

Jan SUBOCZ, Marek ZENKER, Andrzej MROZIK

ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY W SZCZECINIE, KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGII I DIAGNOSTYKI
ul. Sikorskiego 37, 470-300 Szczecin

Wpływ temperatury na odpowiedź dielektryczną przepustów transformatorowych wysokiego napięcia z izolacją stałą

Dr hab. inż. Jan SUBOCZ

Autor ponad 140 prac z zakresu elektrotechnologii, fizyki procesów relaksacyjnych w dielektrykach oraz diagnostyki urządzeń elektrycznych. Członek Komitetu Elektrotechniki PAN, Komisji Nauk Elektrycznych o/Poznań PAN, PKME SEP, IEEE.



e-mail: jan.subocz@zut.edu.pl

Mgr inż. Andrzej MROZIK

Absolwent Wydziału Elektrycznego kierunku elektrotechnika w specjalizacji Przetwarzanie i Użytkowanie Energii Elektrycznej Doktorant w Katedrze Elektrotechnologii i Diagnostyki.



e-mail: andrzej.mrozik@zut.edu.pl

Mgr inż. Marek Łukasz ZENKER

Absolwent Wydziału Elektrycznego w kierunku fizyka techniczna oraz Elektrotechnika. Autor 13 publikacji z zakresu procesów relaksacyjnych w polimerach oraz wykorzystania metod nieniszczących w diagnostyce wysokonapięciowych układów izolacyjnych.



e-mail: zenekm@wp.pl

Keywords: RBP bushing, diagnostic, temperature, $\tan\delta$, polarization index Ka.

1. Wstęp

Obserwowana tendencja do przedłużania czasu pracy transformatorów związana jest ze zwiększeniem ryzyka awarii.

Doświadczenia z eksploatacji wskazują, że dla jednostek starszych niż 30 lat wskaźnik uszkodzeń przekracza 2%, co powoduje nadmierne obciążenie spółek dystrybucyjnych z tytułu usuwania skutków awarii oraz rekompensat za utraconą produkcję przez odbiorców energii. Z analizy uszkodzeń transformatorów wynika, że od 20% do 40% katastrofalnych awarii spowodowanych jest przez wysokonapięciowe przepusty izolacyjne [1,2]. Główną przyczyną uszkodzeń przepustów jest zaawansowany rozwój procesów starzeniowych, który powoduje przeważnie rozwój cieplnego mechanizmu przebicia. Z reguły uszkodzenia przepustów prowadzą do jego eksplozji i wycieku oleju, co może skutkować pożarem transformatora i zanieczyszczeniem środowiska [3]. Cechą charakterystyczną uszkodzeń izolatorów przepustowych jest ich występowanie po wielu latach pracy. Statystyki wykazują, że w skali międzynarodowej około 80% uszkodzeń izolatorów przepustowych ma miejsce między 10. a 20. rokiem użytkowania. Natomiast w Polsce przedział ten znajduje się raczej pomiędzy 20. a 30. rokiem eksploatacji.

Problematyka awaryjności i nowych metod diagnostyki przepustów jest przedmiotem intensywnych prac m.in. powołanej ostatnio grupy roboczej CIGRE WG A2.43. Prezentowany artykuł omawia istotny, dla prac tej grupy, problem wpływu temperatury na odpowiedź dielektryczną przepustu i jej interpretację fizyczną.

2. Obiekt i metodyka badań

Obiektem badań był przedstawiony na rysunku 1 rdzeń przepustu RBP 52 kV. Wpływ temperatury na odpowiedź dielektryczną izolacji przepustu RBP mierzono metodą częstotliwościowej spektroskopii dielektrycznej (z ang. FDS – Frequency Dielectric Spectroscopy) oraz metodą napięcia schodkowego SVM (z ang. Step Voltage Measurement). Pomiary metodą FDS wykonano miernikiem Dirana wraz z dołączonym oprogramowaniem Dirana 1.5 [4]. Temperaturę rdzenia regulowano w zakresie $-20^{\circ}\text{C} \div 110^{\circ}\text{C}$. Do tego celu użyto komory klimatycznej typu KPK 400 firmy Feutron, w której utrzymywano względną wilgotność powietrza $\text{RH} < 20\%$.

Charakterystyki FDS izolacji przepustu wyznaczono w przedziale częstotliwości ($10^{-4} \div 5 \cdot 10^3$) Hz. Do analizy przebiegów wykorzystano programy Origin v.8 oraz WINFIT firmy Novocontrol z zaimplementowanym empirycznym równaniem Havriliaka-Negamięgo (H-N) w postaci [5]:

Streszczenie

W artykule zaprezentowano pomiary zjawisk relaksacyjnych w izolacji modelu przepustu transformatorowego typu RBP (z ang. Resin Bonded Paper). Badania przeprowadzono w różnej temperaturze metodami: FDS (Frequency Domain Spectroscopy) oraz metodą napięcia schodkowego SVM (Step Voltage Measurement). Analiza charakterystyk FDS wykazała występowanie dwóch procesów relaksacyjnych. Pierwszy dotyczy β – relaksacji żywicy i papieru. Drugi związany jest z relaksacją granicy faz lub polaryzacji strukturalnej. W wysokiej temperaturze ujawnia się wpływ transportu masy jonowej. Stwierdzono, że w zależności od temperatury pomiaru, wartość $\tan\delta_{50\text{Hz}}$ może być zdominowana przez różne procesy elektryczne, co utrudnia interpretację fizyczną na potrzeby diagnostyki izolacji. Zaobserwowano, że wartości wskaźnika polaryzacji Ka uzyskanych w teście SVM, są mało zależne od temperatury.

Słowa kluczowe: przepust RBP, diagnostyka, temperatura, $\tan\delta$, wskaźnik polaryzacji Ka.

Influence of temperature on dielectric response of HV transformers bushings with solid insulation

Abstract

The main cause of transformer bushings failures are developed ageing processes which usually lead to thermal mechanism of breakdown. This may result in bushing explosion and oil leak and, subsequently, transformer fire and environment contamination. The presented problem of failures and new diagnostic methods of bushings is the field of interest of CIGRE WG A2.43. The paper describes measurements of relaxation phenomena in the insulation of RBP type transformer bushing (Resin Bonded Paper). The research was conducted with two methods: FDS (Frequency Domain Spectroscopy) and SVM (Step Voltage Measurement). The analysis of FDS results showed the presence of two relaxation processes. The first one comes from β -relaxation of resin and paper, while the second one is related to interface or structural relaxation. In high temperature there is visible influence of ion mass transport. It was found that the values of $\tan\delta_{50\text{Hz}}$, according to the measurement temperature, might be activated by various electric processes, which makes physical interpretation for insulation diagnostics more difficult. The analysis of polarization index Ka values obtained from SVM test showed that they are slightly dependent on temperature.

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon' - j\varepsilon'' = -j \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega} \right)^N + \frac{\Delta\varepsilon}{(1 + (j\omega\tau)^\alpha)^\beta} + \varepsilon_\infty \quad (1)$$

gdzie: $\Delta\varepsilon$ - polaryzowalność, ε_∞ - przenikalność optyczna, τ - czas relaksacji, α, β - stałe H-N, σ_0 - konduktywność.



Rys. 1. Rdzeń przepustu RBP w komorze klimatycznej
Fig. 1. RBP bushing core in a climatic chamber

Test napięciem schodkowym przeprowadzono miernikiem MI 3200 Metrel Theraohm, o stopniach napięcia pomiarowego odpowiednio 2, 4, 6, 8, 10 kV, i sekwencją czasu pomiaru odpowiednio 10, 5, 5, 5, 5 min. Wskaźnik polaryzacji K_a obliczono z zależności [6]:

$$K_a = \frac{i_{30M}}{i_{30C}} \quad (2)$$

gdzie: i_{30M} , i_{30C} – odpowiednio zmierzony i obliczony prąd upływu dla $t = 30$ min.

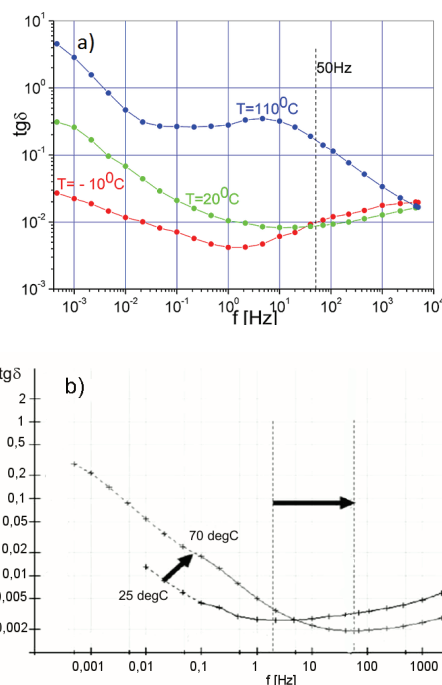
Wyniki pomiarów zostały opracowane za pomocą programu Origin v.8.

3. Wpływ temperatury na charakterystyki FDS

Na rysunku 2 przedstawiono wpływ temperatury na częstotliwościowe charakterystyki współczynnika strat dielektrycznych $\tan\delta$ testowanego rdzenia przepustu RBP (rys. 2a) oraz podobne zależności dla przepustu RIP otrzymane w pracy [7] (rys. 2b).

Na ich podstawie zaobserwowano, że ze wzrostem temperatury następuje przesunięcie się charakterystyki $\tan\delta$ w stronę wyższych częstotliwości, co jest typowym zachowaniem notowanym w dielektrykach stałych. Ich analiza wykazała istnienie dwóch głównych procesów relaksacyjnych. W zakresie wysokich częstotliwości występuje β - relaksacja niezwiązanych grup bocznych i końcowych łańcuchów żywicy oraz celulozy. Natomiast w zakresie niższych częstotliwości występuje relaksacja strukturalna żywicy i papieru. Możliwa jest również relaksacja Maxwella-Wagnera na granicy faz. Z tych zależności nasuwa się spostrzeżenie, że podczas eksploatacyjnego pomiaru $\tan\delta_{50\text{Hz}}$ temperatura przepustu ma bardzo istotne znaczenie dla jego interpretacji fizycznej i tym samym postawienia trafnej diagnozy stanu technicznego izolacji. Przykładowo, bowiem dla pomiaru przeprowadzonego przy częstotliwości 50 Hz w temperaturze 20°C, mierzone są praktycznie właściwości strukturalnej izolacji odpowiadające β - relaksacji, natomiast w wysokiej temperaturze wartość współczynnika $\tan\delta_{50\text{Hz}}$ determinują procesy związane z relaksacją strukturalną i ładunku przestrzennego (rys. 2a), co całkowicie zmienia jego fizyczną interpretację. Z powyższego zachowania wynika istotny dla praktyki eksploatacyjnej wniosek, że zmierzono-

ne wartości $\tan\delta$ w jednej lub kilku wybranych częstotliwościach są niewystarczające dla poprawnej oceny stanu technicznego izolacji. Natomiast badania w szerokim spektrum częstotliwości pozwalają ustalić charakter procesów relaksacyjnych i w istotny sposób poprawić fizyczną interpretację odpowiedzi dielektrycznej izolacji, a tym samym i diagnozę. Należy przy tym zwrócić uwagę, że jest to ogólny problem dotyczący poprawnej analizy pomiarów, gdyż podobny wpływ temperatury notowano również w izolacji przepustów RIP (rys. 2b) [7]. Zagadnienie to będzie po części analizowane w dalszej części artykułu.



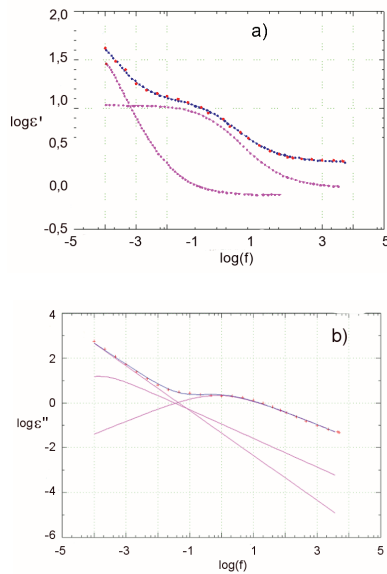
Rys. 2. Częstotliwościowe zależności $\tan\delta$ dla różnej temperatury modelu przepustu RBP (a) oraz przepustu RIP (b) [7]

Fig. 2. Frequency- $\tan\delta$ relationships for various temperature of RBP bushing model (a) and of RIP bushing (b)

Fizyczną interpretację pomiarów spektroskopowych przepustów z izolacją „twardą” można pokazać na przykładzie analizy charakterystyki zespolonej przenikalności dielektrycznej $\varepsilon^*(\omega)$ z zastosowaniem równania (1) dla temperatury pomiaru $T=110^\circ\text{C}$. Wykazała ona, że w zakresie częstotliwości wyższych od 0,1 Hz stwierdzono relaksację Davidsona-Cole’a o rozłożonych stałych czasowych ($\tau = 0,24$ s, $\Delta\varepsilon = 9,33$, $\alpha = 0,55$, $\beta = 1$), natomiast dla $f < 0,1$ Hz wolnozmienną relaksację H-N o dużym ładunku ($\tau = 1410$ s, $\Delta\varepsilon = 45,08$, $\alpha = 0,77$, $\beta = 0,82$). Odpowiedź dielektryczną uzupełnia przewodnictwo jonowe ($N = 1$) (rys. 3a, 3b). Poprawność dokonanej analizy potwierdzono na wykresie Cole – Cole (rys. 3c)

Czas relaksacji oraz pozostałe parametry pierwszego procesu relaksacyjnego wskazują, że jest to typowa dla kompozytów polimerowych polaryzacja grup końcowych i bocznych. Natomiast w zakresie ultraniskiej częstotliwości obserwuje się makroskopową polaryzację żywicy i celulozy, granicy faz „papier - żywica” lub też fazy lepkosprężystej powstającej w pobliżu punktu przemiany fazowej.

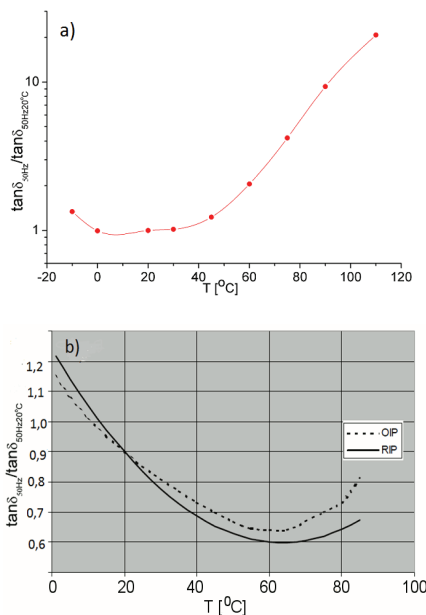
Warto przy tym zwrócić uwagę, że dla temperatury 20 °C (rys. 2a, 2b) w przedziale częstotliwości ($10^2 \div 10^4$ Hz) polaryzacja zdominowana jest przez β - relaksację, a w przedziale częstotliwości niższej od 10 Hz przez polaryzację strukturalną. Tak więc z punktu widzenia fizyki zjawisk pomiaru $\tan\delta_{50\text{Hz}}$ wykonywane dla temperatury przepustu w zakresie 30÷70 °C są bardzo trudne do interpretacji ponieważ główne procesy polaryzacyjne ujawniają się poza częstotliwością $f = 50$ Hz.



Rys. 3. Analiza procesów relaksacyjnych wg wzoru (1) w modelu przepustu RBP dla temperatury 110°C. Analiza części rzeczywistej (a) i urojonej (b) przenikalności dielektrycznej

Fig. 3. Analysis of relaxation processes according to equation (1) for RBP bushing model in temperature 110°C. Analysis of the real (a) and imaginary (b) part of the complex permittivity

Na rysunku 4 pokazano wpływ temperatury na zmiany $\tan\delta_{50\text{Hz}}$ izolacji przepustów RBP, RIP i OIP [8], przy czym wartości te podano w jednostkach względnych odniesionych do temperatury 20°C.



Rys. 4. Wpływ temperatury na względne zmiany wartości $\tan\delta_{50\text{Hz}}$ dla modelu przepustu RBP(a) oraz RIP i OIP (b) [8]

Fig. 4. Effect of temperature on $\tan\delta_{50\text{Hz}}$ value for RBP bushing model (a), RIP and OIP bushing (b) [8]

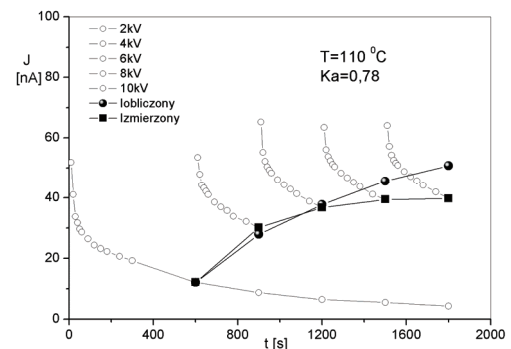
Z porównania charakterystyk można zauważyć, że w zakresie niskiej temperatury zmiany wartości $\tan\delta_{50\text{Hz}}$ były podobne dla wszystkich rodzajów przepustów. Jednak dla temperatury wyższej od 20°C współczynniki otrzymywane dla izolacji RBP znacząco różniły się od wartości podawanych dla podobnej izolacji, ale wykonanej w technologii RIP [8].

Efekt ten prawdopodobnie jest spowodowany różną energią aktywacji procesów polaryzacyjnych. Dane literaturowe [7] wskazują, że jest ona funkcją złożonych czynników takich jak np. rodzajem użytych materiałów, morfologią izolacji czy też technologią jej wykonania. Tak więc przedstawione na rysunku 4 współczyn-

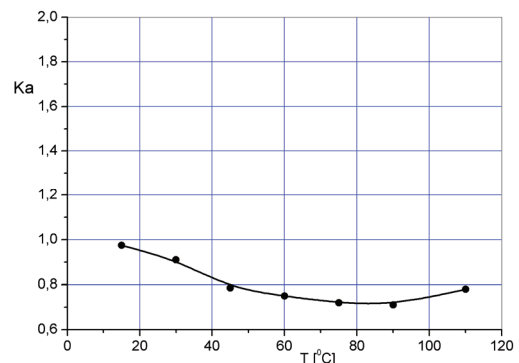
niki korekcyjne, zwłaszcza w wysokiej temperaturze, powinno się raczej traktować jako właściwe dla danego typu przepustu i sposobu wykonania. W odniesieniu do przepustów z izolacją „suchą” będą one zależne od rodzaju użytej żywicy oraz morfologii granicy faz „żywica - papier”, która bezpośrednio zależy od technologii wykonania kompozytu i sposobu jego utwardzenia.

4. Wpływ temperatury na test SVM

Na rysunku 5 pokazano przykładowy wynik testu SVM wykonanego dla modelu przepustu RBP w temperaturze 110°C. Obliczony wg zależności (2) wskaźnik polaryzacji wyniósł $K_a = 0,78$. Z przedstawionej na rysunku 6 charakterystyki wynika natomiast, że ze wzrostem temperatury obserwuje się tendencję do zmniejszania się jego wartości, co prawdopodobnie jest skutkiem skracania się stałych czasowych procesów relaksacyjnych. Jednak obserwowany zakres zmian ($K_a \approx 0,7 \div 0,98$) z punktu widzenia progowych wartości K_a służących do oceny jakości izolacji kompozytowej jest mało znaczący. Warto przy tym zaznaczyć, że dla izolacji wykonanej z kompozytów żywic progowe wartości wskaźnika polaryzacji wynoszą odpowiednio $K_a > 2$ dla akceptowalnego stanu technicznego oraz $K_a > 7$ dla izolacji o zaawansowanych procesach starzeniowych. Tak więc wydaje się, że zanotowany względnie mały wpływ temperatury pozwala z większą wiarygodnością ocenić stan techniczny przepustu na podstawie wartości wskaźnika polaryzacji, zwłaszcza w sytuacji gdy pomiary wykonywane są bezpośrednio po wyłączeniu transformatora spod napięcia, a w izolacji charakteryzuje się dużym rozkładem wewnętrznej temperatury.



Rys. 5. Test napięciem schodkowym przepustu RBP w temperaturze 110°C
Fig. 5. Step Voltage Test of RBP bushing for temperature 110°C



Rys. 6. Zależność wskaźnika polaryzacji K_a od temperatury przepustu RBP
Fig. 6. Dependence of polarization index K_a on RBP bushing temperature

5. Wnioski

Pomiary spektroskopowe przepustów z izolacją kompozytową na bazie żywic wykazały, że występują w niej dwa główne proce-

sy polaryzacyjne zdominowane przez β – relaksację żywicy i papieru, relaksację makroskopową i granicy faz oraz relaksację fazy lepko sprężystej w temperaturze w zakresie przejścia fazowego.

Zaobserwowano, że w zależności od warunków pomiaru oraz rodzaju kompozytu użytego do wykonania izolacji, wartości $\tan\delta_{50\text{Hz}}$ mogą być zdominowane przez odmienne procesy relaksacyjne co utrudnia jego fizyczną interpretację i ocenę stanu technicznego izolacji. Wpływ tych czynników jest bardziej widoczny przy podwyższonej temperaturze pomiaru. Dlatego poprawna diagnostyka izolacji przepustów możliwa jest przy stosowaniu pomiarów procesów polaryzacyjnych w szerokim spektrum częstotliwości.

Dynamiczne pomiary tych procesów można również wykonać w dziedzinie czasu np. metodą skokowego przyrostu napięcia (SVM). Wstępne pomiary wykazały, że w przypadku tego testu wpływ temperatury na wartości wskaźnika polaryzacji K_a jest znacznie mniejszy niż na wartość $\tan\delta_{50\text{Hz}}$. Ponadto, zdaniem autorów interpretacja fizyczna tego wskaźnika jest bardziej jednoznaczna niż współczynnika strat $\tan\delta_{50\text{Hz}}$.

Pracę zrealizowano w ramach projektu rozwojowego NCBiR R01004406/2009.

Autorzy wyrażają podziękowanie Dyrekcji i Pracownikom PGE Elektrownia Dolna Odra za pomoc w realizacji badań.

6. Literatura

- [1] Walczak K., Gielniak J., Graczkowski A., Morańda H.: Analiza FDS w ocenie zawilgocenia izolacji transformatorów, *Pomiary Automatyka Kontrola*, 10 (2008), 727 – 729.
- [2] Subocz J.: *Transformatory w eksploatacji*, Wydawnictwo Energo – Complex, kwiecień 2007.
- [3] Kaźmierski M., Szymański Z.: Przyczynek do diagnostyki stanu technicznego izolatorów przepustowych transformatorów, *Międzynarodowa konferencja transformatorowa, Transformator 2009*, 99- 111.
- [4] <http://omicon-dirana.software.informer.com/>.
- [5] Zenker M.: Spektroskopia dielektryczna układu papier – olej z osadami na celulozie, *Przegląd Elektrotechniczny*, 11b (2010), 82-85.
- [6] Mroziak A.: Odpowiedź dielektryczna modelu przepustu wysokiego napięcia, *Przegląd Elektrotechniczny*, 11b (2010), 59-62.
- [7] Krüger M., Kraetge A., Koch M., Rethmeier K., Pütter M., Hulka L., Koch N., Muhr M., Summereder C.: New diagnostic tools for high voltage bushings, *Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering*, Copyringt 2009 SAIEE, Innes House, Johannesburg.
- [8] ABB Bushing diagnostics and conditioning, www.05.abb.com, zasoby internetowe na dzień 25.02.2011

otrzymano / received: 11.01.2011

przyjęto do druku / accepted: 01.03.2011

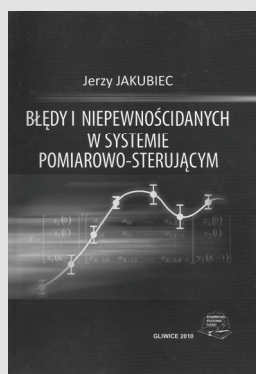
artykuł recenzowany

RECENZJE

Błędy i niepewności danych w systemie pomiarowo - sterującym

Jerzy Jakubiec

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2010, str. 334, poz. bibl. 115, ISBN-978-83-7335-745-7



Książka jest jednym z pierwszych podręczników z dziedziny obróbki danych w automatycznych systemach pomiarowych. Współczesny system, często wielowejściowy i wielowyjściowy, o danych wejściowych zmieniających się z dużymi prędkościami, zawiera część sprzętową i programową, które często są modyfikowalne w czasie jego pracy. Konsekwencją tych cech jest nie tylko złożoność i wielowariantowość systemu ze względu na jego zasadnicze funkcje, ale także różnorodność błędów wyni-

ków na kolejnych etapach przetwarzania danych. W praktyce metrologicznej teoria szacowania niepewności mezurandów mierzonych bezpośrednio lub pośrednio jest na ogół upowszechniona i stosowana, ale w złożonych systemach pomiarowych niepewność określana jest na ogół behawioralnie, przy uwzględnieniu określonych danych wejściowych i odpowiadających im danych wyjściowych. Podejście zaprezentowane w książce dotyczy zagadnień powstawania i propagowania błędów wewnątrz systemu, a więc jest to podejście pogłębione, ważne dla projektanta i programisty systemu. Korzyścią wynikającą z zastosowania podejścia zaprezentowanego w książce jest możliwość identyfikacji najważniejszych źródeł niepewności wewnątrz systemu i ich eliminacji lub minimalizacji. Dzięki temu użytkownik systemu może otrzymać mniejszą i bardziej wiarygodnie oszacowaną wartość nie-

pewności danych na wyjściach systemu. Podejście autora jest nowatorskie, ścisłe, zgodne z obowiązującymi ogólnymi dokumentami metrologicznymi.

Autor stosuje konsekwentnie definicję probabilistyczną błędów na wszystkich etapach przetwarzania danych w systemie pomiarowym, wyjaśnia jak błędy te propagują w torach przetwarzania i wskazuje ogólne sposoby określania niepewności wyników reprezentujących bardzo złożone mezurandy. Wiele pomysłów i mechanizmów przetwarzania jest zilustrowanych przykładami obliczeniowymi w języku Matlab.

Treść książki ma logiczny układ, prowadzący Czytelnika od pojęć podstawowych związanych z systemem pomiarowym, przez opis działania i analizę błędów przetworników A/C, aspekty metrologiczne algorytmów przetwarzających ciągi danych, aspekty metrologiczne próbkowania, błędy opóźnień powstające przy przesyłach sygnałów w systemie, aż do określenia procedur obliczenia niepewności danych wyjściowych systemu.

Problematyka książki ma tendencję rozwojową ze względu na upowszechnienie systemów pomiarowych i sterujących oraz stawiane im rosnące wymagania metrologiczne. Ten kierunek rozwoju prowadzi do zwiększenia dokładności przetwarzania danych, zwiększenia niezawodności systemów i zwiększenia bezpieczeństwa aplikacji. Książka jest wartościowym podręcznikiem akademickim, godnym polecenia studentom i doktorantom specjalizującym się w metrologii, mechatronice, technice systemów pomiarowych i sterujących, informatyce stosowanej.

Opracowanie: Prof. Tadeusz SKUBIS