

Artur PASIERBEK

Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej. Zakład Elektrotechniki i Informatyki

PRAKTYCZNA WERYFIKACJA KOMPUTEROWEGO SYSTEMU DO POMIARU NATĘŻENIA POLA ELEKTRYCZNEGO

Streszczenie. W prezentowanej pracy zamieszczono wyniki badań laboratoryjnych i terenowych prototypowego czujnika i systemu pomiarowego przeznaczonego do pomiaru natężenia pola elektrycznego. Podczas badań szczególną uwagę zwrócono na dokładność pomiaru oraz na parametry eksploatacyjne (łatwość obsługi, bezpieczeństwo personelu dokonującego pomiarów, obszar zastosowań).

PRACTICAL VERIFICATION OF THE COMPUTER BASED ELECTRIC FIELD INTENSITY MEASUREMENT SYSTEM

Summary. The paper describes results of laboratory tests and practical verification of the computer based measurement system with six-electrode sensor. This system is used to measure electric field around high voltage devices. Accuracy of the measurements and exploitation properties (user friendliness, safety, applications) have been examined during tests.

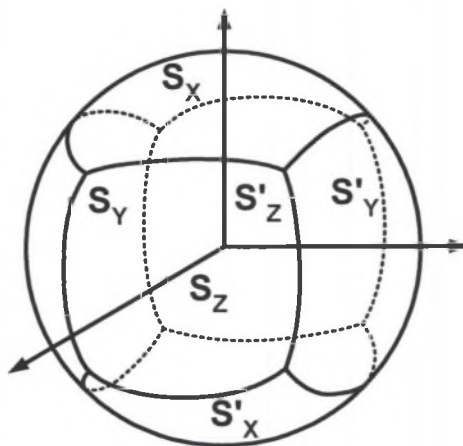
1. WPROWADZENIE

Prototypowy czujnik ma kształt kuli, na powierzchni której znajduje się sześć odizolowanych od siebie przewodzących elektrod rozmieszczonych jak na rys. 1. Wewnątrz znajduje się układ elektroniczny zasilany z baterii.

Elektrody pomiarowe S_X , S'_X , S_Y , S'_Y , S_Z , S'_Z są połączone wewnątrz czujnika z elektronicznym układem pomiarowym (rys. 2).

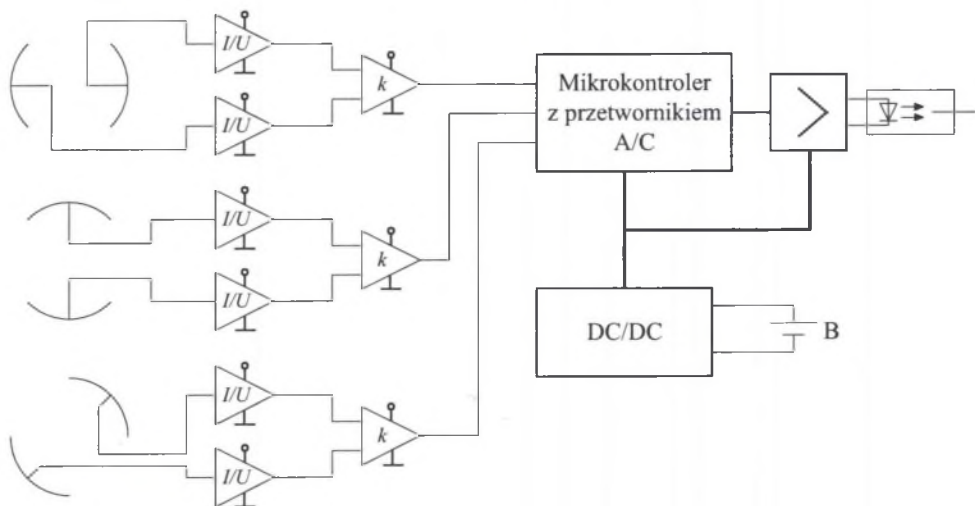
Zmienne pole elektryczne, w którym umieszczamy czujnik podczas pomiarów, indukuje na powierzchniach elektrod ładunek o zmieniającej się gęstości w czasie. To z kolei powoduje przepływ prądu przez połączenia wewnątrz elektrod. W układzie różnicowym następuje odejmowanie prądów z przeciwnych elektrod (oddzielnie dla każdej pary) i przetworzenie na sygnał napięciowy. Uzyskana wartość napięcia jest proporcjonalna do wartości natężenia pola działającego w kierunku zgodnym z wektorem normalnym rozpatrywanej powierzchni. Następnie sygnał napięciowy podawany jest na wejście przetwornika analogowo-cyfrowego (A/D). Uzyskana po przetworzeniu cyfrowa reprezentacja wyniku przesyłana jest do nadajnika,

a następnie w postaci sygnałów świetlnych wyprowadzona na zewnątrz światłowodem. Do pomiaru wszystkich trzech składowych wektora E użyto oddzielnych torów pomiarowych.



Rys. 1. Czujnik sześćoelektrodowy – rozmieszczenie elektrod

Fig. 1. Six electrode sensor – electrode location



Rys. 2. Czujnik sześćoelektrodowy – schemat blokowy

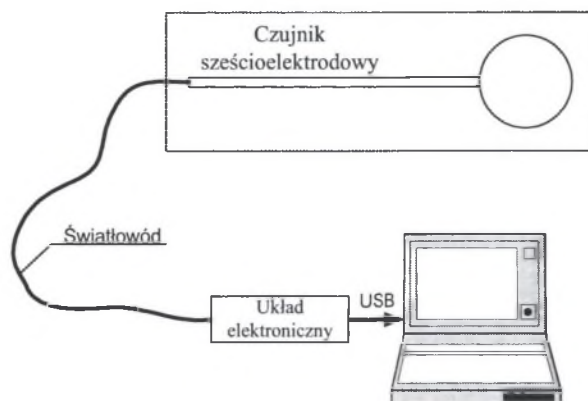
Fig. 2. Six electrode sensor – block diagram

Zastosowany do pomiarów czujnik prototypowy (rys. 3) jest konstrukcją nową, nie poddaną weryfikacji doświadczalnej. Zaistniała więc realna potrzeba przebadania zrealizowanego prototypu. Szczególnie widoczna gdy uwzględnimy fakt, że podczas wyprowadzania teoretycznego równania przetwarzania wprowadzono szereg założeń upraszczających [3].



Rys. 3. Zdjęcie czujnika prototypowego

Fig. 3. Photo of the sensor prototype



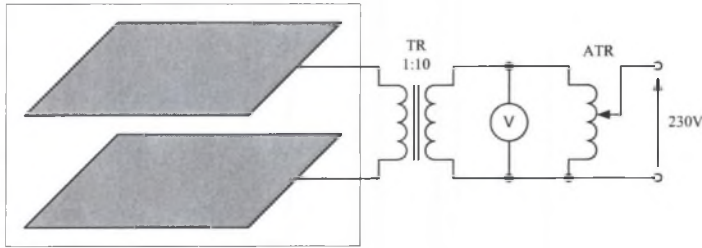
Rys. 4. System pomiarowy z czujnikiem sześcieelektrodowym

Fig. 4. Measurement system with six electrode sensor

Opracowany przez autora system pomiarowy (rys. 4), w skład którego wchodzi oprogramowanie pomiarowe, został zaprojektowany i wykonany od podstaw [3, 4, 5]. Wobec tego wymagał on gruntownego przebadania nie tylko w laboratorium, ale również w terenie. Badania takie zostały przeprowadzone, a uzyskane wyniki pozwoliły na określenie podstawowych właściwości metrologicznych i użytkowych czujnika i współpracującego z nim systemu pomiarowego.

2. WZORCOWANIE PRZYRZĄDU

Wzorcowanie przeprowadzono zgodnie z zaleceniami normy IEC 833 w jednorodnym polu elektrycznym w układzie pokazanym na rys. 5 [3].



Rys. 5. Schemat układu zastosowanego do wzorcowania czujnika
 Fig. 5. Scheme of the sensor calibration system

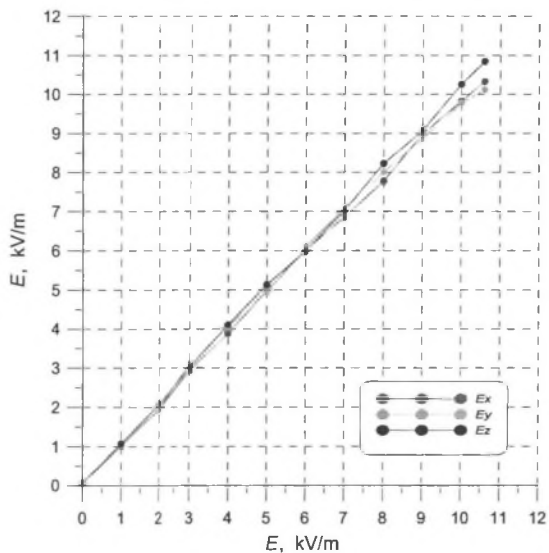
Po umieszczeniu czujnika pomiędzy okładkami kondensatora, tak by wskazanie dla wybranej pary elektrod było maksymalne, przeprowadzono pomiary w zakresie od 0 do 10 kV/m co 1 kV/m. Następnie proces pomiarowy powtórzono dla pozostałych par elektrod. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

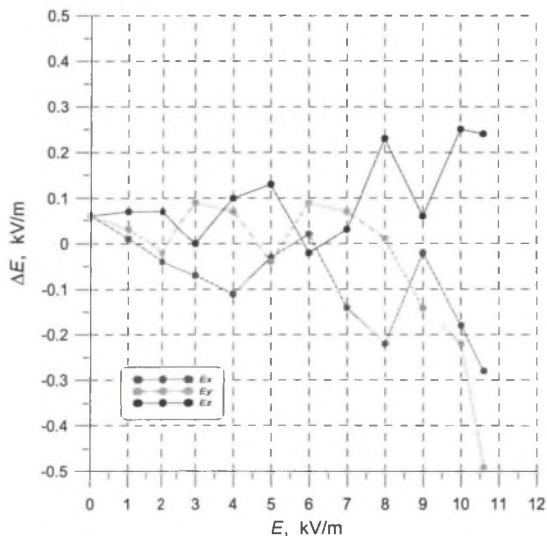
Wyniki pomiarowe oraz błędy pomiaru natężenia pola elektrycznego czujnikiem sześcioelektrodowym pomiędzy okładkami kondensatora płaskiego

E	Ex	Ey	Ez	ΔEz	ΔEy	ΔEz	δEx	δEy	δEz
kV/m	kV/m	kV/m	kV/m	kV/m	kV/m	kV/m	%	%	%
0	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	-	-	-
1	1,01	1,03	1,07	0,01	0,03	0,07	1,0	3,0	7,0
2	1,96	1,98	2,07	-0,04	-0,02	0,07	-2,0	-1,0	3,5
3	2,93	3,09	3,00	-0,07	0,09	0,00	-2,4	3,0	0,0
4	3,89	4,07	4,10	-0,11	0,07	0,10	-2,8	1,8	2,5
5	4,97	4,96	5,13	-0,03	-0,04	0,13	-0,6	-0,8	2,6
6	6,02	6,09	5,98	0,02	0,09	-0,02	0,4	1,5	-0,4
7	6,86	7,07	7,03	-0,14	0,07	0,03	-2,0	1,0	0,5
8	7,78	8,01	8,23	-0,22	0,01	0,23	-2,8	0,2	2,9
9	8,98	8,86	9,06	-0,02	-0,14	0,06	-0,3	-1,6	0,7
10	9,82	9,78	10,25	-0,18	-0,22	0,25	-1,8	-2,2	2,5
10,6	10,32	10,11	10,84	-0,28	-0,49	0,24	-2,7	-4,7	2,3

Na podstawie danych z tabeli 1 sporządzono charakterystyki przetwarzania trzech torów pomiarowych. Z uzyskanych wyników można wnioskować, iż czujnik ma liniową charakterystykę przetwarzania oraz że nachylenie charakterystyk dla poszczególnych torów pomiarowych jest różne od jedności (przypadek idealny). Występują również różnice pomiędzy poszczególnymi kanałami (0,979 dla kanału x, 0,967 dla kanału y, 1,015 dla kanału z). Przyczyną tych rozbieżności jest niedokładne wykonanie elektrod czujnika co w konsekwencji prowadzi do wykazywania przez czujnik właściwości kierunkowych.

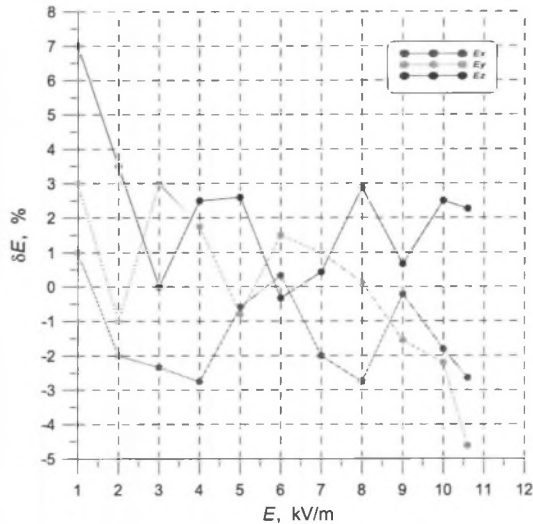


Rys. 6. Charakterystyki przetwarzania czujnika
Fig. 6. Characteristics of the sensor



Rys. 7. Błąd bezwzględny pomiaru dla różnych wartości natężenia pola elektrycznego
Fig. 7. The absolute measurement error for different values of electric field intensity

Na podstawie danych z badań laboratoryjnych sporządzono charakterystyki błędów względnego i bezwzględnego pomiaru natężenia pola elektrycznego. Bezwzględny błąd pomiaru nie przekracza wartości 0,3 kV/m w przedziale (0 – 10 kV/m). Odpowiada to 3% pełnego zakresu pomiarowego.



Rys. 8. Błąd względny pomiaru dla różnych wartości natężenia pola elektrycznego
 Fig. 8. The relative measurement error for different values of electric field intensity

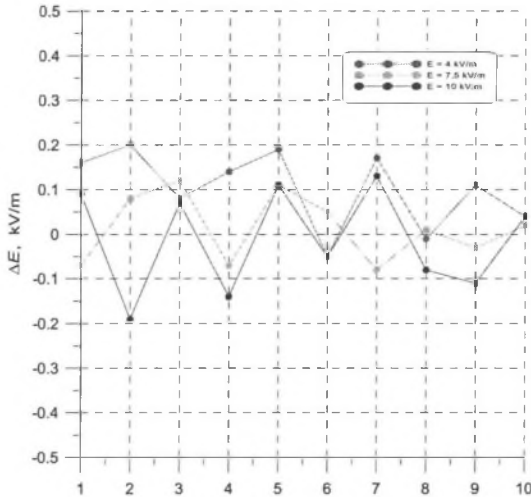
Oprócz pomiarów przeprowadzonych przy stałym ustawieniu czujnika w stosunku do okładek kondensatora, przeprowadzono szereg pomiarów przy stałej wartości skutecznej natężenia pola elektrycznego i zmiennym ułożeniu czujnika. Pomiarzy te miały wykazać bezkierunkowość wskazań czujnika lub jej zaprzeczyć. Na podstawie wcześniejszych pomiarów i uzyskanych wyników należało się spodziewać, że wystąpią pewne różnice wskazań przy zmianach położenia czujnika wynikające z nieidealnego wykonania elektrod. Po przeprowadzeniu badań dla trzech wartości natężenia pola elektrycznego 4 kV/m, 7,5 kV/m i 10 kV/m okazało się, że wskazanie w nieznacznym stopniu zależy od ustawienia czujnika. Uzyskane wyniki zamieszczono w tabeli 2. Na ich podstawie można wnioskować, że błąd bezwzględny wynikający z kierunkowości czujnika nie przekracza 0,2 kV/m. Wartość ta odpowiada 2% pełnego zakresu pomiarowego.

Tabela 2

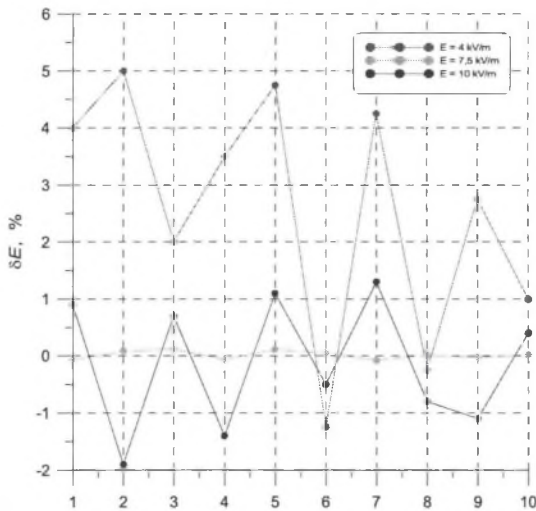
Wyniki pomiaru natężenia pola elektrycznego dla różnych ustawień czujnika
 w polu elektrycznym o natężeniu 4 kV/m, 7,5 kV/m i 10 kV/m

$E_0 = 4,0 \text{ kV/m}$			$E_0 = 7,5 \text{ kV/m}$			$E_0 = 10,0 \text{ kV/m}$		
E	δE_x	$\delta^0 E_x$	E	δE_x	$\delta^0 E_x$	E	δE_x	$\delta^0 E_x$
kV/m	kV/m	%	kV/m	kV/m	%	kV/m	kV/m	%
4,16	0,16	4,0	7,43	-0,07	-0,94	10,09	0,09	0,9
4,20	0,20	5,0	7,58	0,08	1,07	9,81	-0,19	-1,9
4,08	0,08	2,0	7,62	0,12	1,60	10,07	0,07	0,7
4,14	0,14	3,5	7,43	-0,07	-0,94	9,86	-0,14	-1,4
4,19	0,19	4,8	7,61	0,11	1,47	10,11	0,11	1,1
3,95	-0,05	-1,3	7,55	0,05	0,67	9,95	-0,05	-0,5
4,17	0,17	4,3	7,42	-0,08	-1,07	10,13	0,13	1,3
3,99	-0,01	-0,3	7,51	0,01	0,14	9,92	-0,08	-0,8
4,11	0,11	2,8	7,47	-0,03	-0,4	9,89	-0,11	-1,1
4,04	0,04	1,0	7,52	0,02	0,27	10,04	0,04	0,4

Na podstawie danych z tabeli 2 sporządzono wykresy ilustrujące uzyskane wyniki.



Rys. 9. Błąd bezwzględny pomiaru natężenia pola elektrycznego dla różnych ustawień czujnika
Fig. 9. The absolute measurement error for different positions of sensor

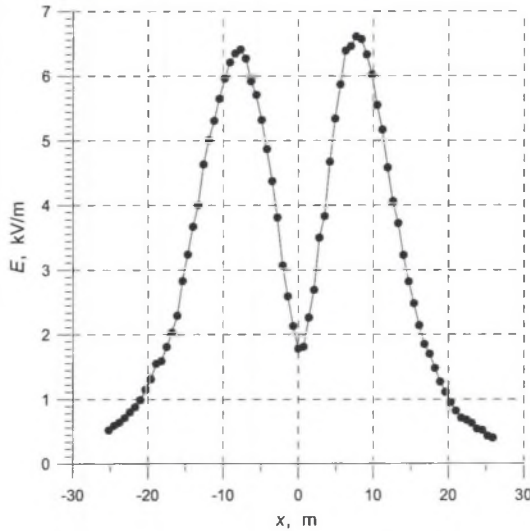


Rys. 10. Błąd względny pomiaru natężenia pola elektrycznego dla różnych ustawień czujnika
Fig. 10. The relative measurement error for different positions of sensor

3. POMIAR NATĘŻENIA POLA ELEKTRYCZNEGO POD LINIĄ 400 kV

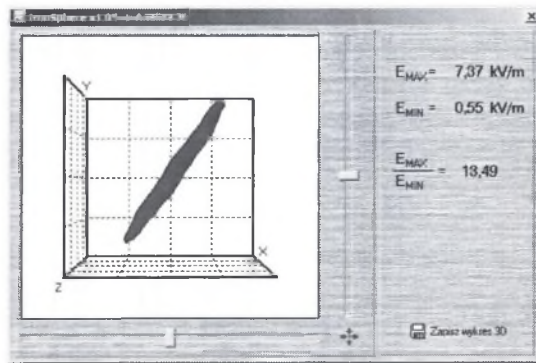
Podczas badań terenowych czujnika przeprowadzono pomiary pola wirującego. Badania przeprowadzone zostały w Wojkowicach Kościelnych pod dwutorową linią o napięciu znamionowym 400 kV. Wykonano szereg pomiarów dla różnych położeń czujnika w przekroju poprzecznym linii i zadanej wysokości. Na podstawie uzyskanych pomiarów sporządzono charakterystykę rozkładu natężenia pola elektrycznego w funkcji położenia czujnika w przekroju

poprzecznym linii (rys. 11). Otrzymane wyniki porównano z wynikami teoretycznymi [1] uzyskując potwierdzenie poprawnego działania systemu pomiarowego.



Rys. 11. Rozkład natężenia pola elektrycznego w przekroju poprzecznym dwutorowej linii 400 kV na wysokości 2,2 m od powierzchni ziemi

Fig. 11. Electric field intensity of the two-way 400 kV power line cross section measured 2.2 m above a ground



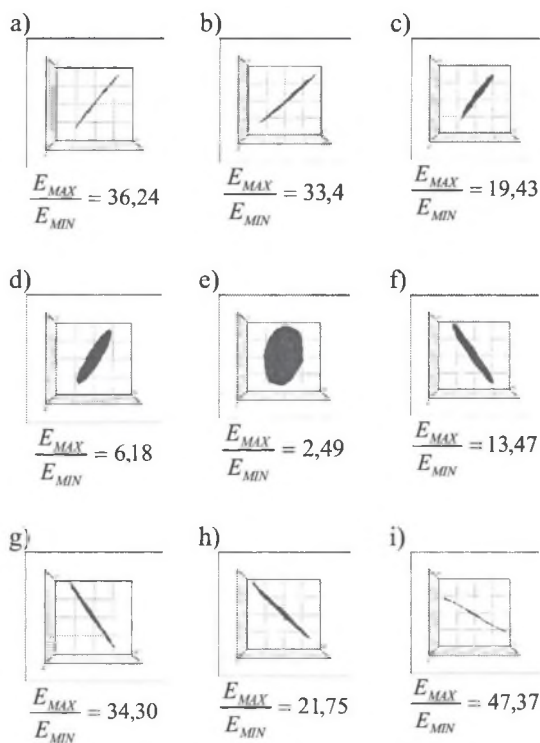
Rys. 12. Pole elektryczne spolaryzowane eliptyczne

Fig. 12. Elliptical polarization of electric field

Jeżeli źródłem pola elektrycznego są, co najmniej dwa przewody zasilane napięciem o przebiegu sinusoidalnym o różnych przesunięciach fazowych, to wokół tych przewodów powstaje pole eliptyczne (rys. 12) lub w szczególnym przypadku kołowe [2]. Dokonując pomiarów natężenia pola elektrycznego w kierunku trzech wzajemnie prostopadłych osi tworzących kartezjański układ współrzędnych, możliwe jest obliczenie powierzchni zakreślonej przez wirujący wektor pola elektrycznego. Oprogramowanie pomiarowe umożliwia wykonanie takich obliczeń, jak również wykreślenie na ich podstawie wykresów

trójwymiarowych. Obliczenia i wizualizacja wyników wykonywane są w czasie rzeczywistym, dlatego możliwa jest ciągła obserwacja zmian zachodzących w badanym obiekcie. Przykładowe wyniki otrzymane podczas pomiarów przedstawiono na rys. 12. Na uzyskanym wykresie wyraźnie zarysowuje się kształt elipsy, a drobne odstępstwa od ideału spowodowane są błędami pomiarowymi. Uzyskane wyniki prezentowane są w lokalnym układzie współrzędnych, którego początek znajduje się w geometrycznym środku czujnika, natomiast kierunki osi wyznaczone są przez jego elektrody. Obrót czujnika powoduje zmianę położenia otrzymanej krzywej.

Podczas pomiarów pod linią 400 kV obserwowane były zmiany ułożenia pola eliptycznego w przestrzeni trójwymiarowej. Przykładowe wyniki pomiarów w przekroju poprzecznym linii na wysokości 2,20 m przedstawiono na rysunku (13a-i).



Rys. 13. Zmiany polaryzacji pola elektrycznego pod linią 400 kV
Fig. 13. Electric field polarization variation under 400 kV power line

Przedstawione na rys. 13 wykresy przedstawiają zmiany pola eliptycznego przy zmianie położenia czujnika w przekroju poprzecznym linii. Rys. 13e przedstawia pole eliptyczne w osi symetrii linii dwutorowej. W punkcie tym stosunek pól dużej do pól małej elipsy jest najmniejszy, czego należało się spodziewać ze względu na największe oddziaływanie przewodów obu linii.

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

- Błąd pomiaru natężenia pola elektrycznego czujnikiem prototypowym w całym zakresie pomiarowym nie przekracza wartości 0,3 kV/m.
- Czujnik podczas pomiarów wykazywał pewne właściwości kierunkowe. Spowodowane jest to niedokładnym wykonaniem elektrod oraz błędami elektronicznego toru przetwarzania sygnałów pomiarowych. Błąd bezwzględny wywołany kierunkowością czujnika nie przekracza wartości 0,2 kV/m. Nie ma więc podstaw do przypuszczenia, że otrzymane na drodze teoretycznej wnioski o bezkierunkowości czujnika są nieprawdziwe.
- Czujnik umożliwia poprawny pomiar natężenia pola elektrycznego większego niż maksymalny zakres pomiarowy. Maksymalna mierzona wartości może być $\sqrt{3}$ razy większa od zakresu pomiarowego. Przypadek ten odpowiada takiemu usytuowaniu czujnika, przy którym wartość chwilowa w każdym torze pomiarowym nie przekracza maksymalnej dopuszczalnej wartości, a składowe wektora w kierunku każdej pary elektrod są takie same. Przedstawiony przypadek jest przypadkiem szczególnym i możliwym do uzyskania podczas pomiarów poprzez odpowiednie ustawienie czujnika. Jednak operator, aby móc dokonywać pomiarów powyżej maksymalnego zakresu, musi cały czas obserwować przebiegi czasowe w torach x, y i z. Jeżeli chociaż w jednym z torów pomiarowych zostanie przekroczona dopuszczalna wartość, to wówczas otrzymane wskazanie obarczone jest dodatkowym błędem.
- Zmiany wskazań wywołane efektem zbliżenia można pominąć, gdy czujnik jest w odległości większej niż 1 m od elementów konstrukcyjnych obiektu badanego, wartość ta odpowiada około 10-krotnej średnicy czujnika.
- Wpływ niejednorodności mierzonego pola można pominąć, gdy czujnik znajduje się w odległości większej niż 1 m od źródła pola.
- Badania terenowe potwierdziły przenośny charakter urządzenia. Czas potrzebny do przygotowania stanowiska pomiarowego w terenie jest krótszy niż 5 minut. Łatwość konfiguracji systemu pomiarowego i oprogramowania sprawia, że pomiary może wykonywać jedna osoba.

LITERATURA

1. Baron B.: *Pole elektryczne przesyłowej linii trójfazowej 400 kV*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Elektryka z. 64, Gliwice 1979, s. 57-70.
2. Baron B., Gacek Z.: *Problems of univocal estimation of electric field intensity round high voltage power equipment*. 8th International Symposium On High Voltage Engineering. Yokohama, Japan 23-27.08.1993.
3. Pasierbek A.: *Miernik natężenia pola elektrycznego quasistacjonarnego z czujnikiem sześcielektrodowym*. Warsztaty doktoranckie II OWD 2000. Istebna-Zaolzie 10.2000, s.178-182.
4. Pasierbek A.: *Transmission of measured signals from six electrode sensor to the measurement system by optical fiber link*. Sešit Katedry Teoretické Elektrotechniki z. XXI, Ostrava 12.02.2003, p.61-65.
5. Pasierbek A.: *Zastosowanie magistrali USB w systemach pomiarowych*. Konferencja ZKwE 2002. Poznań-Kiekrz 22-24.04.2002, Poznań 2002, s.135-137.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stanisław Wincenciak

Wpłynęło do Redakcji dnia 25 maja 2004 r.