

**POLSKA
RZECZPOSPOLITA
LUDOWA**



**URZĄD
PATENTOWY
PRL**

OPIS PATENTOWY

67131

Patent dodatkowy
do patentu _____

Zgłoszono: 02.VI.1970 (P 141 042)

Pierwszeństwo: _____

Opublikowano: 31.12.1972

Kl. 42m⁴,7/26

MKP G06g 7/26

CZYTELNIA

UKD
Urzędu Patentowego
Polskiej Rzeczypospolitej

Twórca wynalazku: Jerzy Mędrzycki

Właściciel patentu: Politechnika Warszawska, Warszawa (Polska)

Urządzenie do modelowania funkcji nieliniowych

1

Przedmiotem wynalazku jest urządzenie do modelowania funkcji nieliniowych oraz analizator analogowy równań nieliniowych algebraicznych i różniczkowych zbudowany z takich urządzeń, a także regulatory układów automatycznej regulacji zawierające wspomniane urządzenie.

Istnieje wiele urządzeń do modelowania funkcji nieliniowych, z których najbardziej zbliżone do urządzenia według wynalazku stosują nieliniową modulację szerokości impulsu oraz nieliniową modulację jego amplitudy. Szerokość impulsu jest modulowana pewnym napięciem zmiennym o zadanym kształcie. Następnie impuls o zmodulowanej szerokości jest dalej modulowany amplitudowo przez inne napięcie o również zadanym kształcie. Otrzymane w ten sposób impulsy są następnie poddawane filtracji, dzięki której uzyskuje się wartość średnią sygnału proporcjonalną do iloczynu obu napięć modulujących.

Niezależnie od stosunkowej złożoności urządzenia wada jego polega na stosunkowo małej szybkości działania wynikającej z konieczności filtrowania sygnałów o małym wypełnieniu. Ta okoliczność wymaga układów filtrujących o dużej inercji i dużym współczynniku tłumienia. Jego wielkość przyczynia się do wzrostu uchybów spowodowanych zwiększeniem się poziomu pełzania zera układów modelujących w stosunku do sygnału.

Inną jeszcze bardziej istotną wadą urządzeń stosujących podwójną modulację jest zakres jej zastosowań ograniczony tylko do pewnych określo-

2

nych funkcji. Wszystkie te podane przyczyny spowodowały, że urządzenia stosujące podwójną modulację impulsu nie znalazły szerszego zastosowania. Najczęściej obecnie stosowany sposób modelowania funkcji nieliniowych polega na aproksymacji danej funkcji nieliniowej funkcją odcinkami liniową. Urządzenie do stosowania tego sposobu składa się z układów złożonych z diod i oporników lub potencjometrów, modelujących odcinki funkcji liniowych. Początki tych odcinków są określone przez napięcie polaryzujące diody.

W skład urządzenia wchodzi układ sumujący prądy pochodzące z poszczególnych układów diodowych. Wadą tego sposobu jest stosunkowo mała dokładność oraz pracochłonność modelowania funkcji. Dalej należy wymienić niemożność miniaturyzacji przetwornika wynikającą z istnienia dużej liczby przełączników i potencjometrów, jak również stosunkowo wysoki koszt.

Stosowane obecnie analizatory analogowe równań nieliniowych algebraicznych i różniczkowych zawierają liniowe wzmacniacze operacyjne z różnymi sprzężeniami zwrotnymi, układy mnożące przy pomocy których dokonywać również można dzielenia i pierwiastkowania, a także zawierają przetworniki nieliniowe, najczęściej diody aproksymujące zadane funkcje nieliniowe odcinkami funkcji liniowych. Przetworniki nieliniowe bywają albo uniwersalne to znaczy pozwalające na modelowanie dowolnej funkcji, albo wyspecjalizowane realizujące tylko ściśle określone funkcje.

Duża różnorodność stosowanych członów powoduje, że analizator analogowy funkcji nieliniowych jest bardzo złożony konstrukcyjnie i skomplikowany w obsłudze. Analizatory tego typu posiadają na ogół wiele członów wymiennych, które bywają używane stosunkowo rzadko, a jednocześnie analizatory te nie są często w stanie rozwiązywać wielu zadań ze względu na brak niektórych przetworników mimo, że wiele innych pozostaje niewykorzystanych. Oczywiście pozostają w mocy niedogodności podane poprzednio przy omawianiu samych urządzeń do modelowania funkcji nieliniowych.

W stosowanych powszechnie regulatorach układów automatycznej regulacji zmiana parametrów samego układu regulatora uzyskiwana jest przy pomocy przetworników mnożących i dzielących, co powoduje, że układy regulatorów o zmiennych parametrach mają bardzo złożoną strukturę, a także wykazują inne niedogodności wyliczone poprzednio przy omawianiu samych przetworników funkcji nieliniowych. Szczególnie skomplikowane okazują się klasyczne układy służące do regulacji stałych czasowych regulatorów.

Celem wynalazku jest opracowanie urządzenia zwiększającego dokładność modelowania funkcji nieliniowych oraz uniwersalnych układów modelujących, a także umożliwiającego typizację układów modelujących, a przez to zwiększenie ich wykorzystania.

Cel wynalazku został zrealizowany w urządzeniu do modelowania funkcji nieliniowych $f(x)$ składającym się z podstawowego układu całkującego, klucza dwuwejściowego, komparatora sygnałów analogowych, oraz generatora funkcji czasu zawierającego układy całkujące, a także taktującego generatora impulsów prostokątnych. Wejście podstawowego układu całkującego, na którego wyjściu otrzymywany jest sygnał modelowanej funkcji nieliniowej $f(x)$ połączone jest z wyjściem klucza dwuwejściowego. Wejście sygnałowe tego klucza połączone jest z wyjściem generatora funkcji czasu dostarczającym sygnału pochodnej $\rho'(v)$ względem czasu autonomicznego v funkcji zewnętrznej $\rho(v)$ dla złożonej funkcji nieliniowej $\rho[h(x)]$ będącej modelem funkcji nieliniowej $f(x)$.

Wejście sterujące klucza połączone jest z wyjściem komparatora sygnałów. Jedno z wejść tego komparatora połączone jest z wyjściem generatora funkcji czasu dostarczającym sygnału funkcji $g(v)$ będącej funkcją odwrotną dla funkcji wewnętrznej $h(x)$. Drugie wejście komparatora połączone jest ze źródłem sygnału zmiennej niezależnej x . Wejścia sterujące wprowadzaniem warunków początkowych do generatora funkcji czasu oraz podstawowego układu całkującego połączone są z wyjściami generatora impulsów prostokątnych. Podany układ połączeń pozwala funkcję nieliniową $f(x)$ w drodze wyboru przedstawić w postaci funkcji złożonej $[h(x)]$, w której zmienną pośredniczącą jest czas autonomiczny $v = h(x)$.

Funkcję zewnętrzną $\rho(v)$ otrzymuje się przez całkowanie po czasie autonomicznym v jej pochodnej $\rho'(v)$, zaś czas całkowania równy funkcji wewnętrznej $h(x)$ uzyskuje się jako funkcję odwrotną funkcji $g(v)$ czasu autonomicznego v przez po-

równanie zmiennej niezależnej x z funkcją $g(v)$ według zależności $v = g^{-1}(x) = h(x)$. Obie funkcje $\rho'(v)$ i $g(v)$ będące modelami czasowymi funkcji $f(x)$ otrzymuje się jako cykliczne rozwiązania odpowiednich równań różniczkowych. W odmianie urządzenia według wynalazku niektóre z wejść generatora funkcji czasu są połączone z wyjściem podstawowego układu całkującego, przy czym wejście sygnałowe klucza dwuwejściowego lub/i jedno z wejść komparatora współpracujących z tym właśnie podstawowym układem całkującym są również połączone z odpowiednimi wyjściami wspomnianego generatora funkcji czasu, przez co połączenia te tworzą pętlę sprzężenia zwrotnego.

W pewnym rozwiązaniu urządzenie według wynalazku jako podstawowy układ całkujący zawiera wzmacniacz operacyjny, na którego wejściu znajduje się klucz dwuwejściowy, na przykład elektroniczny, otwierany i zamykany sygnałem podawanym z połączonego z nim komparatora będącego układem modulacji szerokości impulsów. Na wejście klucza podaje się funkcję $\rho'(v)$ otrzymywaną w modelu czasowym funkcji. Funkcja ta jest całkowana w układzie całkującym tak długo, jak długo istnieje sygnał z komparatora będącego modulatorem szerokości impulsów, po czym następuje zapamiętanie końcowej wartości całki. Na wejście komparatora podaje się funkcję $g(v)$ oraz zmienną x w ten sposób aby na jego wyjściu otrzymać sygnał o szerokości $v = g^{-1}(x)$. Funkcje $g(v)$ i $\rho'(v)$ są generowane cyklicznie.

Wynalazek pozwala na zbudowanie analizatora równań lub maszyny analogowej, którego część operacyjna zawiera wzmacniacze operacyjne i klucze. Analizator taki umożliwia rozwiązywanie równań liniowych przez wykorzystanie wzmacniaczy operacyjnych tak jak w zwykłych analizatorach równań, oraz pozwala na rozwiązywanie równań nieliniowych przez zastosowanie układu modelowania funkcji nieliniowych zrealizowanego w urządzeniu będącym przedmiotem wynalazku. W tym drugim przypadku wzmacniacze operacyjne są podzielone na odpowiednie grupy: część z nich jest przeznaczona dla rozwiązywania operacji liniowych zadania nieliniowego, część zaś połączona w układy rozwiązujące równania różniczkowe generujące funkcje czasu $\rho'(v)$ i $g(v)$. Jako modele te są wykorzystywane zarówno rozwiązania tych równań jak i ich pochodne przy czym każde z nich może być wykorzystane wielokrotnie. Ponadto każda funkcja może być wykorzystana zarówno jako model $\rho'(v)$ oraz jako $g(v)$ pod warunkiem, że funkcja czasu w przypadku wykorzystania jej jako $g(v)$ jest monotoniczna.

Pozostałe wzmacniacze liniowe są wykorzystywane jako wyjściowe układy całkujące urządzeń modelujących oraz jako wzmacniacze komparatora-modulatora szerokości impulsów, którym w najprostszym przypadku jest wzmacniacz z otwartą pętlą lub z dużym wzmocnieniem. W układzie rozwiązującym zadanie nieliniowe funkcje wyjściowe z urządzeń modelujących są wykorzystywane bezpośrednio przez podanie ich na następne urządzenie modelujące, względnie są podawane na klucz przepuszczający tylko część przebiegów, których amplituda jest stała i następnie uśrednione lub eks-

trapolowane za pomocą znanych układów, albo mogą one być podane bezpośrednio na następny układ całkujący lub inercyjny.

Maszyna lub analizator analogowy mogą być ponadto wyposażone w szereg innych elementów typowych dla maszyn analogowych i hybrydowych. Zamiast wykorzystywać do modulacji szerokości sygnałów wzmacniacze liniowe można wyposażyć maszynę w modulatory szerokości sygnałów albo w specjalne komparatory. Zamiast łączyć wzmacniacze operacyjne i klucze w urządzenie modelujące funkcję można wyposażyć maszynę w zestaw dla modelowania funkcji nieliniowych złożone z komparatorów, kluczy i wzmacniaczy całkujących.

Regulację parametrów regulatora automatycznego można uzyskiwać przez zmianę warunków początkowych lub wymuszeń układów generujących funkcje $g(v)$ oraz/lub $\rho'(v)$. W szczególności jeśli regulowane jest wzmocnienie to układ złożony z układu całkującego mającego na wejściu klucz sterowany impulsami z komparatora-modulatora szerokości impulsów należy włączyć na wejście lub wyjście regulatora. Funkcja $g(v)$ jest w tym przypadku liniowa a $\rho'(v)$ nie zależy od czasu autonomicznego. Jeśli wyjście układu całkującego połączyć z wejściem układu modulującego szerokość impulsu pętla sprzężenia zwrotnego to uzyskuje się układ inercyjny, którego stałą czasową można regulować przez zmianę $\rho'(v)$ albo $g(v)$.

Zastosowanie powyższego urządzenia do modelowania pozwala na uzyskiwanie dokładności co najmniej o rząd wielkości lepszej od uzyskiwanej innymi metodami. Urządzenie według wynalazku oferuje znaczne ułatwienia eksploatacyjne, ponieważ zmiana funkcji wymaga tylko zmiany odpowiednich połączeń w modelu i ewentualnie zmiany warunków początkowych, albo też wartości impedancji sprzęgających i może być wykonywana nie tylko ręcznie, ale i automatycznie, na przykład przez cyfrowe urządzenia sterujące. Wyeliminowanie potencjometrów i przełączników podwyższa niezawodność działania współpracujących układów oraz pozwala na ich miniaturyzację na przykład przez zastosowanie obwodów scalonych.

W przypadku stosowania urządzeń według wynalazku wyraźnie ułatwiona jest współpraca systemów modelujących z maszyną cyfrową. Zapamiętanie całej funkcji nieliniowej przez maszynę cyfrową wymaga tylko wpisania do pamięci warunków początkowych i sieci połączeń modelu, względnie tylko warunków początkowych jak to ma miejsce w przypadku aproksymacji za pomocą wielomianu. Ułatwiona jest konwersja analogowo-cyfrowa obliczanych wielkości. Koszt urządzeń według wynalazku jest niski, ponieważ zawierają one małą ilość drogich elementów.

Do zalet analizatora analogowego równań nieliniowych, którego część operacyjna zbudowana jest ze znanych, liniowych wzmacniaczy operacyjnych oraz urządzeń według wynalazku należą: większa dokładność otrzymywanych rozwiązań, znaczne ułatwienie eksploatacji wynikające ze zmniejszenia pracochłonności ustawienia krzywych w przetwornikach funkcji nieliniowych, standaryzacja i unifikacja elementów operacyjnych analiza-

tora, łatwość miniaturyzacji tych elementów oraz polepszenia niezawodności ich działania, mniejszy koszt, poważne zmniejszenie liczby elementów operacyjnych koniecznych dla wygenerowania każdej następnej funkcji nieliniowej.

Podkreślić tu trzeba istnienie możliwości łatwego automatycznego programowania funkcji przy pomocy maszyny cyfrowej lub wyspecjalizowanego cyfrowego urządzenia sterującego, co ma bardzo duże znaczenie dla pracy systemów hybrydowych, a co w układach konwencjonalnych nie było możliwe. Dodać trzeba łatwość konwersji analogowo-cyfrowej oraz łatwość modelowania nieliniowych funkcji wielu zmiennych. Wynika to stąd, że z każdego wyjścia generatora funkcji czasu można otrzymywać zarówno funkcje $\rho'(v)$ jak i $g(v)$ przy założeniu, że są one monotoniczne. Także jeden model czasowy może być wykorzystany dla modelowania różnych funkcji nieliniowych.

W ten sposób ze wzrostem ilości modelowanych funkcji nieliniowych liczba modeli czasowych potrzebnych dla zmodelowania tych funkcji rośnie bardzo wolno albo pozostaje stała. Jeśli na przykład dla generacji funkcji nieliniowych czasu rozwiązano by trzy równania różniczkowe liniowe posiadające oprócz rozwiązań po dwie pochodne tych rozwiązań, to liczba różnych funkcji zmiennej niezależnej x jakie można utworzyć jednocześnie wynosi $(\frac{9}{2})$ nie licząc ich sum, iloczynów itd. Ponadto te same funkcje $g^{-1}(x)$ występujące jako wewnętrzne w różnych funkcjach $f(x)$ można realizować za pomocą jednego komparatora dzięki czemu maleje liczba wymaganych modulatorów.

Jeśli funkcje stanowią sumy funkcji nieliniowych (w układach równań z jednej strony występują zawsze sumy funkcji) można je sumować przed wykonaniem całkowania wszystkie na jednym integratorze wyjściowym dzięki czemu maleje liczba układów całkujących. Stosowanie układów według niniejszego wynalazku usuwa również niedogodności zmiany parametrów regulatora. Tok postępowania przy modelowaniu funkcji nieliniowych bliżej można objaśnić na przykładach modelowania podanych dalej funkcji.

Jeśli funkcja $f(x)$ dana jest w postaci tabelarycznej albo jeśli modele czasowe $\rho'(v)$ i $g(v)$ są zbyt złożone, aproksymuje się ją za pomocą wielomianu. Model $g(v)$ może być liniowy, a $\rho(v)$ stanowi aproksymantę wielomianowej funkcji czasu, $g(v)$ może być aproksymantą, a $\rho'(v)$ jest stałą, albo oba modele mogą być aproksymantami.

Funkcje $\rho'(v)$ i $g(v)$ są otrzymywane przez wygenerowanie funkcji czasu stanowiącej aproksymantę pożądanej funkcji albo też generowane są poszczególne wyrazy wielomianu, które będą sumowane na wzmacniaczu całkującym przez włączenie równoległe odpowiedniej liczby kluczy sterowanych z komparatora-modulatora szerokości impulsów, lub mogą być sumowane na modulatorze szerokości impulsów. Wyraz stały jest podawany na wyjście układu całkującego to znaczy na wejście następnego układu lub na wejście układu całkującego poprzez klucz sterowany impulsem o stałej szerokości.

Jeśli w urządzeniu będącym przedmiotem wynalazku sygnał doprowadzany do komparatora wy-

raża zmienną z zmieniającą się dostatecznie wolno w porównaniu z częstotliwością repetycji to na wejściu układu całkującego uzyskuje się sygnał będący iloczynem $g^{-1}(x) \cdot z$. Jeśli $g(v)$ jest funkcją liniową, to wtedy $g^{-1}(x)$ jest również liniowa i funkcja wyjściowa jest iloczynem $c \cdot x \cdot z$.

Podając sygnał stały C na wejście komparatora modulującego szerokość impulsu, a sygnał x do wzmacniacza całkującego modelu czasowego jako jego wymuszenie otrzymuje się na wyjściu urządzenia modelującego funkcję czasu autonomicznego $g(v) = x \cdot v$ (przy założeniu wolnych zmian x w stosunku do częstotliwości repetycji układu), a na wejściu komparatora impulsu o szerokości $v = k \cdot \frac{c}{x}$. Na wyjściu urządzenia modelującego uzyskuje się funkcję $\rho\left(\frac{1}{x}\right)$ jeśli na klucz podany jest sygnał funkcji $\rho'(v)$, albo $a \frac{z}{x}$ jeśli na klucz podana jest zmienna z .

Przedmiot wynalazku przedstawiony jest w przykładach wykonania na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia schemat blokowy urządzenia podstawowego według wynalazku z uwidocznieniem wejść sygnału odpowiadających funkcjom $g(v)$ i $\rho'(v)$, zmiennej niezależnej x , oraz wyjścia dla funkcji $f(x)$. Fig. 2 przedstawia przebiegi czasowe sygnałów w urządzeniu przedstawionym na fig. 1, a fig. 3 i 4 — przykładowe rozwiązania urządzeń modelujących funkcje $f(x) = a x^2$ oraz $f(x) = e^{\sqrt{x}}$.

Dalej na fig. 5 podano układ generacji funkcji nieliniowej aproksymowanej wielomianem potęgowym, na fig. 6 — układ mnożenia, na fig. 7 — układ dzielenia. Fig. 8 zawiera schemat blokowy części operacyjnej analogowego analizatora równań nieliniowych. Fig. 9 i 10 przedstawiają przykłady łączenia kluczy i wzmacniaczy w analizatorze według wynalazku korzystających z tej samej funkcji nieliniowej $g(v)$, lub gdy funkcja $f(x)$ jest sumą funkcji nieliniowych, fig. 11 przedstawia przypadek regulacji wzmocnienia regulatora z wieloma wejściami sterującego jedną zmienną, fig. 12 — schemat regulatora o stałej czasowej zmienianej za pomocą urządzenia według wynalazku.

Przedstawione na fig. 1 urządzenie składa się z połączonych ze sobą szeregowo wzmacniacza operacyjnego w układzie całkującym 1, klucza dwuwejściowego 2 i komparatora 3 spełniającego rolę modulatora szerokości impulsów, wykonanego na przykład, w postaci wzmacniacza operacyjnego z otwartą pętlą, lub przerzutnika dwustabilnego. Na wejście klucza 2 jest podawany sygnał $\rho'(v)$ z generatora funkcji czasu 4, którym jest układ rozwiązujący równania różniczkowe w rytmie repetycyjnym. Na wejście komparatora 3 podawany jest sygnał z tego samego układu rozwiązującego równania różniczkowe 4 równy $g(v)$ oraz zmienna x . Generator funkcji czasu 4 oraz wyjściowy wzmacniacz całkujący 1 są sterowane z połączonego z nimi generatora impulsów prostokątnych 5 o wypełnieniu — będącym częścią połowy okresu. Impulsy te są podawane na klucze 6 zerujące wzmacniacze całkujące na początku każdego cyklu.

Impulsy o szerokości τ z generatora impulsów 5

pokazane na fig. 2a są podawane na klucze zerujące wzmacniacze całkujących. Na wejścia generatorów funkcji nieliniowych podawany jest sygnał stały lub liniowo narastający w czasie. Sygnał ten stanowi warunek początkowy lub wymuszenie układu rozwiązującego równanie różniczkowe liniowe. W przypadku realizacji elektronicznej urządzenia w momencie pojawienia się impulsów o szerokości τ kondensatory generatorów funkcji $g(v)$ i $\rho'(v)$ są rozładowywane do zera (fig. 2b, 2c). Sygnał z generatora $g(v)$ jest porównywany na komparatorze 1 z sygnałem x dzięki czemu na wyjściu komparatora pojawiają się impulsy o szerokości v (fig. 2d), które z kolei otwierają klucz 2.

Dzięki temu wzmacniacz całkujący wyjściowy całkuje sygnał $\rho'(v)$ w czasie v co pokazano na fig. 2e. W okresach kiedy sygnał wyjściowy jest stały jest on kluczkowany i filtrowany albo zapamiętywany na pozostały okres czasu lub też podawany bezpośrednio na następny układ przetwarzania nieliniowego. W tym ostatnim przypadku impulsy podawane na model czasowy następnego układu modelującego powinny być opóźnione względem impulsów poprzednich o czas odpowiadający połowie okresu.

W szczególności jako przykład można podać modelowanie funkcji $f(x) = x^2$. Urządzenie modelujące funkcję pokazano na fig. 3. Generator 4 jest układem całkującym, na którego wejście podaje się wartość stałą U a na wyjściu uzyskuje się przebieg liniowo narastający w czasie $a \cdot v$. Przebieg wyjściowy tego układu jest jednocześnie wykorzystany jako funkcja $g(v)$ i $\rho'(v)$ i jest podawany na klucz i układ modelujący.

Innym przykładem jest modelowanie funkcji

$f(x) = e^{\sqrt{x}}$. Urządzenie modelujące pokazano na fig. 4. Generator impulsów 4 składa się z dwóch połączonych szeregowo układów całkujących 4a i 4b generujących funkcję $g(v) = a v^2$, przy czym na wejście pierwszego z nich jest podane stałe napięcie, oraz z układu inercyjnego generującego funkcję $C(1 - e^{bv})$. Funkcję $\rho'(v)$ uzyskuje się z tej funkcji przez dodanie na wejście układu całkującego drugiego klucza 2b, równoległe z kluczem 2a, sterowanego z układu porównującego 3, stałej C , a na wejście klucza 2a funkcji z układu inercyjnego. W obu przypadkach na fig. 3 i 4 nie pokazano układu sterującego 5 identycznego z układem jak na fig. 1.

Aby zmodelować funkcję $f(x) = a x^2$ należy przyjąć $\rho'(v) = b v$ oraz $g(v) = c v$.

Z porównania $g(v)$ i zmiennej niezależnej x , czyli z równania $g(v_z) = x_z$ otrzymuje się

$$c v_z = x_z \quad \text{stad} \quad v_z = \frac{1}{c} x_z$$

Funkcja zewnętrzna

$$\rho(v) = k \int_0^v b v dv = \frac{1}{2} k b v^2 \Big|_0^v = \frac{1}{2} k b \frac{1}{c^2} x_z^2$$

gdzie k — stała całkowania.

Stałe k , b i c należy dobierać w ten sposób aby

$$\frac{1}{2} kb \frac{1}{c^2} = a$$

Proces ten musi być powtarzany cyklicznie jeśli x zmienia się w czasie.

W ten sposób można zmodelować funkcję $f(x)$ jeśli x nie zmienia znaku. Aby uzyskać model funkcji dla dowolnego znaku x należy przyporządkować zmiennej $x = 0$ pewną wartość czasu autonomicznego v_0 .

$$\text{wtedy } g(v) = c(v - v_0) = x$$

$$\text{stad } v = \frac{x}{c} + v_0$$

Podobnie należy przesunąć funkcję $\rho(v)$.

Funkcję $e^{\sqrt{x}}$ można zmodelować przyjmując modele $g(v) = v^2$ oraz $\rho'(v) = e^{bv}$. Z porównania $g(v)$ i x otrzymujemy

$$g(v) = x = av^2 \quad \text{stad} \quad v_z = \frac{1}{\sqrt{a}} \sqrt{x_z}$$

$$f(x) = k \int_0^{\sqrt{x}} e^{bv} dv = k \frac{1}{b} \left(e^{b \frac{1}{\sqrt{a}} \sqrt{x}} - 1 \right)$$

Współczynnik b , a należy pobrać tak aby $b \frac{1}{\sqrt{a}} = 1$

a współczynnik k i b tak aby $k \frac{1}{b} = 1$

Do wyniku należy dodać stałą $k \frac{1}{b}$

$$\text{wtedy } f(x) = e^{\sqrt{x}}$$

Aproksymację funkcji za pomocą szeregu potęgowego podano na fig. 5 $f(x) = A_0 + A_1x + A_2x^2 + A_3x^3 + A_4x^4$. Przyjęto model czasowy $g(v) = v$ oraz model $\rho'(v) = a_1v + a_2v^2 + a_3v^3$.

Generator funkcji czasu **4** składa się z trzech wzmacniaczy całkujących **4a**, **4b** i **4c** połączonych szeregowo. Na wejście pierwszego z nich **4a**, podano sygnał stały c . Sygnał wyjściowy układu całkującego **4a** równy $c \cdot k \cdot v$ podawany jest z odpowiednim współczynnikiem na wejście modulatora szerokości impulsu — komparatora **3** i stanowi sygnał $g(v)$. Z innym współczynnikiem podawany jest on na wejście klucza **2b**, dając na wyjściu układu całkującego **2**, składową A_2x^2 wielomianu. Sygnał z wyjścia układu całkującego **4b** podany jest na klucz **2c** dając na wyjściu układu całkującego **1** składową A_3x^3 i sygnał z układu całkującego **4c** podany jest na klucz **2d** dając na wyjściu składową A_4x^4 . Składową A_1x uzyskuje się podając na wejście klucza **2a** napięcie stałe, u_1 , a składową A_0 podając sygnał stały u_0 na wejście członu **7** innego urządzenia współpracującego z układem modelującym funkcję.

Zamiast kluczy **2b**, **2c** i **2d** można w układzie włączyć jeden tylko klucz i na jego wejście podać sygnał z układu całkującego **4c**. Na wejście wzmac-

niaczy **4b** i **4c** należy wtedy podać odpowiednie wymuszenie. Sposób z trzema kluczami jest wygodniejszy w przypadku jeśli realizuje się kilka funkcji, ponieważ ten sam generator funkcji czasu można wykorzystać dla realizacji innych funkcji. Na fig. 5 nie pokazano układu sterującego identycznego z układem **5** pokazanym na fig. 1.

Mnożenie uzyskuje się za pomocą układów przedstawionych na fig. 6. Napięcie o stałej wartości C jest podane jako wymuszenie układu całkującego modelu czasowego **4**, zmienna x — na wejście układu porównującego, zmienna z — na klucz **2**. Wtedy na wyjściu układu całkującego wyjściowego **1** uzyskuje się iloczyn $\frac{z \cdot x}{C}$.

Dzielenie realizuje się w układzie przedstawionym na fig. 7. Zmienną x należy podać na wejście wzmacniacza całkującego **4**, stałą c — na wejście przerzutnika **3**, zmienną z — na wejście klucza **2**. Na wyjściu wzmacniacza całkującego **1** otrzymuje się iloraz $C \cdot \frac{z}{x}$.

W obu przypadkach zmienne x i z muszą zmieniać się dostatecznie wolno w stosunku do częstotliwości impulsów sterujących. Na rysunkach nie pokazano układu sterującego identycznego z układem **5** podanym na fig. 1.

Na fig. 8 podano przykład podziału części operacyjnej analizatora złożonego ze wzmacniaczy operacyjnych i kluczy. Część wzmacniaczy operacyjnych przeznaczona do rozwiązywania równań różniczkowych liniowych generuje funkcje czasu i stanowi model czasowy **M**. Część wzmacniaczy **P** pracuje z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego i produkuje impulsy o szerokości proporcjonalnej do $g(v)$. Klucze **K** są otwierane i zamykane przez te impulsy podając sygnał $\rho'(v)$ na wyjściowe wzmacniacze całkujące liniowe **C**. Pozostałe wzmacniacze liniowe **L** pracują w sposób liniowy z małą częstotliwością repetycji lub w sposób ciągły (rozwiązywanie jednokrotne) i rozwiązują część liniową układów równań. Jeśli rozwiązuje się układ równań różniczkowych a dokładność całkowania nie jest wymagana duża, to zamiast dołączać wzmacniacze liniowe **L** na wyjście wzmacniaczy całkujących **C** można sumować sygnały otrzymywane w każdym cyklu przetwarzania we wzmacniaczach **C**. Aby to zrealizować wystarczy nie podawać impulsów rozładowujących kondensatory tych wzmacniaczy do zera w każdym cyklu pracy.

Fig. 9 przedstawia sposób realizacji różnych funkcji przy stałym modelu $g(v)$ i różnych modelach $\rho'(v)$. Jeden wzmacniacz z otwartą pętlą sprzężenia steruje kilkoma kluczami **3a**, **3b**, **3c**, których wyjścia są podawane na wzmacniacze całkujące **4a**, **4b**, **4c**.

Na fig. 10 podano sposób sumowania kilku różnych funkcji nieliniowych przez połączenie równoległe kluczy **2a**, **2b**, **2c** na wejścia jednego wzmacniacza całkującego **1**.

Przykład regulacji wzmocnienia trzech regulatorów sterujących jedną zmienną przedstawiono na fig. 11. Sygnały x_1 , x_2 , x_3 wchodzi na regulatory **8a**, **8b**, **8c**, na których wyjściach włączone są modulatory szerokości impulsów (komparatory) na które podawana jest ta sama funkcja liniowa

$g(v) = a v$. Wyjścia komparatorów sterują kłucami 2a, 2b, 2c, na które podano sygnały $\rho'_1, \rho'_2, \rho'_3$. Całkowanie i sumowanie tych sygnałów jest przeprowadzone w układzie całkującym 1. Sygnał wyjściowy tego układu jest równy $k_1 \rho_1 x_{10} + k_2 \rho_2 x_{20} + k_3 \rho_3 x_{30}$. Zmiana ρ powoduje zmianę współczynników wzmocnienia.

Przykład regulatora inercyjnego ze stałą czasową regulowaną podano na fig. 12. Sygnał wyjściowy z układu całkującego 1 jest podawany zwrotnie na komparator 3. Funkcja $g(v)$ jest liniowa a ρ' ma stałą i regulowaną wartość. Regulator ma transmitancję $G(s) = \frac{1}{k \frac{\rho}{a} s + 1}$

Zmiana ρ lub a powoduje zmianę stałej czasowej $k \frac{\rho}{a}$. Na fig. 11 i 12 nie pokazano układu sterującego identycznego z układem 5 przedstawionym na fig. 1.

Powyższe urządzenia mogą być wykonane w technice realizacyjnej lampowej, tranzystorowej klasycznej lub zminiaturyzowanej, magnetycznej, pneumatycznej i innych. Dodanie układów przerzutnikowych i kluczy zmieniających warunki początkowe, sygnały lub modele dla danej chwili lub zadanego napięcia pozwala na realizację funkcji nieciągłych nieregularnych itp. Dodanie filtrów, kluczy, ekstrapolatorów i innych urządzeń na wyjściu układu całkującego pozwala na uzyskiwanie sygnałów w postaci dyskretnych lub ciągłych.

Zastrzeżenia patentowe

1. Urządzenie do modelowania funkcji nieliniowych $f(x)$ składające się z podstawowego układu całkującego, klucza dwuwejściowego, komparatora sygnałów analogowych oraz generatora funkcji czasu zawierającego układy całkujące, a także taktującego generatora impulsów prostokątnych, **znamiennie tym**, że wejście podstawowego układu całkującego (1) połączone jest z wyjściem klucza dwuwejściowego (2), zaś wejście sygnałowe tego klucza połączone jest z wyjściem generatora (4) funkcji czasu dostarczającym sygnału pochodnej ($\rho'(v)$) względem czasu autonomicznego (v) funkcji zewnętrznej $\rho(v)$ dla złożonej funkcji nieliniowej $\rho[h(x)]$ będącej modelem funkcji nieliniowej ($f(x)$), zaś wejście sterujące klucza (2) połączone jest z wyjściem komparatora (3) sygnałów, przy czym jedno z wejść tego komparatora połączone jest z wyjściem generatora (4) funkcji czasu dostarczającym sygnału funkcji ($g(v)$) będącej funkcją odwrotną dla funkcji wewnętrznej $h(x)$, zaś drugie wejście komparatora połączone jest ze źródłem sygnału zmiennej niezależnej (x), a wejścia sterujące wprowadzaniem warunków początkowych do generatora (4) funkcji czasu oraz podstawowego układu całkującego (1) połączone są z wyjściami generatora (5) impulsów prostokątnych, wskutek czego podany układ połączeń pozwala funkcję nieliniową $f(x)$ w drodze wyboru przedstawić w postaci funkcji złożonej $h(x)$, w której zmienną pośredniczącą jest czas autonomiczny [$v = h(x)$], przy czym funkcję zewnętrzną $\rho(v)$ otrzymuje się przez całkowanie po czasie autonomicznym (v) jej po-

chodnej [$\rho'(v)$], zaś czas całkowania równy funkcji wewnętrznej $h(x)$ uzyskuje się jako funkcję odwrotną funkcji $g(v)$ czasu autonomicznego przez porównanie zmiennej niezależnej z funkcją $g(v)$ według zależności $v = g^{-1}(x) = h(x)$, przy czym funkcje [$\rho'(v)$] i [$g(v)$] będące modelami czasowymi funkcji [$f(x)$] otrzymuje się jako cykliczne rozwiązania odpowiednich równań różniczkowych.

2. Urządzenie według zastrz. 1, **znamiennie tym**, że niektóre z wejść generatora (4) funkcji czasu są połączone z wyjściem podstawowego układu całkującego (1), przy czym wejście sygnałowe klucza dwuwejściowego (2) i/lub jedno z wejść komparatora (3) współpracujących z tym właśnie podstawowym układem całkującym (1) są również połączone z odpowiednimi wyjściami wspomnianego generatora (4) funkcji czasu, przez co połączenia te tworzą pętlę sprzężenia zwrotnego.

3. Urządzenie według zastrz. 1 lub 2, **znamiennie tym**, że generator (4) funkcji czasu składa się z pewnej ilości n połączonych szeregowo układów całkujących (4a, b, c...), z których pierwszy (4a) na swym wejściu otrzymuje pierwszy sygnał stały (C), zaś jego wyjście połączone jest dodatkowo z jednym z wejść komparatora (3) oraz z wejściem sygnałowym jednego z ($n+1$) kluczy dwuwejściowych (2a, b, c...), a wyjścia następnych w szeregu układów całkujących (4b, c...) generatora (4) funkcji czasu są połączone odpowiednio z wejściami sygnałowymi ($n-1$) kluczy (2c, d...), przy czym wejścia sterujące wszystkich kluczy (2a, b, c...) są połączone z wyjściem komparatora (3), na którego wejście jest przyłożony sygnał zmiennej niezależnej (x), a do wejścia sygnałowego jednego z kluczy (2a) jest przyłożony drugi sygnał stały (u_1), zaś wyjścia wszystkich kluczy (2a, b, c...) połączone są z wejściami sumującymi sygnały podstawowego układu całkującego (1), przy czym do wejść sterujących zadawaniem warunków początkowych dla układów całkujących (4a, b, c...) generatora funkcji czasu (4) są również przykładane impulsy prostokątne o jednakowej częstotliwości i dobranym wypełnieniu, wskutek czego na wyjściu podstawowego układu całkującego (1) otrzymuje się sygnał aproksymujący funkcję nieliniową [$f(x)$] przy pomocy wielomianu potęgowego.

4. Urządzenie według zastrz. 1—3, **znamiennie tym**, że w miejsce komparatora (3) umieszczony jest odejmujący wzmacniacz operacyjny z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego, albo przerzutnik dwustanowy Schmidta lub inny znany modulator czasu trwania impulsów.

5. Urządzenie według zastrz. 1—4, **znamiennie tym**, że jako układy całkujące (1, 4) ma wzmacniacze operacyjne z całkującą pętlą sprzężenia zwrotnego.

6. Urządzenie według zastrz. 1—5, **znamiennie tym**, że do wejścia sygnałowego klucza (2) przyłożony jest sygnał pierwszego argumentu (z), a na wejście komparatora (3) przyłożony jest stały sygnał (c) i liniowo narastający w czasie sygnał całki drugiego argumentu (x) otrzymywany z wyjścia układu całkującego stanowiącego generator (4) funkcji czasu, przy czym sygnały obu argumentów są odpowiednio wolnozmiennie w porównaniu z przebiegami generatora impulsów prostokątnych,

dzięki czemu uzyskuje się na wyjściu podstawowego układu całkującego (1), sygnał iloczynu argumentu (z) i stałej (c) dzielonego przez argument (x).

7. Urządzenie według zastrz. 1—6, **znamiennie** 5
tym, że wejście generatora (4) funkcji $[\rho'(\nu)]$ i/lub funkcji $[g(\nu)]$ będących modelami czasowymi funkcji nieliniowej $[f(x)]$ albo wejścia sygnałowe kluczy (2) połączone są z wyjściami układów generujących sygnał stanowiący kryterium zmiany 10 parametrów regulatora automatycznego.

8. Urządzenie według zastrz. 1—7, **znamiennie** 15
tym, że wyjście podstawowego układu całkującego (1) połączone jest z wejściem sumującym komparatora (3) pętlą sprzężenia zwrotnego dzięki czemu uzyskuje się regulator inercyjny, którego stała cza-

sowa jest regulowana zmianą funkcji $[\rho'(\nu)]$ lub $[g(\nu)]$ będących modelami czasowymi.

9. Urządzenie według zastrz. 1—8, **znamiennie** 5
tym, że na wyjściu podstawowego układu całkującego (1) umieszczone są klucze lub filtry, względnie połączone szeregowo klucze i filtry, względnie ekstrapolatory, układy wzmacniające, tłumiąco-opóźniające lub zmieniające fazy sygnałów, oraz układy pamiętające lub realizujące trywialne funkcje logiczne jak negacja negacji, a także komparatory, a na wejściach podstawowego układu całkującego (1) i układów całkujących w generatorze 10 (4) funkcji czasu, oraz kluczy (2) umieszczone są układy przerzutnikowe lub komparatory i klucze służące do zmiany fazy sygnału, warunków początkowych obu funkcji modelujących $[\rho'(\nu)]$ i $[g(\nu)]$.

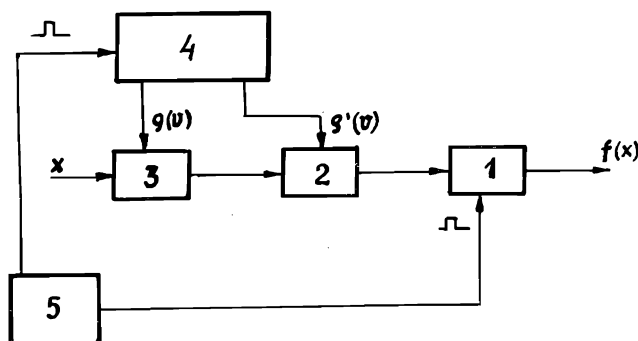


fig. 1

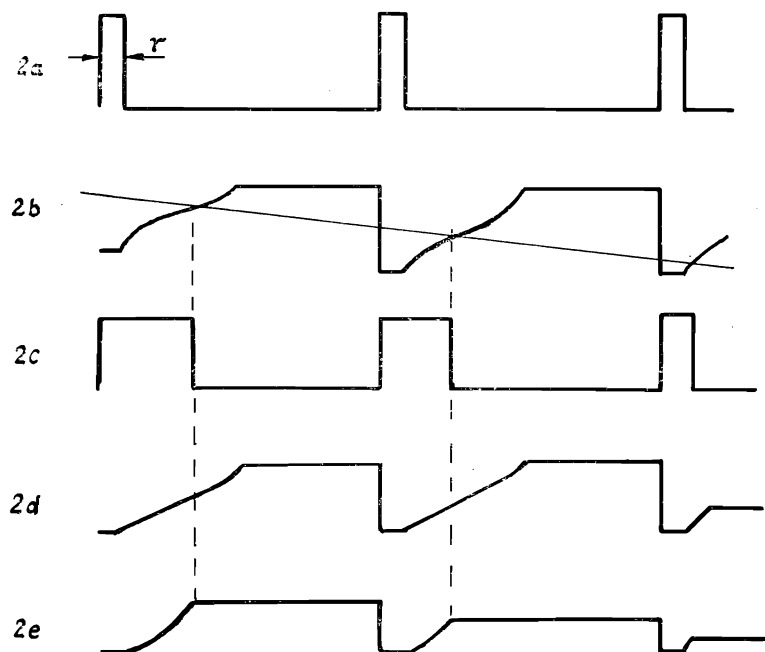


fig. 2.

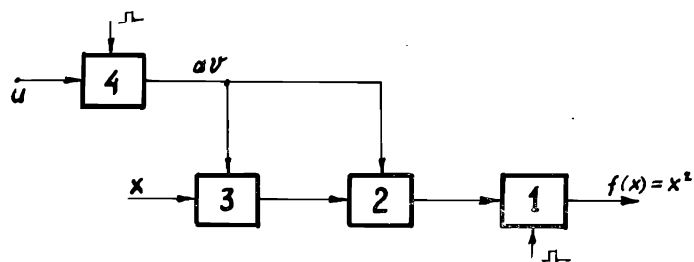


fig. 3

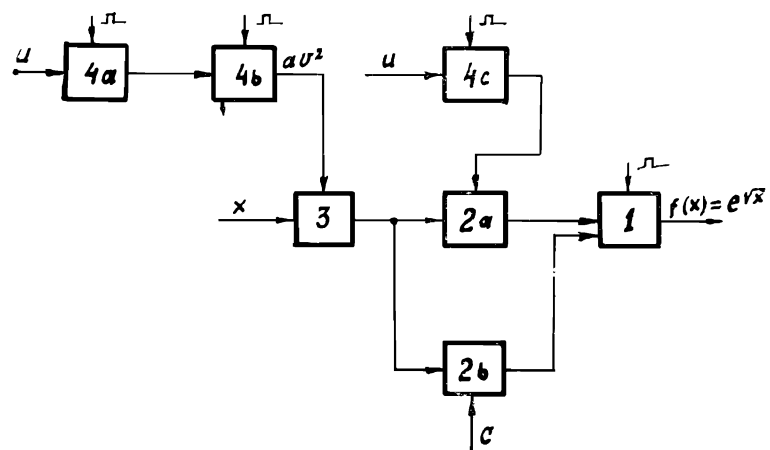


fig. 4.

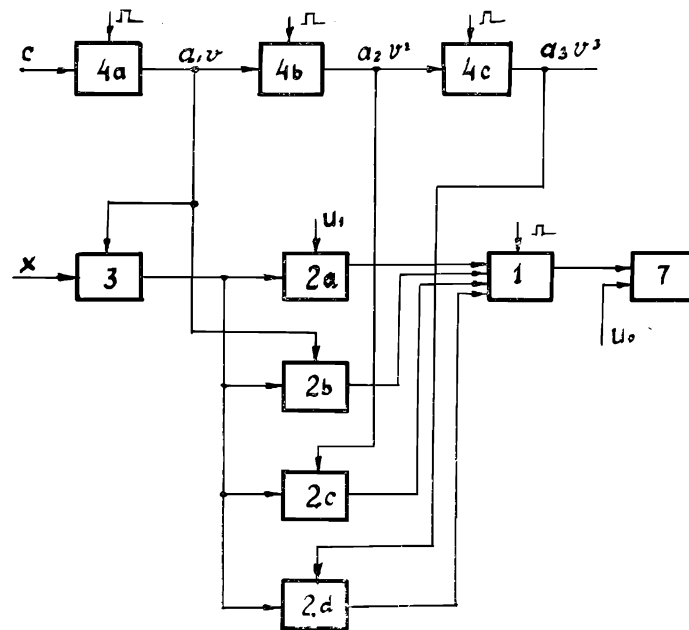


fig. 5

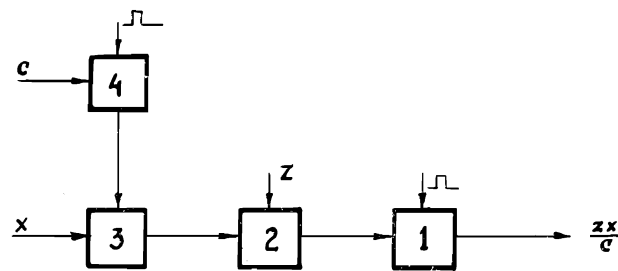


fig. 6.

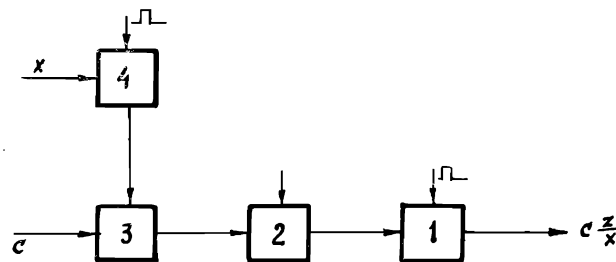


fig. 7.

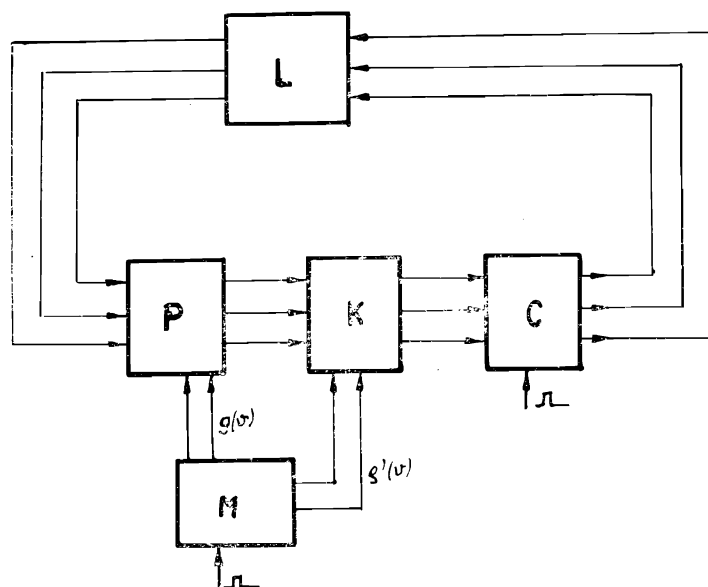


fig. 8.

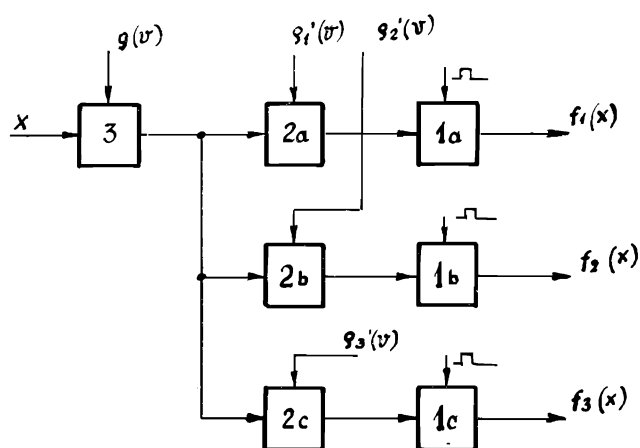


fig. 9

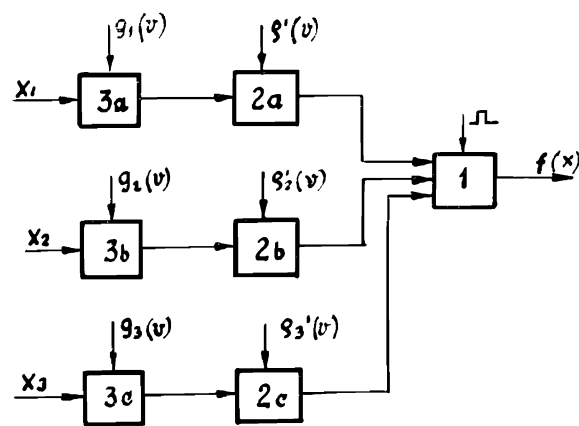


fig 10

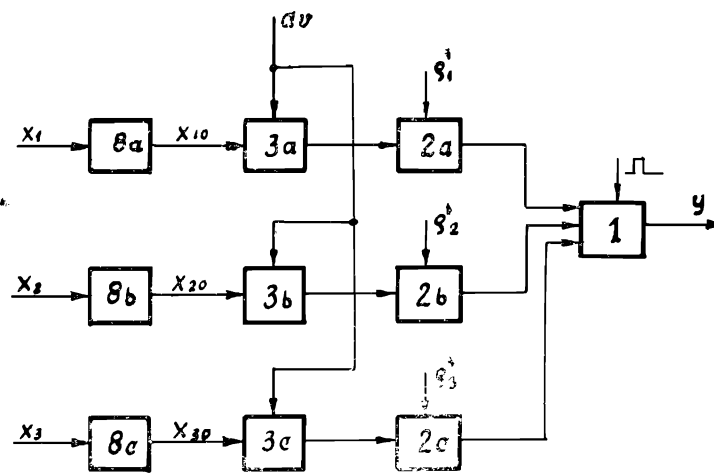


fig. 11

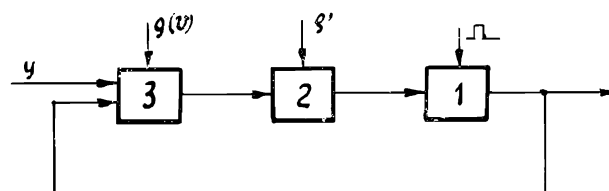


fig. 12