

Ocena parametrów wirtualnych przyrządów pomiarowych

Wiesław Winiński*

Wirtualny przyrząd pomiarowy (WPP) może być oceniany według kryteriów metrologicznych i informatycznych. Głównym kryterium oceny metrologicznej jest niepewność wyników pomiarów. Kryteria informatyczne powinny uwzględniać specyfikę WPP. Kryterium o charakterze metrologiczno-informatycznym jest kryterium szybkości działania WPP. W artykule omówiono powyższe kryteria, skoncentrowano się na kryterium oceny szybkości działania WPP, sygnalizując przyczyny trudności związanych z oszacowaniem czasu działania WPP.

Assessment of Virtual Instruments. A Virtual Instrument (VI) can be assessed using metrological and informatics criteria. The main metrological criterion is an uncertainty of measurement results. The informatics criterion should take account of VI specificity. A mixed, metrological-informatics criterion can be treated the VI speed criterion. In the paper, all above criteria of assessment of the VI's are discussed, focusing on the factors influencing the VI speed.

Wprowadzenie

Przyrząd wirtualny może być zdefiniowany jako przyrząd składający się z komputera ogólnego przeznaczenia i dołączonych do niego – poprzez dowolny kanał komunikacyjny – sprzętowych bloków funkcjonalnych (wewnętrznych i/lub zewnętrznych), przy czym funkcje i możliwości przyrządu są określone zarówno przez sprzęt, jak i oprogramowanie, a obsługa odbywa się z wykorzystaniem graficznego interfejsu użytkownika [1].

Struktura przyrządu wirtualnego obejmuje komputer powszechnego użytku oraz bloki sprzętowe, takie jak: pakiety akwizycji danych, generacji sygnałów, moduły VXI, przyrządy IEC-625 i inne. Każdy z tych bloków jest dołączony bezpośrednio do magistrali komputera (jako karta), lub poprzez interfejs (jako urządzenie zewnętrzne). Przyrząd wirtualny może być projektowany i budowany zarówno przez producenta urządzeń pomiarowych, jak i przez użytkownika, który definiuje jego przeznaczenie i funkcje konstruując odpowiednie oprogramowanie. Oprogramowanie to integruje komputer i pomiarowe bloki sprzętowe, tworząc z nich przyrząd; jest ono zatem integralną częścią przyrządu wirtualnego. Należy wspomnieć o tym, że w wielu współczesnych przyrządach pomiarowych coraz więcej funkcji przetwarzania sygnałów pomiarowych realizuje się programowo za pomocą mikroprocesorów, jednak nie nazywamy ich przyrządami wirtualnymi. Nazwa ta jest zarezerwowana dla tych przyrządów, których integralną częścią jest komputer ogólnego prze-

znaczenia, realizujący funkcje sterowania, przetwarzania danych i wizualizacji wyników.

Do najistotniejszych cech przyrządu wirtualnego należy zaliczyć jego funkcjonalną elastyczność (rekonfigurowalność). Oznacza ona, że jeden sprzętowy blok funkcjonalny (lub ich zbiór) umożliwia stworzenie szerokiego zbioru różnych przyrządów wirtualnych realizujących bardzo różnorodne funkcje. Fakt ten, jak również redukcja części sprzętowej przyrządu wirtualnego do niezbędnego minimum i przesunięcie punktu ciężkości przy projektowaniu przyrządu na oprogramowanie, spowodowały znaczne zmniejszenie kosztu pojedynczego przyrządu. Ważną cechą wirtualnego przyrządu pomiarowego jest jego otwarta architektura, co oznacza m.in. dostęp do magistrali interfejsu łączącego komputer z częścią sprzętową. Inną, bardzo istotną właściwością wirtualnego przyrządu jest możliwość łączenia się komputera z częścią pomiarową przyrządu poprzez sieci teleinformatyczne (Internet, GSM itp.).

Kryteria oceny WPP

Każdy WPP jest zwykle oceniany według kryteriów metrologicznych i informatycznych [2]. Głównym kryterium oceny metrologicznej WPP spełniającego wymagania funkcjonalne, jest niepewność wyników pomiarów. Kryteria informatyczne oceny jakości oprogramowania WPP są typowymi kryteriami stosowanymi przy ocenie projektów informatycznych, z uwzględnieniem specyfiki przyrządów wirtualnych. Kryterium o cha-

* Dr hab. inż. Wiesław Winiński – Politechnika Warszawska, Instytut Radioelektroniki

rakterze mieszanym (metrologiczno-informatycznym) jest kryterium szybkości działania WPP, a w szczególności szybkości działania jego części programowej przy danej części sprzętowej.

Niepewność wyników pomiarów

Niepewność wyników pomiarów wykonywanych wirtualnym przyrządem pomiarowym zależy od niepewności przetwarzania analogowo-analogowego (a/a), analogowo-cyfrowego (a/c) oraz od niepewności przetwarzania cyfrowo-cyfrowego (c/c) realizowanego w komputerze.

Niepewność przetwarzania a/a i a/c (oznaczonego dalej łącznie jako a/a/c), spowodowaną czynnikami wewnętrznymi i zewnętrznymi, charakteryzuje się zwykle następującymi parametrami [3]:

- rozdzielczość przetwarzania
- przesunięcie zera charakterystyki przetwarzania a/c (offset) i jego dryft temperaturowy
- niestalość wzmocnienia
- nieliniowość różniczkowa i całkowa charakterystyki przetwarzania a/a/c
- dryft temperaturowy sygnału odniesienia
- poziom szumów własnych
- czas ustalania sygnału mierzonego
- nieokreśloność aperturowa (ang. jitter).

Przyjęcie właściwego modelu toru pomiarowego w istotny sposób wpływa na szacowanie niepewności wyników przetwarzania a/a/c. Znaczna część prac naukowo-badawczych z zakresu metrologii poświęcona jest tej tematyce. Metody analizy niepewności stanowią dobrze wyodrębniony dział metrologii. Liczba publikacji dotyczących tych zagadnień jest znaczna. Wspomnijmy tylko kilkanaście z nich z ostatniego okresu [4-15].

Niepewność toru przetwarzania danych (c/c) realizowanego w komputerze zależy od:

- klasy zastosowanych algorytmów przetwarzania danych
- sposobu ich programowej implementacji (z uwzględnieniem precyzji procesora cyfrowego)
- niepewności danych pomiarowych podlegających przetwarzaniu.

Dwa główne podejścia do oceny niepewności wyników pomiarów wykonywanych wirtualnym przyrządem pomiarowym, to:

- metoda symulacji statystycznej (metoda Monte Carlo)
- metoda analityczna oparta na zaleceniach ISO [16], [17].

Bardziej uniwersalną, ale droższą pod względem nakładu obliczeniowego, jest metoda pierwsza. Wymaga ona przyjęcia zakresów zmienności wszystkich wielkości charakteryzujących istotne źródła niepewności przetwarzania a/a/c na podstawie wiedzy o zjawiskach wpływających na działanie toru przetwarzania a/a/c. Sygnały o wartościach nominalnych są zaburzone losowo zmieniającymi wartościami poszczególnych skła-

dowych źródeł niedokładności, a następnie podawane na tor przetwarzania c/c. Na podstawie wyników statystycznie wystarczającej liczby realizowanych eksperymentów obliczana jest estymata obciążenia i estymata odchylenia standardowego wyniku pomiaru. Ten drugi parametr jest standardową niepewnością wyników pomiaru. Zaletą tej metody jest możliwość uwzględniania efektu wypadkowego działania wszystkich czynników modelujących źródła niedokładności (niepewności). Przykład powyższego podejścia zaprezentowano w [18].

Metoda proponowana w [16] zakłada podział niepewności na dwa typy według metody ich szacowania:

- niepewności wyznaczone metodą typu A, czyli metodami statystycznymi (na podstawie otrzymanego rozrzutu wyników serii pomiarów)
- niepewności wyznaczone metodą typu B, czyli każdą inną metodą (niestatystyczną).

Podział niepewności na dwa typy odpowiada z grubsza błędom spowodowanym efektami przypadkowymi i błędom spowodowanym efektami systematycznymi. W przypadku niepewności typu A, na podstawie serii pomiarów oblicza się wartość średnią wielkości mierzonej oraz niepewność standardową. Znając wartość niepewności typu A i B wyznacza się niepewność złożoną jako pierwiastek sumy kwadratów obu niepewności oraz niepewność rozszerzoną. Wyznaczanie niepewności rozszerzonej (przedziału ufności) wymaga znajomości rozkładu błędów wypadkowych, co wiąże się z koniecznością przyjęcia pewnych założeń o rozkładach błędów składowych. Wyznaczanie rozkładów błędów składowych stwarza wiele problemów obliczeniowych. W pewnych szczególnych przypadkach można to zagadnienie sprowadzić do obliczania splotu rozkładów błędów składowych. Wykonując pomiary pośrednie, dla każdej pośredniej wielkości mierzonej wyznacza się niepewności typu A i B oraz niepewności złożone, a następnie składa się niepewności cząstkowe zgodnie z zasadą liniowej propagacji niepewności.

Zaletą metody proponowanej w [16], mimo żmudnych obliczeń, jest stosunkowo niewielki koszt obliczeniowy w porównaniu z metodą Monte Carlo, wadą - konieczność nie tylko założenia odpowiednich rozkładów prawdopodobieństwa poszczególnych czynników, ale również założenia korelacji między nimi (lub ich braku), co jest związane z ryzykiem nieadekwatności przyjętego modelu WPP i może prowadzić do błędnych oszacowań. Często stosuje się uproszczone szacowanie niepewności wyników pomiaru, bazujące na ogół na wytycznych podanych w [16], np. [3, 13, 19, 20, 21], na ogół z wykorzystaniem metod numerycznych, np. [3, 21].

Szybkość działania WPP

Specyficzną cechą WPP jest zależność jego szybkości działania nie tylko od sprzętowej części pomiarowej, ale również od komputera, na którym przyrząd jest zaimple-

mentowany. O ile szybkość działania tradycyjnych, autonomicznych przyrządów pomiarowych jest ściśle określona przez sztywną konstrukcję przyrządu, o tyle szybkość działania przyrządów wirtualnych jest zależna również od charakterystyk komputera, na którym WPP w danej chwili jest zainstalowany. Parametry komputera oraz oprogramowania systemowego i użytkowego w istotny sposób wpływają na szybkość działania całego WPP.

Czas działania każdego WPP składa się z czasów wykonania trzech podstawowych etapów działania przyrządu, które można ująć w dwie fazy:

Faza I

- akwizycja danych pomiarowych (przetwarzanie a/a i a/c)

Faza II

- przetwarzanie danych pomiarowych (przetwarzanie c/c)

- prezentacja wyników pomiaru (przetwarzanie c/a).

Wprowadźmy następujące oznaczenia:

t_{akw} - całkowity czas akwizycji danych pomiarowych, tzn. czas mierzony od chwili wyzwolenia pomiaru do chwili wprowadzenia do komputera wyniku pomiaru w postaci cyfrowej

t_{tr} - czas transmisji danych cyfrowych do komputera

t_{przetw} - całkowity czas przetwarzania c/c danych pomiarowych, tzn. czas mierzony od chwili wprowadzenia ich do komputera do chwili uzyskania żądanych wyników przetwarzania,

t_{wiz} - całkowity czas przetwarzania c/a wyników pomiaru, tzn. czas mierzony od chwili zakończenia przetwarzania c/c do chwili pojawienia się wyników na panelu graficznym WPP.

Czas akwizycji t_{akw} można zapisać jako sumę czasów przetwarzania analogowo-analogowego realizowanego przez czujnik pomiarowy oraz czasu przetwarzania analogowo-cyfrowego realizowanego przez przetwornik analogowo-cyfrowy.

$$t_{akw} = t_{aa} + t_{ac} \quad (1)$$

gdzie:

t_{aa} - czas działania czujnika pomiarowego,

t_{ac} - czas przetwarzania analogowo-cyfrowego.

Dla skupionych WPP z komunikacją przewodową czas transmisji danych t_{tr} zależy od wyboru rodzaju lokalnej magistrali pomiarowej i odpowiedniego protokołu komunikacyjnego. Dla danego skupionego WPP czasy te są dokładnie określone i przy prawidłowej konstrukcji WPP są pomijalnie małe w porównaniu z czasem akwizycji t_{akw} . Dla rozproszonych WPP czas transmisji danych może być największym składnikiem w bilansie czasu działania całego przyrządu. Ze względu na rodzaj kanałów i protokołów komunikacyjnych wykorzystywanych w RWPP nie jest możliwe dokładne określenie tego czasu. Zależy on m.in. od zajętości kanału komunikacyjnego (sieci komputerowej lub sieci komórkowej) przez innych użytkowników. Dalsza analiza czasowa przedstawiona w artykule dotyczy skupionych WPP z komunikacją przewodową.

Całkowity czas przetwarzania danych t_{przetw} zależy od sposobu realizacji części programowej WPP oraz od czynników sprzętowych komputera, na którym zainstalowano dany WPP:

$$t_{przetw} = f(\mathbf{h}_{PC}, \mathbf{s}_{PC}) \quad (2)$$

gdzie:

\mathbf{h}_{PC} - wektor czynników sprzętowych komputera

\mathbf{s}_{PC} - wektor czynników programowych WPP

Główne czynniki sprzętowe wpływające na t_{przetw} to: rodzaj procesora w komputerze PC, częstotliwość jego zegara, wielkość pamięci RAM.

Główne czynniki programowe to:

- algorytm przetwarzania c/c i sposób jego implementacji

- narzędzia programowe użyte do kodowania algorytmu przetwarzania c/c

- rodzaj systemu operacyjnego.

Czas wizualizacji wyników pomiaru t_{wiz} zależy głównie od użytej karty graficznej i od złożoności sposobu wyświetlania wyników pomiaru:

$$t_{wiz} = f(\mathbf{g}_{PC}, \mathbf{w}_{PC}) \quad (3)$$

gdzie:

\mathbf{g}_{PC} - wektor czynników sprzętowych komputera (głównie dotyczących karty graficznej)

\mathbf{w}_{PC} - wektor czynników programowych WPP (dotyczących sposobu wyświetlania wyników)

Niezbędnym elementem metodyki projektowania WPP powinna być metodyka analizy czasowej WPP, w tym metoda pomiaru czasu operacji składających się na kod programu WPP. Analiza taka jest szczególnie istotna dla WPP pracujących w czasie rzeczywistym. Większość narzędzi komputerowego wspomaganie projektowania tych przyrządów stosuje języki graficzne, w których dane operacje są realizowane przez zamknięte ikony graficzne (np. ikona FFT) o nieznannej liczbie taktów zegara potrzebnych do ich wykonania. Wówczas klasyczne metody szacowania czasów operacji (np. przez określanie liczby taktów zegara przypadających na daną operację) mają ograniczone zastosowanie.

Przyczyny trudności związanych z oszacowaniem czasu działania WPP są następujące:

- zależność czasu wykonania operacji programowych od konfiguracji komputerów użytkowników WPP, od systemów operacyjnych (MS Windows) i od efektywności zastosowanych algorytmów przetwarzania danych

- losowy rozrzut czasu wykonywania programowych modułów realizowanych w jednym cyklu pracy WPP

- istnienie w komputerze niestabilnych czasowo operacji związanych z pracą samego komputera (o różnym czasie trwania, wykonywanych w niemożliwych do przewidzenia momentach), które powodują znaczny wzrost rozrzutu czasu wykonania pełnego cyklu pracy WPP

– brak certyfikowanych przyrządów, metodyk i standardów oceny czasu wykonania zarówno poszczególnych operacji, jak i pełnego czasu wykonania pojedynczego cyklu pracy WPP projektowanych z wykorzystaniem graficznych, zintegrowanych środowisk programowych.

Propozycję oryginalnej metodyki analizy czasowej skupionych WPP z komunikacją przewodową, realizowanych w graficznych środowiskach programowych, umożliwiającą oszacowanie czasu działania oprogramowania WPP na danym komputerze, a także czasów poszczególnych części tego oprogramowania przedstawiono w [2].

Kryteria informatyczne

Ocenę jakości oprogramowania WPP można także przeprowadzić, posługując się typowymi dla informatyki kryteriami [22, 23], uzupełnionymi kryteriami specyficznymi dla WPP [24, 25, 26]. Te kryteria to: odporność, niezawodność, testowalność, rozszerzalność, otwartość, efektywność.

Odporność programu oznacza jego zdolność do akceptowalnego zachowania w warunkach nienormalnych, nieujętych w specyfikacji wymagań. Poprawność i odporność decydują łącznie o pewności działania oprogramowania.

Niezawodność programu oznacza konieczność stałej poprawnej pracy i jest ostrzejszym wymaganiem od odporności i pewności. Z drugiej strony, absolutna niezawodność jest niemożliwa do osiągnięcia i wymagania niezawodnościowe charakteryzuje się na ogół statystycznie, np. przez prawdopodobieństwo błędu lub awarii systemu. Wymagane jest, aby WPP w sytuacji awaryjnej mógł przejść w stan bezpieczny dla badanego obiektu. Dotyczy to w szczególności urządzeń generujących sygnały, których awaria w żadnym wypadku nie powinna uszkodzić badanego obiektu.

Testowalność oznacza łatwość sprawdzenia poprawności programu. Mieści się w tym zarówno łatwość przygotowania testów używanych w fazie testowania i oceny, jak i czytelność programu sprzyjająca wykrywaniu błędów podczas uruchamiania programu.

Rozszerzalność określa łatwość adaptowania programu do zmieniających się wymagań użytkownika. Wraz z testowalnością, cecha ta określa łatwość konserwacji programów.

Otwartość określa łatwość współpracy opracowanego programu z innym oprogramowaniem. Warunkiem osiągnięcia dużej otwartości jest jak najszersze stosowanie uznanych standardów w całym procesie projektowym. Dla WPP dotyczy to standardowych narzędzi projektowania (np. LabVIEW), standardowych protokołów komunikacyjnych (np. IEC-625 czy RS-232, a dla RWPP również TCP/IP) oraz standardowych organizacji plików i baz danych.

Efektywność określa skuteczność i oszczędność wykorzystania zasobów sprzętowych, takich jak procesor, pamięć i urządzenia peryferyjne komputera.

Kryterium istotnym dla WPP jest rozszerzalność jego części programowej, bowiem właśnie ona jest jedną z podstawowych cech tych przyrządów. Łatwość modyfikacji oprogramowania umożliwia dodawanie nowych funkcji przetwarzania, modyfikację istniejących funkcji, modyfikację graficznego interfejsu użytkownika. Kryterium to jest wyjątkowo łatwe do spełnienia w projektowaniu WPP z użyciem zintegrowanych środowisk programowych (np. LabVIEW, LabWindows/CVI, VEE), dlatego też zdecydowana większość projektowanych na świecie WPP realizowana jest z wykorzystaniem tych środowisk (głównie LabVIEW).

Specyficznym dla oceny WPP kryterium jest kryterium testowalności. Typowe dla informatyki metody testowania oprogramowania są niewystarczające, bowiem nie uwzględniają ścisłego współdziałania oprogramowania WPP z jego pomiarową częścią sprzętową. Interesującą propozycją nowego podejścia do testowania przyrządów wirtualnych jest nowa, parametryczna metoda funkcjonalnego testowania WPP przedstawiona w [27].

Podsumowanie

Wirtualne przyrządy pomiarowe (WPP) na stałe zdomowały się w rzeczywistości metrologicznej. Wiele opracowań znalazło praktyczne zastosowanie zarówno w badaniach naukowych, jak i w przemyśle. W literaturze naukowej znajdujemy głównie opisy konkretnych rozwiązań WPP. Nieliczne – jak na razie – są publikacje dotyczące metod oceny parametrów tych przyrządów, bowiem jest to problem trudny i niejednoznaczny. Brak jest oficjalnych norm dotyczących oceny przyrządów wirtualnych. Czy można oceniać WPP tak jak klasyczne przyrządy pomiarowe (KPP)? Czym różnią się te oba typy przyrządów, czy i jak różnice te wpływają na konieczność innego podejścia do oceny parametrów WPP?

Każdy WPP może być oceniany według kryteriów metrologicznych i informatycznych. Głównym kryterium oceny metrologicznej WPP jest niepewność wyników pomiarów. Niepewność wyników pomiarów wykonywanych przyrządem wirtualnym zależy od niepewności przetwarzania analogowo-analogowego i analogowo-cyfrowego realizowanego w sprzętowej części pomiarowej oraz od niepewności przetwarzania cyfrowo-cyfrowego realizowanego w komputerze. Jak podejść do problemu złożenia tych niepewności? Czy można bezpośrednio przenieść metodę szacowania niepewności klasycznych przyrządów pomiarowych do WPP? Jaka jest waga niepewności poszczególnych elementów WPP? Czy można pominąć niepewność przetwarzania danych pomiarowych w komputerze? Specyficzną cechą WPP jest zależność jego szybkości działania nie tylko od sprzętowej części pomiarowej,

ale również od komputera, na którym przyrząd jest zaimplementowany. Wobec szeregu trudności związanych z szacowaniem czasu działania WPP nasuwa się pytanie, czy i w jakim zakresie możliwa jest praca tych urządzeń w trybie czasu rzeczywistego. Kolejnym problemem jest ocena niezawodności WPP. Czy możliwe jest określenie sformalizowanych miar tej niezawodności? Podobnie z oceną ergonomiczności przyrządów. Czy możliwe jest porównanie klasycznych i wirtualnych przyrządów pod kątem tych kryteriów? Artykuł jest zaproszeniem do dyskusji i próby odpowiedzi choćby na część powyższych pytań.

Bibliografia

- [1] Winiński W.: Virtual Instrument or Measuring System?, Proc. of XVI IMEKO World Congress (Vienna, 2000), tom. V, s. 203-208
- [2] Winiński W.: Wirtualne przyrządy pomiarowe (monografia), Prace Naukowe – Elektronika, z.145, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej (2003)
- [3] Nuccio S., Spataro C.: Assessment of Virtual Instruments Measurement Uncertainty, Computer Standards & Interfaces, 23 (2001), s. 39-46
- [4] Nuccio S., Spataro C.: Can the Effective Number of Bits Be Useful to Assess the Measurement Uncertainty?, Proc. IEEE IMTC'02 Conf., (Anchorage, AK, USA, May 21-23, 2002), s. 1763-1767.
- [5] Ferrero A., Salicone S.: An Innovative Approach to the Determination of Uncertainty in Measurements Based on Fuzzy Variables, Proc. IEEE IMTC'02 Conf., (Anchorage, AK, USA, May 21-23, 2002), s. 227-232.
- [6] Locci N., Muscas C., Peretto L., Sasdelli R.: A Numerical Approach to the Evaluation of Uncertainty in Nonconventional Measurements on Power Systems, Proc. IEEE IMTC'99 Conf., (Budapest, Hungary, May 21-23, 2001), s. 698-703.
- [7] Balsamo A., Mari L.: On the Metrological Evaluation of the software Component of Intelligent Measuring systems, IEEE IMTC'99 Conf., (Venice, Italy, May 24-26, 1999), CD ROM
- [8] Jakubiec J.: Redukcyjna arytmetyka interwałowa w zastosowaniu do wyznaczania niepewności algorytmów przetwarzania danych, Monografia, Wyd. Polit. Śląskiej, Gliwice 2002
- [9] Jakubiec J.: Wyznaczenie niepewności danych w systemie pomiarowym z wykorzystaniem redukcyjnej arytmetyki interwałowej, Pomiary, Automatyka, Kontrola PAK, Nr 7/8, 2002, s. 5-12.
- [10] Gajda J., Twardowski T.: Ocena niepewności wyników identyfikacji parametrycznej, Pomiary, Automatyka, Kontrola PAK, Nr 5/6, 2002, s. 20-24.
- [11] Szafrński T., Morawski R.: Efficient estimation of uncertainty in weakly non-linear algorithms for measurand reconstruction, Measurement, No 29 (2001), s. 77-85.
- [12] Kalus-Jęcek B., Kuśmierk Z.: Wzorce wielkości elektrycznych i ocena niepewności pomiaru, Wyd. PŁ, Łódź 2000, 118 s.
- [13] Turzeniecka D.: Analiza dokładności przybliżonych metod oceny niepewności, Monografia, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.
- [14] National Instruments: Calibration, Accuracy and Uncertainty, <http://www.ni.com/support/calibrat/accuracy.htm>, 2000
- [15] Jaworski J.: Błąd i niepewność pomiarów pośrednich, Pomiary, Automatyka, Robotyka PAR, Nr 10, 1999
- [16] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Int. Organisation for Standardisation (1993, 1995)
- [17] GUM: Wyrażanie niepewności pomiaru – przewodnik, Wyd. Główny Urząd Miar, Warszawa 1999, 192 s.
- [18] Ghiani E., Locci N., Muscas C.: Auto-evaluation of the Uncertainty in Virtual Instruments, Proc. IEEE IMTC'02 Conf., (Anchorage, AK, USA, May 21-23, 2002), s. 385-390.
- [19] Makal J.: Niepewność pomiaru wielokanałowego systemu pomiarowego, PAK, Nr 9, 2001, s. 5-7.
- [20] Dobbing A., Clark N., Godfrey D., Harris P., Parkin G., Stevens M., Wichmann B.: Reliability of Smart Instrumentation, Raport wewn. National Physical Laboratory and Druck Ltd, 8s, 2001.
- [21] Lampasi D.A., Podesta L., A Practical Approach to Evaluate the Measurement Uncertainty of Virtual Instruments, IEEE IMTC Conf. (Como, 2004), 146-151
- [22] Sacha K.: Projektowanie oprogramowania systemów sterujących, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa, 1996.
- [23] Jaskiewicz A.: Inżynieria oprogramowania, HELION, Gliwice, 1997.
- [24] Emmet L., Fromme P.: Software Support for Metrology Best Practice Guide No 2: The Development of Virtual Instruments, National Physical Laboratory, Queens Road, Teddington, Middlesex, United Kingdom, 1999, 86 s.
- [25] Wichmann B.: Measurement System Validation: Validation of Measurement Software, National Physical Laboratory, Queens Road, Teddington, Middlesex, UK, 2000
- [26] Florczyk M.: Przegląd wybranych metod testowania aplikacji informatycznych pod kątem ich zastosowania do testowania wirtualnych przyrządów pomiarowych, PAK, Nr 6/7, 2002, s. 25-28.
- [27] Florczyk M.: Testowanie oprogramowania wirtualnego przyrządu pomiarowego, Mat. konf. SP'04 (Łągow, 2004)