



Wzorzec niestacjonarnego pola elektromagnetycznego

TOMASZ DŁUGOSZ, HUBERT TRZASKA

Politechnika Wrocławska, Instytut Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki,
50-370 Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego 27

Streszczenie. W artykule przedstawiono pokrótce błędy w pomiarach PEM, ze szczególnym uwzględnieniem błędów podczas pomiarów pól impulsowych. Błędy te wynikają z wzorcowania mierników z wykorzystaniem fali ciągłej lub fali ciągłej modulowanej impulsowo. Cel pracy jest dwojaki:

- wprowadzenie do koncepcji nowej metody, która umożliwia wzorcowanie mierników PEM przeznaczonych do pomiarów niestacjonarnych PEM;
- ocena możliwości uproszczenia metody drogą stosowania pobudzenia wzorca paczkami impulsów o kształcie prostokątnym w miejsce sinusoidalnych.

Słowa kluczowe: pomiary pola elektromagnetycznego, niestacjonarne pole elektromagnetyczne, układy ekspozycyjne

Symbole UKD: 537.8

1. Wprowadzenie

Pomiary natężenia pola elektromagnetycznego (PEM) są jednymi z najmniej dokładnych pomiarów wielkości fizycznych. Podczas gdy np. pomiary częstotliwości wykonuje się z błędem znacznie poniżej 10^{-10} , to w przypadku pomiarów PEM najmniejsza ich niedokładność przekracza 5%. Wielkość błędu głównie ograniczona jest przez dokładność wzorców PEM stosowanych do kalibracji mierników PEM, która zazwyczaj nie przekracza podanego wyżej poziomu [1]. Ponadto wspomniane powyżej niedokładności występują w przypadku pomiarów w warunkach pola dalekiego oraz w pomiarach dla fali ciągłej CW. Kiedy dokonuje się pomiarów PEM w polu bliskim, dokładność zostaje dodatkowo ograniczona przez obecność krzywizny pola, uśrednianie mierzonego pola przez antenę pomiarową (sondę), wzajemne oddziaływania pomiędzy sondą a źródłem pierwotnym i źródłami

wtórny, propagację wielotorową, a w rezultacie możliwą polaryzację quasi-sferoidalną oraz inne czynniki [2]. Czasami trzeba przyjąć błąd na poziomie ± 6 dB. Nie wspominając o tym, że dokładność szacowana jest dla pól CW. W przypadku pól modulowanych o modulacji amplitudowej AM ma miejsce dalsze obniżenie dokładności pomiaru.

Aby zrozumieć uwarunkowania metrologiczne, musimy pamiętać, że pomiary PEM w polu bliskim zazwyczaj wykonuje się za pomocą sond zbudowanych z elektrycznie krótkiej anteny obciążonej detektorem diodowym lub termoelektrycznym. Zalety detektorów diodowych obejmują szeroki zakres dynamiczny (który dodatkowo chroni detektor przed przeciążeniem), krótką stałą czasową oraz dobrą czułość, podczas gdy ich główną słabość stanowi kształt charakterystyki dynamicznej, który jest funkcją punktu pracy diody. Zaletą detektora termoelektrycznego jest jego charakterystyka dynamiczna. Jego niedoskonałością jest długa stała czasowa, niższa czułość oraz możliwość uszkodzenia ze względu na przeciążenie. W czasie pomiarów sygnałów CW oba detektory są całkowicie równorzędne jeżeli chodzi o dokładność pomiarów. Jednak ta równowaga znika podczas pomiarów pól modulowanych AM ze względu na to, że w kalibracji miernika używa się z reguły wzorców pobudzanych falą ciągłą.

Rozważmy dwa przykłady:

A. Modulacja AM

Napięcie (V_{AM}) sygnału modulowanego AM można zapisać w postaci:

$$V_{AM} = A(1 + m \cos \omega t) \cos \Omega t, \quad (1)$$

gdzie: A — amplituda;
 m — głębokość modulacji;
 ω i Ω — częstotliwość kątowna sygnału modulującego i fali nośnej.

Na podstawie wzoru (1) z łatwością możemy zauważyć, że w przypadku modulacji AM mierzone PEM może być proporcjonalne do wartości między A przy $m = 0$ i $2A$ w przypadku 100% modulacji ($m = 1$).

Skuteczna wartość (V_{sk}) dowolnego sygnału $[f(t)]$ dana jest zależnością:

$$V_{sk} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt}, \quad (2)$$

gdzie T jest okresem funkcji $f(t)$.

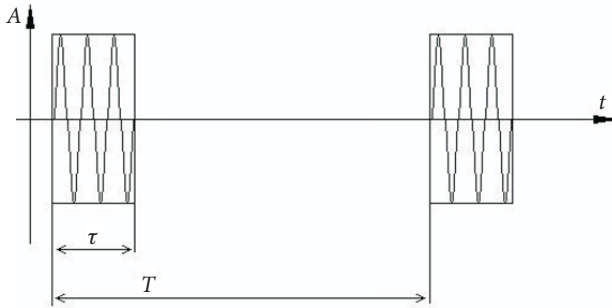
Skuteczna wartość napięcia (V_{AMs}) sygnału AM określona jest w następujący sposób:

$$V_{AMs} = \frac{A}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{m^2}{2}}. \quad (3)$$

W tym przypadku różnice w natężeniu mierzonego PEM, jako funkcja głębokości modulacji, wynoszą 1-1,25.

B. Sygnał impulsowy

Na rysunku 1 pokazano falę impulsową o stałej amplitudzie A , okresie powtarzania impulsów T i czasie trwania impulsu τ .



Rys. 1. Sygnał impulsowy

Bez jakichkolwiek obliczeń na podstawie rysunku 1 jesteśmy w stanie stwierdzić, że amplituda mierzonego sygnału jest stała i proporcjonalna do A . Wartość skuteczna sygnału impulsowego jest wyrażona wzorem:

$$V_{PMs} = \frac{A}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\tau}{T}}. \quad (4)$$

Czas trwania impulsu τ jest często znacznie krótszy niż okres powtarzania impulsów T (na przykład w przypadku systemów radarowych), a w rezultacie skuteczna wartość sygnału może być znacznie mniejsza niż dla sygnału o fali ciągłej.

Przedstawione powyżej rozważania ilustrują różnice w wynikach pomiarów natężenia PEM, kiedy miernik wzorcowany z użyciem fali ciągłej jest wykorzystywany do pomiarów PEM o modulowanej amplitudzie. Ponadto miernik z detektorem diodowym mierzy raczej wartość szczytową (amplitudę), podczas gdy miernik z termoelementem mierzy wartość skuteczną. Zaletą kalibracji miernika za pomocą sygnałów CW lub impulsowych jest prostota tej czynności. Jednak wykonuje się ją kosztem

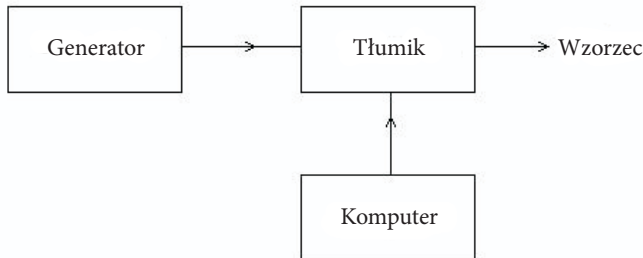
dokładności pomiaru. Błędy pomiarów impulsowych PEM przy wykorzystaniu takich procedur kalibracji mogą sięgnąć nawet jednego rzędu wielkości.

Pomiary PEM w polu bliskim często wykonuje się w celach bezpieczeństwa pracowników i/lub ochrony środowiska. W przypadku niektórych norm ochronnych poziomy ekspozycji podawane są z bezsensowną dokładnością do czterech miejsc znaczących, zaś na podstawie wykonanych pomiarów mogą być podejmowane wiążące prawnie decyzje (np. skrócenie czasu pracy, ze względu na ograniczenie ekspozycji populacji koniecznością może być obniżenie mocy promieniowania lub modyfikacja systemów antenowych itp.).

Powyższe uwagi dotyczące pomiarów stacjonarnych PEM wskazują na niektóre przyczyny ich niewielkiej dokładności. Sytuacja dramatycznie się pogarsza, jeżeli weźmiemy pod uwagę pola niestacjonarne, np. pomiar natężenia PEM wiązki radaru omiatającej obszar i oświetlającej punkt obserwacji przez krótki okres. W pracy przedstawiono rozwiązanie proponowane przez autorów. Rozwiązanie jest dość złożone, jednakże może ono zapewnić kontrolowane poziomy błędów pomiarów.

2. Koncepcja wzorca niestacjonarnego PEM

Na rysunku 2 pokazano schemat blokowy przedstawiający koncepcję wzorca niestacjonarnego PEM.

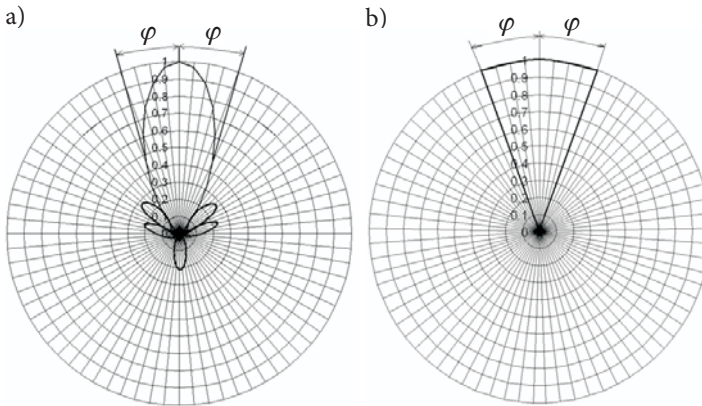


Rys. 2. Schemat blokowy wzorca niestacjonarnego PEM

Koncepcja wzorca opiera się na założeniu, że sygnał wykorzystywany do wzbudzenia PEM w standardowym zestawie wzorca powinien być podobny do sygnału źródła, które będzie mierzone za pomocą kalibrowanego urządzenia. Proponowany wzorec zawiera generator i elektronicznie sterowany tłumik (modulator). Częstotliwość fali nośnej generatora powinna być podobna do częstotliwości źródła, zaś jej modulacja impulsowa powinna być identyczna jak źródła jeśli chodzi o kształty impulsów, ich czas trwania oraz czasy powtarzania. W pierwszym przybliżeniu zakłada się, że impulsy są prostokątne. Następnie doprowadza się stacjonarny sygnał modulowany impulsowo do tłumika, który jest sterowany komputerem i umożliwia

dotatkową modulację amplitudową w celu uzyskania sygnałów wyjściowych w formie pakietów impulsowych przypominających zmiany natężenia PEM w punkcie obserwacji. Czasowy przebieg tłumienia odzwierciedla charakterystykę promieniowania anten, podczas gdy czas powtarzania jest identyczny z częstotliwością przemiatania wiązką promieniowania mierzonego źródła. Następnie sygnał jest stosowany do pobudzenia typowego zestawu wzorca, np. z anteną tubową, jeżeli wykorzystuje się standardową metodę kalibracji PEM, komorę TEM lub inne rozwiązanie. Zgodnie z powyższym, kalibracja musi zostać przeprowadzona osobno dla każdego mierzonego źródła oraz *a priori* wymagane są dane dotyczące parametrów źródła. Złożoność procedury wzorcowania jest jednak ceną, jaką trzeba zapłacić za poprawę dokładności wzorcowania, a następnie pomiaru niestacjonarnego PEM.

W dalszych przykładowych rozważaniach przyjęto, że przedmiotem pomiarów będzie PEM generowane przez obracającą się antenę radaru o charakterystyce promieniowania w płaszczyźnie poziomej $f(\varphi)$. Rozważono dwa typy charakterystyk promieniowania, to znaczy anteny rzeczywistej i anteny idealnej, które pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Charakterystyka promieniowania rozważanej anteny: a) rzeczywista; b) idealna

W przypadku rzeczywistej charakterystyki promieniowania $f_r(\varphi)$ główny listek można opisać za pomocą wzoru:

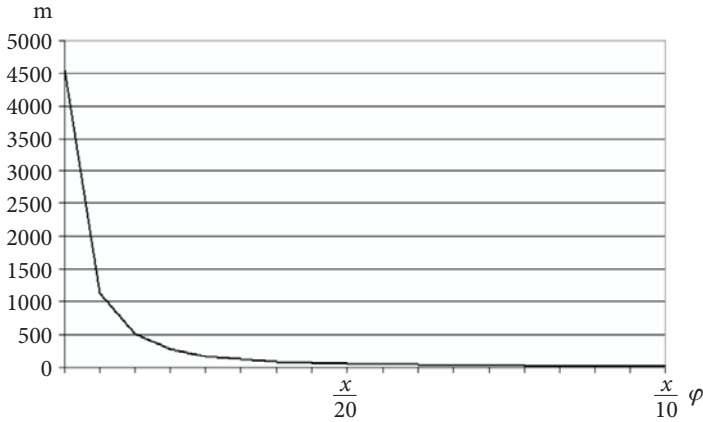
$$f_r(\varphi) = \frac{E_{\max}}{E} = \cos^m \varphi. \quad (5)$$

natomiast charakterystykę anteny idealnej $f_a(\varphi)$ zapiszemy w postaci:

$$f_a(\varphi) = \sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi, \quad (6)$$

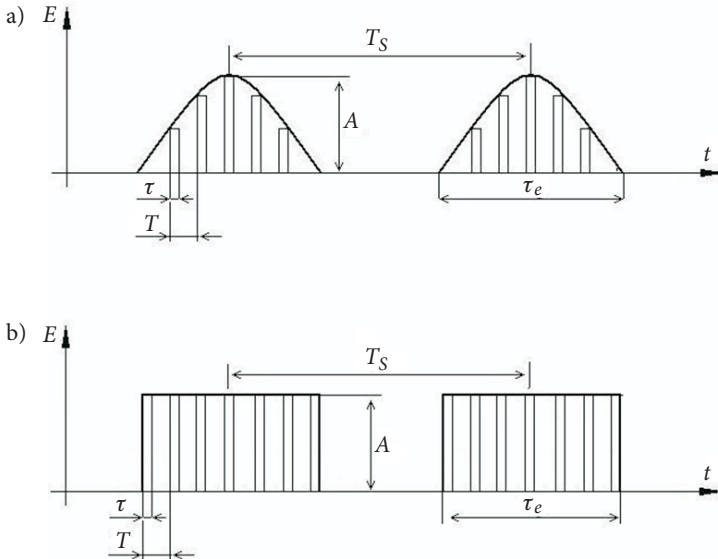
gdzie: φ — kąt promieniowania przy poziomie -6 dB, jak pokazano na rysunku 3.

W celu zilustrowania zmian wartości parametru m w funkcji φ , na rysunku 4 okazano zależność $\cos^m \varphi = 1/2$.



Rys. 4. Wyniki obliczeń zależności $m = f(\varphi)$ dla $f_r(\varphi) = 1/2$

Obie charakterystyki promieniowania przetransferowano na czasowe zależności natężenia pola elektrycznego E w punkcie obserwacji (rys. 5).



Rys. 5. Zmiany natężenia pola elektrycznego E w punkcie obserwacji: a) antena rzeczywista; b) idealna

3. Dokładność przybliżenia

Czas ekspozycji τ_e można obliczyć za pomocą wzoru:

$$\tau_e = \frac{1}{k} \frac{2\varphi}{360^\circ} = \frac{1}{k} \frac{\varphi}{\pi} = \frac{T_r \varphi}{\pi}, \quad (7)$$

gdzie: k — liczba obrotów anteny;

T_r — czas powtarzania ekspozycji punktu obserwacji:

$$T_r = \frac{1}{k}. \quad (8)$$

Czas trwania T pojedynczego impulsu wynosi:

$$T = \frac{1}{n}, \quad (9)$$

gdzie n to częstość impulsów.

W tym miejscu dwie uwagi:

- $f(\varphi)$ i k charakteryzują parametry anteny źródła promieniowania, natomiast wartość n charakteryzuje typ modulacji.
- W przypadku anten o wąskiej wiązce, powiedzmy $\varphi \approx 1^\circ$, zaś $k \approx 10/\text{min}$, czas powtarzania wynosi kilka sekund, co oznacza, że nawet mierniki o długiej stałej czasowej będą mierzyć tylko pojedyncze grupy impulsów podczas każdego obrotu anteny.

Dwie uwagi dodatkowe:

- Ponieważ każdy system promieniowania może być inny (ale identyczny z parametrami źródła promieniowania) musi być także dobór charakterystyki sygnału pobudzającego rozważany wzorzec.
- Normy ochronne wymagają pomiaru uśrednionego natężenia pola dla czasu ekspozycji (nie czasu powtarzania), a więc ten wymóg powinniśmy wziąć pod uwagę.

Dwa przypadki pomiarów:

1. Pomiar wartości szczytowej

Z dokładnością do stałej czasowej kalibrowanego miernika możemy założyć, że bez względu na kształt sygnałów modulujących kalibracja może zostać przeprowadzona poprawnie, zaś błąd kalibracji nie powinien przekroczyć poziomu kilku procent. Jednakże nawet tutaj powinniśmy zauważyć, że wyniki kalibracji w ciągłym polu impulsowym i z wykorzystaniem proponowanej metody będą inne dla różnych rodzajów mierników.

2. Pomiar wartości skutecznej

Powyżej przedstawiono dwie propozycje przybliżenia charakterystyki promieniowania anteny. W obu przypadkach będziemy brać pod uwagę pomiar wartości skutecznej.

a. Charakterystyka przybliżona

Jeżeli uwzględnimy charakterystykę promieniowania przedstawioną na rysunku 3b i zmiany PEM w punkcie obserwacji (rys. 5b), możemy zakończyć rozważania, odwołując się do zależności (4). Wartość skuteczna natężenia PEM jest identyczna, bez względu na obecność dodatkowej modulacji. Jednak wniosek dotyczy mierników o bardzo krótkich stałych czasowych; w przypadku rzeczywistych mierników, podobnie jak wyżej, wystąpią różnice w kalibracji różnych rodzajów mierników, co dobrze ilustruje zaletę przedstawionej metody.

b. „Rzeczywista” charakterystyka promieniowania

Chociaż charakterystyka została nazwana „rzeczywistą”, to znowu mamy do czynienia z przybliżeniem, polegającym na idealizowanym opisie charakterystyki rzeczywistej. Ponadto jest to przybliżenie o znaczeniu teoretycznym, które jest odpowiednie i ważne do przedstawionych rozważań, lecz może znacząco różnić się od charakterystyk promieniowania stosowanych w praktyce rozwiązań systemów antenowych i trybów ich pracy. Przyjąwszy powyższe zastrzeżenia, przystąpimy do dalszych rozważań.

W dalszych analizach funkcję cosinus wyrazimy w postaci szeregu:

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \dots \quad (10)$$

i skorzystajmy z następującego szeregu:

$$(1 - x)^m = 1 - mx + \frac{m(m-1)}{2!}x^2 - \dots \quad (11)$$

Biorąc pod uwagę dwa pierwsze człony (10) i podstawiając je do (11), otrzymamy:

$$\cos^m \varphi = 1 - m \frac{\varphi^2}{2!} + \frac{m(m-1)}{2!} \left(\frac{\varphi^2}{2!} \right)^2 - \dots \quad (12)$$

Po podstawieniu (12) do (2) otrzymamy wartość skuteczną napięcia (V_{skr}) odpowiadającą przebiegowi pokazanemu na rysunku 3a:

$$V_{skr} \approx A \left(1 - \frac{m\varphi^2}{6} + \frac{m^2\varphi^4}{20} \right). \quad (13)$$

Natomiast jego wartość średnia (V_{srr}) wynosi:

$$V_{srr} \approx A \left(1 - \frac{m\varphi^2}{6} + \frac{m^2\varphi^4}{40} \right). \quad (14)$$

Wartość skuteczna (V_{ski}) i wartość średnia (V_{sri}) przebiegów odpowiadających antenie idealizowanej, a pokazanych na rysunku 5b wynosi:

$$V_{ski} = V_{sri} = A. \quad (15)$$

Porównanie wartości skutecznej i średniej PEM wytwarzanego przez antenę rzeczywistą, a dane wzorami (13) i (14), oraz odpowiednie wartości pola wytwarzanego przez antenę idealną, dane wzorem (15), pozwala na oszacowanie błędu proponowanej metody wzorcowania mierników PEM, przy wykorzystaniu do wzorcowania przebiegów prostokątnych w miejsce dokładnego odtworzenia kształtu charakterystyki promieniowania anteny rzeczywistej, przy czym czas trwania obu przebiegów jest identyczny. Błąd ten wynosi około 15%. Błąd ten może być zminimalizowany przy stosowaniu przebiegów pobudzających wzorzec o kształcie dokładnie odpowiadającym czasowym zmianom PEM w punkcie obserwacji, Może być także obniżony przy stosowaniu przebiegów prostokątnych z uwzględnieniem stosownych poprawek wyznaczonych drogą rachunkową lub eksperymentalną.

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono pokrótce błędy w pomiarach PEM, ze szczególnym uwzględnieniem błędów podczas pomiarów pól impulsowych. Błędy te wynikają z wzorcowania mierników z wykorzystaniem fali ciągłej lub fali ciągłej modulowanej impulsowo.

Cel prezentacji jest dwojaki:

- Wprowadzenie do koncepcji nowej metody, która umożliwia wzorcowanie mierników PEM przeznaczonych do pomiarów niestacjonarnych PEM.
- Ocena możliwości uproszczenia metody drogą stosowania pobudzenia wzorca paczkami impulsów o kształcie prostokątnym w miejsce sinusoidalnych.

Koncepcja metody wydaje się oczywista i nie wymaga dodatkowych uwag. Główną słabością tej metody jest konieczność posiadania podobnego sygnału pobudzającego zarówno do kalibracji miernika, jak i przy użyciu tegoż miernika podczas pomiarów. Jednak jest to cena, jaką trzeba zapłacić za możliwość przynajmniej przybliżonej oceny dokładności pomiarów.

Przedstawione rozważania na temat dokładności są w znacznym stopniu uproszczone, gdyż nie ma możliwości stworzenia uniwersalnej metody, która byłaby przydatna w każdym przypadku. Jak wspomniano wyżej, ze względu na dokładność pomiarów procedurę należy przeprowadzać za każdym razem, gdy mamy do czynienia z innym źródłem promieniowania. Nawet w praktyce metrologicznej mogą pojawić się czynniki, które zakłócają bardzo dokładne szacunki, na przykład: niesymetryczność charakterystyki promieniowania anteny i obecność listków bocznych, propagacja wielotorowa i interferencja fal, obecność kilku źródeł w miejscu pomiarów, nieprecyzyjny prostokątny kształt impulsów generowanych przez mierzone źródło (źródła) itd. Można jednak powiedzieć, że wszelkie uproszczenia i przybliżenia zastosowane w przedstawionych rozważaniach prezentują znaczną dokładność w porównaniu z niepewnością dotychczasowych pomiarów niestacjonarnego PEM.

Powyższe rozważania odniesiono do pomiarów pola typu E. Identyczne podejście można zastosować do pomiarów pola typu H i S, chociaż S zazwyczaj mierzy się za pomocą pomiarów pola typu E lub H. Celem prezentacji było wykazanie sposobu podejścia do problemu, nie zaś dostarczenie gotowych rozwiązań. Bardzo znaczącą możliwością jest w tym przypadku zastąpienie sinusoidalnej charakterystyki promieniowania (lub innej) charakterystyką prostokątną. Wynikający z tego błąd procedury jest błędem systematycznym i zawsze ma wartość ujemną. Oznacza to, że wyniki pomiarów źródła z anteną o charakterystyce sinusoidalnej zostaną zminimalizowane, kiedy pomiary będą wykonywane za pomocą miernika wzorcowanego z wykorzystaniem pobudzenia prostokątnego. Należy jednak zastosować współczynnik korekcyjny (wyliczony lub zmierzony), aby zminimalizować błąd pomiaru. Dyskutowany błąd jest błędem metody, nie zaś błędem wzorcowania czy pomiaru i powinien zostać uwzględniony podczas szacowania łącznej niedokładności pomiarów [3].

Możliwość standardowego wzbudzenia za pomocą impulsów prostokątnych jest bardzo atrakcyjna, gdyż umożliwia wykorzystanie podobnych zestawów wzorców do kalibracji różnych mierników przeznaczonych do różnych pomiarów. Ponadto generowanie sygnałów $\sin^m \varphi$ może być kłopotliwe, by nie powiedzieć niemożliwe, podczas gdy generowanie impulsów prostokątnych nie stwarza problemów, gdyż modulator przedstawiony na rysunku 2 może zostać zastąpiony zwykłym przełącznikiem. Ponadto, oprócz zastosowania wspomnianych współczynników korekcyjnych, przy identycznym czasie trwania paczek impulsów o kształcie prostokątnym i sinusoidalnym istnieje możliwość dalszego uproszczenia proponowanej metody wzorcowania drogą skrócenia czasu trwania paczek impulsów prostokątnych τ_e . W przedstawionym powyżej przykładzie czas trwania paczek impulsów prostokątnych przy wzorcowaniu miernika wartości skutecznej powinien być skrócony o około 12%, natomiast przy wzorcowaniu mierników wartości średniej o około 14%.

Chociaż pomiar (wzorcowanie) pól niestacjonarnych stanowił główny cel tej prezentacji, to zaleca się stosowanie podobnych rozwiązań także do wzorcowania mierników przy pomiarach stacjonarnych PEM.

Podziękowanie

Prezentowane prace były możliwe dzięki dofinansowaniu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach grantu Nr 1765/B/T02/2009/37, za co autorzy składają podziękowanie.

Artykuł wpłynął do redakcji 15.05.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w maju 2009 r.

LITERATURA

- [1] M. KANDA, D. CAMELL, J. P. M. DE VREEDE, J. ACHKAR, M. ALEXANDER, M. BORSERO, H. YAJIMA, N. S. CHUNG, H. TRZASKA, *International Comparison GT/RF-86-1 Electric Field Strengths: 27 MHz to 10 GHz*, IEEE Transaction on EMC, 42, 2, 2000, 190-205.
- [2] H. TRZASKA, *EMF Measurements in the Near Field*, Noble Publ., 2001.
- [3] E. GRUDZINSKI, H. TRZASKA, *EMF Standards and Exposure Systems*, Scitech (w druku).

T. DŁUGOSZ, H. TRZASKA

Non-Stationary EMF Standard

Abstract. Errors of EMF measurements were briefly presented in the work with special emphasis to the errors when pulsed fields are measured. The errors resulted from meter calibrations using CW or even continuous pulsed wave excitation. The aim of the presentation is twofold:

- introduction to an idea of a new method that allows a calibration of EMF meters devoted to non-stationary field measurements,
- evaluation of the possibility of simplification of the method using rectangular train of pulses instead of sinusoidal one.

Keywords: electromagnetic field measurements, nonstationary electromagnetic fields, EMF standards

Universal Decimal Classification: 537.8

