

Anna DOMAŃSKA

POLITECHNIKA POZNAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI I TELEKOMUNIKACJI

Sygnaly stosowane w kalibracji i estymacji parametrów przetworników A/C

Dr hab. inż. Anna DOMAŃSKA

Ukończyła studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej w 1979 roku i na Wydziale Mat-Fiz-Chem Uniwersytetu Wrocławskiego w 1984 roku. W 1987 r. uzyskała stopień doktora n.t. a w 1996 roku doktora habilitowanego n.t., obydwa na Wydziale Elektrycznym PP. Główne zainteresowania naukowe dotyczą systemów pomiarowych z cyfrowym algorytmem pomiaru oraz teorii i zastosowań konwersji analogowo-cyfrowej z sygnałem ditherowym. Jest członkiem Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN.

e-mail: domanska@et.put.poznan.pl



Streszczenie

Operacje poprawiające dokładność przetwarzania rzeczywistego przetwornika A/C to kalibracja i korekcja. Ponadto, mające związek z dokładnością, właściwości rzeczywistego przetwornika A/C są charakteryzowane przez szereg parametrów estymowanych w wyniku testowania. Wspólne dla wszystkich takich działań (kalibracji, korekcji, testowania) jest to, iż rezultaty są silnie „sygnałowo zależne”. Opisano zasady korekcji, kalibracji i testowania przetworników A/C. Objasniono, na czym polega zależność rezultatów od rodzaju sygnału podlegającego przetworzeniu. Podano cechy sygnału teoretycznie najodpowiedniejszego do badania przetworników A/C. Określono, w jakim stopniu sygnały praktycznie stosowane posiadają takie cechy.

Słowa kluczowe: przetwornik A/C, korekcja, kalibracja, testowanie, sygnał kalibrujący, sygnał testujący.

Signals applied to the calibration and estimation of the A/D converters

Abstract

There are the following operations improving the accuracy of converting the real A/D converter: calibration and correction. Moreover, the properties of the real A/D converter, related to accuracy, are characterised by a number of parameters estimated through the process of testing. A feature common to all such operations (calibration, correction, testing) is the strongly “signal-dependent” character of results. The paper describes the rules of correction, calibration and testing of the A/D converters, and explains how the results are dependent on the type of signal being converted. The features of the signal, which is theoretically most suitable to test the A/D converters, are given. It has been also determined to what extent practically applied signals retain such features.

Keywords: A/D converter, correction, calibration, testing, calibrating signal, testing signal.

1. Wstęp

Umiejscowienie przetwornika A/C w głównym torze pomiarowym oznacza, iż jego właściwości mają wpływ na dokładność przyrządów i systemów pomiarowych, ilościowo wyrażając się odpowiednią wartością niepewności. W idealnym przetworniku A/C jedynym błędem jest błąd kwantowania. Wynika on z nieliniowości operacji kwantowania, czyli schodkowej charakterystyki kwantyzatora przetwornika. W rzeczywistym przetworniku A/C oprócz błędu kwantowania występują następujące błędy: przesunięcia, wzmocnienia, nieliniowości (różniczkowej/całkowej), histerezy. Błędy przesunięcia i wzmocnienia, ponieważ formuły które je określają są takie same w całym zakresie przetwarzania (są takie same dla każdej wartości wejściowej), łatwo dają się wyeliminować. W przypadku błędu kwantowania i nieliniowości tak nie jest, dla każdej wartości sygnału pomiarowego mają one inną wartość. Jeśli właściwości metrologiczne konwersji a-c mają znaczenie, wynik przetwarzania należy **korygować** ze względu na

te błędy. Dane niezbędne w korekcji są pozyskiwane w procesie **kalibracji**. Ponadto na dokładność wyniku mają wpływ dynamiczne właściwości przetwornika, charakteryzowane przez szereg parametrów estymowanych w wyniku **testowania**. Najważniejsze z nich to: stosunek sygnału do szumu i zniekształceń, efektywna liczba bitów, stosunek sygnału do szumu, łączne zniekształcenia harmoniczne, zakres dynamiczny wolny od zniekształceń.

Przedstawiono zasady korekcji i kalibracji statycznej charakterystyki (charakterystyki we-wy) przetwornika A/C oraz testowania przetwornika w celu określenia jego parametrów dynamicznych. Wspólną cechą wymienionych operacji jest to, iż ich rezultaty cechują się „**lokalnym zakresem adekwatności**” – korekcja jest najbardziej skuteczna wobec sygnałów pomiarowych takiego typu, jakiego był sygnał użyty do kalibracji przetwornika; parametry dynamiczne są zachowywane w przypadku przetwarzania sygnałów pomiarowych takiego typu, jakiego był sygnał wcześniej użyty do testowania przetwornika. Przez sygnały tego samego typu rozumie się sygnały mające taką samą amplitudową funkcję gęstości prawdopodobieństwa (AFGP). Objasniono przyczyny uzależnienia skuteczności korekcji oraz wyników testowania od AFGP sygnału.

W dalszej części podano charakterystykę sygnałów teoretycznie najodpowiedniejszych do badania dokładności przetworników A/C i przedstawiono, w jakim stopniu sygnały praktycznie stosowane posiadają pożądane cechy.

2. Operacje poprawiające dokładność przetwarzania rzeczywistego przetwornika A/C

2.1. Zasady korekcji

Teoretycznie istnieją dwie możliwości poprawy dokładności przetwarzania rzeczywistego przetwornika A/C:

- przez ingerencję w strukturę i poprawę parametrów elementów tworzących przetwornik, jest to możliwość dostępna producentowi,
- przez zastosowanie dodatkowego przetwarzania korygującego metodą cyfrowego przetwarzania sygnałów, jest to możliwość dostępna dla użytkownika.

Przetwarzanie korygujące może dotyczyć danych na wyjściu przetwornika A/C (korekcja wyników pomiaru bezpośredniego w systemie pomiarowym [2]) a także estymatorów (korekcja algorytmów pomiaru pośredniego, tamże). Pierwszy przypadek występuje zdecydowanie najczęściej.

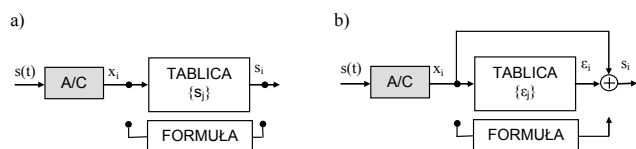
Korekcja danych na wyjściu przetwornika A/C może mieć formę:

- korygowania każdej z wartości wyjściowych z osobna (np. metoda „look-up-table” czy metoda modelu odwrotnego),
- cyfrowej filtracji (liniowej, nieliniowej),
- zastosowania odpowiedniej strategii przygotowania danych do konwersji (nadpróbkowanie, dithering) i uzupełniającej cyfrowej filtracji wyników konwersji.

Rozróżnia się korekcję statyczną – wartość skorygowana jest wyznaczana na podstawie bieżącej wartości wyjściowej przetwornika A/C oraz korekcję dynamiczną – wartość skorygowana jest wyznaczana na podstawie bieżącej i przeszłej (przeszłych) wartości wyjściowej.

Celem korekcji jest otrzymanie poprawionego wyniku konwersji, w minimalnym tylko stopniu obciążonego wcześniej wymienionymi błędami rzeczywistego przetwornika A/C. Poprawiony wynik może być otrzymywany metodą:

- KOR1) z „zastępowaniem” – wynik na wyjściu przetwornika A/C zastępowany jest wynikiem z tablicy lub wynikiem obliczonym z formuły,
 - KOR2) z „dodawaniem” – do wyniku na wyjściu dodawany jest składnik korygujący z tablicy lub składnik korygujący wyliczony z formuły.
- Obie metody schematycznie przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Metody korekcji statycznej przetwornika A/C: a) KOR1, b) KOR2
Fig. 1. Static correction methods of A/D converter: a) KOR1, b) KOR2

Wartość x_i na wyjściu przetwornika A/C ma postać cyfrową, więc wartość skorygowana s_i lub składnik korygujący e_i muszą mieć również taką postać.

2.2. Zasady kalibracji

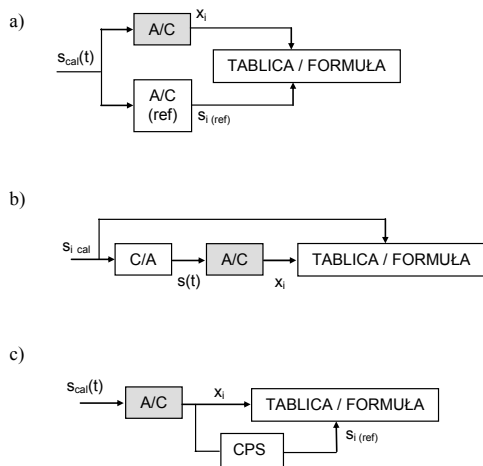
Aby możliwa była korekcja, przetwornik A/C musi wcześniej zostać skalibrowany.

Celem kalibracji jest optymalne, w sensie pewnej „funkcji kosztu”, (np. błąd średniokwadratowy, łączne zniekształcenia harmoniczne, stosunek sygnału do szumu i zniekształceń) zrekonstruowanie wartości skwantowanych, do których byłyby redukowane, w wyniku kwantowania, wartości z każdego z przedziałów. W procesie kalibracji tworzona jest tablica wyników skorygowanych bądź tablica składników korygujących albo identyfikowana jest formuła, z której te wyniki/składniki mogłyby być wyliczone. Tablica lub formuła są wykorzystywane w procesie korekcji (por. rys.1).

Można wyróżnić trzy metody kalibracji:

- KAL1) z analogowym sygnałem kalibrującym i przetwornikiem A/C odniesienia (referencyjnym),
- KAL2) z cyfrowo generowanym sygnałem kalibrującym i przetwornikiem C/A,
- KAL3) z analogowym sygnałem kalibrującym i przetwarzaniem sygnału wyjściowego przetwornika A/C „odtworzającym” czysty sygnał kalibrujący, najczęściej jest to odtwarzanie metodą dopasowania sinusoidy (jeśli sygnał kalibrujący jest sinusoidalny) lub metodą filtru rekonstrukcyjnego.

Metody schematycznie przedstawiono na rys 2.



Rys. 2. Metody kalibracji przetwornika A/C: a) KAL1, b) KAL2, c) KAL3
Fig. 2. Calibration methods of A/D converter: a) KAL1, b) KAL2, c) KAL3

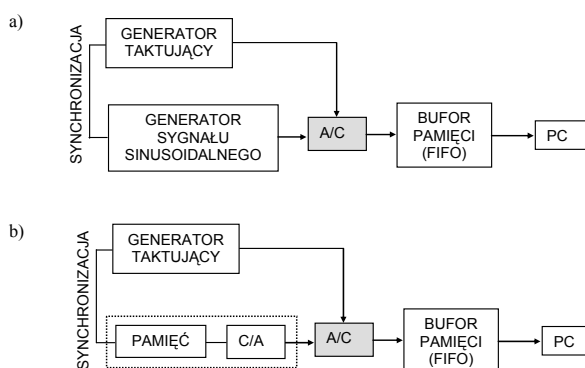
Wartość x_i na wyjściu przetwornika A/C ma postać cyfrową, więc wartość referencyjna s_i , z którą jest porównywana musi mieć również taką postać. Wartość s_i jest cyfrowym odpowiednikiem wejściowego analogowego sygnału kalibrującego.

Rozróżnia się kalibrację statyczną – pojedyncza wartość jest zrekonstruowana z pojedynczej wartości kalibrującej lub ze zbioru wartości kalibrujących należących do tego samego przedziału kwantowania, kalibrację dynamiczną – pojedyncza wartość jest zrekonstruowana z bieżącej i przeszłych wartości kalibrujących lub z ich zbiorów z odpowiednich przedziałów kwantowania.

Oba procesy kalibracja i korekcja zachodzą w dziedzinie cyfrowej. W efekcie otrzymuje się konwersję a-c o lepszych parametrach niż ma rzeczywisty przetwornik A/C.

3. Zasady testowania

Oprócz własności przetwornika A/C wynikających z postaci rzeczywistej charakterystyki statycznej (we-wy), jest on także charakteryzowany ze względu na własności dynamiczne przez szereg parametrów, z których najważniejsze wymieniono we wstępie. Parametry określające własności statyczne i dynamiczne są estymowane w wyniku **testowania**. System do testowania przetworników A/C schematycznie przedstawiono na rys. 3, w wariancie z sygnałem testującym sinusoidalnym oraz innym niż sinusoidalny [3].



Rys. 3. System testowania przetwornika A/C: a) sygnał testujący sinusoidalny,

b) sygnał testujący arbitralny

Fig. 3. System for testing A/D converter: a) sine wave testing signal, b) arbitrary testing signal

Ponieważ parametry dynamiczne przetwornika A/C są definiowane dla sygnału wejściowego sinusoidalnego do ich estymacji w wyniku testowania powinien być stosowany taki właśnie sygnał. Użycie sygnału innego niż sinusoidalny może być uzasadnione, jeśli zachodzi potrzeba określenia parametrów w bardzo szczególnych przypadkach zastosowania przetwornika (konsekwencja „lokalnego zakresu stosowalności” wyników kalibracji/korekcji/testowania).

Metody testowania dzielą się na trzy grupy [1]:

- TEST1) metody statystyczne (histogramowe),
- TEST2) metody częstotliwościowe (wykorzystujące DTF do analizy wyników przetwarzania),
- TEST3) metody czasowe (z dopasowywaną sinusoidą jako odniesieniem).

Metody stosujące sygnał sinusoidalny nazywa się dynamicznymi, choć estymowane parametry mogą być zarówno dynamiczne (TEST2, TEST3) jak i statyczne (TEST1).

Możliwe są dwa warianty, w których ocenia się dokładność bądź estymuje parametry przetworników A/C:

- przetwarzanie bez korekcji - przetwornik A/C nie skorygowany (taką postać mają dane dostarczane przez producentów),
- przetwarzanie z korekcją - przetwornik A/C skorygowany (taką postać mają dane określone przez użytkowników w ramach analizy metrologicznej).

Są to różniące się dane.

4. Sygnały stosowane w kalibracji i testowaniu

Rzeczywisty rozwój metod kalibracji i testowania jest inspirowany z jednej strony pojawianiem się przetworników A/C o coraz lepszych parametrach a z drugiej strony rozszerzającymi się możliwościami ich implementacji połączonymi ze wzrostem dokładności. Wraz z rozwojem zmieniały się także kryteria wyboru odpowiednich sygnałów mogących mieć zastosowanie w tym celu.

A. Sygnał stały

Pierwotnie w kalibracji i testowaniu stosowano sygnał stały o nastawianym poziomie i oba działania dotyczyły właściwości statycznych przetwornika (charakterystyki we-wy). Procedury z zastosowaniem takiego sygnału są bardzo czasochłonne. Konieczność zmieniania wartości wyjściowej kalibratora pociąga za sobą konieczność oczekiwania na ustalenie się nowej wartości po każdej zmianie. Ponieważ wyznaczenie wartości pojedynczego progu wymaga zebrania odpowiednio dużej liczby próbek, aby zapewnić odpowiednio małą niepewność wyniku (w 12 bitowym przetworniku byłoby to 1000 próbek na stopień) przy większych rozdzielczościach, aby wyznaczyć wszystkie progi potrzebny byłby bardzo długi czas (dni). Zrezygnowano więc ze stosowania sygnału stałego na rzecz sygnałów zmiennych - deterministycznych i losowych. Problem czasu ustalania się wartości wielkości kalibrującej wówczas nie występuje, ponieważ wszystkie zebrane wartości pochodzą od tego samego sygnału.

B. Sygnały o równomiernej amplitudowej funkcji gęstości prawdopodobieństwa

Postulatem sformułowanym wobec sygnałów zmiennych, które miały być stosowane w kalibracji i testowaniu przetwornika A/C było, aby ich postać gwarantowała równomierną obsadę wszystkich poziomów kwantowania, co oznaczało, że ich AFGP powinna być funkcją prostokątną. Taki postulat teoretycznie spełniają sygnał szumowy o prostokątnej FGP oraz sygnał o liniowo narastającym zboczu, oba o zakresie zmian równym zakresowi wejściowemu przetwornika. Zastosowanie sygnałów o wymienionych cechach w praktyce okazało się trudne głównie z powodów związanych z generacją.

W przypadku sygnałów szumowych występują trudności z wygenerowaniem sygnału, który miałby stałe własności w odpowiednio szerokim zakresie częstotliwości zwłaszcza częstotliwości wysokich (powinny to być szum biały). Sygnał szumowy o prostokątnej FGP jest także podatny na zmianę FGP pod wpływem szumów (zazwyczaj Gaussowskich) z elementów elektronicznych generatora.

Sygnał o liniowo narastającym zboczu, spełnia postulat jednakowo często występowania każdej wartości, co przekłada się na równomierne obsadzanie wszystkich poziomów kwantowania. Stałe nachylenia zbocza (stała pierwsza pochodna w przedziale) oznacza, że prędkość zmian sygnału w całym zakresie przetwornika A/C jest jednakowa. W tym przypadku trudność polega na wygenerowaniu sygnału o odpowiednio dobrych parametrach - wysokiej liniowości i niskiej zawartości szumów, co jest istotne w przypadku kalibracji i testowania przetworników A/C o wyższych rozdzielczościach czy o małych nieliniowościach. Sygnał taki jest także wrażliwy na zniekształcenia amplitudowe i fazowe, które mogą wystąpić w części toru poprzedzającej przetwornik A/C. Kłopotliwa jest też ocena jakości i weryfikacja jego parametrów.

Zakres zastosowania sygnału stałego oraz sygnałów o równomiernej AFGP ogranicza się do kalibracji oraz estymacji parametrów statycznych przetwornika A/C z zastrzeżeniami, co do dokładności wynikającymi z wyżej wymienionych przyczyn.

C. Sygnał sinusoidalny

W roku 2000 ukazała się norma, która uporządkowała terminologię dotyczącą definiowania parametrów przetworników A/C oraz zasady testowania [3]. Większość parametrów zarówno dynamicznych jak i statycznych jest estymowana według zasad, w których stosowany jest wejściowy sygnał sinusoidalny. Taki sygnał jest także stosowany w nowoczesnych metodach kalibracji przetworników.

Wygenerowanie wysokiej jakości sygnału sinusoidalnego („czystość widmowa”, odpowiednia stałość częstotliwości) oraz dokładne sprawdzanie tej jakości jest relatywnie najprostsze.

Kluczowym problemem do rozwiązania w każdym konkretnym przypadku jest dobór częstotliwości sygnału sinusoidalnego, dobór częstotliwości próbkowania i określenie niezbędnej do estymacji liczby próbek.

Ważniejsze uwarunkowania zastosowania sygnału sinusoidalnego są następujące:

- stosowany sygnał pokrywa cały zakres przetwornika bez jego przekraczania,
- liczba próbek M powinna zapewnić przynajmniej jednokrotne wystąpienie każdego słowa kodowego na wyjściu, w N bitowym przetworniku określa ją zależność [3]:

$$M \geq \pi \cdot 2^N \quad (1)$$

- stosowane jest próbkowanie koherentne, w celu zapewnienia by każda z zebranych M próbek (z pojedynczego wycinka sygnału wejściowego) była z innej chwili czasu (zapobieżenie wielokrotnemu zebraniu próbek sygnału o identycznych fazach), polega ono na doborze częstotliwości sygnału f_0 , częstotliwości próbkowania f_s i liczby próbek M , tak by spełniony był warunek [3]:

$$M \cdot f_0 = J \cdot f_s \quad J, M \text{ liczby całkowite względnie pierwsze} \quad (2)$$

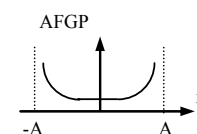
Stąd $f_0 = (J/M) \cdot f_s$. Ponieważ najczęściej $M = 2^i$, więc wystarczy by J było liczbą całkowitą nieparzystą. Dopuszczalna niestałość częstotliwości jest określona następująco [3]:

$$\Delta(f_0 / f_s) / (f_0 / f_s) \leq 1 / (2 \cdot J \cdot M) \quad (3)$$

Próbkowanie koherentne wymaga kontroli stałości relacji (2), czyli zapewnienia synchronizacji.

Zastosowanie sygnału sinusoidalnego do kalibracji i testowania przetwornika A/C nie jest rozwiązaniem optymalnym, lecz kompromisem z następujących powodów:

- zakres przetwornika jest testowany sygnałem o zmieniającym się nachyleniu, czyli w niestałych warunkach dynamicznych,
- wartości sygnału sinusoidalnego nie rozkładają się równomierne na wszystkie poziomy przetwornika, różne poziomy nie są jednakowo często obsadzane, z postaci AFGP sygnału, przedstawionej na rys. 4, wynika, że większych wartości jest więcej niż środkowych, wyliczenia wartości skwantowanych będą dokładniejsze dla wartości chwilowych z otoczenia amplitudy sygnału, bo przeprowadzane zostaną na podstawie większej liczby danych,



Rys. 4. AFGP sygnału sinusoidalnego $x(t) = A \cdot \sin \omega_0 t$

Fig. 4. Amplitude probability density function of a sinusoidal signal

- wyniki kalibracji są różne dla sygnałów kalibrujących o różnych AFGP i różnych częstotliwościach,

- korekcja jest skuteczna, wobec przetwarzanych sygnałów tego samego typu, co sygnał kalibrujący (ten sam typ AFGP i podobna częstotliwość),
- zależność wyników kalibracji od AFGP i częstotliwości sygnału kalibrującego oraz zależność wartości estymowanych parametrów przetwornika od AFGP i częstotliwości sygnału testującego są konsekwencją lokalnie występujących efektów cieplnych w strukturze przetwornika, ich stopień jest zależny od zasady przetwarzania.

5. Podsumowanie

Charakterystykę we-wy przetwornika A/C poddaje się korekcji (przez oddziaływanie na wynik konwersji a-c) w celu redukcji błędów nieliniowości różniczkowej i całkowitej oraz błędów kwantowania. Skuteczność korekcji jest ograniczona do sygnałów przetwarzanych takiego typu, jakiego był sygnał, którym kalibrowano przetwornik

Do kalibracji i testowania przetworników A/C stosowany jest sygnał sinusoidalny. Mimo, iż nie jest to optymalny typ sygnał (ze

względem na nieoptymalną AFGP) jest stosowany z uwagi na powszechną możliwość generacji takiego sygnału o wysokiej jakości.

Wartości parametrów (statycznych i dynamicznych) przetwornika A/C, estymowanych w procesie testowania, mają lokalny zakres adekwatności. Są cechami przetwornika, ale tylko wtedy, gdy przetwarza on sygnały takiego typu, jakiego był sygnał, przy którym były estymowane.

Zależność parametrów przetwornika A/C (zwłaszcza nieliniowości) od AFGP sygnału użytego do kalibracji/testowania jest konsekwencją lokalnie występujących efektów cieplnych w przetworniku, w stopniu zależnym od zasady przetwarzania.

6. Literatura

- [1] Dallet D., Berthoumieu Y., A survey on dynamic characterization of A/D converters, *Measurement*, Vol. 24, 1998.
- [2] Domańska A., Optymalizacja parametrów konwersji a-c z sygnałem ditherowym i uśrednianiem według kryterium wariancji błędów kwantowania, *Pomiary Automatyka Kontrola*, Nr 7/8, 2006.
- [3] IEEE Std. 1241, 2000.

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

Tytuł honorowego profesora Shanghai Maritime University



GDYNIA/SZANGHAJ – 20 listopada 2006 roku tytuł honorowego profesora Shanghai Maritime University otrzymał prof. Janusz Mindykowski z Akademii Morskiej w Gdyni. Prof. J. Mindykowski uznawany jest zarówno w Polsce, jak i na forum międzynarodowym, za jedną z czołowych postaci w zakresie pomiarów i diagnostyki systemów okrętowych, zwłaszcza w obszarze badań i oceny jakości energii elektrycznej. W jego dorobku naukowym znajduje się ponad 200 publikacji, kilkadziesiąt prac badawczych i wdrożeniowych, 18 patentów. Z Shanghai Maritime University prof. J. Mindykowski współpracuje od 1987 roku odgrywając wiodącą rolę podczas wspólnych prac naukowo-badawczych. W okresie współpracy 7-krotnie był zapraszany przez uczelnię chińską jako „visiting professor”, kierował 6 polsko-chińskimi przedsięwzięciami „Joint research project”, realizowanymi w ramach umowy międzyrządowej o współpracy naukowo-technicznej. Jest współautorem 17 prac naukowych opublikowanych wspólnie z uczonymi chińskimi na łamach czasopism *Polish Maritime Research* (1995, 1996), *Journal of Shanghai Maritime University* (2003, 2004) i *Zeszytów Naukowych AM* w Gdyni (2000, 2003), a także w materiałach konferencji o uznanej randze: *IEEE International Conference on Harmonic and Power Quality* (2004), *International Conference on Electrical Power Quality and Utilization* (2003, 2005), *International Marine Electrotechnology Conference and Exhibition* (1997, 2003, 2006), *IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics* (2002, 2003). Nadto, prof. J. Mindykowski był wiceprzewodniczącym Komitetu Programowego i członkiem Komitetu Organizacyjnego wspomnianej, cyklicznej konferencji *International Marine Electrotechnology Conference and Exhibition*, w latach 1994, 1997, 2000, 2003 i 2006, czterokrotnie wygłaszając zapraszone referaty plenarne. Prof. J. Mindykowski promuje również rozwój kadry naukowej w Shanghai Maritime University, w fazie końcowej jest przewodnikiem doktorskim pod jego promotorstwem mgr inż. Xu Xiaoyan p.t. „Measurement and Control of Ship Electrical Power System for Saving Energy

Consumption and Improving its Reliability”, wszczęty na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej w 2002 roku. W roku 2004 z okazji 20-lecia współpracy między SMU i AM w Gdyni, prof. J. Mindykowski został uhonorowany okolicznościową statuetką za “Outstanding achievements in the cooperation 1984-2004”.

