

ANNA SKRZYWAN-KOSEK

Katedra Teorii Regulacji

REGULATOR IMPULSOWY Z MODULACJĄ CZĘSTOTLIWOŚCI IMPULSOWANIA

Streszczenie. Praca niniejsza dotyczy zasady działania regulatora impulsowego z modulacją częstotliwości impulsowania, przy czym układ pracuje bez taktu zewnętrznego. W artykule podano matematyczny opis pracy regulatora oraz jego charakterystyki statyczne, zarówno teoretyczną, jak i uzyskane na drodze eksperymentalnej.

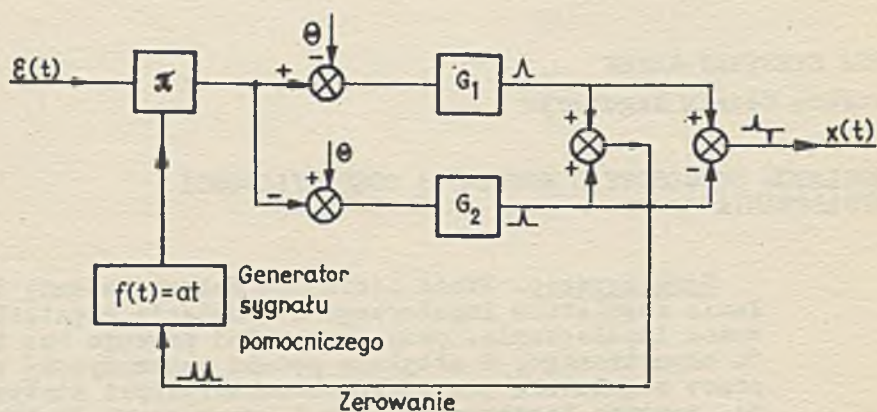
1. Wstęp

Zagadnienia układów regulacji impulsowej omawiane są szeroko w szeregu publikacji i opracowań monograficznych. W literaturze wprowadzona jest klasyfikacja elementów impulsowych według tego, który parametr impulsu (jego wysokość, szerokość czy faza) zmienia się w zależności od sygnału pobudzającego. Jest przy tym narzucony z góry takt zewnętrzny, tj. okres czasu, w którym może nastąpić wysłanie impulsu.

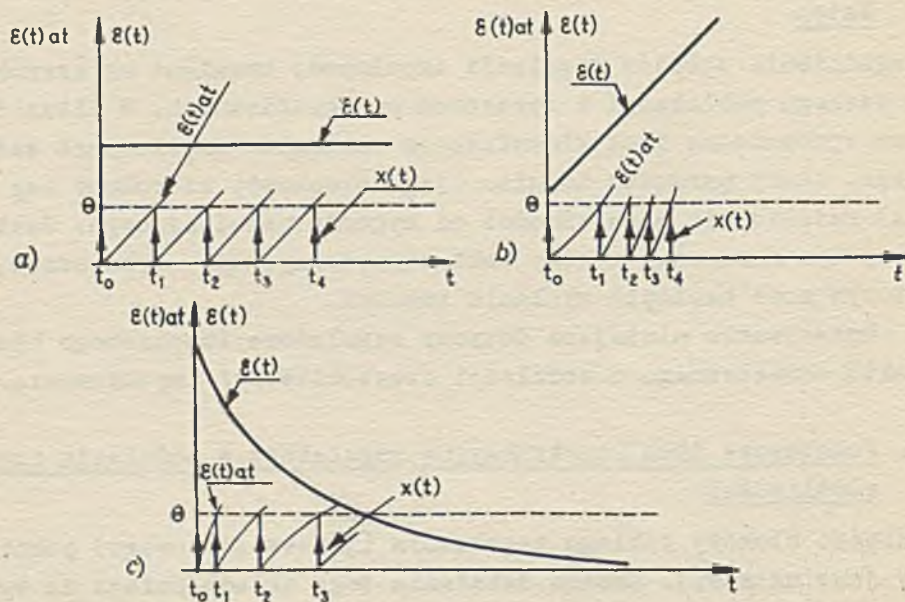
Opracowanie niniejsze dotyczy regulatora impulsowego bez taktu zewnętrznego o modulacji częstotliwości impulsowania.

2. Podstawowa idea konstrukcyjna regulatora z modulacją częstotliwości

Schemat blokowy takiego regulatora (jednowejściowego) pokazany jest na rys.1. Zasada działania tego układu polega na tym, że sygnał wejściowy $\xi(t)$ jest w węźle oznaczonym symbolem \mathcal{A} mnożony przez sygnał pomocniczy o przebiegu a.t. Gdy iloczyn $a(t)\xi(t)$ przekroczy pewną wartość, która dalej będzie nazywana wartością progową i została oznaczona przez θ , zostaje pobudzony generator G_1 gdy $\xi > 0$, a generator G_2 gdy $\xi < 0$.



Rys. 1. Schemat blokowy impulsatora

Rys. 2. Przebiegi sygnału $x(t)$ dla różnych funkcji wejściowych $\varepsilon(t)$

Wysłany z generatora G_1 lub G_2 impuls stanowi sygnał wyjściowy układu, a jednocześnie przez zaznaczone sprzężenie zwrotne zeruje generator funkcji $f(t) = at$. Tak więc po wysłaniu jednego impulsu sygnał na wyjściu elementu mnożącego spada do zera, po czym znów zaczyna narastać według funkcji $\xi(t)at$ tak długo dopóki nie osiągnie wartości $\pm\theta$, co spowoduje wysłanie następnego impulsu, po czym proces się powtarza.

Odpowiedź takiego regulatora na typowe sygnały wejściowe pokazane są na rysunku 2a,b,c.

3. Matematyczny opis pracy regulatora

Matematyczny opis pracy poprzednio naszkicowanego regulatora w jakiejś przejrzystej formie analitycznej jest bardzo trudny. Jesliby założyć, że sygnał wejściowy $\xi(t)$ jest funkcją ograniczoną dla $t < \infty$, to przebieg sygnału wejściowego $x(t)$ można by w przybliżeniu zapisać wzorem:

$$x(t) = A \sum_{n=0}^{\infty} \delta(t-t_n) \text{sign } \xi(t_n), \quad (1)$$

gdzie:

- A - współczynnik proporcjonalności wprowadzony celem uporządkowania wymiarów,
- δ - funkcja Diraca,
- t_n - moment wysłania kolejnego impulsu liczony z wzoru rekurencyjnego:

$$a \left| \xi(t_{n+1}) \right| (t_{n+1} - t_n) - \theta = 0. \quad (2)$$

Ze wzoru (2) można wyznaczyć momenty t_n dla $n = 1, 2, \dots, \infty$. Za moment wystąpienia pierwszego impulsu można przyjąć $t_0 = 0$, tj. moment pojawienia się sygnału $\xi(t)$, nawet jeżeli narasta on od zera. Jeżeli bowiem w układzie pokazanym na rysunku 1 nie było pobudzenia, to funkcja $f(t) = at$ teoretycznie osiągnęła wartość nieskończenie wielką. Pojawienie się sygnału wej-

ściowego nawet bardzo małego spowoduje zrównanie się iloczynu $\varepsilon(t) f(t)$ z wartością progową Θ .

Jeżeli oznaczymy częstotliwość chwilową w przedziale $(t_{n+1} - t_n)$ jako

$$f_{n+1/n} = \frac{1}{t_{n+1} - t_n} \quad (3)$$

to korzystając z równania (2) otrzymamy

$$f_{n+1/n} = k_f \varepsilon(t_{n+1}), \quad (4)$$

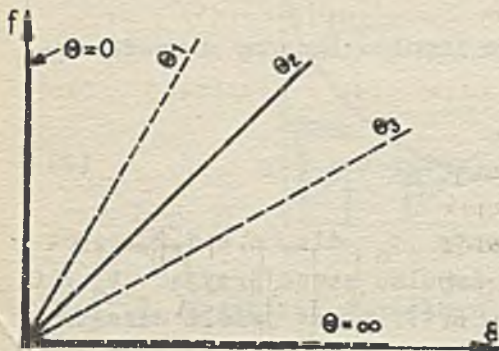
gdzie:

$k_f = \frac{a}{\Theta}$ - współczynnik wzmocnienia częstotliwości.

Częstotliwość określona wzorem (3) jest więc wprost proporcjonalna do wartości sygnału pobudzającego w chwili t_{n+1} .

Współczynnik k_f jest tym większy im większy jest współczynnik "a" (określający szybkość narastania sygnału pomocniczego a.t) oraz im mniejsza jest wartość progowa Θ .

Podając na wejściu układu sygnał $\varepsilon(t) = \varepsilon = \text{const}$ otrzymamy na wyjściu ciąg impulsów o stałej, proporcjonalnej do ε częstotliwości.



Rys. 3. Charakterystyka sta-
tyczna impulsatora

Na rysunku 3 pokazano charakterystykę $f = f(\varepsilon)$ przy założeniu stałej wartości współczynnika "a" oraz dla różnych wartości progowych Θ , przy czym przyjęto $\Theta_1 < \Theta_2 < \Theta_3$.

Znalezienie kolejnych momentów impulsowania t_n z równania (2) nie nastręcza trudności w przypadku prostych funkcji $\varepsilon(t)$, takich jak $\varepsilon(t) = \varepsilon = \text{const}$, czy $\varepsilon(t) = \frac{E}{T} \cdot t$. W przypadku

funkcji bardziej skomplikowanych jak np. $\varepsilon(t) = E \cdot e^{-\frac{t}{T}}$ analityczne rozwiązanie równania (2) napotyka na duże trudności. Momenty impulsowania można wówczas znajdować stosując metodę analityczno-graficzną polegającą na kolejnym znajdowaniu krzywych o równaniu

$$\Phi_n(t) = a |\varepsilon(t)| (t-t_n) \uparrow (t-t_n) \quad (6)$$

i graficznym wyznaczeniu punktu w którym spełnione jest równanie (2). Metodę tę ilustruje rysunek 2.

Na przykładzie pokazanym na rys. 2c można zauważyć, że jeżeli funkcja $\varepsilon(t)$ dąży do zera, to impulsator po pewnym czasie przestanie wysyłać impulsy. Jeżeli bowiem istnieje granica

$$\lim_{t \rightarrow \infty} a |\varepsilon(t)| (t-t_n) \uparrow (t-t_n) = \vartheta \quad (7)$$

to dla dowolnego $\Theta > \vartheta$ można dobrać taką wartość T , że dla $t > T$ spełniony jest warunek

$$a |\varepsilon(t)| (t-T) \uparrow (t-T) < \Theta \quad (8)$$

to znaczy, że dla $t > T$ impulsator przestaje reagować na sygnał wejściowy.

Omówione poprzednio wzory (1) i (2) są oczywiście pewnym przybliżeniem i idealizacją przebiegów rzeczywistych. Dotyczy to przede wszystkim:

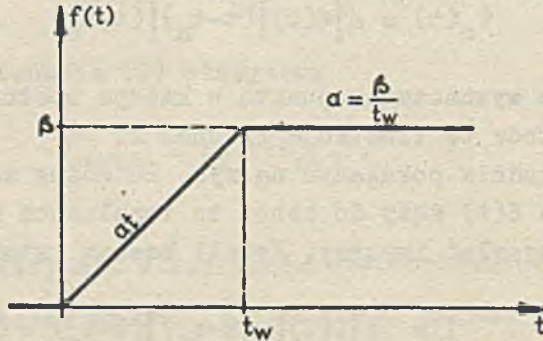
- formy impulsów, które są traktowane jako impulsy Diraca,
- braku ograniczenia w generatorze sygnału pomocniczego $f(t)$, (rys. 1), o którym założyliśmy, że jego sygnał wyjściowy może narastać do nieskończoności.

Jeżeliby uwzględnić nasycenie w generatorze $f(t)$, to należałoby założyć, że funkcja ta ma przebieg pokazany na rysunku 4. Funkcję tę można zapisać jako:

$$f(t) = \beta \text{sat}\left(\frac{t}{t_w}\right) = \begin{cases} 0 & \text{dla } t < 0 \\ at & \text{dla } 0 \leq t < t_w \\ \beta & \text{dla } t \geq t_w \end{cases}$$

Wzór (2) należałoby wówczas zmodyfikować przedstawiając go w postaci:

$$|\varepsilon(t_{n+1})| \text{ sat} \left(\frac{t_{n+1} - t_n}{t_w} \right) - \theta = 0. \quad (9)$$



Rys. 4. Przebieg sygnału pomocniczego $f(t)$

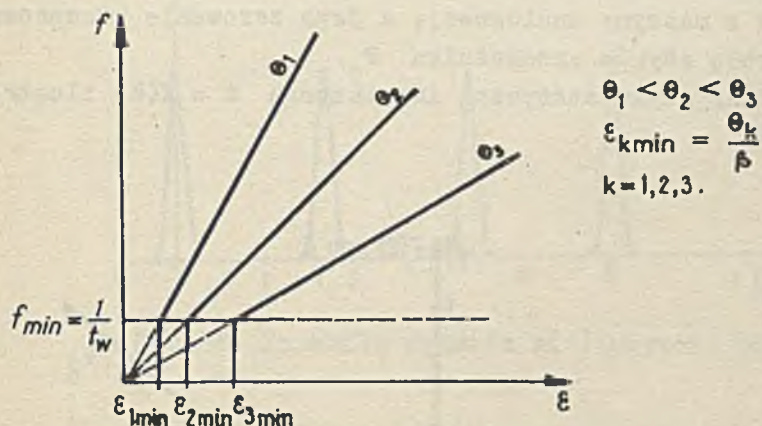
Jeżeli na wejściu impulsatora pojawi się sygnał $\varepsilon(t)$ rosnący, o wartości początkowej mniejszej od $\varepsilon_{\min} = \frac{\theta}{\beta}$ to pierwszy impuls wystąpi po czasie t_0 , po którym $\varepsilon(t)$ wzrośnie do wartości

$$\varepsilon(t_0) = \varepsilon_{\min} = \frac{\theta}{\beta}. \quad (10)$$

Dopóki $\varepsilon(t)$ utrzymywac się będzie powyżej wartości ε_{\min} , impulsator będzie wysyłał impulsy zerując równocześnie generator funkcji $f(t)$ zawsze przed osiągnięciem nasycenia. Momenty impulsowania można więc i w tym przypadku znajdować posługując się równaniem (2). Należy jednak pamiętać, że wysyłanie impulsów skończy się, gdy $\varepsilon(t)$ spadnie poniżej ε_{\min} i będzie utrzymywac się w granicach $\pm \varepsilon_{\min}$. Jeżeli więc będzie $-\varepsilon_{\min} < \varepsilon(t) < \varepsilon_{\min}$ dla wszystkich czasów, w zakresie $0 < t < \infty$, to impulsator wogóle nie będzie wysyłał impulsów. Regulator taki będzie się charakteryzował pewną strefą nieczułości.

$$\pm \varepsilon_{\min} = \frac{\pm \theta}{\beta}.$$

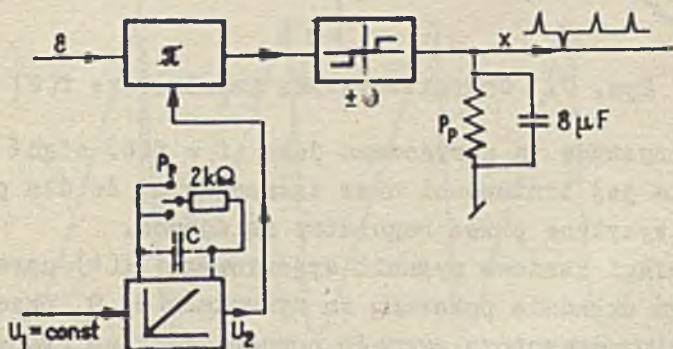
W tym przypadku przebieg charakterystyk odpowiadających przedstawionym poprzednio na rysunku 3 będzie taki, jak to pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Charakterystyka statyczna impulsatora ze strefą nieczułości

4. Model impulsatora z modulacją częstotliwości

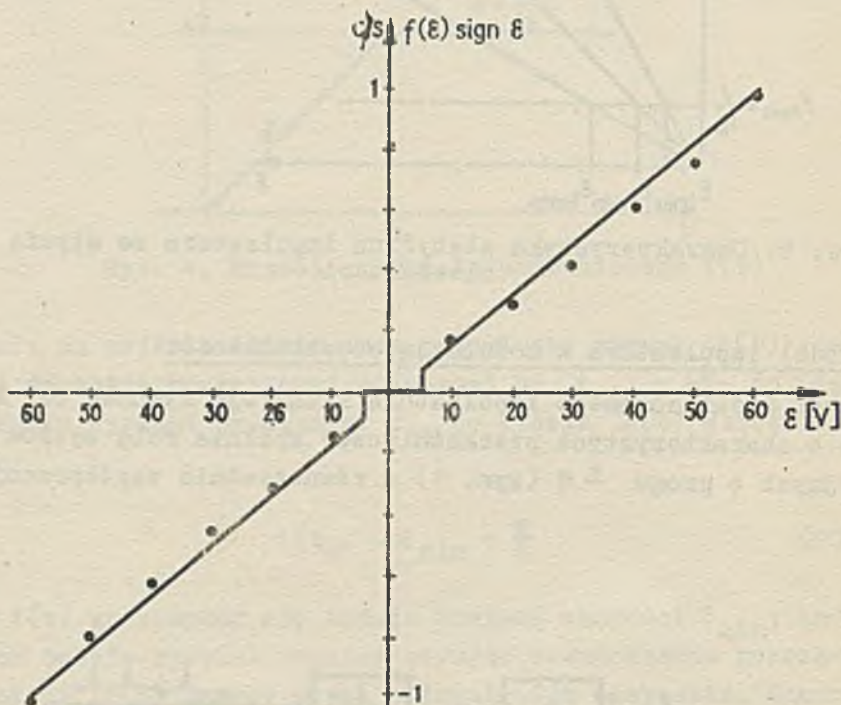
Schemat zrealizowanego impulsatora ilustruje rysunek 6. Element o charakterystyce przekaźnikowej spełnia rolę węzłów sumacyjnych o progu $\pm \theta$ (rys. 1) a równocześnie współpracując



Rys. 6. Schemat ideowy zrealizowanego układu impulsatora

z przekaźnikiem spolaryzowanym P_p jest źródłem impulsów dodatnich lub ujemnych w zależności od znaku sygnału ε . Jako źródło sygnału pomocniczego $f(t) = at$ wykorzystano element całkujący z maszyny analogowej, a jego zerowanie przeprowadzono za pomocą styków przekaźnika P_p .

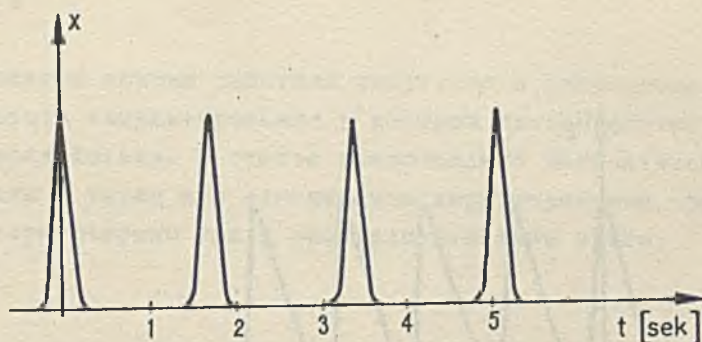
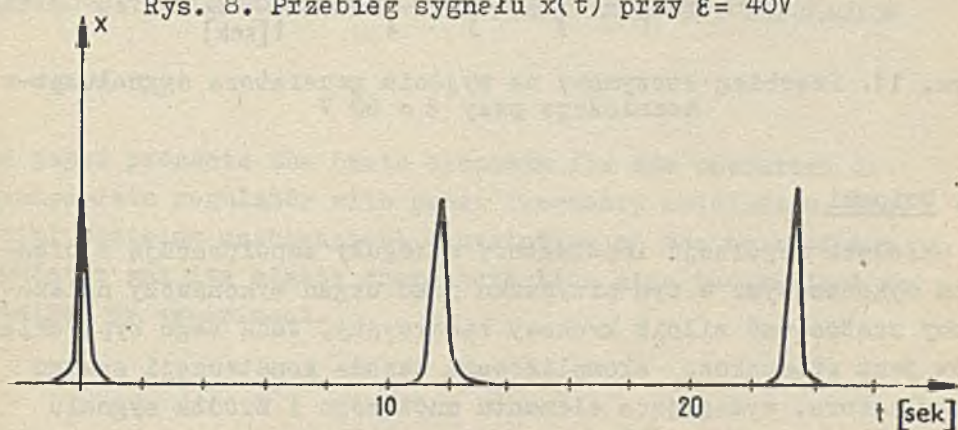
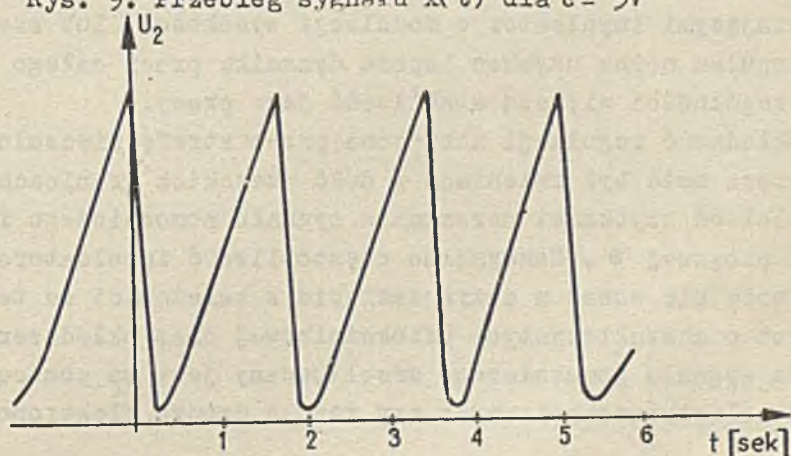
Charakterystykę statyczną impulsatora $f = f(\varepsilon) \text{ sign } \varepsilon$ ilustruje rysunek 7.

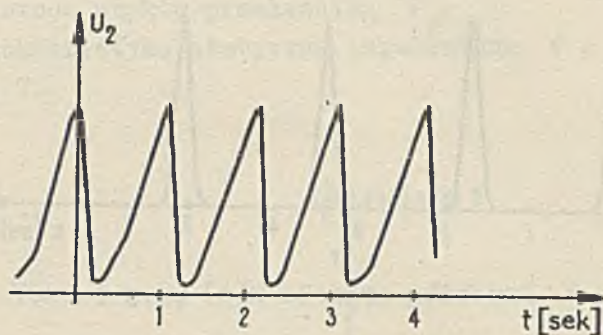


Rys. 7. Charakterystyka impulsatora $f(\varepsilon) \text{ sign } \varepsilon$

Charakterystykę tę narysowano jako $f = f(\varepsilon) \text{ sign } \varepsilon$ celem podkreślenia jej liniowości oraz zaznaczenia, że dla pobudzeń $\varepsilon < 0$ impulsy wysyłane przez regulator są ujemne.

Przebiegi czasowe sygnału wyjściowego $x(t)$ uzyskanego w omawianym układzie pokazano na rysunkach 8, 9, przebiegi zaś na wyjściu generatora sygnału pomocniczego na rysunkach 10 i 11

Rys. 8. Przebieg sygnału $x(t)$ przy $\varepsilon = 40V$ Rys. 9. Przebieg sygnału $x(t)$ dla $\varepsilon = 5V$ Rys. 10. Przebieg otrzymany na wyjściu generatora sygnału pomocniczego przy $\varepsilon = 40 V$



Rys. 11. Przebieg otrzymany na wyjściu generatora sygnału pomocniczego przy $\xi = 60$ V

5. Wnioski

W układach regulacji impulsatory z reguły współpracują z organem wykonawczym. W tym przypadku jako organ wykonawczy należałoby zastosować silnik krokowy rewersyjny. Wadą tego typu układów jest stosunkowo skomplikowana zasada konstrukcji samego impulsatora, wymagająca elementu mnożącego i źródła sygnału pomocniczego. Wydaje się jednak, że w porównaniu z układami zawierającymi impulsator o modulacji wysokości lub szerokości impulsu można uzyskać lepszą dynamikę pracy całego układu, w szczególności większą stabilność jego pracy.

Dokładność regulacji narzucona przez strefę nieczułości impulsatora może być zmieniana w dość szerokich granicach, w zależności od szybkości narastania sygnału pomocniczego i od wartości progowej Θ . Maksymalna częstotliwość impulsatora również może się wahać w dużym zakresie w zależności od tego czy element o charakterystyce przekaźnikowej oraz układ zerowania źródła sygnału pomocniczego zrealizowany jest za pomocą elementów elektromechanicznych czy też na drodze elektronicznej.

Rękopis złożono w Redakcji w dniu 17.I.1968 r.

ИМПУЛЬСНЫЙ РЕГУЛЯТОР С МОДУЛЯЦИЕЙ ЧАСТОТЫ ИМПУЛЬСИРОВАНИЯ

Р е з ю м е

Статья касается основы действия импульсного регулятора с модуляцией частоты импульсирования в котором схема работает без внешнего воздействия. В статье представлено математическое описание работы а также его статические характеристики, полученные как теоретическим так и экспериментальным путём.

SAMPLED-DATA CONTROL SYSTEM WITH PULSE-FREQUENCY MODULATION

S u m m a r y

The paper presents the basic elements for the operation of sampled-data regulator with pulse frequency modulation. The article contains mathematical description of the work of the regulator and its static characteristics also theoretical as obtained by experiment.