

# Programowe odtwarzanie dynamicznych wielkości wejściowych czujników z wyjściem częstotliwościowym

Jan Ryszard Jasik,  
Piotr Wardak \*

Opisano tor pomiarowy wspomaganego komputerowo rejestratora dynamicznych wielkości wejściowych czujników z wyjściem częstotliwościowym. System bazuje na szybkim konwerterze częstotliwość-kod, zrealizowanym z wykorzystaniem mikrosterownika rodziny '52 współpracującego z komputerem osobistym przez interfejs RS-232C. Podano sieć działań programu w języku assemblera, realizującego procedurę konwersji częstotliwość-kod. Zamieszczono diagramy programów napisanych w środowisku LabVIEW, obsługujących łącze RS-232C, realizujących proces odtwarzania dynamicznych przebiegów na podstawie dostarczanych przez konwerter kodów oraz wizualizujących na ekranie monitora te przebiegi.

**Numerical Reconstruction of Instantaneous Input Values of Sensors with Frequency Output.** This paper describes a slotted line of computer-aided recorders of dynamic input quantities from the sensors with frequency output. The system is based on a fast frequency-to-code converter realised with the use of a family '52 microcomputer, which co-operates a personal computer interface RS-232C. A follow chart in the assembler language, which realises the procedure of frequency-to-code conversion, is given. Diagrams of programs written in the LabVIEW environment are also presented. Those programs service the RS-232C connection and they realise reconstruction process of dynamic courses on the basis of converter-given codes. They also visualise the courses on the monitor screen.

## Wprowadzenie

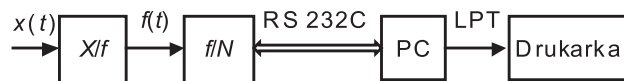
Programowe odtwarzanie dynamicznej wielkości mierzonej  $x(t)$  jest procedurą wyznaczania estymaty  $\hat{x}(t)$  na podstawie ciągu kodów  $N(t_i)$  reprezentujących dyskretne, rozstawione równomiernie próbki  $x(t_i)$  tej wielkości. Przyrządem pozwalającym efektywnie realizować odtwarzanie jest „inteligentny” przetwornik pomiarowy, który w swej klasycznej postaci [1] składa się z analogowego przetwornika wielkości mierzonej w napięciu ( $X/u$ ) oraz próbkującego przetwornika analogowo-cyfrowego (A/C) sprzężonego z odpowiednio oprogramowanym komputerem osobistym.

Struktura taka stała się na tyle tradycyjna, że również dla czujników o wyjściu częstotliwościowym ( $X/f$ ) proponuje się [2] konwersję częstotliwość-napięcie ( $f/U$ ) i dalsze klasyczne już postępowanie z użyciem przetwornika inteligentnego. W rozwiązaniach tych

pomija się jednak korzystne cechy metrologiczne właściwe sygnałowi częstotliwościowemu. Przyczyną tego stanu rzeczy są zapewne trudności związane z hardware'owym pomiarem [3, 4] częstotliwości chwilowej sygnału wyjściowego czujnika  $X/f$ , niosącego informację o chwilowych wartościach dynamicznej wielkości mierzonej  $x(t)$ .

W pracy przedstawiono sposób pokonania tych trudności, polegający na zastosowaniu szybkiego konwertera częstotliwość-kod ( $f/N$ ) zaimplementowanego w strukturze mikrokomputera jednoukładowego, współpracującego z komputerem osobistym poprzez standardowy interfejs RS-232C. Opisano szybki konwerter  $f/N$  oparty na jednochipowym mikrokontrolerze rodziny 80C51. Konwerter ten oprócz realizacji procedury pomiarowej przesyła do komputera osobistego, poprzez standardowy interfejs szeregowy RS-232C, dane o zmierzonej

\* Dr inż. Jan Ryszard Jasik, mgr inż. Piotr Warda – Politechnika Lubelska, Katedra Automatyki i Metrologii



Rys. 1. Tor pomiarowy rejestratora

częstotliwości chwilowej, w celu dalszego przetwarzania oraz rekonstrukcji wielkości mierzonej  $x(t)$  i jej rejestracji w trybie *off line*. Zamieszczono sieć działań assemblerowego programu zaimplementowanego w mikrosterowniku oraz diagramy – napisanego w środowisku LabVIEW – programu obsługi łącza RS-232C, rekonstrukcji wielkości mierzonej oraz jej wizualizacji na wirtualnym panelu rejestratora.

### Zasada konwersji

Tor pomiarowy rejestratora jest przedstawiony na rys. 1. W ogólnym przypadku częstotliwość  $f(t)$  sygnału wyjściowego czujnika  $X/f$  jest modulowaną funkcją czasu o postaci:

$$f(t) = f_p \pm f_m x(t), \quad (1)$$

gdzie:

$f_p$  – częstotliwość nośna odpowiadająca początkowej wartości wielkości mierzonej  $x(t)$ , przy czym  $0 \leq x(t) \leq 1$ ,  $f_m$  – dewiacja częstotliwości zawierająca informację o wartości chwilowej wielkości mierzonej.

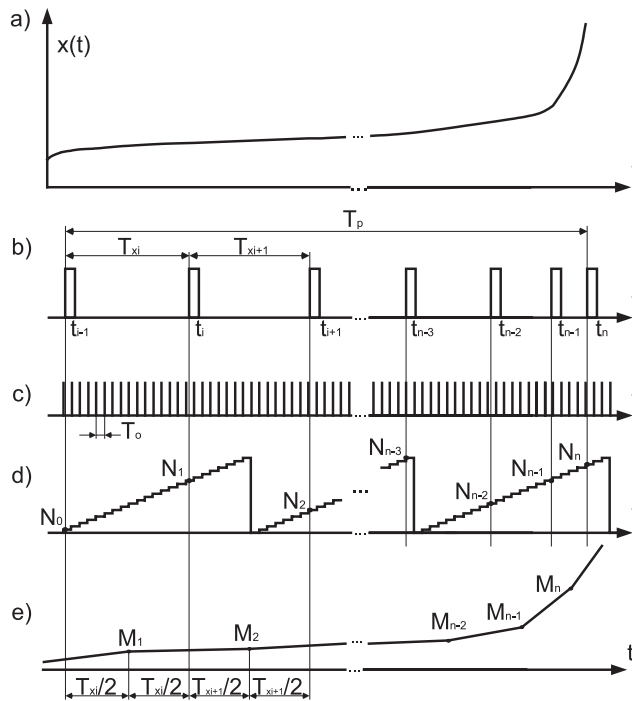
Częstotliwość chwilową sygnału wyjściowego czujnika  $X/f$  wyznacza się jako odwrotność czasu międzyimpulsowego  $T_{xi} = t_i - t_{i-1}$  (rys. 2b) zgodnie ze wzorem:

$$f_{xi}(t) = \frac{1}{t_i - t_{i-1}} = \frac{1}{T_{xi}} \quad (2)$$

gdzie:  $t_i$  – chwile, w których pojawiają się charakterystyczne zbocza sygnału wyjściowego czujnika  $X/f$ .

Procedura pomiaru częstotliwości chwilowej  $f_{xi}(t)$  dla celów rekonstrukcji reprezentowanej przez nią wielkości  $x(t)$  (rys. 2a), wymaga wyznaczenia czasów trwania wszystkich przedziałów międzyimpulsowych  $T_{xi}$  (rys. 2b) w zadanym czasie pomiaru  $T_p$ . Zadanie to może być zrealizowane z użyciem dwóch liczników odczytywanych naprzemiennie. Korzystniejszym rozwiązaniem dla implementacji komputerowej jest użycie jednego licznika zliczającego impulsy zegarowe o częstotliwości  $f_0 = 1/T_0$  (rys. 2c) w pętli z przepełnieniami, odczytywanego „w locie” w chwilach, odpowiadających chwilom występowania charakterystycznych zboczy sygnału mierzonego [5]. O dokładności toru rejestratora decyduje z jednej strony błąd kwantowania  $\gamma_{kw}$ , nieunikniony w procesie konwersji  $f/N$ , który może być oszacowany [5] zależnością:

$$\gamma_{kw} = \frac{f_{xi}(t)}{f_0} \quad (3)$$



Rys. 2. Przebiegi czasowe ilustrujące pracę konwertera częstotliwość-kod: a) przebieg wielkości mierzonej, b) impulsy sygnału wyjściowego konwertera  $X/f$ , c) impulsy generatora zegarowego, d) kod wyjściowy licznika zliczającego w pętli, e) odtworzony przebieg wielkości mierzonej

oraz właściwy konwerterowi błąd uśredniania [6], który można wyrazić wzorem:

$$\gamma_{usr} = \frac{\sin 0,5\Omega T_{xi}}{0,5\Omega T_{xi}} - 1 \cong \frac{\Omega^2 T_{xi}^2}{24}, \quad (4)$$

gdzie:  $\Omega = 2\pi f_{xi}(t)$ .

Wyniki konwersji otrzymywane z nierównomiernym krokiem są przyporządkowywane chwilom odpowiadającym środkom  $t_n$  kolejnych przedziałów międzyimpulsowych, określanym przez rekurencyjny wzór:

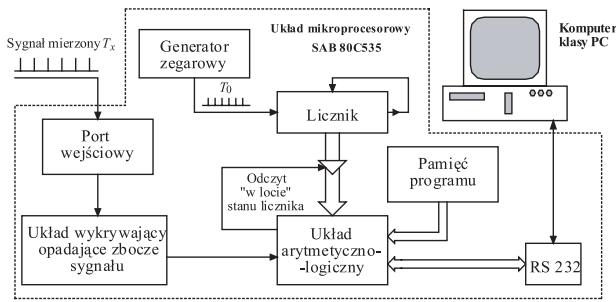
$$t_n = \frac{T_n}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} T_{xi}, \quad (5)$$

gdzie:  $n$  – numer bieżącego przedziału międzyimpulsowego.

W procesie rekonstrukcji wielkości wejściowej nieunikniony jest również błąd aproksymacji  $\gamma_a$  [6], którego wartość maksymalną przy zastosowaniu aproksymacji liniowej wyraża reszta szeregu Lagrange'a o postaci:

$$\gamma_a = \frac{1}{8} f''_{xi}(t) T_{xi}^2. \quad (6)$$

Sposób realizacji takiej procedury pomiarowej w aplikacji na mikrokomputer jednoukładowy [7, 8] jest przedstawiony na rys. 3. Kluczową rolę w układzie pełni licznik, zliczający w pętli impulsy o częstotliwości  $f_0$ , uzyskiwane z podziału przez 12 częstotliwości oscylatora taktującego mikrokontroler. W mikrokon-



Rys. 3. Konfiguracja mikrokomputera jednodukadowego do pomiarów częstotliwości chwilowej

trolerze rolę tego licznika pełni układ czasowo-licznikowy (*timer*) oznaczony T2 [8]. Zadaniem konwertera jest mierzenie kolejnych przedziałów międzyimpulsowych sygnału wejściowego czujnika  $X/f$ , gromadzenie wyników pomiaru w pamięci RAM mikrokontrolera i przesyłanie ich do komputera nadrzędnego poprzez interfejs RS-232C.

W celu zapewnienia systemowi możliwości płynnego działania, do obróbki sygnału wejściowego zastosowano przerwanie mikroprocesora. Wykorzystanie przerwania zapobiega opóźnieniom rejestracji wynikającym z właściwości asemblera, wymagającego dodatkowych cykli maszynowych podczas obróbki danych i umieszczenia ich w pamięci [8]. Funkcję taką mają mikroprocesory rodziny '52 [7, 8] wyposażone w licznik T2, który pozwala na sprzętową rejestrację aktualnej zawartości licznika przy opadającym lub narastającym zboczu wejściowego sygnału, wyzwalającego proces zliczania.

Użyto dwóch przerwań: przerwanie INT3 oraz przerwanie przepełnienia licznika T2. Procedura obsługi INT3 rozpoczyna się od odczytu zatrzaśniętej „w locie” wartości licznika z rejestru CRC. Następnie zostaje obliczona liczba impulsów  $N_{xi}$  w przedziale międzyimpulsowym, na podstawie bieżącej i poprzedniej wartości licznika, a także jej zapamiętanie w rejestrach R1 i R2 procesora. Aktualną dla przedziału  $T_{xi}$  wartość licznika  $N_{xi}$  wyraża kod obliczany według wzoru:

$$N_{xi} = N_i + N_{max} * K - N_{i-1} \quad (7)$$

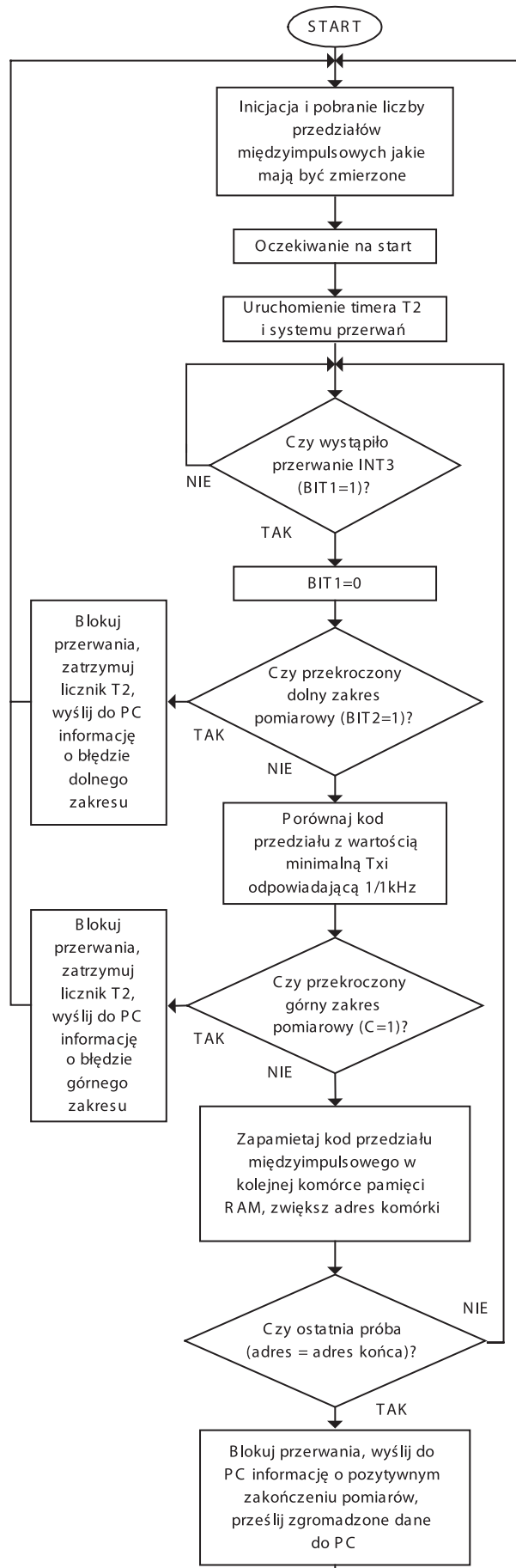
gdzie:

$N_i$  oraz  $N_{i-1}$  – kody licznika w chwilach odpowiednio  $t_i$  oraz  $t_{i-1}$ ,

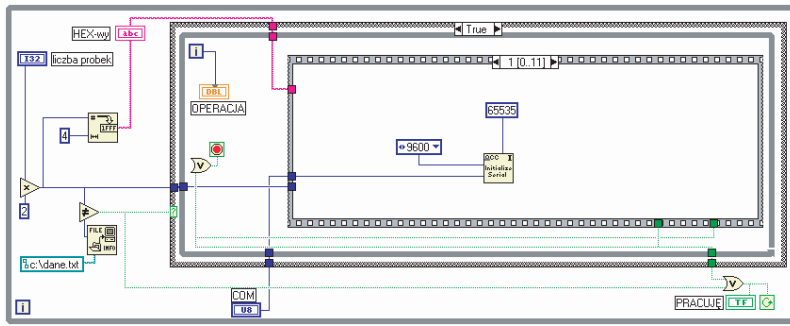
$N_{max}$  – pojemność licznika,

$K$  – liczba przepełnień licznika w czasie pomiaru każdego z przedziałów  $T_{xi}$ . Dodatkowo bieżąca wartość licznika jest zapamiętywana do wykorzystania w następnym pomiarze.

Procedura przypisana do przerwania od licznika T2 ma za zadanie sprawdzanie liczby przepełnień i kontrolę górnego zakresu pomiarowego. Przepełnienia licznika są uwzględniane w obliczeniach w przypadku pomiaru długiego przedziału czasu, po czym znacznik przepełnienia zostaje wyzerowany. Następnie kody te są pod-



Rys. 4. Sieć działań programu głównego konwertera



Rys. 5. Diagram obsługi portu szeregowego

dawane przetwarzaniu mającemu na celu obliczenie częstotliwości chwilowej  $f_{xi}(t)$  według wzoru:

$$f_{xi}(t) = \frac{1}{T_{xi}} = \frac{f_0}{N_i + N_{max}K - N_{i-1}}, \quad (8)$$

gdzie:  $f_0$  – częstotliwość generatora zegarowego.

Dzięki zastosowanej programowej kontroli wypełnienia licznika, maksymalny przedział międzyimpulsowy  $T_{xi}$  może być dowolnie długi. Maksymalna wartość mierzonej częstotliwości (minimalny przedział międzyimpulsowy  $T_{xi}$ ) jest ograniczona dopuszczalnym błędem kwantowania  $\gamma_{kw}$  i może być oszacowana z zależności:

$$f_{xi\ max} = \frac{f_0 \gamma_{kw} \%}{100}. \quad (9)$$

### Oprogramowanie konwertera częstotliwość kod

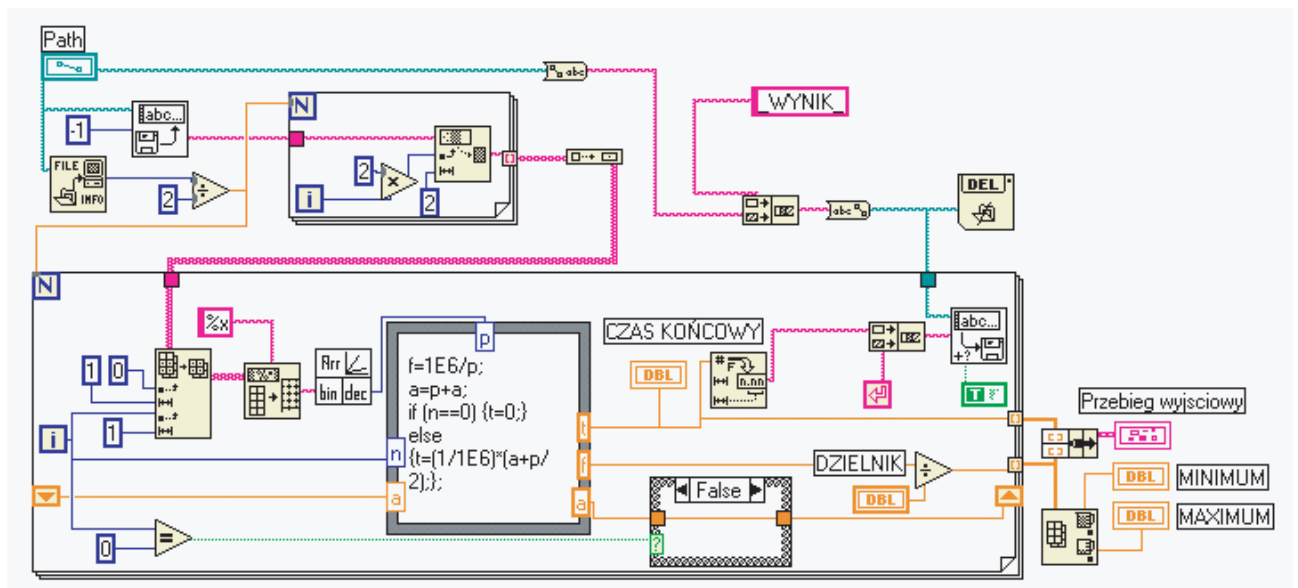
Program główny konwertera  $f/N$ , którego sieć działań zamieszczono na rys. 4, rozpoczyna działanie od

połączenia z komputerem nadrzędnym i pobrania liczby przedziałów międzyimpulsowych, które ma zmierzyć. Po otrzymaniu rozkazu rozpoczęcia pomiarów zostaje uruchomiony licznik T2 i system przerwań. Następnie, po otrzymaniu sygnału o wystąpieniu przerwanienia INT3, uzyskany wynik jest sprawdzany pod względem poprawności zakresu, tj. czy nie został przekroczony od dołu lub od góry zakres pomiarowy. W wypadku stwierdzenia przekroczenia, program przerywa pomiary i wysyła do komputera nadrzędnego informację o błędzie.

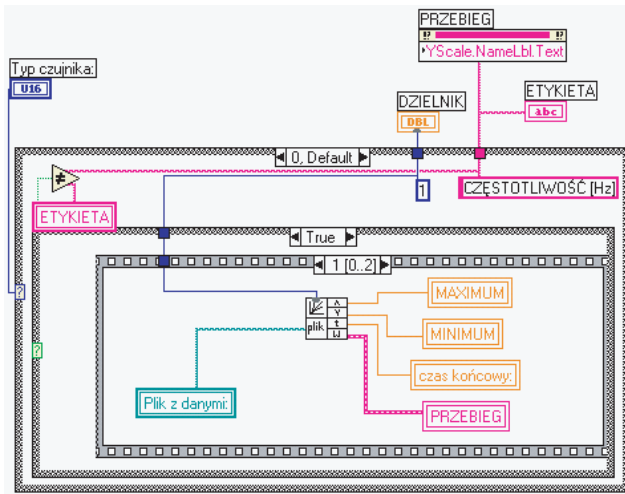
W przeciwnym wypadku pomiaru jest zapisany do pamięci RAM komputera i cykl pomiarowy powtarza się aż do osiągnięcia zadanej liczby przedziałów międzyimpulsowych, po czym przerwanienia są blokowane, komputer PC otrzymuje informację o pozytywnym zakończeniu pomiarów i zostają do niego przesłane uzyskane dane pomiarowe. W eksperymencie wykorzystano, oprogramowany w assemblerze, mikroprocesor SAB 80C535 [8].

### Oprogramowanie komputera nadrzędnego

Oprogramowanie komputera nadrzędnego zostało napisane w języku G, stosowanym w środowisku LabVIEW 6i [9]. Komputer osobisty wymienia informacje i dane z konwerterem  $f/N$  za pośrednictwem interfejsu RS-232C. Procedura ta rozpoczyna działanie od kontroli poprawności transmisji, następnie odbywa się wysłanie danych o pomiarze do konwertera i odbiór uzyskanych wyników. Otrzymane dane pomiarowe są każdorazowo automatycznie zapisywane na dysku w pliku *dane.txt*. Na rys. 5 pokazano fragment programu ob-



Rys. 6. Diagram odtworzenia zarejestrowanego przebiegu



Rys. 7. Fragmenty diagramu programu głównego

sługujący transmisję danych między komputerem osobistym i mikrokontrolerem. Struktura SEQUENCE jest ustawiona w oknie inicjacji portu szeregowego. Z lewej strony rysunku znajdują się elementy ustalające liczbę mierzonych przez konwerter  $f/N$  przedziałów międzyimpulsowych  $T_{xi}$ .

Procedura rekonstrukcji (rys. 6) dynamicznej wielkości  $x(t)$  wymaga pobrania z pliku *dane.txt* reprezentacji kodowych mierzonych przedziałów międzyimpulsowych i obliczenie, zgodnie ze wzorem (8), odpowiadających im częstotliwości.

Procedura rozpoczyna działanie od ustalenia liczby powtórzeń pętli odczytującej dane z pliku. Po tym następuje utworzenie wektora dwubajtowych liczb szesnastkowych. Są one konwertowane na liczby dziesiętne i poddawane obliczeniom w oknie formuły. Widać w nim kod napisany w języku C. Dzięki temu uzyskuje się wartości częstotliwości dla poszczególnych czasów międzyimpulsowych i położenie wyliczonych punktów w oknie czasowym. Z ciągu wyników buduje się macierz o wymiarach narzuconych przez zadaną liczbę przedziałów międzyimpulsowych. Tak zgromadzone dane są przekazywane do modułu "XY Graph.vi" rysującego odtwarzany przebieg. Poza wizualizacją zrekonstruowanego sygnału program podaje także minimalną i maksymalną wartość wielkości mierzonej  $x(t)$ , uzyskaną z wyliczeń oraz całkowity czas pomiaru. Dodatkowo podprogram, podczas wykonywania działań matematycznych, zapamiętuje na dysku czasy międzyimpulsowe w postaci dziesiętnej w specjalnie stworzonym pliku tekstowym. Nazwa tego pliku jest identyczna ze źródłowym, natomiast do rozszerzenia jest dodawany wyraz „\_WYNIK\_”, dzięki czemu łatwo można zidentyfikować i posortować dane oraz rezultaty pomiarów. Tak spreparowane dane można obrabiać na dowolnym komputerze wyposażonym w arkusz kalkulacyjny akceptujący dane w plikach tekstowych.

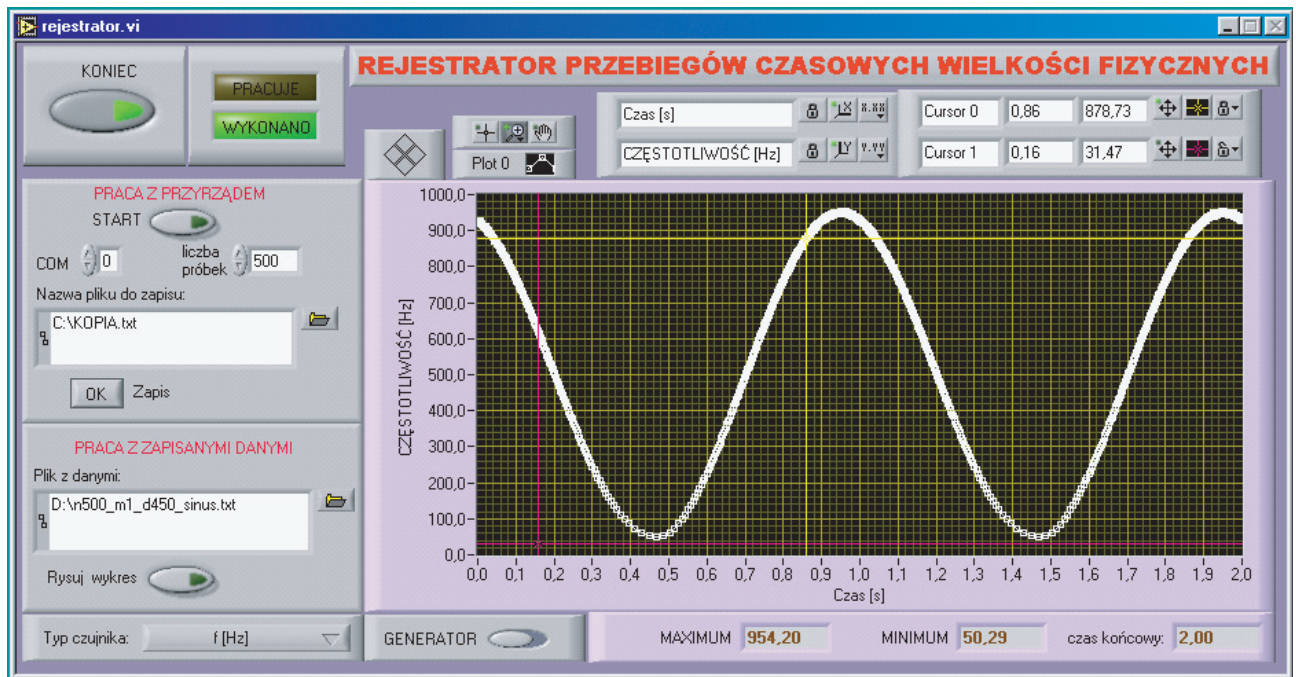
Program główny nadzoruje pracę podprogramów. Na zamieszczonym na rys. 7 fragmencie znajduje się omówiony wcześniej moduł wyliczający punkty odtwarza-

nego przebiegu. Do procedury odtwarzającej rejestrowany przebieg są dostarczane informacje określające sposób rekonstrukcji. Odbierane są od niej dane niezbędne do wykreślenia przebiegu  $x(t)$  na panelu głównym przedstawionym na rys. 8.

Dopasowanie programu do aktualnej charakterystyki statycznej czujnika  $X/f$  odbywa się poprzez wprowadzenie z panelu rejestratora rodzaju czujnika za pomocą kontrolki „TYP CZUJNIKA”. Zmienne „DZIELNIK” i „ETYKIETA” (rys. 7) służą do ustawienia odpowiednio: czułości przetwornika i etykiety osi rzędnych wykresu. Zajętość programu, tj. pomiar i obliczanie wyników, sygnalizuje wskaźnik „PRACUJĘ”, zaś możliwość zmiany konfiguracji i uruchamiania kolejnych pomiarów lub otwierania plików wskaźnik „WYKONANO”. Jest możliwa praca z przyrządem lub z zapisanymi na dysku danymi; wówczas nie jest potrzebny konwerter  $f/N$ . Przed rozpoczęciem pomiaru należy dołączyć numer portu szeregowego, do którego jest dołączony konwerter  $f/N$  oraz liczbę przedziałów międzyimpulsowych jakie mają być zmierzone. Po wykonanym pomiarze (uruchamianym przyciskiem „START”) przebieg zostaje automatycznie narysowany. Archiwizację uzyskanych wyników można uzyskać, zapisując dane odczytane z konwertera na dysku pod nazwą umieszczoną w oknie „Nazwa pliku do zapisu:”. Przy pracy w trybie *offline* należy tylko wpisać nazwę pliku z wynikami w oknie „Plik z danymi:” i uruchomić rysowanie przebiegu przyciskiem „Rysuj wykres”. Program umożliwia powiększanie wykresu w celu analizy jego interesujących fragmentów. Dwa ruchome kursory pozwalają precyzyjnie ustalić wartości czasu i częstotliwości (lub innej wielkości umieszczonej na osi rzędnych) przyporządkowane danemu punktowi, odpowiadającemu środkowi przedziału międzyimpulsowego (rys. 2). Zakończenie programu jest możliwe po naciśnięciu przycisku „KONIEC”.

## Podsumowanie

Zaprezentowana w pracy idea została sprawdzona w układzie rzeczywistym, który miał strukturę identyczną ze strukturą przedstawioną na rys. 1. W miejsce przetwornika  $X/f$  zastosowano cyfrowy generator [10] pracujący w trybie modulacji częstotliwości sygnału impulsowego o standardzie TTL i częstotliwości w zakresie od 15 Hz do 1 kHz. Pojawiający się na ekranie monitora specjalnie opracowany przyjazny interfejs użytkownika wskazuje eksperymentatorowi „krok po kroku” czynności, które powinien wykonać by otrzymać na ekranie przebieg czasowy rejestrowanej wielkości fizycznej. Prezentowane na wirtualnym panelu rejestratora wykresy przedstawiają przebiegi dynamicznej wielkości  $x(t)$ . Rekonstrukcja przebiegów odbywa się na podstawie, uzyskiwanych z nierównomiernym krokiem (właściwość konwersji  $f/N$ ), „próbek” reprezentujących średnią wartość dynamicznego procesu  $x(t)$  w czasie odpowiadającym przedziałom między-



Rys. 8. Widok wirtualnej płyty czołowej rejestratora

impulsowym  $t_i - t_{i-1}$  [11] dzięki zastosowaniu aproksymacji liniowej. W dolnej części ekranu znajdują się dwie liczby opisujące w sekundach skrajne wartości osi czasowej. Widoczny na rys. 8 wykres jest rysowany na podstawie wszystkich zmierzonych przedziałów międzyimpulsowych. Przy odpowiednio wysokiej zadanej ich liczbie czytelność wykresu może być niezadowalająca, dlatego też program ma wbudowaną lupę czasową, umożliwiającą powiększenie dowolnego obszaru osi czasu. Wyniki eksperymentu są zapamiętywane w specjalnym pliku, dzięki czemu użytkownik ma możliwość wielokrotnego ich wykorzystania bez konieczności zbędnego powtarzania pomiarów. Dodatkowo jest to zabezpieczenie przed przypadkową utratą danych pomiarowych.

Wykonane urządzenie zaprojektowano do rejestracji wielkości fizycznych reprezentowanych przez sygnały impulsowe zmodulowane częstotliwościowo. Należy jednak nadmienić, że jest ono szybkim przyrządem do pomiaru stykających się przedziałów czasu. Tę właściwość można wykorzystać do rejestracji częstotliwości chwilowej, śledzenia odchyłek częstotliwości chwilowej od jej wartości znamionowej (np. odchyłek częstotliwości sieciowej od 50 Hz) itp.

## Bibliografia

- [1] Jakubiec J.: *Bieżące programowe odtwarzanie wartości chwilowych dynamicznych przebiegów wejściowych nieliniowych przetworników pomiarowych*, Zeszyty Naukowe PŚl., Nr 111, Gliwice, 1980.
- [2] Kitchin Ch., Quinn D., Sherman S.: *Single - Supply Acceleration-to-Frequency Circuits*, Analog Dialogue. <http://www.analog.com/librarian/analogDialogue/archives/29-3/single.html>.
- [3] Saha A. R., Mazumder B. C.: *A Flash-Type Frequency-to-Code Converter*, *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, vol.72, NO 4, APRIL 1984 p. 530-531.
- [4] Smagin Ju. A. i in.: *Bystrodiestwujuszczij priobrazowatel „czastota-kod”*, *PriBORostrojenije*, No 11, 1984, s. 44-48.
- [5] Jasik J. R., Pawłowski E.: *Pomiary częstotliwości chwilowej sygnałów elektrycznych*, 1998, PAK Nr 2.
- [6] Jasik J. R.: *Przetwarzanie sygnałów pomiarowych w systemach sz częstotliwościowym nośnikiem informacji*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2003.
- [7] *Microcomputer Components SAB 80515/SAB 80C515 8-Bit Single-Chip Microcontroller Family*, Siemens AG 1995.
- [8] Janiczek J., Stępień A.: *Mikrokontrolery*, Wydawnictwo Centrum Kształcenia Praktycznego, Wrocław 1997.
- [9] National Instruments LabVIEW User Manual, July, 2000 Edition.
- [10] *HP 33120A Function Generator/Arbitrary Waveform Generator, User's Guide*, Hewlett Packard, 1994.
- [11] Jasik J. R., Warda P.: *Komputerowa rejestracja przebiegów czasowych reprezentowanych przez sygnały impulsowo-częstotliwościowe*, Varia Informatica (red. Miłosz M. i Muryjas P.), wyd. Polskie Towarzystwo Informatyczne, Lublin, 2003., s. 61-68.