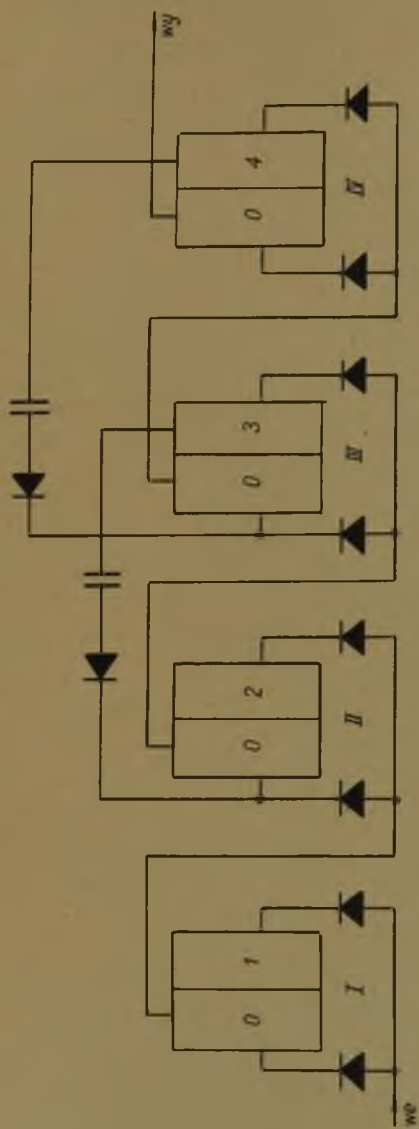
Rys.2. Zasada pomiaru prędkości obrotowej metodą cyfrową



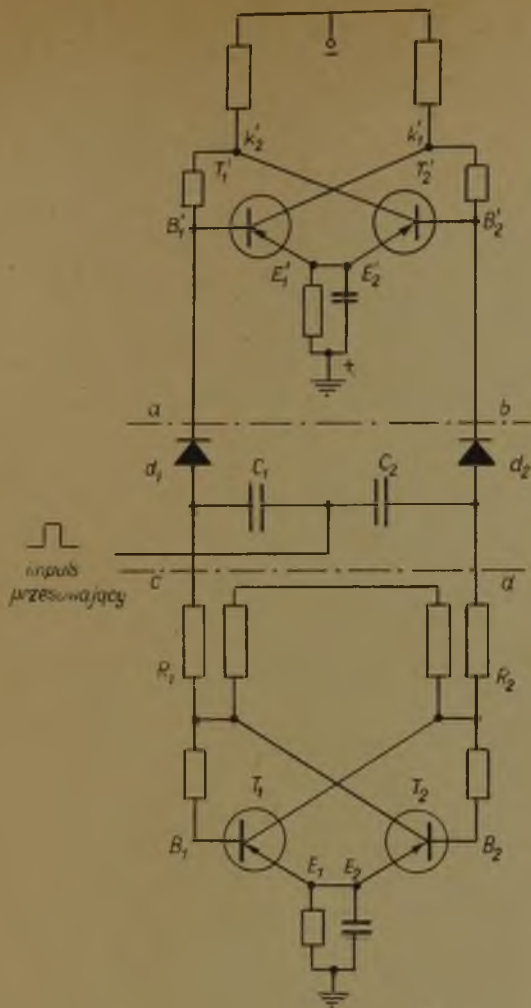
Rys.3. Ciągła funkcja czasu  $f(t)$  o ograniczonym widmie częstotliwości  $B(\omega)$



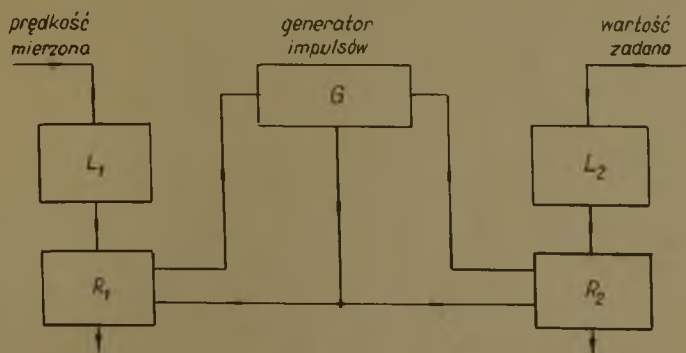
Rys.4. a - Schemat układu przeskowego, b - Charakterystyka statyczna tranzystora



Rys. 5. Schemat dekady licznika zbudowanego z układów przeskokowych



Rys.6. Sposób połączenia układu przeskokowego licznika z układem przeskokowym rejestru



Rys.7. Schemat układu porównywania wielkości rzeczywistej z wielkością zadaną