

**POLSKA
RZECZPOSPOLITA
LUDOWA**



**URZĄD
PATENTOWY
PRL**

OPIS PATENTOWY

50571

Patent dodatkowy
do patentu _____

Zgłoszono: 13.XI.1964 (P 106 259)

Pierwszeństwo: _____

Opublikowano: 18. II. 1966

Kl. 21 c, 46/50

MKP

G 05 b 13/00

WZGLĘDZIELNIA

Urzędu Patentowego
Polskiej Rzeczypospolitej Ludowej

Współtwórcy wynalazku: prof. dr Roman Kulikowski, dr inż. Ryszard
Gawroński, mgr inż. Andrzej Stempień

Właściciel patentu: Polska Akademia Nauk (Instytut Automatyki), War-
szawa (Polska)

Urządzenie sterujące wyznaczające optymalny przebieg sterowania

1

Przedmiotem niniejszego wynalazku jest urządzenie sterujące, stanowiące układ zespołów najkorzystniej elektronicznych, sprzężonych z obiektem sterowanym i wyznaczające optymalny przebieg sterowania tym obiektem.

Efekt działania urządzeń technicznych, na przykład silników, maszyn roboczych, urządzeń technicznych, a także pojazdów mechanicznych, raket itp. zależy od przebiegu ich sterowania. Można na przykład stwierdzić, że koszt transportu jednostki ciężaru za pomocą określonego typu samolotu zależy od przebiegu jego sterowania na trasie, inaczej mówiąc od przebiegu lotu. Podobnie od przebiegu sterowania zależy wydajność pieca przemysłowego, urządzeń transportowych i innych urządzeń pracujących okresowo. Przebieg sterowania, któremu odpowiadają najmniejsze koszty lub największa wydajność nazywamy przebiegiem optymalnym.

Znane dotychczas sposoby sterowania umożliwiają wyznaczenie dla pewnych określonych obiektów optymalnego przebiegu sterowania, na przykład za pomocą maszyn matematycznych, jednak do tego celu niezbędna jest znajomość charakterystyki sterowania obiektem, czyli zależność efektów jego pracy, na przykład wydajności, kosztów lub innych od przebiegu sterowania. Na przykład w celu określenia za pomocą maszyny matematycznej optymalnego przebiegu sterowania samolotem konieczna jest znajomość zależności

2

kosztów transportu (zużycia paliwa itp.) od przebiegu sterowania.

Inaczej mówiąc, wyznaczanie optymalnych przebiegów sterowania znanymi dotychczas sposobami jest możliwe wyłącznie w tych nielicznych przypadkach, w których znane są charakterystyki sterowania obiektów.

Powyższą wadę usuwa urządzenie do optymalnego sterowania według wynalazku, dzięki temu, że obiekt sterowany stanowi integralną jego część sprzężoną z zespołami wyznaczającymi optymalny przebieg sterowania, również w przypadku nieznannej charakterystyki sterowania obiektu.

Urządzenie według wynalazku stanowi układ zespołów najkorzystniej elektronicznych, sprzężonych z obiektem sterowanym, przy czym optymalny przebieg sterowania uzyskuje się przez nanoszenie na przebieg wyjściowy (pierwotny) włączony na wejście obiektu określonych poprawek. Jeden z zespołów urządzenia porównuje przy tym efekty jego działania odpowiadające przebiegowi sterowania bez poprawki i z naniesioną poprawką, a w przypadku uzyskania polepszenia tego efektu powoduje nadanie odpowiedniego sygnału do zespołu, który w dalszym ciągu poprawia przebieg w tym samym kierunku. Jeżeli natomiast naniesiona poprawka powoduje pogorszenie efektu działalności urządzenia, to zespół porównujący powoduje naniesienie na przebieg sterowania poprawki o odwrotnym znaku. Dzięki

temu uzyskuje się samosprężenie zwrotne umożliwiające zbliżanie się do optymalnego przebiegu sterowania drogą kolejnych prób. Urządzenie według wynalazku jest ponadto zaopatrzone w specjalny zespół (generator funkcji ortonormalnych), który umożliwia uzyskanie optymalnego przebiegu sterowania w możliwie małej ilości prób.

Dzięki powyższym własnościom urządzenie według wynalazku może zapewnić optymalny przebieg sterowania również w przypadku zmiany charakterystyki sterującej obiektu, na przykład w wyniku zmiany temperatury otoczenia, własności surowca lub innych czynników zewnętrznych.

Wynalazek jest bliżej wyjaśniony na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia zespół wykresów ilustrujących efekty pracy obiektu dla różnych przebiegów sterowania przedstawionych na fig. 2, fig. 3 — sposób przekształcania pierwotnego przebiegu sterowania przez nakładanie funkcji ortonormalnych w celu uzyskania przebiegu optymalnego, fig. 4 — schemat blokowy urządzenia według wynalazku do wyznaczania optymalnego przebiegu sterowania obiektu, fig. 5 — schemat przełącznika, fig. 6 — schemat linii opóźniającej, fig. 7 — schemat zespołu całkującego, fig. 8 — schemat zespołu włączającego, fig. 9 — schemat zespołu mnożącego, fig. 10 — schemat sumatora funkcji, fig. 11 — schemat sumatora, fig. 12 — schemat generatora funkcji ortonormalnych, a fig. 13 — schemat zespołu przełączającego.

Urządzenie sterujące wyznaczające optymalny przebieg sterowania według wynalazku składa się z następujących podstawowych zespołów: z obiektu sterowanego **I**, który w urządzeniu spełnia rolę zespołu dostarczającego informacji o aktualnej charakterystyce jego sterowania, z przełącznika **II**, z linii opóźniającej **III**, zespołu całkującego **IV**, zespołu włączającego **V**, z zespołu mnożącego **VI**, z sumatora funkcji **VII**, sumatora **VIII**, generatora funkcji ortonormalnych **IX**, z włączników **X** i **XI** oraz z zespołu przełączającego **XII**.

Obiekt sterowany **I** stanowiący w układzie urządzenia sterującego według wynalazku zespół informujący ma określoną i ogólnie biorąc zmienną w czasie charakterystykę sterowania. Wyjaśni to następujący przykład. Na fig. 2 przedstawiono przykładowo trzy różne przebiegi sterowania prędkości samolotu.

Przebieg sterowania **A** odpowiada stałej prędkości v samolotu w czasie lotu t . Przebiegowi temu odpowiada określona zależność kosztów K lotu w funkcji czasu, przedstawiona przez krzywą A_1 na fig. 1. Innemu przebiegowi sterowania przedstawionemu przez krzywą **B** na fig. 2 (początkowy wzrost szybkości do wartości maksymalnej, a następnie jej stopniowy spadek) odpowiada wykres B_1 zależności kosztów lotu w funkcji czasu. Zależność pola zawartego między odpowiednimi wykresami A_1 , B_1 , a osią czasu na fig. 1 od kształtu krzywych **A**, **B** przebiegu sterowania na fig. 2, stanowi charakterystykę sterowania obiektu. Matematycznie można dowiedzieć, że większość obiektów rzeczywistych ma również taki określony przebieg sterowania (przedstawiony

na fig. 2 w postaci krzywej **C**), któremu odpowiada najmniejsza lub największa wartość pola S zakreślanego na fig. 1, zawartego pod krzywą C_1 określającą efekt działania obiektu, na przykład zależność kosztów lub wydajność względem czasu w stosunku do pól odpowiadających innym krzywym A_1 , B_1 , właściwym dla innych przebiegów **A**, **B** sterowania. Ten właśnie przebieg sterowania przedstawiony na fig. 2 przez krzywą **C** nosi nazwę optymalnego przebiegu sterowania.

Wyznaczenie optymalnego przebiegu sterowania (odpowiadającego krzywej **C** na fig. 2) jest jak już wyżej wspomniano możliwe, na przykład przy użyciu maszyny matematycznej, lecz wymaga znajomości charakterystyki sterowania obiektu. Wyznaczenie tego przebiegu za pomocą urządzenia według wynalazku nie jest natomiast uwarunkowane znajomością charakterystyki sterowania, ponieważ sterowany obiekt spełnia w nim rolę zespołu informującego o swych aktualnych własnościach sterowniczych. Sposób wyznaczania optymalnego przebiegu sterowania za pomocą urządzenia według wynalazku przedstawiony schematycznie na fig. 3, polega na nakładaniu na wyjściowy przebieg sterowania (przedstawiony na fig. 3 przez prostą **A**, odpowiadającą krzywej A_1 na fig. 1), kolejnych dodatnich lub ujemnych przyrostów scharakteryzowanych na przykład przez krzywą **B** (fig. 3). W wyniku tego nałożenia otrzymuje się inny przebieg sterowania przedstawiony przez krzywą **E**. Zadaniem urządzenia jest porównanie efektu pracy obiektu **I** przy tym nowym przebiegu **E** sterowania i w przypadku jego polepszenia przyjęcie wprowadzonych zmian przebiegu sterowania, zaś w przypadku pogorszenia przyjmuje je z przeciwnym znakiem.

Po dokonanej próbie, pierwszej zmiany przebiegu sterowania następuje nałożenie na przebieg wyjściowy **A** innej funkcji **F** (fig. 3), w wyniku czego otrzymuje się nowy przebieg sterowania i w podobny sposób bada się jego wpływ na efekt pracy urządzenia.

Przełącznik **II** przedstawiony oddzielnie na fig. 5 służy do przełączania informacji przekazywanych przez obiekt sterowany **I** na przemian na linię opóźniającą **III** albo bezpośrednio na układ całkujący **IV**. W tym celu przełącznik **II** jest zaopatrzony w elektromagnes 1, sprzężony z zespołem przełączającym **XII**.

Linia opóźniająca **III** przedstawiona przykładowo na fig. 6 stanowi urządzenie magnetofonowe, zaopatrzone w taśmę 2, tworzącą zamkniętą pętlę, w głowicę 3 nagrywającą informacje otrzymane z wyjścia obiektu **I** przy górnym położeniu przełącznika **II** (na fig. 5), w głowicę 4 kasującą i głowicę 5 odtwarzającą przebiegi zapisane przez głowicę 3 z opóźnieniem równym cyklowi pracy obiektu (czyli cyklowi przekazywania mu zmian przebiegu sterowania).

Zespół całkujący **IV** przedstawiony oddzielnie na fig. 7, stanowi typowe urządzenie całkujące, stosowane w maszynach matematycznych i składa się przykładowo z wzmacniacza 6, z włączonego równolegle kondensatora 7 i — szeregowo opor-

nika 8. Na wejście zespołu IV są włączane przez przełącznik II równocześnie przebiegi informacyjne bezpośrednio z obiektu sterowanego I oraz opóźnione o jeden cykl przebiegi z linii opóźniającej III. W wyniku tego przebieg nadawany na wejście tego zespołu IV stanowi różnicę przebiegów zespołów I i III, a przebieg na jego wyjściu, przekazywany do zespołu V, stanowi całą tę różnicę i jest miarą poprawienia (lub pogorszenia) efektów pracy obiektu sterowanego I w wyniku zmiany przebiegu sterowania spowodowanej nałożeniem określonej poprawki.

Zespół włączający V przedstawiony oddzielnie na fig. 8 jest zaopatrzony w elektromagnes 9, sterowany przez zespół przełączający XII i służy do włączania obliczonej wartości całki w określonym czasie na wejście zespołu mnożącego VI.

Zespół mnożący VI przedstawiony oddzielnie na fig. 9 stanowi przykładowo typowe urządzenie mnożące stosowane w maszynach matematycznych i składa się z czterech sumatorów 10 i dwóch kwadratów 11, połączonych w sposób przedstawiony na fig. 9. Jedno z wejść tego zespołu VI otrzymuje sygnał a_1 z zespołu całkującego IV przez wyłącznik V, a w tym samym czasie drugie z wejść sygnał h_1 stanowiący określoną poprawkę (zmianę) przebiegu sterowania z zespołu IX przez wyłącznik X. Na wyjściu zespołu mnożącego uzyskuje się wskutek tego sygnał stanowiący iloczyn $a_1 \cdot h_1$ przekazywany do sumatora funkcji VII.

Sumator funkcji VII, przedstawiony przykładowo na fig. 10, stanowi urządzenie magnetofonowe, złożone z taśmy dwuścieżkowej 12 stanowiącej zamkniętą pętlę oraz z dwóch układów głowic pracujących na obydwu ścieżkach zapisu tej taśmy. Jeden z tych układów składa się z głowicy 13 włączanej za pomocą elektromagnesu 14, sterowanego przez zespół przełączający XII i nanoszącej na jedną ze ścieżek zapis wejściowego przebiegu sterowania (A na fig. 3), z głowicy kasującej 14 oraz z głowicy odczytującej 15, połączonej z wejściem sumatora 17, a równocześnie przekazującej sygnały na wejście sumatora VIII. Drugi zespół składa się z głowicy 16 połączonej z sumatorem 17 przedstawionym przykładowo na fig. 11, z głowicy kasującej 18 oraz z głowicy odtwarzającej 19, połączonej z jednym wejściem sumatora 17. Drugie wejście tego sumatora 17 jest połączone z wyjściem zespołu mnożącego VI.

Sumator VIII przedstawiony na fig. 11 i stanowiący przykładowo typowy sumator stosowany w maszynach matematycznych, składa się ze wzmacniacza 20, z włączonego równolegle opornika 21 oraz szeregowo oporników 22 i 23, połączonych z wejściem wzmacniacza. Sygnał przekazywany na sumator VIII z sumatora funkcji VII jest w nim nakładany z sygnałem h_1 otrzymywanym z zespołu IX przez wyłącznik XI i przekazywany na wejście układu sterującego sterowanego obiektem I.

Zespół IX stanowi generator funkcji ortonormalnych, zapewniający uzyskanie optymalnego przebiegu sterowania możliwie małą ilością prób. Generator ten składa się z linii opóźniającej 24 przedstawionej przykładowo na fig. 6, na której

jedno z wejść jest włączany sygnał z sumatora VII, a drugie wejście jest połączone z wyjściem układu różniczkującego.

Układ różniczkujący składa się z wzmacniacza 25, z włączonego równolegle opornika 26 i szeregowo kondensatora 27 i z sumatora 28 przedstawionego przykładowo na fig. 11, którego jedno wejście jest połączone z wyjściem linii opóźniającej 24, a drugie z wyjściem układu mnożącego 29, zaś wyjście jest włączone na wejście kwadratora 30 i równolegle na wejście układu dzielącego. Układ dzielący jest złożony z wzmacniacza 31 włączonego równolegle do układu mnożącego 32, którego jedno z wejść jest połączone szeregowo z opornikiem 33, a drugie z wyjściem układu całkującego 34. Układ całkujący 34 jest przedstawiony przykładowo na fig. 7, przy czym jego wejście jest włączone na wyjście kwadratora 30. Wyjście układu dzielącego jest włączone na wejście linii opóźniającej 35, przedstawionej przykładowo na fig. 6, której wyjście jest włączone na wejście układu mnożącego 29 oraz połączone przez wyłącznik X z zespołem mnożącym VI i przez wyłącznik XI z sumatorem VIII. Generator jest ponadto wyposażony w zespół mnożący 36, na którego jedno z wejść jest włączone wyjście linii opóźniającej 24, a na drugie wyjście linii opóźniającej 35, zaś jego wyjście jest połączone z wejściem układu całkującego 37 przedstawionego przykładowo na fig. 7. Wyjście układu całkującego jest włączone na wejście wymienionego uprzednio układu mnożącego 29, którego wyjście jest włączone na sumator 28.

Zespół przełączający XII przedstawiony oddzielnie na fig. 13 stanowi znany układ przekazywaczy czasowych, złożony z silnika synchronicznego 38, napędzającego przez przekładnię 39 zestaw osadzonych na wspólnym wałku krzywek 40a, 40b... współpracujących ze stykami 41a, 41b... sterującymi wymienionymi uprzednio elektromagnesami 1, 9, 14, włączającymi w odpowiednim czasie zespoły II, V, VII, X, XI i IX.

Działanie opisanego wyżej urządzenia sterującego, wyznaczającego optymalny przebieg sterowania jest następujące.

Za pomocą głowicy 13 sumatora funkcji VII nanosi się na jedną ze ścieżek taśmy magnetofonowej 12 wyjściowy przebieg sterujący (odpowiadający na przykład prostej A na fig. 3). Przebieg ten jest odtwarzany za pomocą głowicy 15 i przekazywany na sumator VIII.

W pierwszym cyklu pracy sumator nie nakłada na otrzymany sygnał żadnej poprawki i przekazuje go bez zmiany na układ sterujący obiektem I. Efekt działania obiektu zostaje przy tym zanotowany po przełączeniu przełącznika II w górne położenie za pomocą głowicy nagrywającej 3 na taśmie magnetofonowej 2 linii opóźniającej III, na przykład w postaci krzywej A_1 na fig. 1.

W następnym cyklu pracy na przekazany na wejście sumatora VIII sygnał zostaje przez włączenie wyłącznika XI dodany sygnał z generatora w funkcji ortonormalnych.

Działanie tego generatora, które stanowi istotną część urządzenia według wynalazku polega na zmodelowaniu za pomocą opisanych zespołów elek-

tronicznych przedstawionych przykładowo na fig. 12 znanego algorytmu postępowania zwanego metodą Schmidta i służącego do ortonormalizacji dowolnego zespołu funkcji. Zespół taki ma tę własność, że z jego składowych można złożyć dowolną funkcję, a więc również i wyznaczoną funkcję optymalnego przebiegu sterowania, przedstawioną przykładowo na fig. 2 przez krzywą C, przy czym złożenie tej funkcji uzyskuje się za pomocą stosunkowo niewielkiej liczby prób. W efekcie działania generatora uzyskuje się na jego wyjściu sygnały odpowiadające funkcjom spełniającym warunki ortonormalności.

Po nałożeniu krzywej (na przykład D na fig. 3) na sygnał odpowiadający pierwotnemu przebiegowi sterowania A, uzyskuje się na wyjściu sumatora VIII przebieg odpowiadający sumie tych funkcji (a więc krzywą E na fig. 3), który nadawany jest na układ sterujący obiektu I. Efekt działania obiektu I w wyniku nowego przebiegu sterowania jest przekazywany przez przełącznik II bezpośrednio na zespół całkujący IV. Równocześnie na wejście tego zespołu IV nadawany jest opóźniony przez linię opóźniającą III sygnał z poprzedniego cyklu, przy czym różnice obydwu sygnałów zostają przez zespół IV scałkowane, w wyniku czego na wyjściu tego zespołu uzyskuje się całkę różnicy a_1 .

W następnym cyklu pracy skutek oddziaływania na sumator VIII tych samych sygnałów wejściowych, zostaje ponownie nadany na zespół sterujący obiektu I ten sam przebieg sterowania, przy czym sterowany przez zespół XII przełącznik II znajduje się w położeniu środkowym. Równocześnie ten sam co poprzednio sygnał wyjściowy z generatora IX funkcji ortonormalnych, zostaje przez włącznik X przyłożony na zespół mnożący VI (sygnał h_1), na którego drugie wejście zostaje równocześnie podany przez włącznik V sygnał a_1 z zespołu całkującego IV zapamiętany z poprzedniego cyklu pracy urządzenia. Na wyjściu zespołu mnożącego VI uzyskuje się więc iloczyn $a_1 \cdot h_1$, który zostaje przyłożony na wejście sumatora 17 zespołu VII i za pomocą głowicy 16 zapisany na drugiej ścieżce taśmy magnetofonowej 12.

W przypadku kiedy uzyskana w wyniku porównania efektu pracy urządzenia po zmianie przebiegu sterowania i przed tą zmianą wartość całki a_1 jest dodatnia, czyli odpowiada korzystnej zmianie efektu pracy urządzenia, to wartość sygnału $a_1 \cdot h_1$ podawanego na sumator 17 w następnym cyklu pracy urządzenia jest również dodatnia i proporcjonalna do uzyskanego polepszenia efektu pracy obiektu. Natomiast w przypadku, gdy wartość a_1 jest ujemna to znaczy odpowiada pogorszeniu się efektu pracy obiektu, to również ujemna jest wartość sygnału $a_1 \cdot h_1$ podawanego na sumator 17, przy czym bezwzględna wartość tego sygnału jest tym większa im intensywniejsze jest pogorszenie efektu pracy obiektu.

Trzy opisane cykle, w wyniku których uzyskuje się zapisanie na taśmie magnetofonowej 12, uzyskanej dodatniej lub ujemnej zmiany efektu pracy sterowanego obiektu I, tworzą łącznie cykl zapisu urządzenia.

Następnie trzy kolejne cykle pracy urządzenia odpowiadające łącznie drugiemu cyklowi zapisu przebiegają w sposób podobny jak wyżej opisany z tą różnicą, że generator funkcji ortonormalnych IX wytwarza w drugim cyklu zapisu drugą kolejną funkcję ortonormalną (odpowiadającą na przykład krzywej F na fig. 3), powodując nadawanie odpowiednich sygnałów h_2 — z jednej strony na sumator VIII, a z drugiej na zespół mnożący VI. Ponadto sumator 17 zespołu sumuje w tym drugim cyklu zapisu zarówno poprzednio obliczoną wartość poprawki ($a_1 \cdot h_1$), jak i wartość poprawki obliczoną na drugim cyklu ($a_2 \cdot h_2$), w wyniku czego na wyjściu sumatora 17 uzyskuje się sygnał odpowiadający sumie tych wartości, który zostaje za pomocą głowicy 16 zapisany na tej samej ścieżce taśmy magnetofonowej 12.

W następnym trzecim cyklu zapisu następuje podanie na sumator VII kolejnej następnej funkcji ortonormalnej generowanej przez zespół IX, a w końcowym wyniku uzyskuje się na taśmie magnetofonowej 12 zapis sumy wszystkich obliczonych w poprzednich cyklach zapisów poprawek $\sum a_i \cdot h_i$ z uwzględnieniem właściwego ich znaku. Po wyczerpaniu przez generator IX całkowitego zespołu funkcji ortonormalnych w kilku kolejnych cyklach zapisu zostaje w ostatnim cyklu włączony elektromagnes 14, który powoduje podanie zapisu sumy wszystkich poprawek $\sum a_i \cdot h_i$ oraz funkcji A (fig. 3), odpowiadającej pierwotnemu przebiegowi sterowania z wyjścia sumatora 17 na głowicę 13 i zapisanie na pierwszej ścieżce taśmy magnetofonowej 12 przebiegu sterującego, zbliżonego do przebiegu optymalnego.

Na tym kończy się pierwszy cykl przybliżania do optymalnego przebiegu sterowania, zaś uzyskana krzywa stanowi przebieg wejściowy do następnego cyklu przybliżania. Cykl ten ma przy tym przebieg identyczny do poprzednio opisanego, a w jego końcowym efekcie uzyskuje się krzywą jeszcze bardziej zbliżoną do optymalnego przebiegu sterowania (odpowiadającego krzywej C na fig. 2). Jeżeli w międzyczasie nastąpiła zmiana warunków pracy obiektu (na przykład zmiana składu paliwa, temperatury zewnętrznej itp.) to niezależnie od pierwotnych warunków pracy urządzenie uwzględnia te zmiany, a uzyskiwana krzywa przebiegu sterowania zbliża się do przebiegu optymalnego w tych właśnie nowych warunkach pracy obiektu.

Urządzenie sterujące wyznaczające optymalny przebieg sterowania według wynalazku może znaleźć zastosowanie do sterowania dowolnych obiektów z jednym wejściem sterującym, zwłaszcza obiektów pracujących okresowo.

Zastrzeżenia patentowe

1. Urządzenie sterujące wyznaczające optymalny przebieg sterowania, **znamiennie tym**, że jest wyposażone w generator (IX) funkcji ortonormalnych, włączony przez sumator (VIII) na układ sterujący obiektu (I), stanowiącego równocześnie zespół informacyjny urządzenia, przy czym to samo wyjście generatora (IX) jest połączone

- z wejściem zespołu mnożącego (VI), na którego drugie wejście jest podawany przez układ zespołów (III, IV) współczynnik (a_i) stanowiący miarę polepszenia lub pogorszenia efektu pracy obiektu sterowanego (I), przy czym zespół mnożący (VI) jest połączony przez sumator funkcji (VII) z wejściem sumatora (VIII).
2. Urządzenie według zastrz. 1, **znamiennie tym**, że zespół służący do określenia współczynnika (a_i) składa się z linii opóźniającej (III) i z zespołu (IV) oraz z przełącznika (II), który włącza na przemian bezpośrednio zespół całkujący (IV) lub łącznie z linią opóźniającą (III).
 3. Urządzenie według zastrz. 1 i 2, **znamiennie tym**, że sumator funkcji (VII) stanowi urządze-

nie magnetofonowe z taśmą (12) o dwusieczkowym zapisie i jest wyposażony w dwa zespoły głowic (16, 18, 19 i 13, 14, 15) współpracujących z tymi ścieżkami taśmy oraz w sumator (17), na którego wejście jest włączony zespół mnożący (VI) oraz głowice odczytujące (15 i 19) obydwu zespołów, a którego wyjście jest połączone z głowicą zapisującą (16) jednego z tych zespołów głowic bezpośrednio, a z głowicą zapisującą (13) drugiego zespołu za pomocą przełącznika.

4. Urządzenie według zastrz. 1, **znamiennie tym**, że jego generator funkcji ortonormalnych (IX) stanowi model fizyczny algorytmu ortonormalizacji według Schmidta (fig. 12).

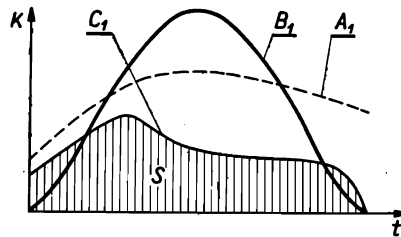


Fig. 1

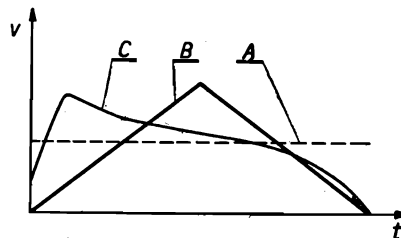


Fig. 2

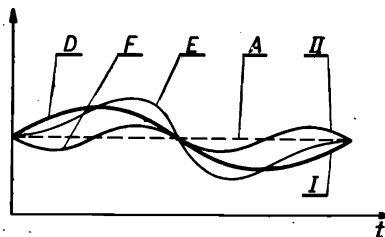
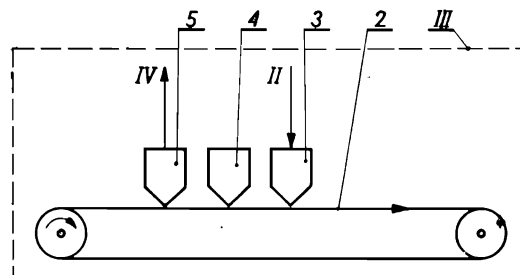
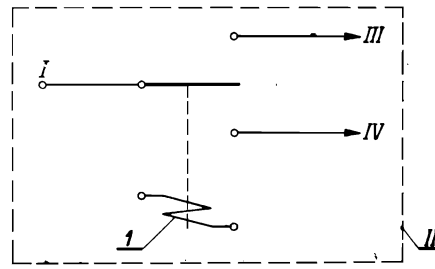
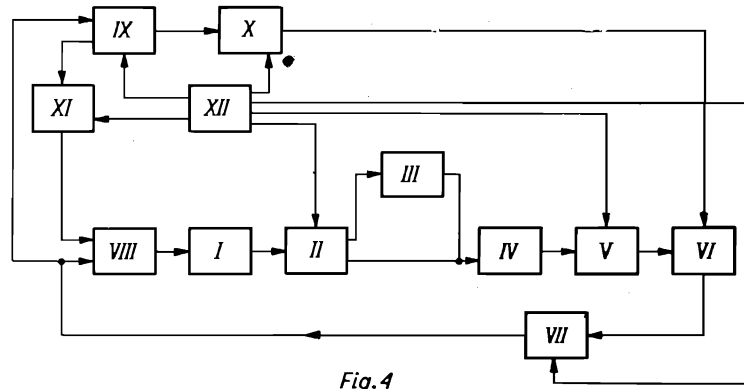


Fig. 3



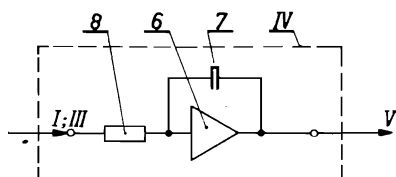


Fig. 7

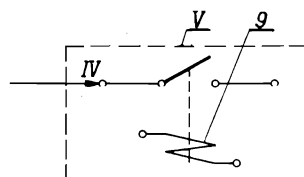


Fig. 8

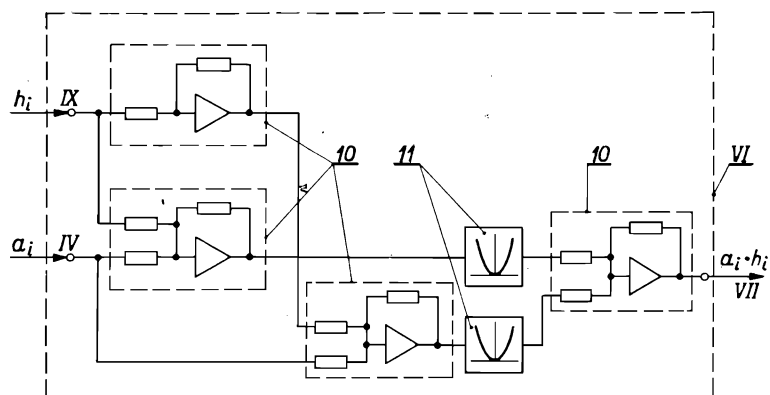


Fig. 9

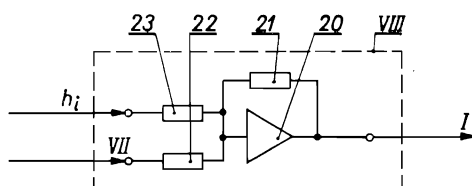


Fig. 11

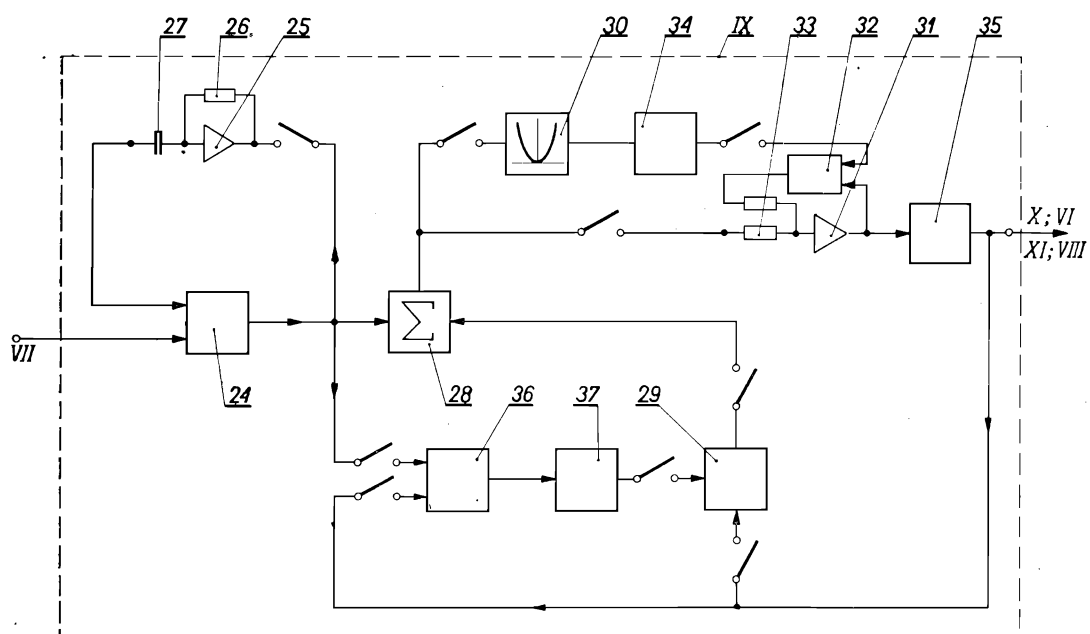


Fig. 12

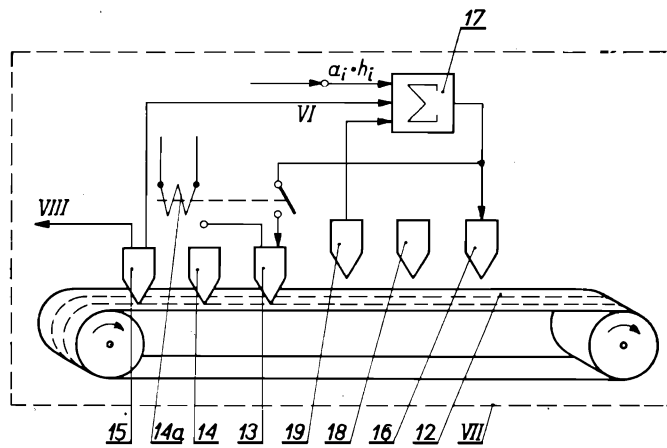


Fig. 10

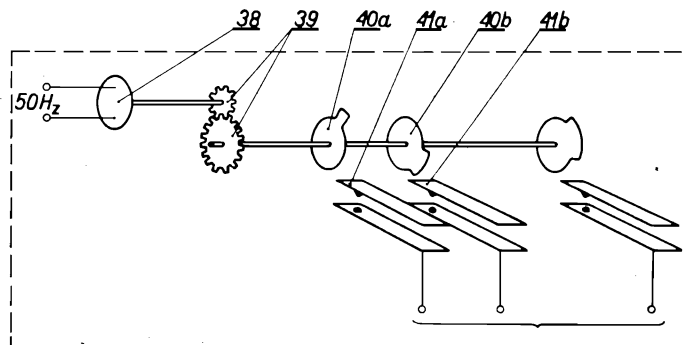


Fig. 13