

Paweł BIENKOWSKI¹, Marcin ŚWIDERSKI², Bartłomiej ZUBRZAK¹

¹ POLITECHNIKA WROCLAWSKA, INSTYTUT TELEKOMUNIKACJI TELEINFORMATYKI I AKUSTYKI, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

² UNIWERSYTET EKONOMICZNY WE WROCLAWIU, INSTYTUT RACHUNKOWOŚCI, ul. Komandorska 118/120, 53-345 Wrocław

Wybrane aspekty wzorcowania mierników pola elektromagnetycznego

Dr inż. Paweł BIENKOWSKI

Absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej (Mgr inż. 1992, Dr 1998). Adiunkt w Instytucie Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki PWr, Kierownik Pracowni Ochrony Środowiska Elektromagnetycznego i z-ca kierownika akredytowanego laboratorium badawczego (AB-361) i wzorującego (AP-078). Zajmuje się szeroko pojętą metrologią pola elektromagnetycznego, zwłaszcza pod kątem ochrony środowiska i bezpieczeństwa pracy w polu elektromagnetycznym.

e-mail: Pawel.bienkowski@pwr.wroc.pl



Mgr inż. Bartłomiej ZUBRZAK

Absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej Doktorant w Instytucie Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki PWr, członek personelu Pracowni Ochrony Środowiska Elektromagnetycznego oraz akredytowanego laboratorium badawczego (AB-361) i wzorującego (AP-078). Podejmuje tematykę niepewności związanych z metrologią pola elektromagnetycznego i zajmuje się automatyzacją procesów wzorcowania.

e-mail: Bartlomiej.zubrzak@pwr.wroc.pl



Mgr inż. Marcin ŚWIDERSKI

Absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Wrocławskiej oraz Wydziału Matematyki i Informatyki Uniwersytetu Wrocławskiego. Doktorant w Instytucie Rachunkowości Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu. W pracy zawodowej zajmuje się controllingiem finansowym, a więc jednym z działów rachunkowości zarządczej.

e-mail: marcin0034@wp.pl



Streszczenie

Wzorcowanie mierników PEM to proces, w którym pojawia się wiele aspektów dyskusyjnych. Praca przedstawia niektóre z nich wraz z różnymi podejściami do ich rozwiązania. Dokonano w niej porównania metod uśredniania wyniku pomiaru, a także poruszono inne kwestie mające wpływ na wynik wzorcowania jak np. dobór kąta obrotu w trakcie pomiaru izotropowego wraz z odniesieniem się do norm i zaleceń. Praca stanowi podłoże do dalszych badań oraz do dyskusji.

Słowa kluczowe: wzorcowanie, pole elektromagnetyczne, mierniki PEM, izotropowość.

Selected aspects of electromagnetic field meter calibration

Abstract

Electromagnetic field (EMF) meter calibration is a process full of many aspects open to questions. The first section of the paper contains a review of EMF meter calibration methods including basic metrological characteristics. This topic was developed in the next sections when paying a special attention to essential factors influencing the calibration result. The parameter on which greatest attention is focused is isotropy. In the paper there is analysed the influence of many elements connected with isotropy evaluation, like for example position of an EMF detector in relation to the field vector (Fig. 3) or selection of a measurement step angle (Tab.1 and Fig. 4), on the calibration result. There are analysed problems related to isotropy estimation when using a few different approaches to its solving. There is also made a comparison of measurement result averaging methods with use of proper statistic analysis (Figs. 6, 7 and 8). Questions of minor importance including references to available standards and recommendations are dealt with [1, 4, 8, 9]. The presented aspects are specific evaluation of methods presented in European and American standards and recommendations as well as signalization of possible methodology differences resulted from its meaning diversities. Simultaneously There is shown the lack of Polish standards in this field. The ground for further research and open discussion is given.

Keywords: electromagnetic field, EMF meters, calibration, isotropy.

1. Wzorcowanie

W szeroko pojętej metrologii podstawowym czynnikiem, na którym bazuje pomiar jest odpowiednio wywzorcowany przyrząd pomiarowy. Wzorcowanie (nazywane także kalibracją) to zbiór operacji ustalających, w określonych warunkach, relację między wartościami wielkości mierzonej wskazanymi przez przyrząd pomiarowy, a odpowiednimi wartościami realizowanymi przez wzorce jednostki miary [1]. Innymi słowy wzorcowanie to przypisanie wskazaniu przyrządu wzorcowanego odpowiadającej temu wskazaniu wartości wielkości mierzonej. Taką grupę przyrządów stanowią również mierniki natężenia pola elektromagnetycznego (PEM) stosowane w pomiarach związanych z kompatybilnością elektromagnetyczną i ochroną przed nadmierną ekspozycją ludzi i środowiska na PEM. Są to mierniki pola o stosunkowo dużym natężeniu (w zależności od mierzonej składowej pola od części V/m, A/m lub W/m² aż do kV/m, kA/m i kW/m²) w szerokim paśmie częstotliwości od pól stałych aż do zakresu mikrofal (rzędu dziesiątek GHz). Dla tego typu mierników istotne są trzy podstawowe rodzaje charakterystyk metrologicznych[2]:

- Charakterystyka amplitudowa – przedstawia reakcję urządzenia wzorcowanego na zmianę amplitudy wielkości mierzonej. W rozważanym przypadku będzie to zmiana napięcia na wyjściu czujnika w stosunku do zmiany natężenia mierzonego pola elektromagnetycznego. Zwykle oczekuje się, żeby zmiany te były liniowe (lub opisane inną funkcją, np. kwadratową), a odchylenie od zadanej funkcji jest miarą nieliniowości czujnika.
- Charakterystyka częstotliwościowa – obrazuje reakcję urządzenia wzorcowanego na zmianę częstotliwości wielkości mierzonej, czyli częstotliwości generowanego pola elektromagnetycznego, przy zachowaniu stałego natężenia PEM.
- Charakterystyki czasowe – określają takie parametry jak czas reakcji urządzenia potrzebny układowi pomiarowemu na osiągnięcie 90% wartości ustalonej wskazań po skokowej zmianie sygnału pobudzającego oraz zmianę reakcji miernika na pole modulowane, zwłaszcza z modulacją impulsową w stosunku do pola niemodulowanego pola harmonicznego. Istotność poszczególnych charakterystyk zależy od konstrukcji i przeznaczenia miernika. Np. do pomiarów przywołanych wcześniej pomiarów potrzeby kompatybilności elektromagnetycznej czy ochrony przed nadmierną ekspozycją na PEM bardzo często stosuje się mierniki szerokopasmowe z czujnikami o charakterystyce wszechkierunkowej (sferycznej) [3]. Dla takich czujników niezwykle istotnym parametrem, poza wymienionymi charakterystykami metrologicznymi, jest izotropowość zdefiniowana jako odchylenie wskazań miernika w zależności od kierunku padania mierzonego PEM [4].

2. Izotropowość jako parametr metrologiczny miernika PEM

Mierniki PEM mogą być wyposażone w różne (często wymienne) sondy. Dzielimy je na kierunkowe (jednoosiowe) oraz izotropowe (trójosiowe, wszechkierunkowe) i te ostatnie będą przedmiotem dalszych analiz.

Sondy kierunkowe to takie, których charakterystyka przestrzenna odpowiada charakterystyce pojedynczego dipola, a tym samym wskazanie miernika z taką sondą zależy od wzajemnego położenia anteny czujnika i kierunku wektora pola. Dla uzyskania prawidłowego wyniku pomiaru niezbędne jest wyszukanie w przestrzeni takiego położenia, w którym wskazanie jest maksymalne. W tym przypadku warunki pomiaru są zbliżone do warunków wzorcowania – w obu przypadkach sondę miernika należy ustawić na maksimum wskazań.

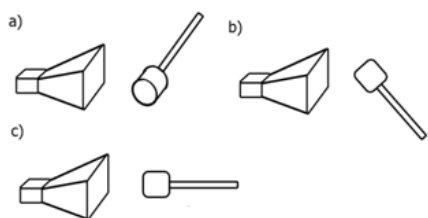
Sondy izotropowe (dominujące na rynku) zbudowane są najczęściej z zestawu trzech czujników umieszczonych ortogonalnie, a wynikiem pomiaru jest RSS (z ang. *Root Square Sum* – pierwiastek sumy kwadratów). Jeżeli poszczególne czujniki umieścimy wzdłuż osi kartezjańskiego układu współrzędnych, to wynik pomiaru można zapisać jako:

$$E_{total} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (1)$$

Spełnienie tej zależności gwarantuje niezmiennosc wskazania miernika w funkcji wzajemnego położenia sondy pomiarowej i wektora mierzonego pola. W praktyce występuje szereg czynników, które powodują, że charakterystyka ta nie jest idealna i wskazania miernika zmieniają się przy obracaniu sondy. Miarą tych zmian jest właśnie izotropowość. Ponieważ ideą stosowania sond izotropowych jest brak konieczności wyszukiwania maksimum wskazań, nie ma praktycznie możliwości zapewnienia powtarzalności warunków wzorcowania i pomiaru w trakcie normalnej eksploatacji miernika. Oczywiście i w tym przypadku można zalecić wyszukiwanie wskazania maksymalnego, ale po pierwsze - to kłóci się z ideą stosowania sond sferycznych, a po drugie - większość dostępnych komercyjnie mierników posiada sondy sztywno połączone z miernikiem, co uniemożliwia swobodny obrót urządzenia z jednoczesnym odczytem wartości ze wskaźnika.

Napisane powyżej powoduje, że niezbędne jest ustalenie procedur wyznaczania izotropowości oraz określenie, jak należy wyznaczyć wynik wzorcowania.

Izotropowość zależna jest od konstrukcji sondy i zwykle zmienia się w funkcji częstotliwości, a często również natężenia mierzonego PEM [3, 4]. Dla wyznaczenia izotropowości idealnym rozwiązaniem byłoby takie obrócenie sondy, podczas którego zebrano by pomiary z całej powierzchni sfery, ale ze względów praktycznych pomiaru realizuje się zwykle w jednej płaszczyźnie. Definiuje się trzy sposoby ustawienia wzorcowanej sondy względem wektora PEM w warunkach wzorcowania (rys. 1): ustawienie równoległe i prostopadłe uchwyty sondy do kierunku propagacji oraz ustawienie pod tzw. kątem analitycznym [5].



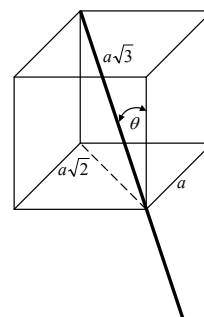
Rys. 1. Ustawienia sond: połozenie prostopadłe (a), pod kątem analitycznym (b) i równoległe (c)

Fig. 1. Probe position: perpendicular (a), under analytical angle (b) and parallel (c)

Połozenie równoległe (*physical major axis*) minimalizuje wpływ oddziaływania PEM na doprowadzenia sygnału między sondą a miernikiem, które zwykle prowadzone są w uchwycie sondy. W połozeniu prostopadłym (*physical minor axis*) uchwyt sondy ustawiony jest prostopadłe do wektora pola i kierunku propagacji. Jest to typowe połozenie sond przy wzorcowaniu np. używając popularnego wzorca PEM, jakim jest linia TEM (ang. *Transverse Electromagnetic*) [6].

Żadne z ustawień nie jest w pełni uniwersalne i jego użyteczność zależy od wewnętrznej konstrukcji sondy (a właściwie od ustawienia czujników względem osi odniesienia, jaką jest uchwyt sondy). W praktyce przyjmuje się, że najbardziej uniwersalne jest ustawienie b). Jeżeli sonda izotropowa zbudowana jest z trzech pojedynczych czujników umieszczonych ortogonalnie wzdłuż trzech krawędzi wirtualnego sześcianu, którego przekątną jest oś uchwytu sondy, to przy obrocie wokół osi, co 120° kolejny z czujników składowych ustawia się w połozeniu swojego największego wskazania, kiedy dwa pozostałe są ustawione na minimum reakcji, a tym samym przy pełnym obrocie uzyskuje się informację o stosunku wskazań poszczególnych sond oraz izotropowości całej sondy. Kąt analityczny definiuje zależność:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{a\sqrt{2}}{a\sqrt{3}}\right) = \arcsin\left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right) = 54,74^\circ \quad (2)$$



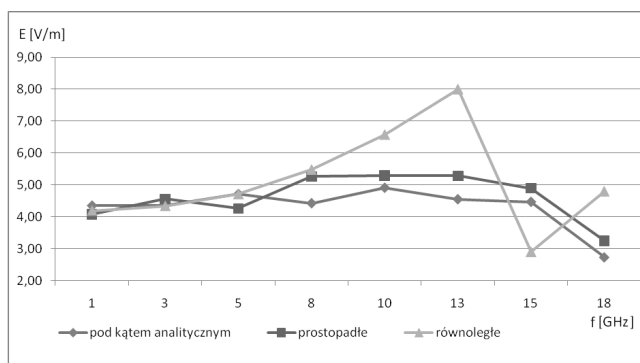
Rys. 2. Definicja kąta analitycznego

Fig. 2. Definition of analytical angle

3. Czynniki wpływające na wynik pomiaru izotropowości

Ustawienie sondy PEM

W zależności od zastosowanego ustawienia otrzymane wyniki mogą się od siebie różnić, dlatego istotne jest zawarcie informacji o połozeniu sondy PEM wraz z prezentacją wyników kalibracji.



Rys. 3. Przykładowe wyniki wyznaczania charakterystyki częstotliwościowej tego samego miernika PEM w trzech różnych połozeniach sondy pomiarowej

Fig. 3. Exemplary comparison of EMF values obtained during calibration taken on the same device in three different probe position

Rysunek 3 prezentuje przykładowe wyniki wyznaczenia charakterystyki częstotliwościowej miernika z sondą izotropową pracującą w paśmie 1MHz-18GHz przy różnych ustawieniach sondy. Wynikiem wzorcowania jest wskazanie miernika przy stałym natężeniu pola wzorcowego w funkcji częstotliwości. W zależności od sposobu ustawienia sondy, różnice w uzyskanych wynikach sięgają nawet 30%.

Dobór liczby pomiarów cząstkowych w trakcie obrotu sondy

Przy wyznaczaniu izotropowości sondy jednym z istotnych parametrów jest liczba pomiarów podczas obrotu sondy w polu wzorcowym, która determinuje zarówno dokładność odwzorowania charakterystyki przestrzennej sondy jak i czas wykonania wzorcowania. Zalecany krok pomiarowy powinien być mniejszy niż 15° [7], co daje co najmniej 24 pomiary na jeden obrót. Autorzy dysponując zautomatyzowanym stanowiskiem pomiarowym o rozdzielczości $1,8^\circ$ dokonali analizy wpływu ilości kroków na ostateczny wynik pomiaru. Jako odniesienie do analiz przyjęto pomiar z największą rozdzielczością, to jest 200 pomiarów na jeden obrót.

Tabela 1 prezentuje wyniki porównania wyrażone we współczynniku będącym stosunkiem zmierzonego PEM przy kroku o rozdzielczości $1,8^\circ$ do wyników pomiarów odpowiednio z rozdzielczością $3,6^\circ$; $7,2^\circ$ i $14,4^\circ$. Jak widać największa różnica to 2% (w przypadku 100 kroków na obrót dla częstotliwości 2,5 GHz).

Tab. 1. Porównanie wyników pomiaru PEM w zależności od liczby kroków na obrót

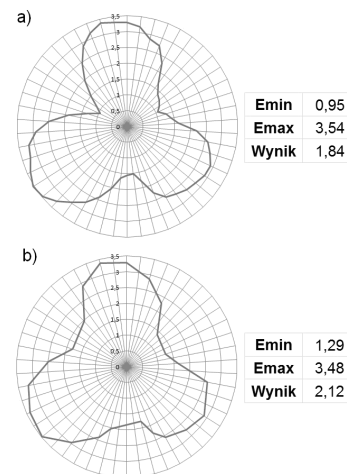
Tab. 1. Comparison of EMF measurement results depending on step count per rotation

Liczba kroków na obrót (kąt kroku pomiarowego)	Stosunek wartości natężenia PEM odniesienia (dla kąta $1,8^\circ$) do wartości uzyskanych przy poszczególnych kątach kroku pomiarowego dla różnych częstotliwości PEM				
	1 GHz	1,5 GHz	2 GHz	2,5 GHz	3 GHz
200 ($1,8^\circ$)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100 ($3,6^\circ$)	0,99	1,00	1,00	1,02	1,00
50 ($7,2^\circ$)	1,01	1,01	1,00	1,01	1,01
25 ($14,4^\circ$)	1,01	1,01	1,00	1,01	1,01

Po serii badań, do praktycznego stosowania przyjęto liczbę kroków równą 50 pomiarów na obrót (krok co $7,2^\circ$), co jak wskazują powyższe wyniki jest wartością zapewniającą prawidłowe określenia izotropowości sondy. Pomiar o takim kroku spełnia zalecenia oraz stanowi doskonały kompromis między czasem pomiaru, a jego dokładnością, która powinna być na tyle duża, by wychwycić prawidłowo wartość minimalną i maksymalną z całej serii pomiarów, a także być w stanie ujawnić ewentualne defekty w charakterystyce przestrzennej sondy. Równie istotnym parametrem jest czas pomiaru, który bezpośrednio przekłada się na koszt wzorcowania. Można zauważyć, że liczba 25 pomiarów na obrót również się sprawdza i spełnia zalecenia, jednakże doświadczalnie okazało się, że przy tak dużym kroku pomiarowym może zaistnieć sytuacja analogiczna do pokazanej na rysunku 4. Jako wynik ostateczny przyjęto średnia arytmetyczną ze wskazania maksymalnego i minimalnego.

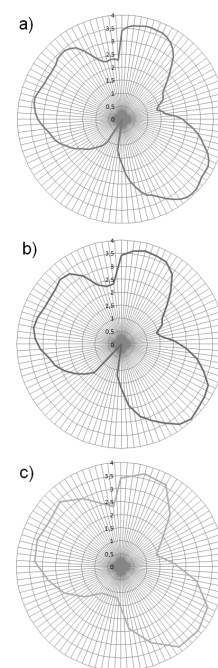
Rysunek 4 przedstawia sytuację, w której zbyt mała liczba kroków może wpłynąć na ostateczny wynik pomiaru. W przypadku b) nieprawidłowo wyznaczono wartość minimalną z obrotu, co zafałszowało w konsekwencji wynik całego pomiaru. Dobierając zbyt małą liczbę kroków w zaprezentowanym przykładzie wynik wzrósł o ponad 15% (liczony wg [8]). Kolejną sytuację wynikającą z nieprawidłowego doboru kroku pomiarowego ilustruje rysunek 5. Mamy tu do czynienia z niewykryciem bardzo ostrego minimum, które wskazywałoby na uszkodzenie jednego z detektorów. Przy 25

pomiaram na obrót uzyskane wyniki maskują defekt, co w konsekwencji może spowodować dopuszczenie do użytku przyrządu, który powinien zostać sklasyfikowany jako niesprawny.



Rys. 4. Porównanie wykresów izotropowości oraz wyników wzorcowania dla 50 (a) i 25 (b) pomiarów na obrót

Fig. 4. Comparison of isotropy characteristics and calibration results for 50 (a) and 25 (b) measurements per rotation



Rys. 5. Wykres izotropowości sondy w zależności od ilości pomiarów na obrót obrazujący nieprawidłowe wykrycie wartości minimalnej pomiaru – a) 100 pomiarów, b) 50 pomiarów, c) 25 pomiarów

Fig. 5. Probe isotropy plot depending on measurement count per rotation showing incorrect detection of minimal measurement result – a) 100 measurements, b) 50 measurements, c) 25 measurements

Wynik wzorcowania

Wynikiem każdego pomiaru jest przedział wartości, w którym znajduje się wynik prawidłowy. Ze względów praktycznych zwykle jako wynik pomiaru podaje się pojedynczą wartość i przedział błędu lub niepewność pomiaru. Analogiczna sytuacja występuje przy wzorcowaniu. W tym przypadku wskazanie przyjęte jako wynik wzorcowania staje się wskazaniem odniesienia przy późniejszych pomiarach. Rozpatrując mierniki PEM z sondami izotropowymi pojawia się pytanie: co jest wynikiem wzorcowania w tym przypadku?

Wyznaczenie izotropowości sprowadza się do wyznaczenia maksymalnych zmian wskazania miernika przy pełnym obrocie sondy – jest to w zasadzie pomiar względny. Bezwzględna wartość maksymalna i minimalna wskazań określa przedział zmienności wyniku wzorcowania i można by go przyjąć jako wynik wzorcowania, ale rozwiązanie to jest niepraktyczne. Oczekujemy pojedynczego wyniku, a izotropowość staje się jedną ze składowych niepewności pomiaru. W tym momencie pojawia się kolejne pytanie: w jaki sposób wyznaczyć tę pojedynczą wartość z otrzymanego przedziału zmienności, aby zapewnić możliwie najmniejszą niepewność pomiaru? Można przyjąć za normami (np. [8]), że wynikiem jest średnia geometryczna z wartości maksymalnej oraz minimalnej uzyskanej przy pomiarze izotropowości, ale czy jest to optymalne rozwiązanie? Dla oceny tego zagadnienia, poniżej przedstawiono wyniki analiz różnego podejścia do interpretacji wyników wzorcowania.

W rozważaniach skupiono się zasadniczo na trzech rodzajach uśrednienia wyniku z przedziału:

- **Średnia arytmetyczna** – najbardziej popularny i intuicyjny sposób uśredniania. Cechuje go duża wrażliwość na skrajne wartości całego przedziału. Wyraża się wzorem:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (3)$$

Można także zastosować średnią z wartości max i min.:

$$\bar{x}_E = \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2}. \quad (4)$$

- **Średnia geometryczna** – stosowana najczęściej w badaniach średniego tempa zmian zjawisk. Charakteryzuje się tym, że w mniejszym stopniu niż średnia arytmetyczna odzwierciedla wpływ wartości ekstremalnych na przeciwny poziom zmiennej.

$$\bar{x}_G = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i}. \quad (5)$$

Analogicznie jak dla średniej arytmetycznej, tu również można zastosować średnią geometryczną z wartości max i min.:

$$\bar{x}_{GE} = \sqrt[2]{x_{\min} \cdot x_{\max}}. \quad (6)$$

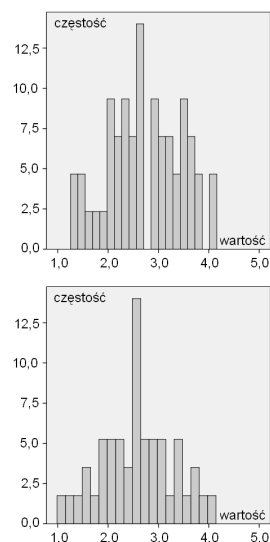
- **Mediana** - dzieli zbiorowość na dwie równe części; połowa jednostek ma wartości cechy mniejsze lub równe medianie, a połowa wartości cechy równe lub większe od mediany. Cechuje ją brak wrażliwości na wartości odstające, czyli wartości bardzo wyraźnie oddalone od innych wartości w serii pomiarowej, dzięki temu pomiary takie wcale lub tylko nieznacznie wpływają na wartość mediany.

$$Me = \begin{cases} \frac{x_{n+1}}{2} & \text{gdy } n \text{ nieparzyste} \\ \frac{1}{2} \cdot \left(x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1} \right) & \text{gdy } n \text{ parzyste} \end{cases} \quad (7)$$

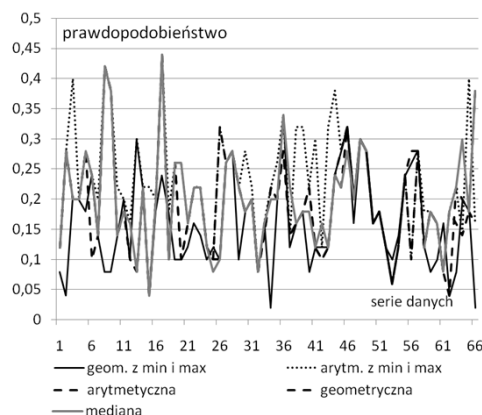
Jako kryterium będące wyznacznikiem „jakości” danego uśrednienia autorzy przyjęli jego przynależność do przedziału wartości charakteryzującego się największą częstością występowania wyniku. Innymi słowy w kontekście pomiarów i wzorcowania chodzi o to, by wykonując dany pomiar otrzymać jednoznaczny wynik niezależnie od położenia sondy, więc sensownym wydaje się kryterium najwyższego prawdopodobieństwa wystąpienia danego wyniku w trakcie pomiaru.

Rysunek 6 ilustruje rozkład przedziałów wyników uzyskanych podczas rzeczywistych serii pomiarowych. Widać na każdym z nich przedział wyraźnie dominujący (albo grupę przedziałów –

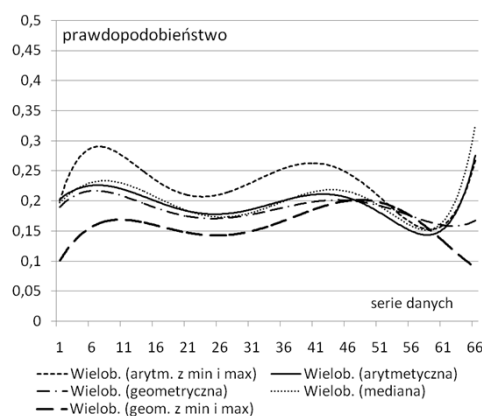
wtedy przyjmowano średnią z tych przedziałów). Po przeanalizowaniu prawie 70 zestawień danych otrzymano rezultaty prezentowane na rysunku 7 i 8.



Rys. 6. Przykładowe histogramy uzyskane w trakcie badań
Fig. 6. Exemplary histograms obtained during investigations



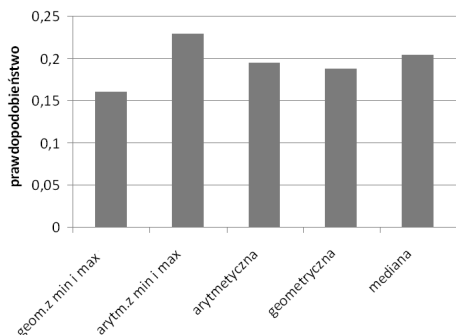
Rys. 7. Zestawienie wyników porównania uśrednień wraz z liniami regresji wielomianowej
Fig. 7. Average comparison results together with polynomial regression lines



Rys. 8. Zestawienie porównania linii regresji wielomianowej z wyników uśrednień
Fig. 8. Comparison of polynomial regression lines from average results

Otrzymane wyniki wskazują niewielki rozrzut w zależności od stosowanej metody uśredniania wyniku. Rysunki 7 i 8 jednoznacznie wskazują, że najbardziej prawdopodobny wynik, jaki

otrzymamy w trakcie pomiaru będzie efektem średniej arytmetycznej z wartości minimalnej i maksymalnej. Uśrednione prawdopodobieństwa przedstawione na rysunku 9 mogłyby nasuwać jednak wniosek, że wahania te są stosunkowo małe, ale na rysunku 8 linie trendów dość obrazowo przedstawiają większe prawdopodobieństwo wystąpienia wyniku z metody średniej arytmetycznej z minimum i maksimum.



Rys. 9. Zestawienie uśrednionych prawdopodobieństw wystąpienia wyniku danej średniej

Fig. 9. Comparison of averaged probabilities of particular average result occurrence

Zaskakująca jest także duża różnica w prawdopodobieństwie pomiędzy średnimi wyznaczanymi ze wszystkich wartości a tymi obliczonymi z wartości granicznych. Obieranie wartości krańcowych jest wyjątkowo niekorzystne w przypadku średniej geometrycznej (czyli zgodnie z zaleceniami w [8]) – uśrednianie arytmetyczne daje o wiele większe prawdopodobieństwo otrzymania wyniku zbliżonego do uznanego przez autorów jako poprawnego (0,23 w porównaniu do 0,16 w przypadku średniej geometrycznej). Po analizie uzyskanych danych (których nie zaprezentowano w pracy ze względu na ich obszerność) nasuwają się następujące wnioski:

- Średnia arytmetyczna doskonale sprawdza się w przypadku sond o wyraźnych minimach i maksimach. Kształt charakterystyki izotropowej takiej sondy przypomina trójlistną koniczynę
- Jeśli sonda ma „okrągłą” charakterystykę izotropowości, czyli wraz z obrotem sondy odczytane wartości fluktuują w bardzo małym zakresie, doskonale sprawdza się zastosowanie mediany jako wartości wyniku. Porównywalne wyniki daje także średnia arytmetyczna z całego przedziału.
- Różnica w uśrednionym prawdopodobieństwie wynosi ok. 0,07 (od 0,16 do 0,23), jednak w indywidualnych przypadkach potrafiła sięgać nawet 0,3. To obrazuje jak bardzo użyta metoda może wpłynąć na ostateczny wynik wzorcowania

Uśrednienia bazujące na wartościach skrajnych niosą ryzyko dużego zafalszowania ostatecznego wyniku, gdy w serii pomiarowej wkradnie się błąd (np. w postaci pojedynczej „igły” zarówno wysokiego jak i bardzo niskiego poziomu chwilowego PEM zmie-

zonego przez wzorcowany miernik np. na skutek zmian tła elektromagnetycznego albo w skutek błędu przetwarzania kalibrowanego urządzenia). Dobra praktyka nakazuje wykonywać dwukrotnie każdy z pomiarów izotropowych, co w znacznym stopniu redukuje ryzyko pomyłki spowodowane błędem pomiarowym.

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono podstawowe wiadomości na temat wzorcowania mierników pola elektromagnetycznego. Szczególną uwagę zwrócono na sposób wyznaczania wyniku wzorcowania dla sond wszechkierunkowych (izotropowych). Przeanalizowano różne metody i przedstawiono wnioski. Wnioski te mogą być użyteczne podczas opracowywania metodyki wzorcowania oraz budżetu niepewności pomiaru, ponieważ istniejące w tym zakresie normy i rekomendacje zagraniczne nie są jednoznaczne, a polskie praktycznie nie istnieją.

5. Literatura

- [1] VIM, International vocabulary of basic and general terms in metrology - wydanie polskie: Międzynarodowy słownik podstawowych i ogólnych terminów z metrologii, Główny Urząd Miar, Warszawa 1996.
- [2] Bieńkowski P.: Charakterystyki metrologiczne mierników natężenia pola elektromagnetycznego. Przegląd Elektrotechniczny, 2009.
- [3] Bieńkowski P., Trzaska H.: EMF meters for surveying purposes calibration and validation. W: 2010 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, April 12-16, 2010, Beijing, China. [Piscataway, NJ] : IEEE, cop. 2010.
- [4] PN-EN 50361:2002 Pomiar dawki swoistej absorpcji (SAR) związanej z ekspozycją ludzi na pola elektromagnetyczne wytwarzane przez telefony ruchome w zakresie częstotliwości od 300 MHz do 3 GHz; – Norma podstawowa.
- [5] Trzaska H.: Pomiar pola elektromagnetycznych w polu bliskim, PWN, Warszawa-Wrocław 1998.
- [6] Crawford M. L.: Generation of standard EM fields using TEM transmission cells, IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 16, pp. 189–195, 1974.
- [7] Bieńkowski P.: Electromagnetic fields measurements – methods and accuracy estimation, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 29, IOS Press ISSN 1383- 7281.
- [8] IEEE 1309 Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antennas, from 9 kHz to 40 GHz.
- [9] PN-EN 50383:2002 - Obliczenia i pomiary intensywności pola elektromagnetycznego i swoistego tempa pochłaniania energii związanego z ekspozycją ludzi w polach elektromagnetycznych o częstotliwościach od 110 MHz do 40 GHz, wytwarzanych przez radiowe stacje bazowe i stałe stacje końcowe bezprzewodowych systemów telekomunikacyjnych. Norma podstawowa.

otrzymano / received: 02.12.2011

przyjęto do druku / accepted: 02.02.2012

artykuł recenzowany / revised paper

INFORMACJE

Informacja redakcji dotycząca artykułów współautorskich

W miesięczniku PAK od numeru 06/2010 w nagłówkach artykułów współautorskich wskazywany jest autor korespondujący (Corresponding Author), tj. ten z którym redakcja prowadzi wszelkie uzgodnienia na etapie przygotowania artykułu do publikacji. Jego nazwisko jest wyróżnione drukiem pogrubionym. Takie oznaczenie nie odnosi się do faktycznego udziału współautora w opracowaniu artykułu. Ponadto w nagłówku artykułu podawane są adresy korespondencyjne wszystkich współautorów.

Wprowadzona procedura wynika z międzynarodowych standardów wydawniczych.