

Konrad HEJN
Instytut Systemów Elektronicznych
Politechnika Warszawska

PRZETWORNIKI EMULOWANE A POMIAROWE PRZYRZĄDY WIRTUALNE — UWAGI OGÓLNE

Streszczenie. Jedną z najbardziej doniosłych zmian we współczesnych przyrządach pomiarowych jest naśladowanie, a następnie zastępowanie fizycznych układów przez moduły oprogramowania. Taka projektowa aktywność nazywana jest emulacją i ma na celu poprawę dokładności lub szybkości działania klasycznych przyrządów pomiarowych. Emulacja wymaga przede wszystkim przesunięcia przetwornika analogowo-cyfrowego (bloku pozyskiwania danych) na sam początek toru pomiarowego! Przykład z woltomierzem wartości skutecznej pokazuje, że zastąpienie nieliniowego przetwornika sprzętowego modułem oprogramowania zwiększa dokładność pomiarów zmiennoprądowych. Natomiast przykład z analizatorem pokazuje, że zastąpienie banku analogowych filtrów selektywnych przez cyfrowy woltomierz Fouriera (FFT) zwiększa szybkość pomiaru widma sygnału. W konsekwencji, prawidłowo stosowana w sprzęcie pomiarowym emulacja pozwala wykonywać pomiary nie tylko z laboratoryjną dokładnością, ale także z szybkością wymaganą przez przemysł elektroniczny. Stąd zaproponowano wprowadzenie do definicji wirtualnego przyrządu pomiarowego pojęcia emulacji jako jego inherentnej cechy (atrybutu). W zakończeniu odniesiono się krytycznie do koncepcji rozproszonych wirtualnych przyrządów pomiarowych.

EMULATED CONVERTERS AND DSP-BASED (VIRTUAL) INSTRUMENTS — GENERIC REMARKS

Summary. One of the most significant changes in modern electronic instrumentation is that software routines can now emulate (softly imitate and replace) physical circuits. It provides an effective way around poor accuracy and/or low speed of classical instrumentation. However, it also demands to place an analog-to-digital converter (i.e. data acquisition block) at the very front-up of a measurement chain. A nonlinear converter emulation makes the digital voltmeter capable to provide AC and DC measurements of comparable accuracy. Similarly a selective filter emulation speeds up signal spectrum analysis. So, correctly applied emulation in classical instruments provides an effective solution to difficult problems of the laboratory accuracy demanded at a production speed. Presently emulations seem to be an inherent attribute of any DSP-based (virtual) instrument. Consequently, the definition of virtual instrument should reflect this fact. While virtual instruments have their strong merits, a questionable concept of distributed virtual instruments seems to be unconvincing.

1. WPROWADZENIE

Decentralizacja przetwarzania analogowo-cyfrowego (tzn. jego przeniesienie w bezpośrednie otoczenie obiektu pomiaru) pozwoliła już w latach osiemdziesiątych XX wieku wyeliminować problemy związane z komutacją i transmisją analogowych sygnałów małej mocy, np. w przemysłowych systemach akwizycji danych. Stało się to możliwe dzięki stale malejącym cenom scalonych przetworników analogowo-cyfrowych.

Podobnie, decentralizacja sztucznej inteligencji (możliwa dzięki tanim komputerom) w kierunku bloków akwizycji danych pozwala nie tylko automatyzować działanie przyrządu pomiarowego, ale także naśladować i zastępować — lub krócej — **emulować** jego wybrane fragmenty przez moduły oprogramowania. Stało się to zauważalną tendencją w latach dziewięćdziesiątych XX wieku, głównie dzięki systematycznie zwiększającemu się upakowaniu elementów elektronicznych w jednej strukturze przy jednoczesnym zachowaniu na podobnym poziomie mocy rozpraszanej przez układ scalony [12, 3]. Decentralizacja sztucznej inteligencji zmniejszyła też natężenie ruchu danych (ale nie informacji!) po magistrali, wokół której integrowany jest współczesny przyrząd pomiarowy [1].

Wprawdzie teoria cyfrowego przetwarzania sygnałów nic nam nie “mówi”, jak zmierzyć w środowisku zakłóceń przemysłowych gęstość mocy rzędu $(nV)^2/\text{Hz}$, czy przesunięcie fazowe z rozdzielczością 0.01 stopnia, lub dziewiątą harmoniczną zniekształceń na poziomie -110 dB, to jednak zastąpienie fizycznych układów (sprzętowa przetworników) modułami oprogramowania (przetwornikami emulowanymi) pozwala zmniejszyć, a nie raz i wyeliminować wiele — w przeciwnym wypadku nieuniknionych — niedoskonałości klasycznych przyrządów pomiarowych, takich jak: przesłuchy, nieliniowości, szумы, dryfy, niestabilności kalibracji, czasy ustalania się odpowiedzi na wyjściach filtrów selektywnych, wrażliwość cieplną itp. [11].

2. EMULACJA A WIRTUALNOŚĆ W TECHNICIE POMIAROWEJ

Koncepcja wirtualności znana jest w technice komputerowej od początku jej narodzin. W technice pomiarowej przywołano ją formalnie w roku 1986 jako szósty z siedmiu wyspecyfikowanych celów¹ normy [6]. Nieco później pojawiły się na rynku komputery osobiste pracujące z graficznym interfejsem użytkownika (GUI). W tej sytuacji każdy z nas mógł już zaprojektować wirtualną płytę czołową interesującego go przyrządu pomiarowego. Stąd też mnogość poglądów i pojęć, które nie były jednoznacznie interpretowane, a nawet więcej, w których nadużywana była koncepcja wirtualności. Na przykład, najczęściej przywoływana definicja wirtualności jest kojarzona z komputerem osobistym wykonującym funkcje — pozornie tylko istniejącego — sprzętowego przetwornika. Z takim podejściem można by się ostatecznie zgodzić, gdyby wspomniano coś o poprawie dokładności lub szybkości działania pomiarowego przyrządu wirtualnego w stosunku do jego klasycznego, w pełni sprzętowego odpowiednika. Jednak często przyrządowi pomiarowemu przypisuje się atrybut wirtualności, jeśli komunikujemy się z nim za pomocą wirtualnej płyty czołowej, z czym zgodzić się już nie można. Istnieje bowiem wiele wirtualnych przyrządów pomiarowych, które mają rzeczywistą płytę czołową. Dlatego z punktu widzenia konstruk-

¹ 6. To provide the ability to implement new functionality in test systems, through the use of *virtual instruments*

tora i użytkownika współczesnej aparatury **pomiarowej** pojęciu wirtualności powinno być nadane bardziej precyzyjne znaczenie, odwołujące się do "filozofii" wirtualności znanej już wcześniej w technice komputerowej.

Istotą pomiaru jest proces porównania wartości cechy mierzonego obiektu z wartością wzorcową wedle wybranej skali. Z czysto praktycznego (technicznego) punktu widzenia interesują nas dodatkowo: rzetelność (dokładność) oraz perspektywa czasowa (szybkość) takiego porównania. Ważnym zatem pytaniem jest: co istotnie nowego wniosła koncepcja wirtualności, że stała się tak atrakcyjna w projektowaniu przyrządów pomiarowych?

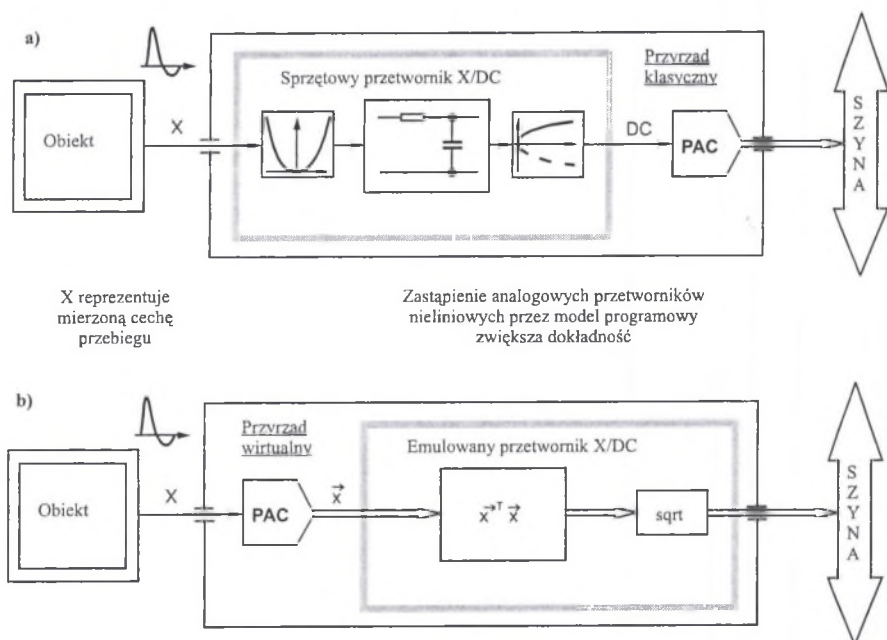
Zacznijmy od sprawy podstawowej, jaką jest definicja wirtualnego przyrządu pomiarowego. Wygodne wydaje się wprowadzenie pojęcia emulacji w rozumieniu wykorzystywanym od dziesiątków lat w technice komputerowej. Źródłosłów łaciński oznacza naśladowanie. Anglosasi nadali temu słowu znaczenie: zastąpienie w celu usprawnienia. Dobrym przykładem może być emulacja (za pomocą programu) CD-ROMu na dysku twardym. Dla użytkownika gier komputerowych jest to niezauważalne, bo tego CD-ROMu fizycznie nie instaluje (jest on wirtualny), ale bardzo go lubi, bo ułatwia mu zabawę. Podobnie w systemach wielozadaniowych, emulacja jednostek logiczno-arytmetycznych (ALU) prowadzi do banku wirtualnych procesorów. Z punktu widzenia wykonywania programu, przełączanie rzeczywistego procesora pomiędzy zadaniami (mechanizm przerwań) wygląda tak, jak byśmy dysponowali bankiem procesorów, z których każdy obserwuje swoje własne zdarzenie i reaguje na nie w granicach przypisanego czasu. Stąd już niedaleko do systemów pracujących w czasie na bieżąco (systemów czasu rzeczywistego). Ale o tym będzie nieco dalej, bo w tym miejscu chodzi tylko o uwypuklenie faktu, że aby coś **było wirtualne, musi najpierw być emulowane** (dotyczy to również płyty czołowej!). Emulacja jest zatem wrodzoną (inherentną) cechą wirtualności.

Nowoczesność wirtualnego przyrządu pomiarowego można oszacować na podstawie liczby, dostępnych w nim, emulowanych przetworników, podobnie jak nowoczesność systemu pomiarowego można oceniać poziomem jego automatyzacji. Pamiętajmy jednak, że emulacja i automatyzacja to nie te same pojęcia. Jeśli się z tym zgodzimy, to łatwo już możemy rozróżnić wirtualny przyrząd pomiarowy od automatycznego systemu pomiarowego, z czym często są kłopoty. Wreszcie krótka uwaga o charakterze etymologicznym. W języku łacińskim słowo wirtualny znaczyło to samo co skuteczny. Stąd *notabene* wirtuoz, czyli wybitny solista, wyrastający ponad umiejętności konkurentów. Inżynierowie powinni chyba podążać za tym znaczeniem słowa wirtualny.

Wróćmy teraz do wcześniej już postawionego pytania: czy koncepcja wirtualności może zwiększyć dokładność lub szybkość tradycyjnie wykonywanego pomiaru? Odpowiedź znana jest przynajmniej od kilkunastu lat i brzmi: tak, ale w określonych warunkach. Nie miejsce tutaj na zbyt wiele szczegółów, dlatego podane zostaną tylko dwa przykłady, które, mamy nadzieję, dostatecznie zilustrują istotę techniki emulacji.

W pierwszym przykładzie skoncentrujemy się na problemie dokładności. Zadanie polega na pomiarze wartości skutecznej (cechy X) sygnału, rys. 1. W tradycyjnym rozwiązaniu na wejściu toru pomiarowego znajduje się nieliniowy, w pełni sprzętowy, przetwornik X/DC (kolejno: podnoszenie do kwadratu, filtracja, pierwiastkowanie). Niedokładność i niestabilność jego charakterystyki statycznej powodują większe błędy w pomiarach zmiennoprądowych niż stałoprądowych — od 20 do 200 razy! Przyczyną tego nie jest jakaś szczególnie kłopotliwa cecha przebiegów zmiennoprądowych, ale fakt, że wykonane w **tej samej technologii** przetworniki nieliniowe są zawsze mniej dokładne od przetwor-

ników liniowych. Mała dokładność wynika z faktu, że układy analogowe nie naśladują funkcji nieliniowych tak wiernie, jak jest to możliwe dla funkcji liniowych. Zwiększenie dokładności pomiarów zmiennoprądowych uzyskuje się, umieszczając **szybki i dokładny** przetwornik analogowo-cyfrowy na wejściu toru pomiarowego oraz wykonując **nieliniowe** przetworzenie w sposób numeryczny (pierwiastek z sumy kwadratów). W takim, jak mówimy, emulowanym przetworniku dokładność przetwarzania jest w pełni pod kontrolą projektanta. Emulowany nieliniowy przetwornik wykonuje operacje na wektorach (ciągach próbek) w sposób zbliżony do tego, w jaki kieszonkowy kalkulator robi to z wprowadzanymi z klawiatury skalarami. Emulacja nie musi koniecznie oznaczać zastąpienia fizycznego układu przez zaprogramowany komputer, może równie dobrze oznaczać jego zastąpienie przez odpowiednią matrycę logiczną (np. przez sieć neuronową)!

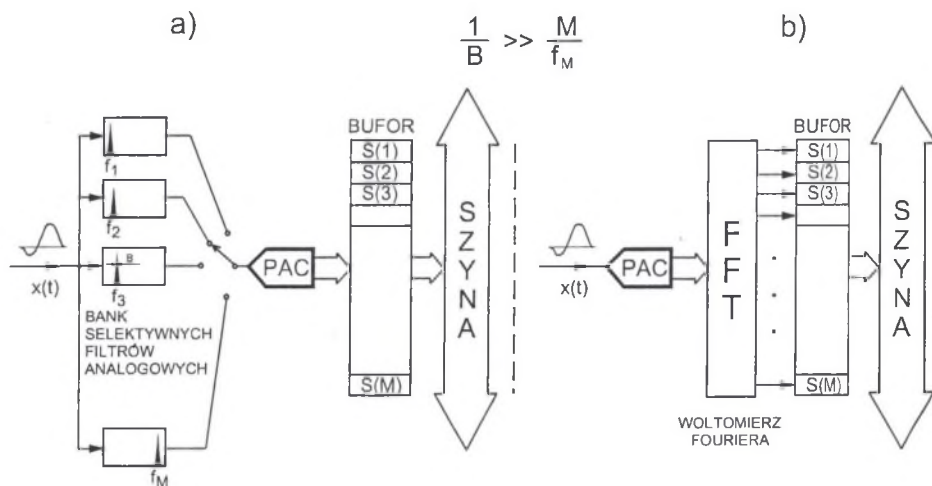


Rys. 1. Struktury cyfrowego woltomierza wartości skutecznej: a) klasyczna, b) współczesna (emulowany jest nieliniowy przetwornik wartości skutecznej)

Fig. 1. Structures of AC digital voltmeter: a) classical, b) modern (nonlinear rms/DC converter is emulated)

Drugi przykład dotyczy analizatora widma sygnału, rys. 2. Zajmujemy się w nim problemem szybkości wykonania pomiaru. W klasycznym analizatorze na wejściu znajduje się bank selektywnych filtrów analogowych. Uzyskanie dokładnego pomiaru nie jest trudne, bo filtry realizują **liniowe** funkcje przenoszenia. Problem tkwi jednak w czasie trwania pomiaru, który jest tym dłuższy, im bardziej selektywne mają być charakterystyki amplitudowe filtrów. Czas potrzebny na akwizycję próbek sygnałów na wyjściach filtrów lub na prezentację ostatecznego wyniku nie jest krytyczny. W ogólnym bilansie decydujący jest czas ustalania się odpowiedzi filtru, a ten jest tym większy, im węższe jest pasmo B

filtrów. Im bardziej dokładnie chcemy analizować widmo sygnału, tym więcej musimy na to poświęcić czasu! Nasz problem nie polega jednak na otrzymaniu zbioru odfiltrowanych, rzeczywistych przebiegów, a jedynie na znalezieniu ich amplitud. Można je uzyskać za pomocą **koherentnego** całkowania (w miejsce **selektywnej** filtracji). Przemieszczenie przetwornika analogowo-cyfrowego na wejście łańcucha pomiarowego i zastąpienie (emulacja) banku analogowych filtrów przez standardowy algorytm cyfrowego przetwarzania sygnałów FFT pozwala wykonać wymagany pomiar w czasie krótszym, bliskim podstawowemu okresowi “najwolniejszego” komponentu sygnału. Detekcja składowych widma dokonywana jest wtedy w dziedzinie sygnałów cyfrowych, za pomocą tzw. cyfrowego woltomierza Fouriera. Łączy on w sobie funkcje filtrów selektywnych o nieskończonej dobroci i woltomierzy wektorowych o nieskończonym oporze wejściowym. Zalety takiej emulacji ujawniają się szczególnie wyraźnie wtedy, kiedy obiekt badany jest przy wielu częstotliwościach jednocześnie.



Rys. 2. Struktury analizatora widma: a) klasyczna, b) współczesna (emulowany jest bank selektywnych filtrów analogowych)

Fig. 2. Structures of spectrum analyzer: a) classical, b) modern (bank of selective filters is emulated)

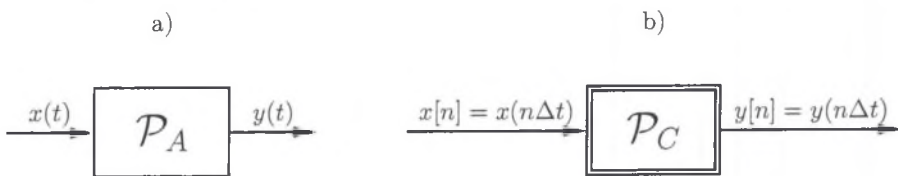
W dobrze zaprojektowanym wirtualnym przyrządzie pomiarowym okno próbkowania powinno być precyzyjnie skoordynowane z każdym impulsem zegarowym, z każdym sygnałem i zakłócającym go komponentem. Jedynie wtedy nie będzie roztrwaniana matematyczna precyzja emulowanych przetworników. Mówimy, że wirtualny przyrząd pomiarowy posiada **atrybut koherentności**, jeśli wszystkie istotne dla jego działania częstotliwości przebiegów i zegarów pozostają w całkowitych stosunkach. Koherencja to także taka technika pomiarowa, która przy założonej dokładności pozwala pozyskiwać i przetwarzać wektory danych o skończonej (w miejsce nieskończonej) długości.

W podsumowaniu powyższych dwóch przykładów należy wyraźnie podkreślić, że istotnym atrybutem **przyrządu pomiarowego** nie jest jego rzeczywista albo wirtualna płyta

czołowa, czy taki lub inny komputer osobisty z nim współpracujący, ale jest nim dokładność lub szybkość, z jakimi może on dokonać określonego pomiaru (porównania). Prawidłowo zastosowana koncepcja wirtualności może wiele w tym zakresie pomóc. Uwaga ta dotyczy wirtualnych przyrządów pomiarowych, a nie przyrządów wirtualnych w ogóle.

3. SYMULATOR A EMULATOR PRZETWORNIKA SPRZĘTOWEGO

Częste i uzasadnione jest pytanie o różnicę między symulacją a emulacją, bowiem oba pojęcia korzystają z cyfrowego modelu analogowej rzeczywistości. Dlatego przyjrzymy się tej sprawie nieco dokładniej w oparciu o rys. 3, gdzie pokazano: a) przetwornik sprzętowy (analogowy) P_A , oraz b) jego cyfrowy model P_C w postaci modułu oprogramowania.



Rys. 3. Pojęcie modelu: a) przetwornik sprzętowy (analogowy), b) przetwornik programowy (cyfrowy)

Fig. 3. Numerical model: a) analog converter (physical circuit), b) digital converter (software routine)

Sygnałem wejściowym przetwornika sprzętowego jest sygnał $x(t)$ ciągły w czasie, natomiast przetwornika cyfrowego — sygnał $x[n]$ dyskretny w czasie, taki że

$$x[n] = x(n\Delta t), \quad (1)$$

gdzie Δt oznacza okres próbkowania (dyskretyzacji osi czasu).

Przetwornik P_C byłby wiernym **modelem cyfrowym** przetwornika analogowego P_A , jeśli jego sygnał wyjściowy $y[n]$ równałby się próbkom (wartościom chwilowym) sygnału wyjściowego $y(t)$ przetwornika P_A , to znaczy

$$y[n] = y(n\Delta t). \quad (2)$$

W ogólnym przypadku nie możemy znaleźć takiego przetwornika P_C , aby równość (2) była dokładnie spełniona dla dowolnego pobudzenia $x(t)$. Może być ona spełniona tylko w przybliżeniu (na ogół bardzo dobrym), jeśli pobudzenie $x(t)$ spełnia odpowiednie ograniczenia. Stąd przedmiotem zainteresowań modelowania numerycznego jest poszukiwanie dla określonej klasy pobudzeń najlepszego, w sensie najbliższym równości (2), modelu cyfrowego P_C dla przetwornika analogowego P_A . Dalej chcemy jedynie zwrócić uwagę na dwójakie — zależne od zastosowania — znaczenie numerycznego modelowania we współczesnej technice pomiarowej.

PO PIERWSZE, model cyfrowy P_C istotnie **ułatwia analizę** dynamiki przetwornika sprzętowego P_A , bo pozwala zredukować równania różniczkowe do równań różnicowych. Te ostatnie rozwiązujemy numerycznie, korzystając z prostych operacji na sygnałach:

opóźnienia, skalowania i sumowania. Mówimy wtedy, że dysponujemy **symulatorem** przetwornika analogowego. Zachowuje się on jak specjalizowany komputer, udający cyfrowo operacje wymagane w przetworniku analogowym. Prostim przykładem może być cyfrowy symulator analogowego filtra.

PO DRUGIE, model cyfrowy P_C może **naśladować i zastąpić** przetwornik analogowy P_A . Dobrym przykładem tego ostatniego może być, omawiany już w punkcie 2, bank filtrów wąskopasmowych, mający za zadanie analizę widma sygnału, rys. 2a. Jeśli ten sam cel może zostać osiągnięty za pomocą jego modelu cyfrowego (woltomierza Fouriera z rys. 2b), to mówimy wtedy, że dysponujemy **emulatorem** przetwornika analogowego.

Jak widać, różnica między symulacją a emulacją zależy od **zastosowania** modelu cyfrowego. Istotą emulatora jest praca w takich samych warunkach fizycznych co i przetwornika analogowego. W przyrządach pomiarowych wyróżniającą cechą emulatora jest bezpośrednia współpraca z poprzedzającym go przetwornikiem analogowo-cyfrowym po stronie akwizycji danych lub następującym po nim przetwornikiem cyfrowo-analogowym po stronie generacji sygnałów.

4. DOKŁADNOŚĆ PRZETWORNIKÓW EMULOWANYCH

Przetworniki emulowane nie są wolne od błędów. Ich dokładność zależy od typowych dla obliczeń numerycznych czynników. Prostim przykładem, ale jednocześnie dobrze ilustrującym istotę tego problemu, jest przetwornik emulowany o funkcji polegającej na sumowaniu wartości N próbek. Jego wejściem jest wtedy wektor $\{a_1, a_2, \dots, a_N\}$, a pożądanym wyjściem skalar $s_N = \sum_{n=1}^N a_n$. Istnieje wiele sposobów wykonania tego zadania, ale najwygodniej wydaje się kumulować kolejne wartości próbek, co oznacza, że każda następna próbka uzupełnia otrzymaną wcześniej sumę. W tym przypadku dla $s_N \neq 0$ można wykazać [9], że oszacowanie *a priori* błędu względnego, skumulowanej przez przetwornik emulowany, sumy s wyraża się następującą nierównością

$$\frac{|s - s_N|}{|s_N|} \leq \nu w_k w_u = \nu(N-1) \frac{\sum_{n=1}^N |a_n|}{|\sum_{n=1}^N a_n|} \quad (3)$$

W prawej stronie wzoru (3) występują trzy, jakościowo różne, czynniki. Pierwszy z nich ν określa **precyzję** (inaczej mówiąc siłę) zastosowanej do konstrukcji przetwornika emulowanego arytmetyki. Ponieważ algorytmy numeryczne produkują błędy, więc z grubsza wymaga się, aby środowisko, w którym emulowany jest przetwornik sprzętowy, dysponowało przynajmniej tysiąc razy większą precyzją od tej wymaganej w ostatecznym wyniku pomiaru. Współcześnie dostępne środowiska gwarantują bardzo dużą precyzję, na przykład $\nu = 10^{-17}$.

Drugi czynnik w_k jest **wskaźnikiem kumulacji błędów**. Charakteryzuje on stopień "rozmycia" wyniku przez przetwornik emulowany. Twórca algorytmu może na jego podstawie zorientować się, ile cyfr z precyzji (siły) zastosowanej arytmetyki zmarnuje algorytm przy założeniu absolutnie dokładnych danych na wejściu. W omawianym przypadku kolejnego sumowania można stwierdzić, że algorytm charakteryzuje się wskaźnikiem akumulacji błędu $w_k = N - 1$ oraz że jest wskazane, aby zaczynać sumowanie od próbek

o małych wartościach modułu (przy wymaganiu pracy w czasie na bieżąco może to być niemożliwe!). Warto jednak w tym miejscu dodać, że istnieje znacznie lepszy algorytm, sumujący po dwie próbki i tworzący tak zwane sumy pośrednie. W takim algorytmie panuje większa "sprawiedliwość", bo każda próbka bierze udział w sumowaniu tyle samo razy. Wskaźnik kumulacji błędu jest wtedy mniejszy i wynosi $w'_k = \log_2 N$. Jeśli N nie jest potęgą liczby dwa, to dane można zawsze uzupełnić próbkami o zerowych wartościach — podobnie jak przy FFT.

Wreszcie trzeci czynnik w_u jest **wskaźnikiem uwarunkowania zadania**. Informuje on o względnej wrażliwości przetwornika emulowanego (algorytmu) na niepewność danych wejściowych i dlatego jest szczególnie interesujący dla konstruktora aparatury pomiarowej [4]. Im jego wartość jest mniejsza, tym lepiej, ale z reguły jest niestety znacznie większa od jedności. W tym konkretnym przypadku (to znaczy dla próbek o wartościach bipolarnych) może ona nawet przyjmować dowolnie duże wartości. Stąd tak proste zadanie, jak kumulacja bipolarnych wartości próbek, okazuje się zadaniem źle uwarunkowanym numerycznie, co zresztą powszechnie wiadomo! Można także pokazać, że oszacowanie *a posteriori* błędu względnego kosztuje (w sensie nakładu obliczeń) znacznie więcej aniżeli samo tylko oszacowanie *s* dokładnej sumy s_N . Oczywiście, w profesjonalnych algorytmach likwiduje się bipolarność przez dodanie do każdej próbki dostatecznie dużej stałej (offsetu). Sumowaniu podlegają wtedy tylko próbki unipolarne, a wskaźnik uwarunkowania zadania przyjmuje wartość równą jedności. Jednorazową korekcję wykonuje się raz — po zakończeniu sumowania. Na marginesie tej sprawy warto przypomnieć, że dobrze określonym zadaniem numerycznym jest sumowanie kwadratów próbek, natomiast źle określonym zadaniem (należy go unikać) jest numeryczne (nie mylić z analitycznym) obliczanie pochodnej.

Istotne w konstrukcji przetwornika emulowanego jest pozostawianie wszystkich trzech wymienionych czynników (wskaźników) — występujących w wyrażeniu (3) w jawnie rozłącznym formacie (co jest raczej wyjątkiem niż regułą) — pod pełną kontrolą projektanta. Może on je tak ukształtować, aby uzyskać założoną na wstępie dokładność przetwarzania. Jest to znana zaleta systemów cyfrowych. Precyzję ν można zwiększyć wydłużając długość słowa, a w ostateczności przechodząc od arytmetyki stało- do zmiennopozycyjnej. Wskaźnik kumulacji błędów w_k można poprawić wybierając bardziej stabilny (niekoniecznie najszybszy) algorytm lub usprawniając gospodarkę zaokrągleniami i przepełnieniami. Niezależnie jednak od tych typowo cyfrowych zabiegów negatywne oddziaływanie wskaźnika uwarunkowania zadania w_u można istotnie zmniejszyć przez dostarczanie do algorytmu **dokładniejszych** danych wejściowych. To ostatnie jest zadaniem metrologa, aby nie powiedzieć — jego statutowym obowiązkiem.

W pomiarowych przyrządach wirtualnych, które korzystają zwykle z biblioteki starannie zaprojektowanych przetworników emulowanych, o poziomie niepewności danych wejściowych decydują przede wszystkim szybkie przetworniki analogowo-cyfrowe. Są one usytuowane na początku toru pomiarowego (rys. 1 i rys. 2). Stąd zapewne wynika obserwowany wzrost zainteresowania precyzyjnymi metodami pomiaru ich parametrów [8, 5, 7], a także zewnętrzną korekcją nieliniowości uwzględniającą ich dynamikę [10].

5. SZYBKOŚĆ PRZETWORNIKÓW EMULOWANYCH — PRACA W CZASIE NA BIEŻĄCO

Zastanówmy się teraz nad problemem szybkości działania pomiarowych przyrządów wirtualnych. Ze zmniejszającą szybkość działania, "barokowej" wizualizacji wyników i innych podobnych "wodotrysków" możemy zawsze zrezygnować, bo istotne dla przeprowadzenia prawidłowego eksperymentu pomiarowego są bloki akwizycji danych oraz przetworniki emulowane. Te pierwsze działają w rytmie wynikającym z przyjętej metody pomiaru i dlatego niewiele możemy w tym miejscu poprawić. Dużo więcej natomiast możemy zwykle usprawnić w zbiorze przetworników emulowanych.

Stąd wiele uwagi, często niestety niepotrzebnie, poświęca się analizie czasowej wirtualnych przyrządów pomiarowych, implementowanych na platformie systemów operacyjnych typu MS Windows, czyli systemów operacyjnych, które z założenia zachowują się w czasie w sposób nieprzewidywalny! W MS Windows włącza się wszystko w sposób przypadkowy, na przykład: indeksator dysku, wymiatanie pamięci operacyjnej na dysk, mechanizmy szeregowania zadań itd. Użytkownik nie dysponuje narzędziami do przyblokowania tej "samowolnej" aktywności komputera. Stąd jego czas reakcji na zdarzenia zgłaszane przez bloki akwizycji danych jest losowy i dlatego nie należy się temu dziwić. Więcej, nikt nie jest w stanie w **stu procentach** określić maksymalnego czasu reakcji takiego komputera. Jest to szczególnie istotne wtedy, gdy pomiarowy przyrząd wirtualny pracuje w pętli sprzężenia zwrotnego jakiegoś większego systemu. Wystarczy wtedy jeden przypadek na milion i mamy gotową katastrofę!

Szybkość przetworników emulowanych zależy przede wszystkim od szybkości działania zastosowanego procesora i od nadzorującego go systemu operacyjnego. Nawet procesory z akceleratorami i koprocessorami są często za wolne, aby być użyteczne w komercyjnych aplikacjach wektorowej arytmetyki. Stąd algorytmy emulacji nie powinny odwoływać się do oprogramowania wysokiego poziomu, ale raczej powinny być dopasowane do systemu operacyjnego komputera! W przeciwieństwie do MS Windows systemy czasu rzeczywistego (lub inaczej pracujące w czasie na bieżąco) obsługują zdarzenia w ściśle określonych czasowych limitach. System czasu rzeczywistego to jest taki system, który reaguje na przypadkowo w czasie zachodzące zdarzenia w sposób przewidywalny. Obsługa dowolnego zdarzenia trwa krócej od zadeklarowanego, maksymalnego czasu reakcji systemu. Praktyczny problem z systemami czasu rzeczywistego polega zwykle na tym, że różne zdarzenia mają różne czasowe limity ich obsługi [2].

Zatem, do konstrukcji wirtualnych (ale jednocześnie efektywnych) przyrządów pomiarowych bardziej nadają się systemy czasu rzeczywistego, na przykład QNX ("podrasowana" wersja UNIX-a instalowalna na komputerach osobistych), aniżeli bardzo popularne systemy operacyjne typu MS Windows. Niestety, systemy działające w czasie na bieżąco mają ograniczone, ze zrozumiałych względów, narzędzia programowe wspomagające konkretną aplikację. Stąd zaprojektowanie, na przykład, wirtualnej płyty czołowej jest trudnym zadaniem.

Dla jasności rozważań dotyczących pracy wirtualnych przyrządów pomiarowych w czasie na bieżąco należy wprowadzić pojęcia pomiaru i monitorowania obserwowanego zjawiska w czasie właściwym (tylko zbieranie danych odbywa się w czasie na bieżąco). Stąd dalej, podobnie wygodne, byłoby zastosowanie pojęcia sprzężenia zwrotnego, gwarantującego skuteczne i niezawodne oddziaływanie przyrządu na otoczenie.

6. ROZPROSZONE PRYZRĄDY WIRTUALNE

W rozprawie [14] wprowadzono pojęcie **rozproszonych** wirtualnych przyrządów pomiarowych. Spróbujemy wyjaśnić jego nietrafność przez ponowne odwołanie się do techniki komputerowej. W szybkich komputerach pamięć operacyjna umieszczana jest blisko jednostki arytmetyczno-logicznej (ALU). Chodzi o minimalizację czasu przesyłania danych między nimi. Podobnie, tylko bliskie sąsiedztwo bloku akwizycji danych i przetwornika emulowanego gwarantuje szybkie działanie wirtualnego przyrządu pomiarowego. Jeśli medium komunikacyjnym będzie nieprzewidywalny Internet, to bez wątpienia nastąpi dramatyczne pogorszenie parametrów czasowych przyrządu. Zatem, takie rozproszenie jest możliwe, ale ma sens jedynie przy braku specyfikacji dotyczącej szybkości działania wirtualnego przyrządu pomiarowego. To wygląda tak jak komunikowanie się ALU z pamięcią za pomocą Internetu! Mielibyśmy wtedy komputer rozproszony, ale bardzo wolno działający. Dla jasności, nie kwestionujemy przy tym takich pojęć, jak: rozproszone projektowanie [13], rozproszone systemy pomiarowe (geograficzne rozproszenie obiektów pomiaru), czy nawet rozproszone monitorowanie i przetwarzanie (geograficzne rozproszenie użytkowników tych samych danych).

7. WNIOSKI

Koncepcja **przetworników emulowanych**, uwzględniająca techniki: koherentnego próbkowania², synchronicznego całkowania³ oraz wielotonowego testowania⁴, umożliwia budowanie przyrządów pomiarowych działających z szybkością wymaganą przez przemysł elektroniczny i jednocześnie zachowujących laboratoryjną dokładność. Klasyczne, sprzętowe przetworniki i przyrządy analogowe zanikają jedynie w sensie swych cech fizycznych, a nie funkcjonalnych, bo te pozostają w postaci modułów oprogramowania.

Współczesny elektroniczny system pomiarowy ma do dyspozycji bibliotekę emulowanych przetworników, a ich aplikacyjna konfiguracja — będąca pod kontrolą operatora systemu — tworzy konkretny pomiarowy przyrząd wirtualny. Istnieje on w postaci oprogramowania, napisanego celem wypełnienia następujących zadań:

- (A) dystrybucji lub akwizycji sygnałów,
- (B) numerycznej obróbki sygnałów (syntezy lub analizy) oraz
- (C) graficznej prezentacji wymagań lub uzyskanych rezultatów.

Do realizacji tych zadań niezbędne są dokładne i szybkie “interfejsy”: przetwornik cyfrowo-analogowy po stronie pobudzeń oraz przetwornik analogowo-cyfrowy po stronie pomiarów.

W zakończeniu podkreślimy trzy inspirujące tę pracę fakty. Po pierwsze, emulacja jest od dawna znanym pojęciem w technice pomiarowej i oznacza nie tyle automatyzację wykorzystania sprzętowych zasobów przyrządu pomiarowego, co ich zastąpienie przez moduły oprogramowania. Po drugie, realizacja przyrządów wirtualnych wymaga przemyślenia od nowa dotychczasowych metod pomiarowych oraz zapewnienia ich integracji z oprogra-

² Okno próbkowania zawiera zarówno całkowitą liczbę M okresów sygnału, jak i całkowitą liczbę N okresów próbkowania, przy czym często M i N są względnie pierwsze.

³ Okno całkowania zawiera całkowitą liczbę M okresów analizowanych sygnałów.

⁴ Sygnały pobudzające są sumą wielu wzajemnie ortogonalnych przebiegów sinusoidalnych.

owaniem systemowym współczesnych komputerów. Przetworniki emulowane wykazują **zero tolerancji** dla błędów projektanta. W przeciwieństwie do przetworników sprzętowych nie wybaczą mu nawet najdrobniejszych zaniedbań! I wreszcie po trzecie, trzeba pogodzić się z tym, że krytycznym podzespołem wirtualnych przyrządów pomiarowych jest, występujący na wejściu, przetwornik analogowo-cyfrowy. Decyduje on o dokładności, szybkości i koszcie pomiaru. Z reguły efektywny, tzn. **dokładny i szybki**, przetwornik analogowo-cyfrowy jest złożonym i drogim układem elektronicznym. Stąd, umiejętne wykorzystanie możliwości technologii mikroelektronicznych, jak i rzetelna informacja o parametrach metrologicznych dostępnych na rynku przetworników analogowo-cyfrowych mają kluczowe znaczenie dla konstrukcji pomiarowego przyrządu wirtualnego.

LITERATURA

1. Anonymous. *HP75000 Family of VXI Components, Systems, and Services*. Hewlett-Packard, 1996.
2. Black J.: *The System Engineer's Handbook: a Guide to Building VMEbus and VXIbus Systems*. Academic Press, 1992.
3. Hejn K.: Impact of microelectronics on automatic test systems. In *Applications of Microelectronic and Fiber Sensors*, p. 43–70, Waplewo, 7–11 May 1990. Forth National School of Fiberoptics. In Polish.
4. Hejn K.: *Selected issues in the metrology of contemporary analog-to-digital converters*, volume 121 of *Electronics Issues*. Publishing House of the Warsaw University of Technology, Warsaw, PL, April 1999. In Polish.
5. IEEE Std 1057. *Standard for Digitizing Waveform Recorders*. IEEE Press, June 14 1994. Revision of Trial-Use Ieee Std 1057–1989.
6. IEEE Std 1155. *Standard for VMEbus Extensions for Instrumentation: VXIbus*. IEEE Press, 23 February 1993. Approved.
7. IEEE Std 1241. *Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters*. IEEE Press, 12 May 1997. Draft printed.
8. IEEE Std.1057. *Trial-Use Standard for Digitizing Waveform Recorders*. IEEE Press, July 1989. For Trial-Use.
9. Kielbasiński A., Schwetlick H.: *Numerische lineare Algebra — Eine computerorientierte Einführung*, chapter 10.2. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1988.
10. Lundin H., Skoglund M., Handel P.: Optimizing dynamic post-correction of a/d converters. In *Proc. of XXth IEEE IMTC'03*, volume 2, p. 1206–1211, Vail, Co, USA.
11. Mahoney M.: *DSP-Based Testing of Analog and Mixed-Signal Circuits*, chapter 2 and 4. The Computer Society of the IEEE, 1987.
12. Mead C., Conway L.: *Introduction to VLSI Systems*. Addison-Wesley Publishing Company, 1980.
13. Pawlak A.: Distributed Engineering — a New Paradigm of Design Aided by Internet. *Elektronika*, (3):10–11, 2001. In Polish.
14. Winiecki W.: *Virtual Instruments*, volume 145 of *Electronics Issues*. Publishing House of the Warsaw University of technology, Warsaw, PL, March 2003. In Polish.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jerzy Jakubiec

Wpłynęło do Redakcji dnia 28 grudnia 2004

Abstract

One of the most significant changes in modern electronic instrumentation (DSP-based) is that software routines can now emulate (softly imitate and replace) physical circuits. It provides an effective way around poor accuracy and low speed of classical instrumentation. However, it also demands to place an analog-to-digital converter (i.e. data acquisition block) at the very front-up of a measurement chain (before of any nonlinear and/or selective detection function).

The concept of an emulation has been known in computer engineering since its very beginning. It was eagerly adapted in measurements to implement new functionality in test systems, through the use of emulated converters. Presently emulations seem to be an inherent attribute of any DSP-based (virtual) instrument. Consequently, the definition of virtual instrument should reflect this fact.

Poor accuracy of classical AC instruments is a result of the fact that analog circuits cannot reproduce nonlinear function nearly as well as the linear one. In the contrary, emulation of a nonlinear converter makes the voltmeter capable to provide AC and DC measurements of comparable accuracy, Fig. 1.

Similarly, emulation of a selective filter bank speeds up signal spectrum analysis. Since the filters are linear, the accuracy is not the issue. The speed becomes the problem. Because each filter in Fig. 2a is required to produce a real time waveform, it has finite settling time, no matter how it is implemented. The settling time is substantially longer than the longest signal period. Fortunately, the problem does not call for filtered waveforms. We must only find their amplitudes which can be done by timed integrals, making theoretically possible to measure them within the longest period. It is enough to digitize the unfiltered input first and then use the software equivalent (FFT) of a selective filter bank.

In an effective virtual instrument, the digitizing window must be precisely coordinated with each and every clock, signal, and distortion component. Only then, the mathematical precision of the emulated converters will not be wasted. A virtual instrument, in which all frequencies of clocks and signals are related in whole-number ratios, is said to be coherent. Coherence is also a technique that allows to collect and process the finite (instead of infinite) length data vector needed to provide the required accuracy.

Most of the emulated converters produce cumulative errors (3). Some of them are derived from nothing but the algorithm (ill-conditioning) and the others are due to the input data finite accuracy. One rule of thumb states that the arithmetic put into practice (an essence of the emulated converter) should be at least three decimal orders of precision beyond that is desired in the end result.

The speed of emulated converters depends mostly on the processor and operating system applied. Even processors with mathematical accelerators are often too slow at vector mathematics to be useful for commercial needs. So, emulation of certain physical circuits should not be implemented in high-level language environment but built into the operating system. A real time system should respond to urgent events within the prescribed time limits.

While virtual instruments have their strong merits, a questionable concept of distributed virtual instruments seems to be unconvincing, not to say senseless. It sounds like a distributed computer whose ALU (processor) communicates with an operating memory

through — unpredictable — Internet. A good engineering practice is to keep the data transfer time short in comparison with other components of measurement time.

The emulated converter concept provides a number of benefits in comparison with traditional analog measurement technique. Correctly applied emulation provides an effective solution to difficult problems of the laboratory accuracy demanded at a production speed. Reduced switching and settling time is also vital. Another benefit is that the UUT response is memorized and can be proceeded later, not necessary in real time.

Necessary cost of fast and accurate ADC is the price paid for all the discussed advantages. In modern (DSP-based) instrumentation, the ADC has to precede the DSP-based operations and its output is a vector (i.e. a sequence of samples). In classical (analog) instrumentation, the ADC follows the mathematical operations and its output is a scalar (i.e. a single sample).