

Wzorcowanie anten prętowych – pasywnych i aktywnych

Streszczenie. Referat ten dotyczy metod wzorcowania pomiarowych anten prętowych pasywnych i aktywnych (ze wzmacniaczem), zasilanych względem płaskiej kwadratowej lub prostokątnej metalowej przeciwwagi, przeznaczonych na zakres częstotliwości od 10 kHz do 30 MHz. Dla przykładu zaprezentowano wzorcowanie anteny pasywnej firmy EMCO dwoma metodami i oszacowano niepewności wzorcowania anteny tymi metodami.

Abstract. The paper concerns calibration methods of the measuring rod antennas: passive and active (with amplifier), designed for the frequency range from 10 kHz to 30 MHz. powered in relation to the flat square or rectangular metal plate. The paper presents, as the example, calibration results and appropriate uncertainty of the passive antenna (EMCO) received with the help of both described methods. (**Calibration rod antennas – passive and active**).

Słowa kluczowe: wzorcowanie anten, antena unipolowa, antena aktywna, współczynnik antenowy.

Keywords: antennas calibration, monopole antenna, active antenna, antenna factor.

doi:10.12915/pe.2014.07.58

Wstęp

Wzorcowanie anteny pomiarowej polega na wyznaczeniu współczynnika, zwanego Współczynnikiem Antenowym (WA) (ang. Antenna Factor AF), który wiąże natężenie pola elektrycznego E występującego w miejscu lokalizacji anteny z napięciem U na jej dopasowanym wyjściu. Z uwagi na to, że długości (wysokości) anten prętowych są bardzo małe w stosunku do długości fali, metody stosowane do ich wzorcowania są zdecydowanie inne niż dla anten pomiarowych przeznaczonych do pomiarów w zakresie wyższych częstotliwości. Jest wiele metod i procedur wzorcowania anten w zakresie fal krótkich, preferowanych przez różne laboratoria wzorcujące, znanych z literatury, np. [4] czy zaleceń np. [5], brak jest jednak ustaleń normatywnych. Obecnie na ukończeniu jest proces nowelizacji normy CISPR 16-1-6 [2], która ujmuje już procedury wzorcowania anten pomiarowych, zarówno prętowych jak i pętlowych w tym niskim zakresie częstotliwości. Głównym celem twórców normy jest ujednoczenie w skali CISPR metod i procedur wzorcowania anten w zakresie częstotliwości od 9 kHz do 18 GHz, oraz jednoznaczne zdefiniowanie typów wykorzystywanych anten, jako pomiarowe. W referacie omówione są dwie metody wzorcowania anten: metoda zastępczego kondensatora i metoda pola wzorcowego.

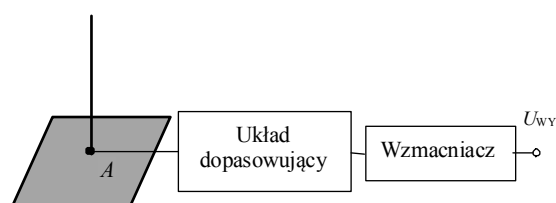
Wzorcowanie metodą zastępczą

Metoda ta jest stosowana dla anten pomiarowych prętowych (rys. 1), których długość przewodu anteny nie przekracza $\lambda/8$, a więc dla długości 1 m do częstotliwości 37,5 MHz. Metoda ta w normie nazywa się metodą podstawienia zastępczego kondensatora (ECSM - Equivalent Capacitor Substitution Method). Polega ona na tym, że unipol jest usunięty i zastąpiony u podstawy anteny odpowiadającym mu kondensatorem. Metoda ta nie uwzględnia jednak wpływu na WA obudowy wzmacniacza, dlatego wymagana jest dodatkowa korekta - dodanie do wysokości pręta połowy wysokości metalowego pudełka, przy obliczaniu pojemności za pomocą równań. Kondensator zastępczy musi charakteryzować się małą indukcyjnością rozproszoną, aby można było tą metodą wyznaczyć współczynnik antenowy z niepewnością nie większą niż 1 dB.

Współczynnik antenowy WA anteny pasywnej lub aktywnej wyraża się zależnością

$$(1) \quad WA = \frac{E}{U_{wy}}$$

w której: E – natężenie pola elektrycznego w miejscu anteny pomiarowej, U_{wy} – napięcie na jej wyjściu.



Rys.1. Układ elektryczny pomiarowej anteny prętowej

Siła elektromotoryczna e wydzielona u podstawy pręta anteny w punkcie A jest równa

$$(2) \quad e = E \cdot h_{sk}$$

gdzie: h_{sk} – wysokość skuteczna anteny prętowej, opisana

$$(3) \quad h_{sk} = \frac{\lambda}{2\pi} \operatorname{tg} \frac{\pi h}{\lambda}$$

gdzie: h – fizyczna długość pręta, λ – długość fali.

Podstawiając w (1) za E wielkość wyliczoną z (2), i wyrażając WA w [dB], mamy

$$(4) \quad WA_{[dB/m]} = e_{[dB(\mu V)]} - U_{wy[dB(\mu V)]} - 20 \log(h_{sk[m]})$$

Dla anteny o długości pręta 1 m, a więc o $h/\lambda < 0,1$, wysokość skuteczna h_{sk} jest równa $h/2$ czyli 0,5 m. Podstawiając tę wartość do (4), otrzymuje się

$$(5) \quad WA_{[dB/m]} = e_{[dB(\mu V)]} + 6 - U_{wy[dB(\mu V)]}$$

gdzie: e – siła elektromotoryczna odbiorczej anteny prętowej, U_{wy} – napięcie na wyjściu anteny, 6 – współczynnik korekcyjny wysokości skutecznej anteny.

Oczywiście dla innej niż 1 m wysokości anteny, inny będzie również współczynnik korekcyjny.

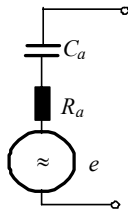
Zastępczy układ elektryczny odbiorczej krótkiej anteny prętowej, ma postać pokazaną na rys. 2.

Dla pręta o długości ok. 1 m składowa rzeczywista impedancji wejściowej R_a w zakresie częstotliwości do 30 MHz jest mała, poniżej 3Ω i można ją pominać, zaś

składową urojoną X_a stanowi pojemność C_a pręta względem przeciwwagi. Opisuje ją wzór

$$(6) \quad C_a = \frac{55,6h}{\ln(h/a) - 1} \frac{\tan(2\pi h/\lambda)}{2\pi h/\lambda}$$

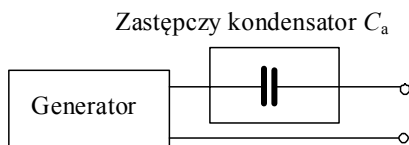
w którym: h - rzeczywista długość anteny w [m], λ - długość fali w [m], a - promień pręta w [m].



Rys.2. Układ elektryczny krótkiej anteny prętowej

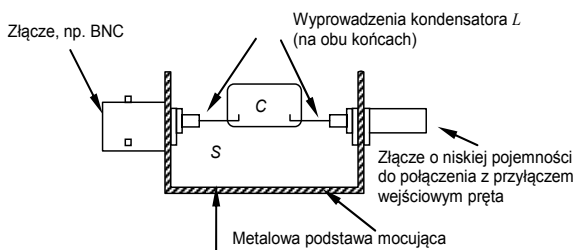
Dla pręta o długości 1 m i promieniu 5 mm pojemność ta w zakresie częstotliwości do 30 MHz jest bardzo bliska wartości 12 pF.

Siłę elektromotoryczną oraz pojemność pomiarowej anteny prętowej z rys. 2 zastępuje się układem pomiarowym pokazanym na rys. 3.



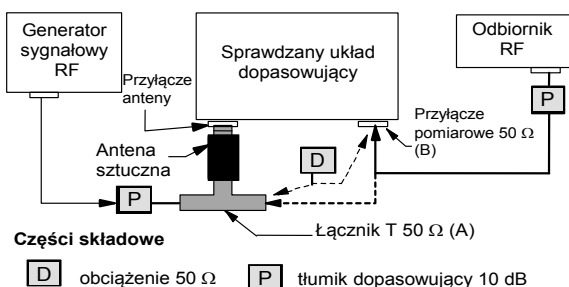
Rys.3. Zastępczy układ zasilania krótkiej anteny prętowej

Kondensator stanowiący pojemność anteny jest zamontowany w małym metalowym pudełku w taki sposób, aby jego przewody doprowadzeń nie były dłuższe od 8 mm, a odległość kondensatora od ścianek nie była większa od 10 mm. Przykładowe rozwiązanie mocowania kondensatora pokazano na rys. 4.



Rys.4. Przykład montażu kondensatora (wg normy [2])

Układ pomiarowy wzorcowania anteny prętowej metodą zastępczego kondensatora z wykorzystaniem generatora i odbiornika pomiarowego pokazano na rys. 5.



Rys.5. Układ wzorcowania anteny prętowej (wg normy [2])

Kolejność wykonywanych czynności:

- w miejscu pręta anteny podłączyć kondensator,
- na wejście kondensatora przyłączyć trójnik,
- generator poprzez tłumik 10 dB dołączyć do jednego z wejść trójnika,
- trzecie złącze trójnika obciążyć opornikiem 50 Ω,
- zmierzyć napięcie na wyjściu wzmacniacza U_{WY} ,
- na trójniku, w miejsce opornika 50 Ω podłączyć odbiornik pomiarowy i odczytać napięcie U_{WE} ,
- współczynnik antenowy wyliczyć z zależności 7.

$$(7) \quad WA_{[dB/m]} = U_{WE [dB(\mu V)]} - U_{WY [dB(\mu V)]} + 6$$

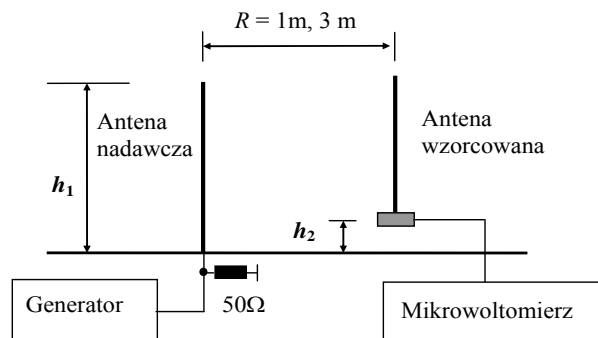
Uwagi:

- Kondensator musi być dołączony wprost w miejsce pręta anteny.
- Jeśli poziom sygnału z generatora jest mały, tłumik dopasowujący po stronie generatora nie jest potrzebny.

Wzorcowanie metodą pola wzorcowego

Do wzorcowania anten prętowych tą metodą potrzebna jest duża płaska powierzchnia odniesienia o doskonałej przewodności. W laboratorium IŁ-PIB we Wrocławiu w jednej z dużych hal taką powierzchnię stanowi podłoga pokryta w całości arkuszami blachy stalowej ocynkowanej, połączonych z sobą w sposób zapewniający ich doskonały kontakt elektryczny.

Pole wzorcowe wytworzone jest przez antenę nadawczą - krótką antenę prętową, zasilaną względem dużej płaszczyzny doskonale przewodzącej, wg rys. 6.



Rys.6. Układ pomiarowy

Antena prętowa nadawcza zasilana jest z generatora o stosunkowo dużej mocy wyjściowej. Ponieważ impedancja wejściowa anteny jest bardzo duża, na jej wejściu poprzez trójnik podłącza się rezystor 50 Ω, dzięki temu wzdłuż kabla anteny nadawczej nie ma fali stojącej (jest dopasowanie), a napięcie podawane na antenę nadawczą jest napięciem wyjściowym z generatora zmniejszonym o tłumienie wprowadzane przez zastosowany kabel.

Korzystając z rys. 7, **natężenie pola elektrycznego** E w miejscu anteny wzorcowanej opisują ściśle zależności analityczne

$$(8) \quad E = \frac{30 \cdot J_A}{\sin(\beta h_1)} \left(\frac{e^{-j\beta d_1}}{d_1} + \frac{e^{-j\beta d_2}}{d_2} - 2 \cos(\beta h_1) \frac{e^{-j\beta d_0}}{d_0} \right)$$

$$d_1 = \sqrt{(h_1 - h_2)^2 + R^2} \quad d_2 = \sqrt{(h_1 + h_2)^2 + R^2}$$

$$d_0 = \sqrt{h_2^2 + R^2}$$

w których: h_1, h_2, R, d_1 i d_2 - jak na rys. 7.

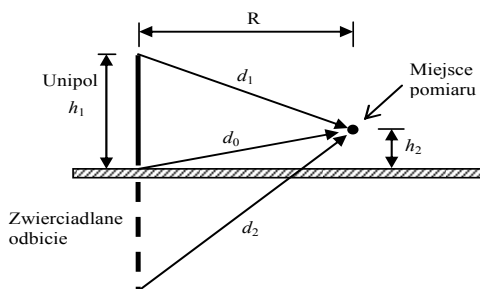
Pierwsze wyrażenie (8) można zapisać krócej

$$(9) \quad E = A \cdot J_A$$

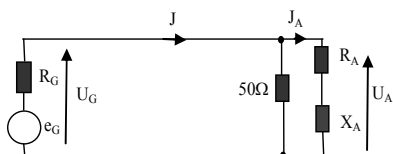
Gdzie przez A oznaczono

$$(10) \quad A = \frac{30}{\sin(\beta h_1)} \left(\frac{e^{-j\beta d_1}}{d_1} + \frac{e^{-j\beta d_2}}{d_2} - 2 \cos(\beta h_1) \frac{e^{-j\beta d_0}}{d_0} \right)$$

Prąd J_A w antenie nadawczej można wyznaczyć korzystając z układu na rys. 8.



Rys.7. Geometria ustawienia anten



Rys.8. Układ elektryczny zasilania anteny nadawczej

Jest on równy

$$(11) \quad J_A = \frac{U_G (Z_G + 50)}{\sqrt{[50Z_G + R_A(Z_G + 50)]^2 + [X_A(Z_G + 50)]^2}}$$

lub inaczej

$$(12) \quad J_A = S \cdot U_G$$

gdzie przez S oznaczono wyrażenie

$$(13) \quad S = \frac{(Z_G + 50)}{\sqrt{[50Z_G + R_A(Z_G + 50)]^2 + [X_A(Z_G + 50)]^2}}$$

W którym: U_G - napięcie wyjściowe generatora, Z_G - impedancja generatora, R_A - rezystancja i X_A - reaktancja anteny.

Przyjmując wymiary anteny nadawczej: wysokość $h_1 = 1$ m, promień pręta $a = 0,005$ m, przenikalność $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m, reaktancja i rezystancja wyrażają się prostymi wzorami

$$(14) \quad X_A = -\frac{12296,96}{f_{[MHz]}}$$

$$R_A = 10 \cdot \left(\frac{f_{[MHz]}}{47,75} \right)^2$$

Natężenie pola E po podstawieniu w (9) za prąd J_A z (12), opisuje ostatecznie funkcja

$$(15) \quad E = A \cdot S \cdot U_G$$

Współczynnik antenowy WA z (1) po podstawieniu w nim za E z (15), wyraża w [dB] prosty związek

$$(16) \quad WA_{[dB/m]} = 20 \log(A \cdot S) + U_{G[dB(\mu V)]} - U_{WY[dB(\mu V)]}$$

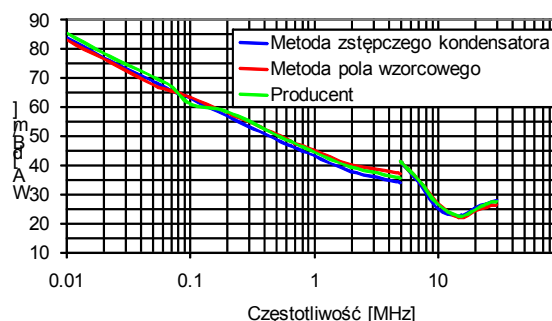
gdzie: U_{WY} - napięcie na wyjściu anteny wzorcowanej.

Metoda pola wzorcowego jest zalecana, ponieważ we współczynniku antenowym uwzględniony jest wpływ wielkości przeciwwagi (płaszczyzny odniesienia), wielkość i kształt metalowej obudowy wzmacniacza (dla anten aktywnych), a także sprzężenie elektromagnetyczne z obiektem badanym (silne dla odległości mniejszej niż 5 m.)

Przykład wzorcowania obu metodami

Przeprowadzono wzorcowanie anteny pomiarowej typu 3303 firmy EMCO na zakres częstotliwości od 10 kHz do 30 MHz dwoma omówionymi w niniejszym artykule metodami. Wzorcowana antena składa się z pręta o długości $h = 1,1$ m i średnicy $a = 0,006$ mm umieszczonego nad ekranem kwadratowym o wymiarach 0,6 m x 0,6 m wykonanym z blachy aluminiowej.

Współczynnik antenowy wyznaczony obu metodami wykreślono na rys. 9. Odległość pomiarowa $R = 3$ m.



Rys.9. Wyniki wzorcowania anteny prętowej typu 3303

Analiza niepewności, zgodnie z równaniem (17)

$$(17) \quad WA = 20 \log \left(\frac{V_{DIRECT}}{V_{AUC}} \right) - 20 \log(h_e)$$

jest dwuczęściowa. Pierwszy człon zawiera błędy pomiaru napięcia wynikające z aparatury pomiarowej, z niedopasowania impedancyjnego, a także dokładności wykonania kondensatora. Drugi człon dotyczy dokładności określenia wysokości skutecznej anteny. Budżet niepewności wzorcowania anteny tą metodą zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Budżet niepewności WA, metoda zast. kondensatora

Źródło niepewn.	Wartość [dB]	Typ rozkł.	k	Niepow. [dB]
Stabilność generatora	0,02	Prost.	1,73	0,012
Niedop. gener. (WFS=1.43)	0,115	U	1,41	0,082
Błąd obliczeń wysok. skut. 4%	0,341	Prost.	1,73	0,20
Błąd doboru kondensatora	3 pF	Prost.	1,73	0,52
Niedop. odb. (WFS=1.8)	0,183	U	1,41	0,13
Powtarzalność połączenia	0,05	Gausa	1	0,05
Nieliniowość odbiornika	0,05	Gausa	1	0,05
Sygnal/szum	0,1	Prost.	1,73	0,058
Niepow. stand.				1,102
Niepow. rosz. (k=3)				± 2,2dB

- Największa rozbieżność w dopasowaniu impedancyjnym jest wtedy, gdy oba wyjścia trójnika są zakończone 50Ω , wtedy współczynnik odbicia wynosi 9,5 dB. Ponieważ jest mało prawdopodobna impedancja wejściowa w miejscu unipola 50Ω , dlatego przyjęto na wejściu trójnika współczynnik odbicia równy 15 dB. Impedancja wyjściowa anteny jest uwarunkowana bądź poprzez wzmacniacz bądź też przez układ dopasowujący umieszczone w skrzynce. Przyjmując różne rozwiązania tych układów, założono współczynnik odbicia na wyjściu na poziomie 10 dB. Niepewność niedopasowania M wyliczono z zależności (18). Zmierzony współczynnik odbicia analizatora wektorowego był większy od 25 dB.

$$(28) \quad M = 20 \log \left[\frac{1 - \Gamma_{VNA} (S_{11} + S_{22})}{1 + \Gamma_{VNA}^2} \right]$$

Dla $\Gamma_{VNA} = 25$ dB, $S_{11} = 15$ dB, a $S_{22} = 10$ dB, mamy $M = 0,272$ dB.

- W procedurze ECSM we wzorze do określenia wysokości skutecznej anteny występuje czynnik $\tan(x)$. Dla niskich częstotliwości można przyjąć skuteczną wysokość anteny prętowej równą połowie wysokości fizycznej anteny. Czynnikiem z $\tan(x)$ częściowo koryguje wysokość skuteczną dla częstotliwości bliskich rezonansowym. Stosując tę poprawkę można przyjąć, że skuteczna wysokość elementu anteny prętowej o długości do 1,1 m może być do 35 MHz wyliczona z błędem do 4%.

- Przyjęta jest stała wartość zastępczego kondensatora w zestawie kalibracyjnym. Tymczasem pojemność rzeczywistej pomiarowej anteny prętowej zmienia się z częstotliwością, w szczególności w wyższym zakresie, (wzór 6). Faktyczna pojemność może być nawet o 4 pF większa od ustalonej, co przyczynia się do zwiększenia niepewności. W związku z tym jest uzasadnione przypisanie do współczynnika niepewności wartości pojemności ± 3 pF.

Wyznaczony współczynnik antenowy metodą ECSM odnosi się do warunków swobodnej przestrzeni, kiedy antena pomiarowa i źródło sygnału nie sprzęgają się.

Analiza niepewności drugą metodą, zgodnie z równaniem (18)

$$(18) \quad WA_{\{dB/m\}} = 20 \log \left(\frac{U_G}{U_{WY}} \right) + 20 \log(A) + 20 \log(S)$$

jest trójczęściowa. Pierwszy człon zawiera błędy pomiaru napięcia wynikające z aparatury pomiarowej i z niedopasowania impedancyjnego. Drugi człon dotyczy wymiarów geometrii ustawienia anten i współczynnika odbicia gruntu. Zaś trzeci odnosi się do impedancji wewnętrznej generatora, odbiornika i wejściowej nadawczej anteny prętowej. Budżet niepewności wzorcowania anteny tą metodą zamieszczono w tabeli 2.

- Kabel od generatora dołączony jest do trójnika, którego jedno wyjście połączone jest z anteną nadawczą, a na drugie zapięty jest rezystor 50Ω (rys. 6). Największy błąd niedopasowania występuje dla częstotliwości 30 MHz, kiedy zarówno rezystancja i reaktancja anteny nadawczej stają się porównywalne z obciążalnikiem 50Ω (założono WFS = 1,43).

- Niedopasowanie anteny wzorcowanej z odbiornikiem przyjęto podobne jak poprzednio.

- Niepewność wzorcowania anteny prętowej tą metodą jest oczywiście mniejsza od niepewności metodą poprzednią, ponieważ w procesie wzorcowania uwzględnia się:

- zmianę wysokości skutecznej anteny wzorcowanej w funkcji częstotliwości,
- wielkość przeciwwagi,
- sprzężenie anteny z metalową obudową wzmacniacza czy układu dopasowującego.

Wzorcowanie metodą pola wzorcowego przeprowadzono dla odległości anteny wzorcowanej od źródła sygnału 10 m, dla której nie występuje wzajemne oddziaływanie na siebie anten (brak sprzężenia). Dla przypadku, kiedy przewidywane są pomiary natężenia pola w odległości 1 m lub 3 m od źródła sygnału, antena pomiarowa musi być wcześniej dla takich odległości wyzorcowana, i to tylko metodą pola wzorcowego.

Tabela 2. Budżet niepewności WA, metoda pola wzorcowego

Źródło niepewn.	Wartość [dB]	Typ rozkł.	k	Niepew [dB]
Stabilność generatora	0,02	Prost.	1,73	0,012
Niedop. gener. (WFS=1.43)	0,115	U	1,41	0,082
Błąd wymiarów: h_1, h_2, R	0,043 0,1 0,043	Prost.	1,73	0,025 0,06 0,025
Niedop. odb. (WFS=1.8)	0,183	U	1,41	0,13
Powtarzalność połączenia	0,05	Gausa	1	0,05
Nieliniowość odbiornika	0,05	Gausa	1	0,05
Sygnal/szum	0,1	Prost.	1,73	0,058
Błąd stanowiska	1,0	Prost.	1,73	0,58
Niepew. stand.				0,622
Niepew. rozsz. (k=2)				$\pm 1,2$ dB

LITERATURA

- [1] ANSI C63.5-2006, American National Standard for Electromagnetic Compatibility–Radiated Emission Measurements in Electromagnetic Interference, (EMI) Control–Calibration of Antennas (9 kHz to 40 GHz).
- [2] CISPR 16-1-6: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods. Part 1-6: Radio disturbance and immunity measuring apparatus EMC-antenna calibration.
- [3] CISPR 16-1-4, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 1-4: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Antennas and test sites for radiated disturbance measurements.
- [4] M. Kanda, Standard Antennas for Electromagnetic Interference Measurements and Methods to Calibrate Them, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, November 1994, vol. 36 nr 4.
- [5] SAE ARP 958, Electromagnetic Interference Measurement Antennas, Standard Calibration Methods, Standard 958, Society of Automotive Engineers, Revision A, Issue Data 1992-11-5, Revision C 1997.

Autor: mgr inż. Piotr Tyrawa, Instytut Łączności, ul. Swojczycka 38, 51-501 Wrocław, E-mail: p.tyrawa@itl.waw.pl.