

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **222224**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **393936**

(51) Int.Cl.
G01M 7/02 (2006.01)
G01N 29/46 (2006.01)

(22) Data zgłoszenia: **15.02.2011**

(54) **Urządzenie do monitoringu konstrukcji mechanicznych
i sposób monitoringu konstrukcji mechanicznych**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:
27.08.2012 BUP 18/12

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:
29.07.2016 WUP 07/16

(73) Uprawniony z patentu:

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE,
Kraków, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:

**KRZYSZTOF MENDROK, Bielsko-Biała, PL
WOJCIECH MAJ, Krzeszowice, PL
TADEUSZ UHL, Wieliczka, PL**

(74) Pełnomocnik:

rzecz. pat. Andrzej Stachowski

PL 222224 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest urządzenie do monitoringu konstrukcji mechanicznych i sposób monitoringu konstrukcji mechanicznych, co sprowadza się do nieniszczącego wykrywania uszkodzeń i przeciążeń konstrukcji mechanicznych w czasie rzeczywistym.

Konstrukcje mechaniczne, takie jak mosty, wysokie budynki, statki powietrzne i morskie, szybkie pociągi, urządzenia górnicze, poddawane różnym obciążeniom statycznym i dynamicznym wymagają ciągłego nadzorowania ich stanu technicznego. Im bardziej jest skomplikowana konstrukcja mechaniczna, tym trudniej jest określić, który element znajduje się na granicy wytrzymałości lub uległ już uszkodzeniu, co może przyczynić się do zniszczenia całej konstrukcji mechanicznej. Wczesne wykrycie pęknięć, stanów korozyjnych lub granicznych stanów naprężeń może zapobiec katastrofom, o których coraz częściej jest głośno w mediach. Obecnie, niskie ceny urządzeń elektronicznych pozwalają na zbudowanie układów elektronicznych, które mogą zostać wykorzystane do monitorowania dowolnych konstrukcji mechanicznych.

Z publikacji opisu zgłoszeniowego wynalazku nr US 2006/0069520 A1 pt. „*Structure health monitoring system and method*” znany jest sposób i urządzenie do monitorowania stanu konstrukcji mechanicznych, który bazuje na diagnostyce opartej na danych zbieranych z sensorów. Dane te są analizowane pod kątem możliwości wystąpienia uszkodzenia określonego elementu.

Z publikacji opisu patentowego nr US 6,006,163 pt. „*Active damage interrogation method for structural health monitoring*” znana jest metoda i urządzenie, które bazuje na aktuatorach i czujnikach piezoelektrycznych przymocowanych lub wbudowanych w konstrukcję mechaniczną. Wykrywanie uszkodzeń przeprowadza się na podstawie wymuszania i pomiarów drgań konstrukcji mechanicznej aktuatorami i czujnikami piezoelektrycznymi. Na podstawie wymuszenia drgań i odpowiedzi liczona jest funkcja przejścia konstrukcji mechanicznej i porównywanie z analogiczną funkcją przejścia konstrukcji mechanicznej znajdującej się w stanie referencyjnym to znaczy nieuszkodzonym, przykładowo zaraz po wykonaniu konstrukcji. Po porównaniu amplitudy i fazy funkcji przejścia obu stanów oblicza się wskaźnik uszkodzenia, zwany Cumulative Avaradge Delta, który służy do wykrycia, zlokalizowania i określenia uszkodzenia monitorowanej konstrukcji mechanicznej.

W urządzeniu do monitoringu konstrukcji mechanicznych zawierającym moduł pomiarowo-diagnostyczny z przyłączonym do niego urządzeniem wymuszającym drgania, czujnikami drgań, układem do wprowadzania danych i poleceń oraz układem alarmowym lub ostrzegającym, moduł pomiarowo-diagnostyczny jest wyposażony w elektroniczny układ o strukturze bezpośrednio programowalnej macierzy bramek, posiadający co najmniej tyle wejść co czujników drgań umieszczonych w co najmniej dwóch różnych punktach pomiarowych na konstrukcji mechanicznej i odbierający sygnały jednocześnie ze wszystkich podłączonych czujników drgań, z których każdy jest przyłączony do jednego wejścia elektronicznego układu bezpośrednio programowalnego za pomocą analogowego toru przetwarzania zawierającego wstępny wzmacniacz sygnału, filtr antyaliasingowy, wzmacniacz o regulowanym wzmocnieniu, kontrolowalny blok filtrów analogowych oraz przetwornik analogowo cyfrowy, przy czym elektroniczny układ bezpośrednio programowalny zawiera układ mnożący i układ sumujący przetwarzające sygnały z czujników drgań konstrukcji mechanicznej w stanie referencyjnym i w stanie monitorowanym na sygnał, który jest podawany do układu alarmowego lub ostrzegającego, gdy charakter drgań konstrukcji mechanicznej w stanie monitorowanym odbiega od charakteru drgań konstrukcji mechanicznej w stanie referencyjnym wywołanych urządzeniem wymuszającym drgania.

Korzystnie, czujnikami drgań są piezoelektryczne czujniki akcelerometryczne, z zintegrowanym wewnętrznym wzmacniaczem, mierzące przyspieszenia drgań, o transmisji prądowej w standardzie 4–20 mA, paśmie do 1 kHz i amplitudzie napięciowego sygnału użytecznego w zakresie ± 1 GV.

Korzystnie, urządzeniem wymuszającym drgania jest młotek modalny.

Z kolei, w sposobie monitoringu konstrukcji mechanicznych za pomocą urządzenia zawierającego moduł pomiarowo-diagnostyczny z przyłączonym do niego urządzeniem wymuszającym drgania, czujnikami drgań, układem do wprowadzania danych i poleceń oraz układem alarmowym lub ostrzegającym, polegającym na wzbudzaniu drgań za pomocą urządzenia wymuszającego drgania, rejestracji sygnału elektrycznego pochodzącego od drgań za pomocą czujników drgań, analizie drgań i wysyłaniu sygnału ostrzegawczego lub alarmowego, gdy drgania przekroczą wartości dopuszczalne, rejestruje się jednocześnie sygnały elektryczne pochodzące od co najmniej dwóch czujników umieszczonych w różnych miejscach konstrukcji mechanicznej, z których każdy przekazuje się za pomocą oddzielnego analogowego toru przetwarzania zawierającego wstępny wzmacniacz sygnału, filtr anty-

aliasingowy, wzmacniacz o regulowanym wzmocnieniu, kontrolowalny blok filtrów analogowych oraz przetwornik analogowo cyfrowy do jednego wejścia elektronicznego układu bezpośrednio programowalnego, w którym za pomocą układu mnożącego i układu sumującego przetwarza się sygnały z czujników drgań najpierw w stanie referencyjnym, a następnie w stanie monitorowanym i generuje się sygnał ostrzegawczy lub alarmowy, który podaje się do układu alarmowego lub ostrzegającego, gdy charakter drgań konstrukcji mechanicznej wywołanych urządzeniem wymuszającym drgania w stanie monitorowanym odbiega od charakteru drgań konstrukcji mechanicznej wywołanych urządzeniem wymuszającym drgania w stanie referencyjnym.

Przedmiot wynalazku jest uwidoczniony w przykładach wykonania na rysunku, na którym Fig. 1 przedstawia schematycznie konstrukcję mechaniczną z urządzeniem do monitoringu konstrukcji mechanicznych, Fig. 2 przedstawia schemat blokowy analogowego toru przetwarzania, Fig. 3 przedstawia schemat blokowy modułu pomiarowo-diagnostycznego urządzenia do monitoringu konstrukcji mechanicznych, Fig. 4 przedstawia przykładowy przebieg sygnału generowanego przez czujnik lub sensor, Fig. 5 przedstawia ogólny schemat układu realizującego proces filtracji, Fig. 6 przedstawia proces realizacji operacji arytmetycznych pokazany schematycznie, Fig. 7 przedstawia strumieniowe przetwarzanie operacji arytmetycznych pokazany schematycznie, Fig. 8 przedstawia uszczegółowiony schemat układu realizującego proces filtracji, Fig. 9 przedstawia diagram czasowy pracy układu realizującego proces filtracji, Fig. 10 przedstawia proces obliczania jednego składnika macierzy wynikowej, Fig. 11 przedstawia przykładowe widmowe funkcje przejścia zarejestrowane dla układu bez uszkodzenia, Fig. 12 przedstawia przykładowe wyniki filtracji modalnej dla konstrukcji mechanicznej bez uszkodzenia, Fig. 13 przedstawia przykładowe wyniki filtracji modalnej dla układu z uszkodzeniem i Fig. 14 przedstawia wykres słupkowy wartości indeksu uszkodzenia dla konstrukcji mechanicznej.

Sposób monitoringu konstrukcji mechanicznych, zgodny z wynalazkiem, opiera się na modelu modalnym, którego parametrami jest zbiór częstotliwości własnych konstrukcji mechanicznej, przy których występuje zjawisko rezonansu, współczynników tłumienia dla tych częstotliwości i postaci lub formy drgań, to jest formy odkształcania konstrukcji mechanicznej dla danej częstotliwości drgań wymuszanych za pomocą urządzenia wzbudzającego drgania, przy czym postać drgań własnych jest opisana wektorem modalnym. Wskutek wymuszeń, w konstrukcji mechanicznej, tak w stanie nieuszkodzonym określanym stanem referencyjnym, jak i w stanie monitorowanym, wzbudza się drgania, które przetwarza się przez czujniki drgań. Podczas pomiarów rejestruje się widmowe funkcje przejścia w postaci inertancji, to jest stosunku przyspieszenie/siła dla pomiaru referencyjnego, a dla kolejnych pomiarów mogą to być widmowe gęstości mocy lub również widmowe funkcje przejścia. Z sygnałów czasowych od $A_1(t)$ do $A_n(t)$ w postaci cyfrowej, liczona jest transformata Fouriera. W jej wyniku otrzymuje się gęstości widmowe mocy odpowiedzi, czyli przebiegi amplitudowo-częstotliwościowe $X_1(\omega)$ do $X_n(\omega)$ w formie macierzy H , gdzie każda kolumna jest kolejnym widmem X . Wymiar tej macierzy wynosi $m \times n$, gdzie m to liczba prążków widma, a n to liczba użytych kanałów.

$$H_{mn}(\omega) = \begin{bmatrix} X_{11}(\omega_1) & X_{12}(\omega_1) & X_{1n}(\omega_1) \\ X_{21}(\omega_2) & X_{22}(\omega_2) & X_{2n}(\omega_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{m1}(\omega_m) & H_{m2}(\omega_m) & X_{mn}(\omega_m) \end{bmatrix}$$

Następnie macierz ta jest przemnażana przez wektor współczynników filtru modalnego y , które są wcześniej wyliczane programowo dla obiektu nieuszkodzonego, to jest w stanie referencyjnym, i przechowywane w pamięci urządzenia pomiarowo-diagnostycznego. Wymiar wektora y wynosi $n \times 1$.

$$\begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1N} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ X_{M1} & X_{M2} & \dots & X_{MN} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_M \end{bmatrix}$$

Wektor Z jest odpowiedzią konstrukcji mechanicznej na wymuszenie, którą można przedstawić w postaci przebiegu amplitudowo-częstotliwościowym i która jest związana z drganiami i -tej częstotliwości drgań własnych, po usunięciu składowych związanych z innymi częstotliwościami drgań własnych poza jedną, najczęściej taką, przy której występuje jedno maksimum w stanie nieuszkodzonym. Jeżeli wystąpi uszkodzenie, dynamika układu zmienia się i zmieniają się postacie drgań własnych. W konsekwencji, zmieni się charakter drgań konstrukcji mechanicznej wywołanych urządzeniem wymuszającym drgania.

Oprócz odpowiedzi Z konstrukcji mechanicznej na wymuszenie, często, w celu określenia czy występuje uszkodzenie, oblicza się wskaźnik DI_4 według poniżej podanego wzoru, który określa różnicę energii sygnałów konstrukcji w stanie referencyjnym nieuszkodzonym i sygnałów w stanie bieżącym, inaczej zwanym stanem monitorowanym

$$DI_4 = \frac{\int_{\omega_s}^{\omega_1} |z_i(\omega) - z_{ref}(\omega)|^2 d\omega}{\int_{\omega_s}^{\omega_1} z_{ref}(\omega)^2 d\omega}$$

gdzie:

ω_s – częstotliwość początkowa rozpatrywanego pasma;

ω_1 – częstotliwość końcowa rozpatrywanego pasma;

Z_i – charakterystyka w stanie bieżącym;

Z_{ref} – charakterystyka w stanie referencyjnym;

DI_4 – energia różnicy sygnałów.

Obliczenia odpowiedzi Z konstrukcji mechanicznej na wymuszenie i/lub wskaźnika DI_4 można dokonać za pomocą odpowiednich programów, jednak taki sposób obliczeń jest czasochłonny i wymaga dużych mocy obliczeniowych.

W sposób bardziej wydajny, uszkodzenie konstrukcji można określić za pomocą urządzenia 101 do monitoringu konstrukcji mechanicznych 110, które zostało przedstawione schematycznie na Fig. 1. Urządzenie 101 do monitoringu konstrukcji mechanicznych 110, którą w przedstawionym przykładzie rozwiązania jest belka jednostronnie utwierdzona, zawiera urządzenie 122 wymuszające drgania, zestaw 120 czujników 121 lub sensorów, z przyporządkowanymi do każdego z nich analogowymi torami przetwarzania 130, umieszczonych na konstrukcji mechanicznej 110 przymocowanej za pomocą zestawu mocującego 111 do podłoża 112, moduł pomiarowo-diagnostyczny 140, połączony lub komunikujący się w inny sposób z jednostką obliczeniową 141, przykładowo komputerem klasy PC lub komputerem przemysłowym, klawiaturą 142 lub innym układem do wprowadzania danych i poleceń, wyświetlaczem 143 lub innym interfejsem do kontaktowania się z operatorem i układem alarmowym lub ostrzegającym 144. Modułem pomiarowo-diagnostycznym 140 w przedstawionym rozwiązaniu jest układ oparty na elektronicznym układzie o strukturze bezpośrednio programowalnej macierzy bramek typu FPGA (Field-Programmable Gate Array), posiadający co najmniej tyle wejść co czujników 121 drgań umieszczonych w co najmniej dwóch różnych punktach pomiarowych na konstrukcji mechanicznej 110 i odbierający sygnały jednocześnie ze wszystkich podłączonych czujników drgań, z których każdy jest przyłączony do jednego wejścia elektronicznego układu bezpośrednio programowalnego za pomocą analogowego toru przetwarzania 130. Z kolei jako czujniki 121 lub sensory mogą być użyte piezoelektryczne czujniki akcelerometryczne, z zintegrowanym wewnętrznym wzmacniaczem przykładowo czujniki piezoelektryczne mierzące przyspieszenia drgań, typu PCB M333B30, wykonane w technologii ICP (Integrated Circuit Piezoelectric) lub czujniki tensometryczne, a urządzeniem 122 wymuszającym drgania może być młotek modalny. Z racji rozmiarów konstrukcji mechanicznych zakłada się wykorzystanie czujników drgań o transmisji prądowej w standardzie 4–20 mA zapewniającej bardzo małe zmniejszenie jakości sygnału przy transmisjach na odległości rzędu 100 m i większych, paśmie do 1 kHz i amplitudzie napięciowego sygnału użytecznego w zakresie ± 10 V.

Fig. 2 przedstawia schemat blokowy jednego czujnika 121 i przyporządkowanego do niego analogowego toru przetwarzania 130, który w szczególności zawiera wstępny wzmacniacz sygnału 231, filtr antyaliasingowy 232, wzmacniacz 233 o regulowanym wzmocnieniu, kontrolowalny blok filtrów analogowych 234 oraz przetwornik analogowo-cyfrowy 235 połączony z szynami 236 danych i kontrolnymi lub sterującymi 237. Wskazane jest, aby tor przetwarzania miał możliwość zapamiętania minimum 8000 próbek sygnału od chwili rozpoczęcia pomiaru, przykładowo, dzięki zastosowaniu układów pamięci typu DRAM. (Dynamic Random Access Memory).

Fig. 3 przedstawia schemat blokowy modułu pomiarowo-diagnostycznego 140 urządzenia do monitoringu konstrukcji mechanicznych, który zawiera dwa współpracujące ze sobą podsystemy, a mianowicie procesor centralny lub centralną jednostkę obliczeniową CPU (Central Processing Unit) 310 z modułami pamięci typu RAM (Random Access Memory) 311 i typu FLASH (Flash Memory) 312,

układ FPGA 320 z towarzyszącymi podukładami takimi jak pamięć 321 konfiguracji FPGA i pierwszy układ pamięci typu SRAM (Static Random Access Memory), 322, drugi układ pamięci typu SRAM 323 i trzeci układ pamięci SDRAM 324. Układ pamięci SDRAM (Synchronous Dynamic Random Access Memory) 324 wykorzystywany jest do buforowania przetworzonego do postaci cyfrowej sygnału analogowego przekazywanego z każdego czujnika 121 zestawu 120 czujników, a układy pamięci synchroniczne SRAM 322, 323 służą jako szybki bufor danych dla struktury układu FPGA służącej do przetwarzania zmierzonego sygnału. Ponadto moduł pomiarowo-diagnostyczny 140 jest wyposażony w interfejs 330 użytkownika i komunikacji zewnętrznej zawierający między innymi kontroler typu ETHERNET 331, złącze typu USB (Universal Serial Bus) 332, UART (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter) 333, a także układy zasilania 340. Zadaniem centralnej jednostki obliczeniowej CPU 310 lub procesora centralnego jest obsługa interfejsu 330 użytkownika i komunikacji zewnętrznej, natomiast układ FPGA 320, który zawiera układ mnożący i układ sumujący, realizuje akwizycję danych ze wszystkich czujników 121 drgań lub sensorów, implementuje realizowany algorytm przetwarzania sygnałów z czujników oraz w sposób pośredni lub bezpośredni komunikuje się z zewnętrznymi układami urządzenia do monitoringu konstrukcji mechanicznych. Elektroniczny układ programowalny typu FPGA 320 przetwarza tak sygnały z czujników 121 drgań konstrukcji mechanicznej w stanie referencyjnym jak i sygnały z czujników 121 drgań w stanie monitorowanym na sygnał, który jest podawany do układu alarmowego lub ostrzegającego 144, gdy charakter drgań konstrukcji mechanicznej w stanie monitorowanym odbiega od charakteru drgań konstrukcji mechanicznej w stanie referencyjnym wywołanych urządzeniem 122 wymuszającym drgania. Architektura elektronicznego układu programowalnego typu FPGA 320 umożliwia wykorzystanie w stopniu maksymalnym zalet przetwarzania sekwencyjnego realizowanego przez centralną jednostkę obliczeniową CPU 310 oraz przetwarzania równoległego implementowanego w układzie FPGA 320.

W celu określenia stopnia uszkodzenia konstrukcji mechanicznej, wykonuje się pojedyncze wymuszenia urządzeniem 122 wymuszającym drgania, którym może być młotek modalny, dla konstrukcji w stanie nieuszkodzonej zaraz po oddaniu konstrukcji do użytku, a później co określony czas dla tej samej konstrukcji, której stan jest monitorowany. Wskutek wymuszeń, w konstrukcji mechanicznej, tak w stanie nieuszkodzonej określanym stanem referencyjnym, jak i w stanie monitorowanym, wzbudza się drgania, które przetwarza się przez czujniki 121 zestawu 120 czujników o przykładowym przebiegu drgań w czasie pokazanym na Fig. 4. Podczas pomiarów rejestruje się widmowe funkcje przejścia w postaci inertancji, to jest stosunku przyspieszenie/siła dla pomiaru referencyjnego a dla kolejnych pomiarów mogą to być widmowe gęstości mocy lub również widmowe funkcje przejścia. Z sygnałów czasowych od $A_1(t)$ do $A_n(t)$ w postaci cyfrowej przetworzonych z sygnałów czasowych drgań otrzymanych z czujników 121 drgań, gdzie n przyjmuje wartości od 2 do 16, zakładając przykładowo, że urządzenie pomiarowo-diagnostyczne ma 16 kanałów, to jest torów pomiarowych, liczona jest transformata Fouriera. W jej wyniku otrzymuje się gęstości widmowe mocy odpowiedzi, czyli przebiegi amplitudowo-częstotliwościowe $X_1(\omega)$ do $X_n(\omega)$ w formie macierzy H , która została, podana na wstępie opisu, gdzie każda kolumna jest kolejnym widmem X . Wymiar tej macierzy wynosi $m \times n$, gdzie m to liczba prążków widma, a n to liczba użytych kanałów, wynosząca przykładowo 16, która najczęściej jest równa liczbie czujników 121 drgań. Odpowiedź Z konstrukcji mechanicznej na wymuszenie, zgodnie z przedstawionym rozwiązaniem, określa się w wyniku operacji filtracji modalnej, która jest realizowana przez układ FPGA 320 z towarzyszącymi podukładami takimi jak pamięć 321 konfiguracji FPGA i pierwszy układ pamięci typu SRAM 322, drugi układ pamięci typu SRAM 323 i trzeci układ pamięci SDRAM 324. Ta operacja jest realizowana w poniżej opisany sposób. Podczas operacji filtracji modalnej kolejne wiersze macierzy H stanowią kolejne sygnały X z diagramu Fig. 5, 8 i 9, a sygnałem Y jest wektor y . W wyniku mnożenia sygnału X i Y otrzymujemy jeden element wektora wyjściowego x , gdzie kolejne wiersze macierzy H brane do X dają kolejne elementy wektora x . Elementy $R_1 \dots R_4$ są to tymczasowe bufony, gdzie przechowywane są cząstkowe iloczyny kolejnych operacji mnożenia macierzowego. Dla przykładu R_1 to iloczyn pierwszego elementu X przez pierwszy element Y , R_2 to drugi element X przez drugi element Y i tak do R_4 . Wynika to z potokowej architektury układu mnożącego, który realizuje operację mnożenia w czterech etapach, każdy w jednym cyklu zegara. Dzięki temu mnożąc wiersz przez kolumnę macierzy nie musi się czekać na wynik cztery cykle zegara na każdy z cząstkowych wyników tylko w kolejnym cyklu można wykonać kolejny iloczyn co przyspiesza operacje dla macierzy o większych wymiarach. Wynikiem tej operacji jest wektor odpowiedzi filtru modalnego x , o wymiarach $m \times 1$. Tym razem sygnałem X jest wyliczony wektor z po filtracji modalnej, a sygnałem Y jest wektor referencyjny, który jest wektorem odpowiedzi filtru modalnego

dla testowanego obiektu w stanie referencyjnym wyliczany wcześniej programowo i przechowywany w pamięci urządzenia, podobnie jak wektor y .

Do realizacji operacji filtracji modalnej zastosowano układ przedstawiony na Fig. 5, którego jednym z głównych elementów jest układ kontrolny 520, który komunikuje się z obszarem X pamięci typu SRAM 522 i obszarem Y pamięci typu SRAM 523. Układ kontrolny 520 korzystając z pamięci współczynników oraz danych realizuje operacje mnożenia wykorzystując moduły sumatora inaczej układ sumujący 525 i multiplikatora inaczej układ mnożący 524 zmiennopozycyjnych liczb rzeczywistych.

Operacje mnożenia i dodawania podzielone są na cztery etapy, z których każdy realizowany jest w kolejnym cyklu zegara, co przedstawiono na Fig. 6. Każdy z etapów realizowany jest jednocześnie przez funkcjonalnie niezależne bloki logiczne. Układy te posiadają na swoim wejściu oraz wyjściu rejestry, dzięki czemu możliwe jest przetwarzanie potokowe, a na Fig. 7 przedstawiono schematycznie strumieniowe przetwarzanie operacji arytmetycznych w odniesieniu do osi czasu. Z Fig. 7 wynika, że czas realizacji n – niezależnych między sobą operacji mnożenia liczb zmiennoprzecinkowych wynosi $(n + 3) \times T_e$, a opóźnienie wynosi $4 \times T_e$. Usprawnienie obliczeń realizowane jest poprzez odpowiednie uszeregowanie w czasie operacji mnożenia i dodawania, prowadzące do minimalizacji czasu realizacji mnożenia macierzy X oraz Y . Jako że z bloku układu mnożącego 524, pokazanego na Fig. 8, poszczególne iloczyny otrzymywane są co okres $T = 1 \times T_e$ a proces sumowania wymaga do realizacji $T = 4 \times T_e$, wykorzystano układ sumatora 525 z akumulacją do czterech niezależnych rejestrów wybieranych po kolei. Diagram czasowy pracy układu realizującego proces filtracji został przedstawiony na Fig. 9, a proces obliczania jednego składnika macierzy wynikowej w odniesieniu do czasu został przedstawiony na Fig. 10.

Tabela 1

Lp.	Częstotliwość drgań własnych [Hz]	Współczynniki tłumienia modalnego [%]
1	24.7	0.62
2	68.5	0.26
3	133.7	0.32
4	222.9	0.34
5	442.9	0.22
6	461.2	0.24

Fig. 11 przedstawia przykładowe widmowe funkcje przejścia zarejestrowane dla układu bez uszkodzenia, czyli w stanie referencyjnym. Na podstawie pomiarów w stanie referencyjnym wykonuje się analizę modalną i estymuje się częstotliwości drgań własnych i odpowiadające im współczynniki tłumienia modalnego i postacie drgań własnych. Przykładowo, w powyżej podanej tabeli 1 zestawiono zidentyfikowane parametry modalne, dla sześciu częstotliwości drgań własnych, gdzie podano współczynniki filtru modalnego, to jest wzajemne wektory modalne, obliczone na podstawie poniżej podanego wzoru.

$$\psi = H_{kN}(\omega) + \frac{2\xi_r \omega_r^2}{\omega_r^2 - \omega^2 + 2j\xi_r \omega_r \omega}$$

gdzie:

ω_r – r -ta częstota drgań własnych

ξ_r – r -ty współczynnik tłumienia modalnego

Podsumowując, w sposobie monitoringu konstrukcji mechanicznych za pomocą urządzenia przedstawionego na Fig. 1, 2 i 8, rejestruje się jednocześnie sygnały elektryczne pochodzące od co najmniej dwóch czujników 121 drgań umieszczonych w różnych miejscach konstrukcji mechanicznej 110, z których każdy przekazuje się za pomocą oddzielnego analogowego toru przetwarzania 130 zawierającego wstępny wzmacniacz sygnału 231, filtr antyaliasingowy 232, wzmacniacz 233 o regulowanym wzmocnieniu, kontrolowalny blok filtrów analogowych 234 oraz przetwornik analogowo-cyfrowy 235 do jednego wejścia elektronicznego układu programowalnego typu FPGA 320, w którym za pomocą układu mnożącego 524 i układu sumującego 525 przetwarza się sygnały z czujników 121

drgań najpierw w stanie referencyjnym, a następnie w stanie monitorowanym i generuje się sygnał ostrzegawczy lub alarmowy, który podaje się do układu alarmowego lub ostrzegającego 144, gdy charakter drgań konstrukcji mechanicznej wywołanych urządzeniem 122 wymuszającym drgania w stanie monitorowanym odbiega od charakteru drgań konstrukcji mechanicznej wywołanych urządzeniem 122 wymuszającym drgania w stanie referencyjnym.

Fig. 12 przedstawia przykładowe wyniki filtracji modalnej czyli odpowiedzi Z konstrukcji mechanicznej na wymuszenie dla konstrukcji mechanicznej bez uszkodzenia tylko z jednym maksimum, Fig. 13 przedstawia przykładowe wyniki filtracji modalnej dla układu z uszkodzeniem z dwoma wyraźnymi maksimumami, gdy charakter drgań konstrukcji mechanicznej wywołanych urządzeniem wymuszającym drgania w stanie monitorowanym odbiega od charakteru drgań konstrukcji mechanicznej wywołanych urządzeniem wymuszającym drgania w stanie referencyjnym pokazanym na Fig. 12, a Fig. 14 przedstawia wykres słupkowy wartości indeksu uszkodzenia dla konstrukcji mechanicznej. Po zmianie charakteru drgań konstrukcji mechanicznej wywołanych urządzeniem wymuszającym drgania w stanie monitorowanym, które odbiegają od charakteru drgań konstrukcji mechanicznej wywołanych urządzeniem wymuszającym drgania w stanie referencyjnym, co wiąże się z przekroczeniem wartości granicznych indeksu uszkodzenia, podawana jest informacja o wystąpieniu uszkodzenia lub aktywowane jest urządzenie alarmowe 144.

Zastrzeżenia patentowe

1. Urządzenie do monitoringu konstrukcji mechanicznych zawierające moduł pomiarowo-diagnostyczny, wyposażony w elektroniczny układ o strukturze bezpośrednio programowalnej macierzy bramek, z przyłączonym do modułu urządzeniem wymuszającym drgania, czujnikami drgań, w ilości odpowiadającej ilości wejść elektronicznego układu bezpośrednio programowalnego, układem do wprowadzania danych i poleceń oraz układem alarmowym lub ostrzegającym, **znamiennie tym**, że czujniki (121) drgań umieszczone są w co najmniej dwóch różnych punktach pomiarowych na monitorowanej konstrukcji mechanicznej (110), z których każdy jest przyłączony do jednego wejścia elektronicznego układu bezpośrednio programowalnego (320) za pomocą analogowego toru przetwarzania (130) zawierającego wstępny wzmacniacz sygnału (231), filtr antyaliasingowy (232), wzmacniacz (233) o regulowanym wzmocnieniu, kontrolowalny blok filtrów analogowych (234) oraz przetwornik analogowo cyfrowy (235), przy czym elektroniczny układ bezpośrednio programowalny (320), zawiera układ mnożący (524) i układ sumujący (525) przetwarzające jednocześnie sygnały ze wszystkich podłączonych czujników (121) drgań konstrukcji mechanicznej na sygnał, który jest podawany do układu alarmowego lub ostrzegającego (144).

2. Urządzenie do monitoringu konstrukcji mechanicznych według zastrz. 1, **znamiennie tym**, że czujnikami drgań są piezoelektryczne czujniki akcelerometryczne, z zintegrowanym wewnętrznym wzmacniaczem, mierzące przyspieszenia drgań, o transmisji prądowej w standardzie 4–20 mA, paśmie do 1 kHz i amplitudzie napięciowego sygnału użytecznego w zakresie ± 10 V.

3. Urządzenie do monitoringu konstrukcji mechanicznych według zastrz. 1, **znamiennie tym**, że urządzeniem (122) wymuszającym drgania jest młotek modalny.

4. Sposób monitoringu konstrukcji mechanicznych za pomocą urządzenia zawierającego moduł pomiarowo-diagnostyczny z przyłączonym do niego urządzeniem wymuszającym drgania, czujnikami drgań, układem do wprowadzania danych i poleceń oraz układem alarmowym lub ostrzegającym, polegający na wzbudzaniu drgań za pomocą urządzenia wymuszającego drgania, rejestrowaniu sygnału elektrycznego pochodzącego od drgań za pomocą czujników drgań, analizie drgań i wysyłaniu sygnału ostrzegawczego lub alarmowego, gdy drgania przekroczą wartości dopuszczalne, **znamiennie tym**, że rejestruje się jednocześnie sygnały elektryczne, stanowiące odpowiedź na wymuszone drgania, pochodzące od co najmniej dwóch czujników umieszczonych w różnych miejscach monitorowanej konstrukcji mechanicznej, z których każdy przekazuje się za pomocą oddzielnego analogowego toru przetwarzania do przypisanego mu wejścia elektronicznego układu programowalnego x, w którym to układzie, za pomocą układu mnożącego i układu sumującego, przetwarza się jednocześnie sygnały z czujników drgań w stanie monitorowanym, a następnie porównuje się charakter drgań konstrukcji mechanicznej wywołanych urządzeniami wymuszającymi drgania w stanie monitorowanym z charakterem drgań konstrukcji mechanicznej wywołanych przez urządzenie wymuszające drgania w stanie referencyjnym, które zapisane są w pamięci elektronicznego układu programowalnego i generuje się

sygnał ostrzegawczy lub alarmowy, który podaje się do układu alarmowego lub ostrzegającego, wówczas gdy charakter drgań konstrukcji mechanicznej wywołanych urządzeniem wymuszającym drgania w stanie monitorowanym odbiega od charakteru drgań konstrukcji mechanicznej wywołanych urządzeniem wymuszającym drgania w stanie referencyjnym.

Rysunki

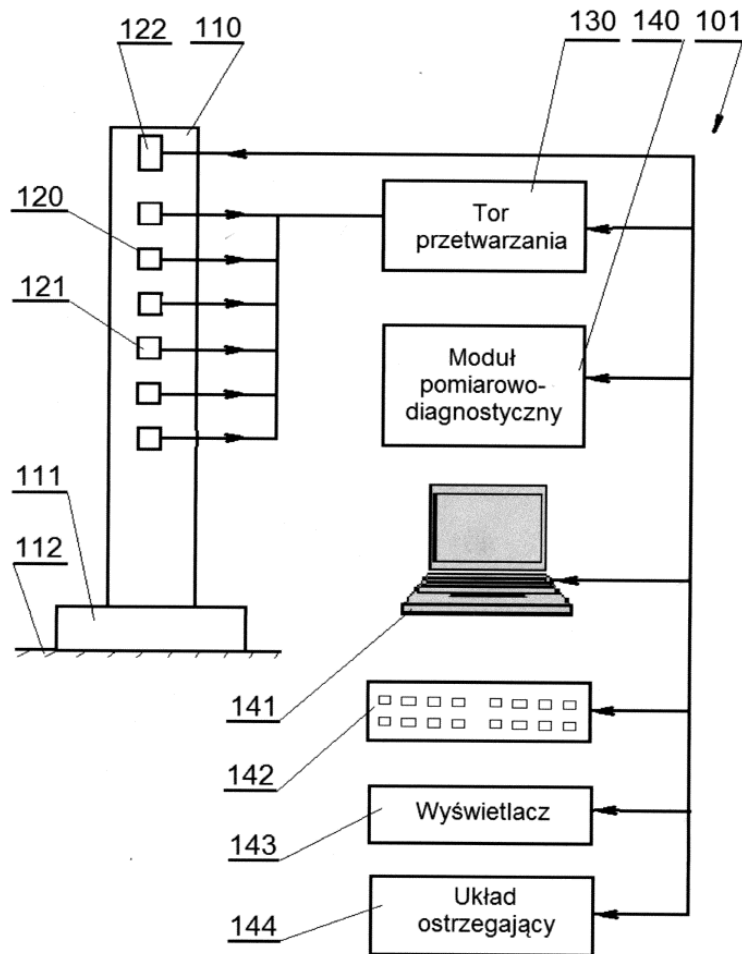


Fig. 1

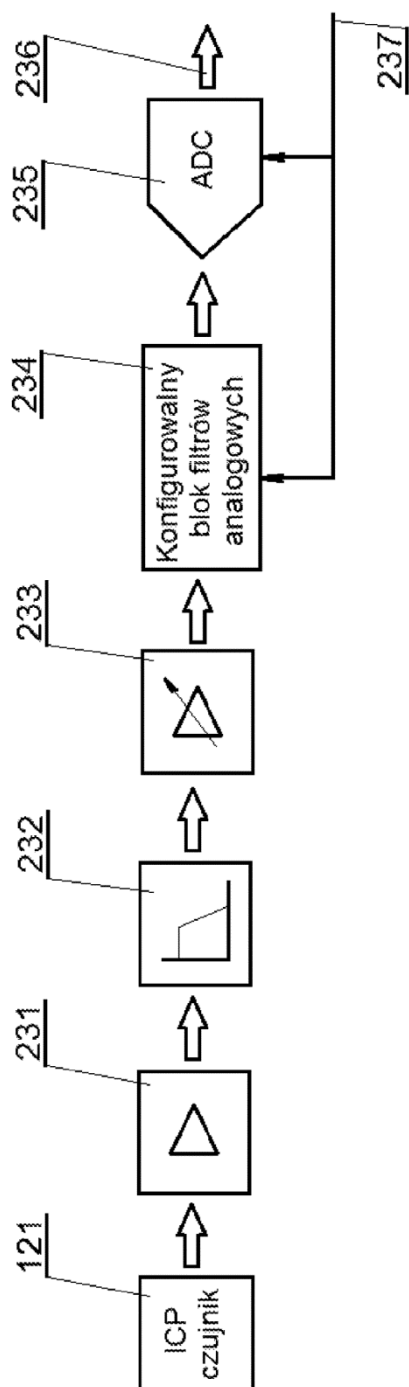


Fig. 2

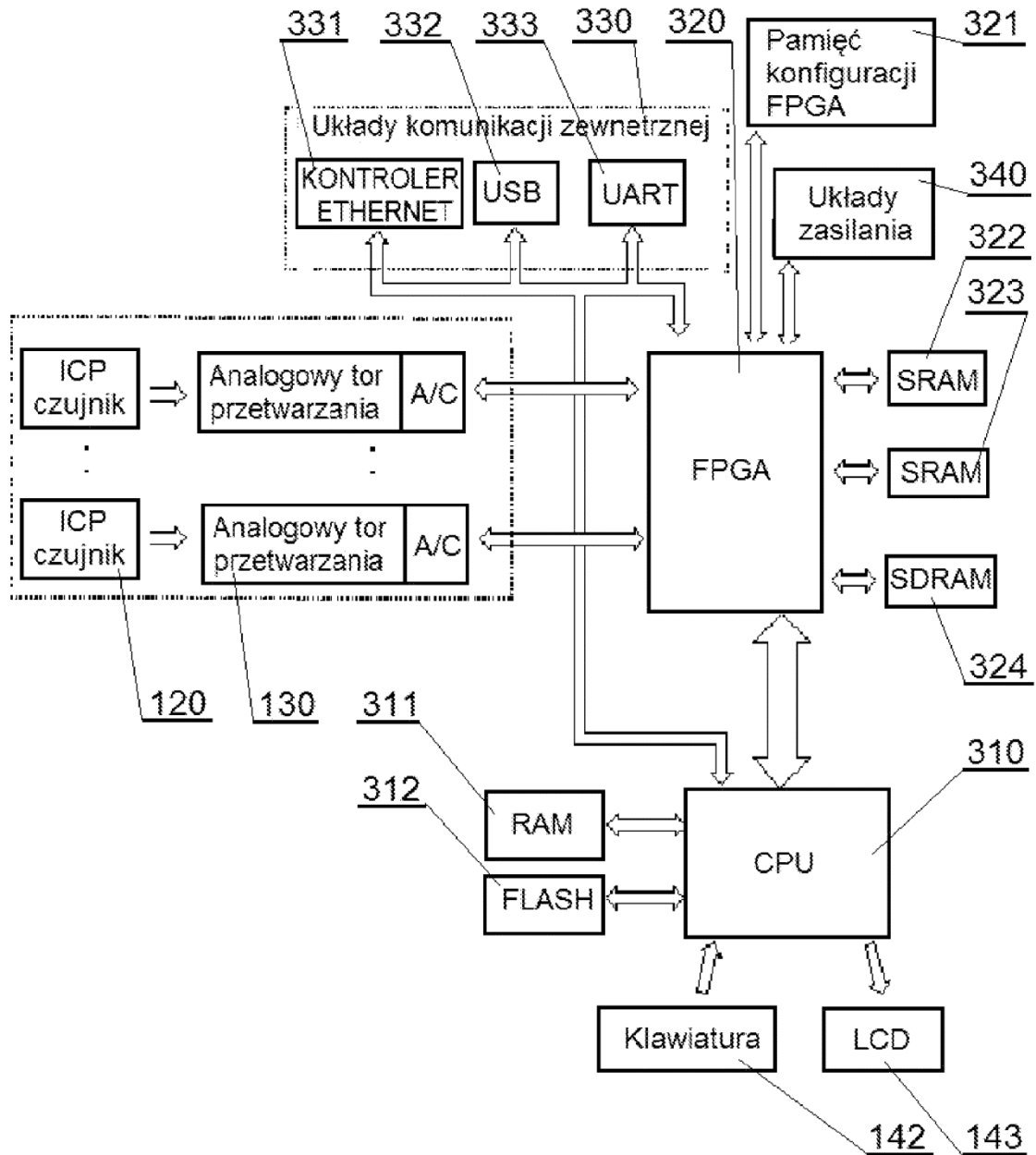


Fig. 3

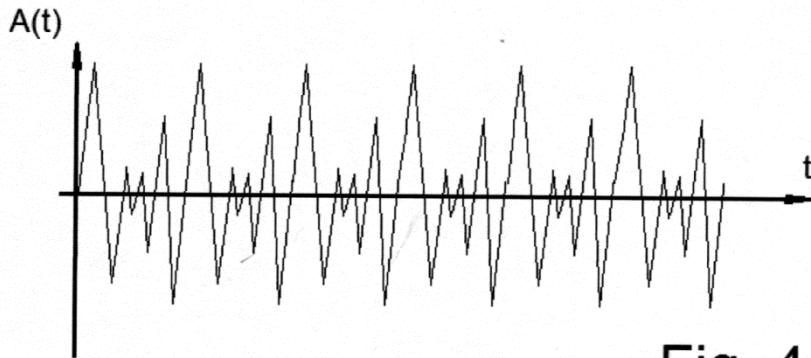


Fig. 4

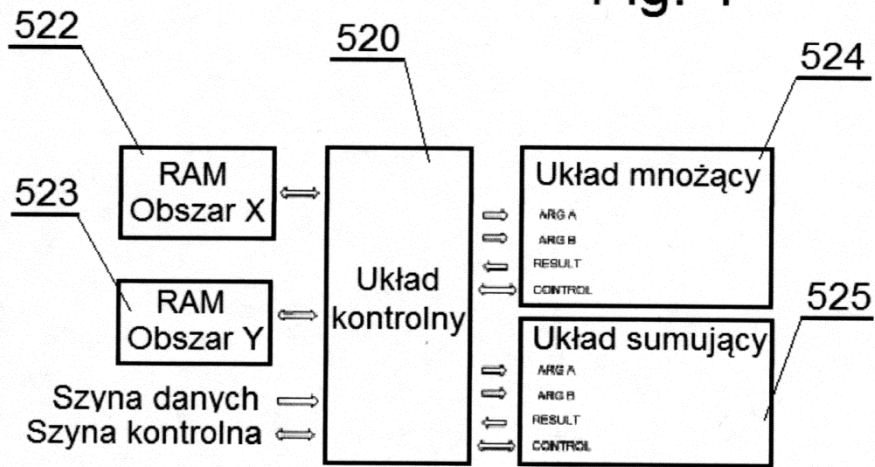


Fig. 5

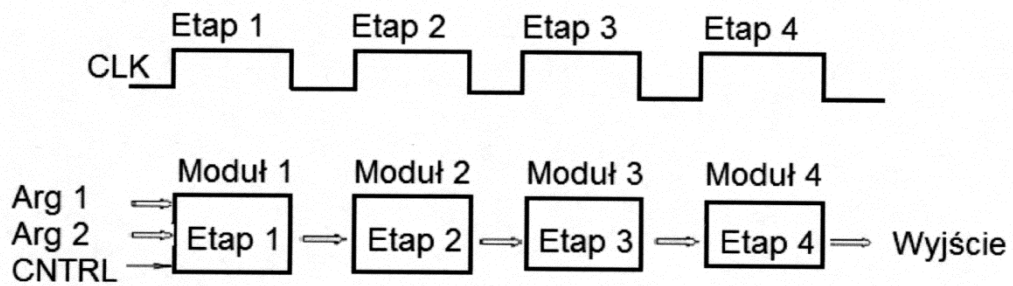


Fig. 6

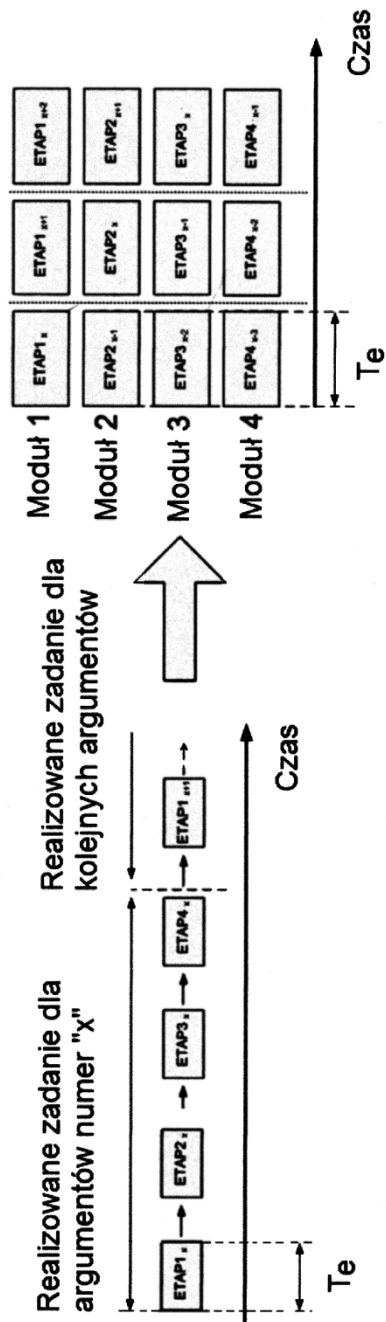


Fig. 7

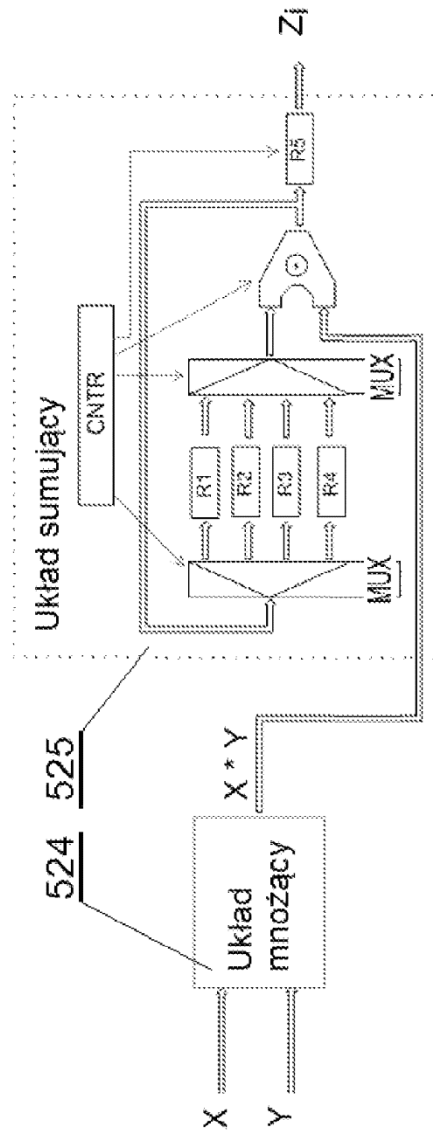


Fig. 8

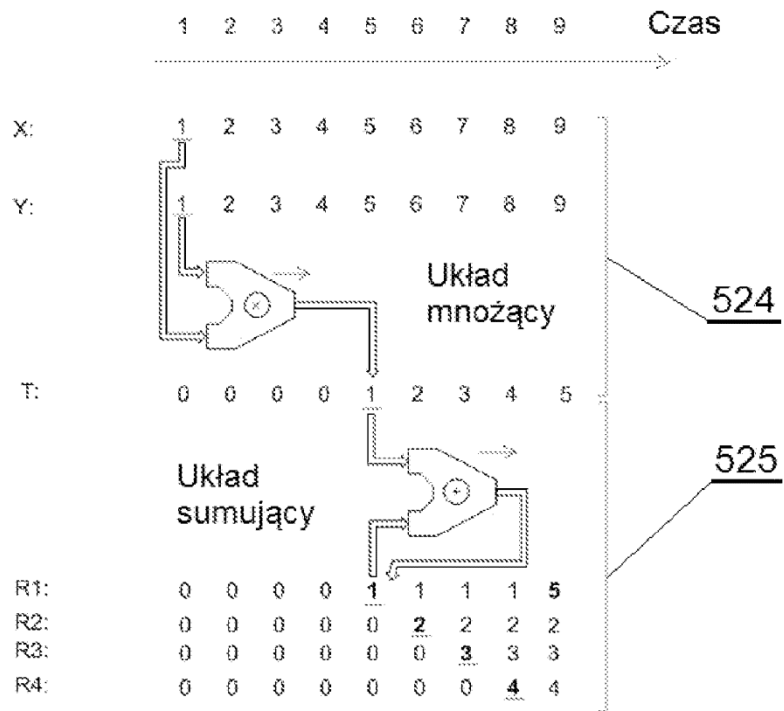


Fig. 9

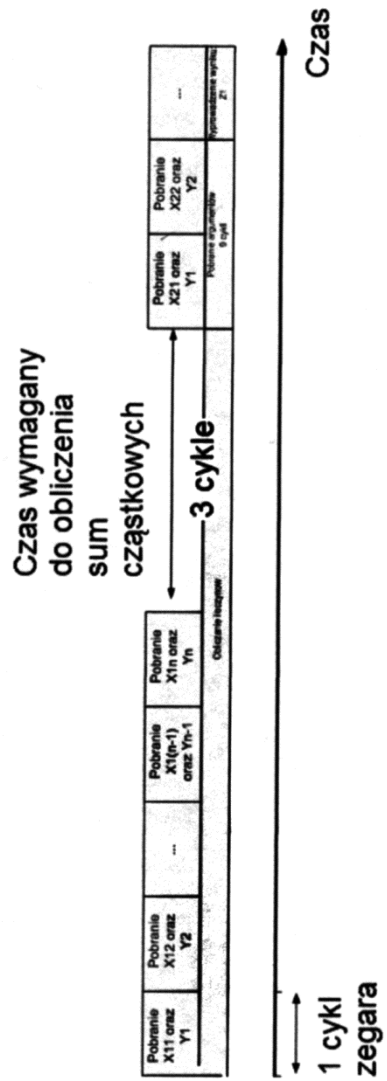


Fig. 10

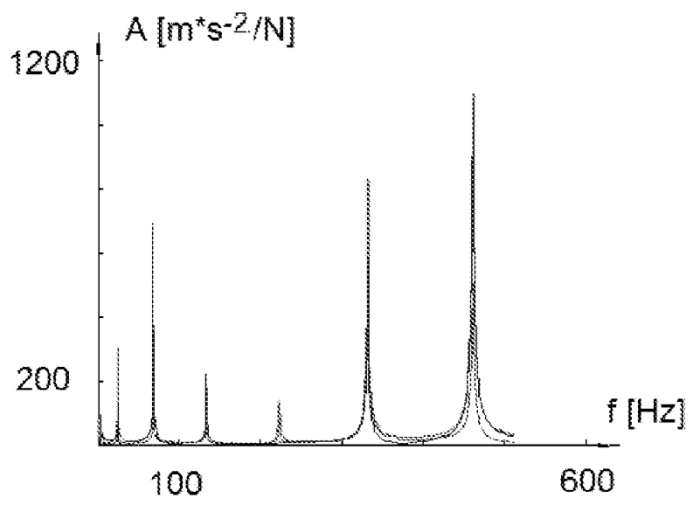


Fig. 11

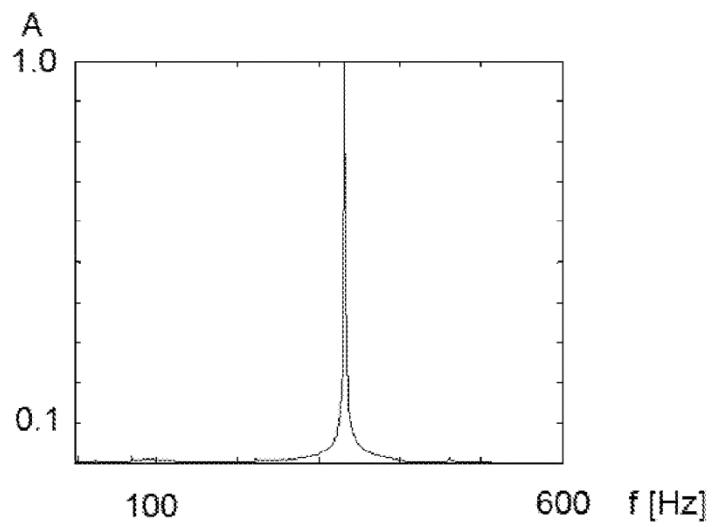


Fig. 12

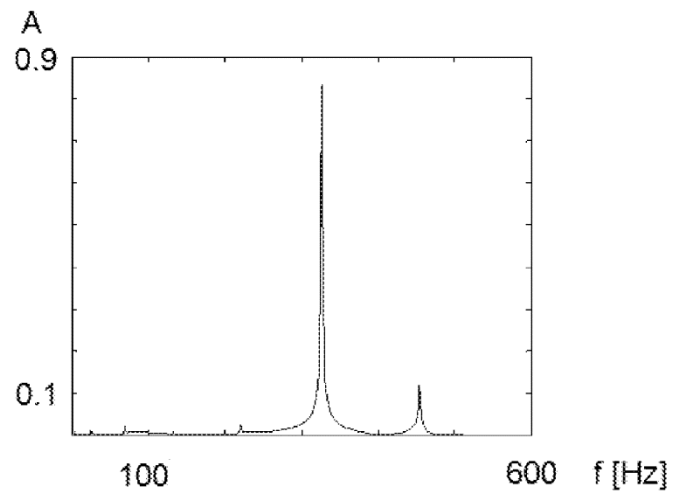


Fig. 13

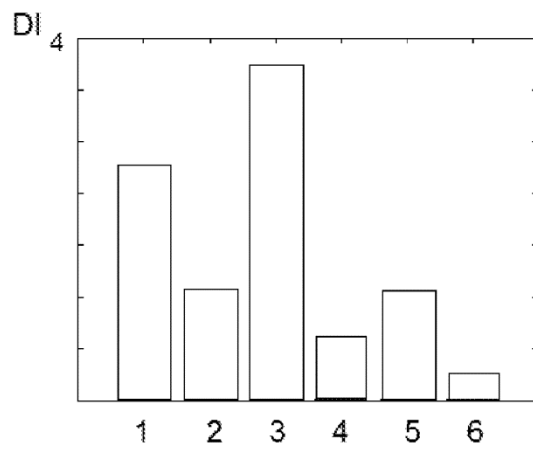


Fig. 14

