Seria: ELEKTRYKA z. 105

Nr kol. 915

Franciszek MACHNIK

Instytut Podstawowych Problemów Elektrotechniki i Energoelektroniki Politechniki Sląskiej

ladoie z wartoduję ostężenie pola

J = LaSon.

KONSTRUKCJA I BADANIA WŁAŚCIWOŚCI MIERNIKA NATĘŻENIA POLA ELEKTRYCZNEGO O CZĘSTOTLIWOŚCI PRZEMYSŁOWEJ

Uwraledaleje: ektwalne potrzeby w iskranie przemowedzenie posierów nebe

tents pole electrypanned w stroppedte ursented alectrospersebyezzych o

I granding all avial and a sign of a start o

<u>Streszczenie</u>. Przedstawiono istotne dla pomiarów cechy wektora natężenia pola elektrycznego wytwarzanego przez urządzenia elektroenergetyczne wysokiego napięcia: polaryzację eliptyczną, przebieg zmian w czasie modułu wektora i zależność składowych wektora od kierunku w przestrzeni. Opisano stosowane rozwiązania konstrukcji mierników natężenia pola o częstotliwości przemysłowej. Na podstawie analizy właściwości wektora pola opracowano miernik składowych wektora natężenia pola, którego konstrukcję opisano w artykule. Miernik posiada czujnik dwuelektrodowy ze światłowodową transmisją sygnału pomiarowego. W wyniku badań praktycznych wyznaczono najważniejsze właściwości miernika: czułość, wrażliwości na czynniki wpływające, takie jak: oddziaływanie elementów ptoczenia i czujnika pomiarowego, niejednorodność pola, właściwości kierunkowe. W badaniach zastosowano wzorzec natężenia pola i model linii jednoprzewodowej. W artykule podano także wyniki pomiarów natężenia pola wirującego pod linią przesyłową

azglis provid cashed walls w slaving other oneshing

pognat with ally a new concord press I

1. Wstep

Pole elektryczne wytwarzane przez urządzenia elektroenergetyczne wysokiego napięcia, jak stwierdzono już dawno, może mieć szkodliwy wpływ na organizm człowieka. Szkodliwość tego wpływu zależy przede wszystkim od wartości natężenia pola i czasu przebywania człowieka pod wpływem tego pola. Z tego więc względu istotna jest znajomość rozkładu natężenia pola w otoczeniu urządzeń elektroenergetycznych. W praktycznych przypadkach rozkład ten można wyznaczyć jedynie na drodze pomiarowej. Zainteresowanie pomiarami pól elektrycznych rośnie w ostatnim czasie ze względu na wzrost wartości stosowanych napięć w systemach elektroenergetycznych. Dotychczasowe pomiary przeprowadzano najczęściej na wysokości 1,5 lub 1,8 m nad powierzchnią ziemi, wyznaczając natężenie pola w kierunku prostopadłym do tej powierzchni. Rozpowszechnianie się prowadzenia prac konserwacyjnych pod napięciem stwarza również potrzebę wyznaczanie natężenia pola bezpośrednio w pobliżu przewodów roboczych pod napięciem. Uwzględniając aktualne potrzeby w zakresie przeprowadzania pomiarów natężenia pola elektrycznego w otoczeniu urządzeń elektroenergetycznych opracowano miernik natężenia pola z czujnikiem kierunkowym i zbadano jego właściwości.

Właściwości lokalne wektora natężenia pola elektrycznego urządzeń elektroenergetycznych

Ogólne wiadomości na temat pola elektrycznego wytwarzanego przez urządzenia elektroenergetyczne wysokiego napięcia można znaleźć w pracy [1]. Ze względów praktycznych wielkością najbardziej interesującą jest natężenie pola elektrycznego, nie zaś potencjał tego pola. Ewentualna szkodliwość pola dla organizmów żywych jest związana właśnie z wartością natężenia pola oddziałującego na te organizmy - [8]. W artykule zrezygnowano więc z rozpatrywania zagadnień związanych z pomiarem potencjału pola.

Załóżmy, że pole elektryczne jest wytwarzane przez urządzenia elektroenergetyczne trójfazowe o potencjałach przewodów roboczych sinusoidalnie zmiennych o pulsacji من . Wówczas w prostokątnym układzie współrzędnych składowe wektora pola wynoszą:

$E_{\alpha}(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{z},\mathbf{t}) = E_{m\alpha}(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{z},\mathbf{t}) \sin \left[\omega \mathbf{t} + \mathcal{G}(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{z})\right], \quad \alpha = \mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{z}.$

W przypadku ogólnym fazy początkowe tych składowych w danym punkcie przestrzeni są różne i zależne od współrzędnych (x,y,z) tego punktu. W pracy [1] wykazano, że wektor pola o takich składowych jest wektorem wirującym, którego koniec zakreśla w ciągu jednego okresu elipsę – rys. 1. Długości półosi dużej elipsy oznaczono przez E_{am} , a półosi małej – E_{bm} . Półosie elipsy (długości i kierunki w przestrzeni) wyznaczają jednoznacznie wirujący wektor natężenia pola, co należy wziąć pod uwagę podczas pomiarowego wyznaczania rozkładu pola.

Zbadano dalej zmianę w czasie modułu wektora pola i zmianę składowych tego wektora w płaszczyźnie elipsy. W dalszych rozważaniach pole wirujące eliptyczne przedstawiono jako superpozycję (przy założeniu ośrodka liniowego i izotropowego) dwóch pól pulsujących, sinusoidalnie zmiennych o kierunkach półosi dużej i małej oraz przesuniętych w czasie o ćwierć okresu:

$\mathbf{E}(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{z},\mathbf{t}) = \mathbf{E}_{am} \sin(\omega \mathbf{t}) + \mathbf{E}_{bm} \cos \omega \mathbf{t}).$ (1)

stanowszych nadięć w systemst slektronarzetyczaych. Dotychozazowa posłary przeprowalzano zajczętalaj na wysokażej 1,5 lub 1,8 w osó posterzehnię slad, wyzosczajęc natężenie pola w kierunku proszepadzya do taj posterzehn ni, Rozpowszebalanie się prowstannie prze zonaczwanyjopub pod napięciem rywarze równieć potrzebę wyznaczenie zatężenie pola bezpodrednie w poblide przewstów rokozych pod napięciem.



Rys. 1. Elipsa i składowe wektora natężenia pola elektrycznego Fig. 1. Ellipse and electric field intensity vector components

Zależność modułu tego wektora od czasu jest następująca (tam, gdzie nie jest to konieczne, nie notowano dalej współrzędnych (x,y,z) punktu, w którym jest rozpatrywane pole):

$$\left| \mathbb{E}(t) \right| = \sqrt{\mathbb{E}_{am}^2 \sin^2 \omega t} + \mathbb{E}_{bm}^2 \cos^2 \omega t =$$

$$\frac{\sqrt{2}}{2}\sqrt{E_{am}^2 + E_{bm}^2 - (E_{am}^2 - E_{bm}^2)} \cos 2 \omega t.$$

Wartości maksymalna i minimalna przebiegu w czasie modułu wektora $|\mathbf{E}(t)|$ są równe długościom \mathbf{E}_{am} i \mathbf{E}_{bm} półosi elipsy. Zależność ta może być wykorzystana w konstrukcji czujnika pomiarowego natężenia pola spolaryzowanego eliptycznie. Czujnik taki powinien wytwarzać trzy sygnały pomiarowe proporcjonalne do wartości chwilowych trzech wzajemnie prostopadłych składowych wektora natężenia pola $\mathbf{E}_{cc}(t), c = x, y, z$. Sygnał proporcjonalny do wartości chwilowej modułu wektora pola oraz sygnały proporcjonalne do długości

(2)

(3)

półosi elipsy tego wektora można otrzymać, realizując przetwarzanie analogowe sygnałów na podstawie zależności:

$$E(t) = \sqrt{E_{x}^{2}(t) + E_{y}^{2}(t) + E_{z}^{2}(t)},$$

$$E_{am} = \max_{t \in (t_{o}, t_{o} + T)} \{E(t)\}, \quad E_{bm} = \min_{t \in (t_{o}, t_{o} + T)} \{E(t)\}$$

Taki sposób pomiaru wartości półosi alipsy wektora natężenia pola nie wymagałby w czasie pomiarów zmiany orientacji czujnika w przestrzeni. Analiza i konstrukcja czujnika sześcioelektrodowego realizującego wg przedstawionego sposobu będą tematem odrębnego artykułu.

W dalszej kolejności wyznaczono wartości składowych wektora natężenia pola w płaszczyźnie elipsy o kierunkach określonych przez kąt_i Ψ , zaznaczony na rys. 1. Przyjmując natężenie pola, dla którego jest ważna zależność (1), obliczono wartości chwilowe składowych wektora pola;

 $E_{w}(t) = E_{am} \sin \psi \sin \omega t + E_{bm} \cos \psi \cos \omega t =$

=
$$(E_{am}^2 \sin^2 \psi + E_{bm}^2 \cos^2 \psi) \frac{1}{2} \sin \left[\omega t + \arctan \left(\frac{E_{bm}}{E_{am}} \operatorname{ctg} \psi\right)\right]$$

Wartości chwilowe składowych zmieniają się w czasie sinusoidalnie, a wartość skuteczna tych składowych wynosi:

$$E_{\psi} = \frac{1}{2} \sqrt{E_{am}^2 + E_{bm}^2 - (E_{am}^2 - E_{bm}^2) \cos 2\psi}.$$
 (4)

Na rys. 1 zaznaczono wektor o długości 2 E4, reprezentujący składową w kierunku 4. Końce takich wektorów dla wszystkich kierunków w płaszczyznie elipsy tworzą krzywą 1 pokazaną na rysunku. W przypadkach granicznych, kiedy pole ma polaryzację kołową, krzywa ta przechodzi w okrąg, a dla pola o polaryzacji liniowej – w dwa styczne okręgi. Wartości skuteczne składowych w kierunkach półosi dużej i małej oznaczono przez E_a oraz E_b.

Zastosowanie do pomiaru natężenia pola miernika z czujnikiem kierunkowym, mierzącego składową natężenia pola w określonym kierunku, umożliwia wyznaczenie półosi elipsy w następujący sposób: płaszczyzna elipsy jest prostopadla do kierunku, dla którego wskazanie miernika jest zerowe; wskazania minimalne i maksymalne w płszczyźnie elipsy wyznaczają małą i dużą półoś elipsy. Orientacje czujnika dla tych wskazań wyznaczają jednocześnie kierunki półosi w przestrzeni.

Stosowane rozwiązania konstrukcji mierników natężenia pola elektrycznego o częstotliwości przemysłowej

Podstawowym elementem miernika natężenia pola, decydującym o jego właściwościach, jest czujnik pomiarowy. Zasada pomiaru natężenia pola jest oparta na zjawisku indukcji elektrycznej. Stosowane są czujniki uziemione oraz izolowane, przyjmujące potencjał pola, w którym się znajdują.



Rys. 2. Konstrukcje mierników z czujnikami uziemionymi Fig. 2. Constructions of meesuring instru-

ments with earthed sensors

Typowe rozwiązania konstrukcji mierników z czujnikami uziemionymi przedstawiono na rys. 2. Prąd pomiarowy i_p płynie pomiędzy czujnikiem i ziemią. W warunkach normalnych pomiaru jest on proporcjonalny do potencjału pola w miejscu położenia czujnika przed wprowadzeniem tego czujnika do badanego pola. Bezpośredni odczyt natężenia pola wymaga założeń dotyczących geometrii pola. Zakła-

da sie najcześciej pole jednorodne prostopadłe do powierzchni ziemi. Miernik z czujnikiem kulistym pokazany na rys. 2a był opracowany i wykonany na Politechnice Śląskiej w Gliwicach. Wskazania cyfrowe na wyświetlaczu elektroluminescency jnym nie sa dostatecznie czytelne z wiekszej odległości (osoba dokonująca pomiaru nie może się znajdować blisko czujnika, by nie zakłócała rozkładu pola). Rozwiązanie konstrukcyjne podobne do przedstawionego na rys. 2b mają mierniki typu ME-2, opracowane na Politechnice Wrocławskiej i mierniki typu NFM1, produkowane w VE Kombinat PRACITRONIC Dresden, DDR - 7]. Czujniki uziemione mają szereg wad: dużą niedokładność (10-20%). ograniczenie miejsca pomiarów do obszarów przy powierzchni ziemi, konieczność ustawienia na określonej wysokości nad powierzchnią ziemi, dużą wrażliwość na czynniki wpływające (np. niejednorodność i kierunek pola), trudności we wzorcowaniu. Obliczanie czułości na podstawie modelu matematycznego czujnika kulistego, proponowany w pracy 1, prowadzi do kilkunastoprocentowych błędów z powodu nieuwzględniania istnienia koniecznego połączenia elektrycznego czujnika z ziemią i oddziaływania ziemi (wniosek z obliczeń numerycznych dla czujnika kulistego podpartego przewodzącym prętem).

Pomiary natężenia pola z dala od powierzchni ziemi wymagają zastosowania czujników izolowanych od ziemi. Czujniki takie posiadają co najmniej dwie elektrody pomiarowe, pomiędzy którymi przepływa prąd przetwarzany w układach elektronicznych czujnika we wskazanie natężenia poła, najczęściej za pomocą przetwornika analogowego umieszczonego wewnątrz czujnika. Stosowane czujniki mają różne kształty: kuliste, prostopadłościenne, nieregularne - [6]. Na rys. 3a pokazano czujnik prostopadłościenny zamocowany przegubowo na dielektrycznej rękojeści. Czujnik o takiej konstrukcji był opracowany w Zakładach Pomiarowo-Badawczych Energetyki "ENERGOPOMIAR" w Gliwicach. Stosowany w pracy [9] miernik ma podobny czujnik o wymiarach 145x105x82 mm. Na rys. 3b pokazano miernik z czujnikiem o kształcie walcowym, z którego sygnał jest transmitowany za pomocą światłowodu do zewnętrznego układu odczytu wskazań. Miernik był opracowany i wykonany na Politechnice Śląskiej. Według rozeznań autora miernik z czujnikiem kulistym jest stosowany w Instytucie Energetyki w Warszawie. Za granicą mierniki są produkowane w pojedynczych egzemplarzach lub w małych seriach, najczęściej przez samych użytkowników.



Rys. 3. Konstrukcje mierników z czujnikami izolowanymi Fig. 3. Constructions of measuring instruments with insulated sensors

W pracy [6] porównano mierniki różnych typów. Różnice ich wskazań w tych samych warunkach pomiarowych sięgały 25% (badania w polu dwóch równoległych elektrod kwadratowych). Różnice te wynikają z różnych warunków wzorcowania dla poszczególnych mierników, ich wrażliwości na czynniki wpływające i różnic konstrukcyjnych. W literaturze mało jest danych na temat wrażliwości mierników na czynniki wpływające, takie jak: niejednorodność i kierunek pola, zbliżenie elementów otoczenia, człowieka, warunki atmosferyczne. Nie spotykano także opracowań dotyczących pomiaru wartości charakteryzujących wektor natężenia pola wirującego. Dotychczasowe pomiary w otoczeniu urządzeń elektroenergetycznych ograniczały się najczęściej do wyznaczania natężenie pola w kierunku prostopadłym do powierzchni ziemi na wysokości 1,5 lub 1,8 m, mimo iż polaryzacja eliptyczna pola na tych wysokościach już wyraźnie występuje.

Przedstawiony stan techniki pomiarowej natężenia pola elektrycznego o częstotliwości przemysłowej i aktualna potrzeba dokładniejszych pomiarów

as [slokysoint to relate antiquest antiques, cajesedele] as

pola wirującego uzasadniają celowość prowadzenia prac badawczych nad nowymi konstrukcjami mierników oraz analizy właściwości metrologicznych tych mierników.

<u>Konstrukcja miernika natężenia pola elektrycznego z dwuelektrodowym</u> czujnikiem kierunkowym

Podczas konstrukcji miernika przyjęto następujące założenia:

- miernik powinien umożliwić pomier parametrów elipsy wektora natężenia pola wirującego,
- niedokładność pomiarów w warunkach normalnych powinna być mniejsza od 1,5%.

Pole, którego natężenie ma być mierzone, nazwano polem pierwotnym dla odróżnienia od pola dyfrakcji istniejącego w otoczeniu czujnika w czasie pomiarów. Zniekształcenie pola podczas pomiarów nie jest przyczyną błędów pomiarowych w warunkach normalnych pomiaru, ponieważ zostało ono uwzględnione w procesie wzorcowania miernika.

Zastosowanie w mierniku czujnika kierunkowego umożliwia pomiar parametrów elipsy pola w sposób podany w p. 2. Czujnik powinien przetwarzać natężenie pola pierwotnego w kierunku swojej osi geometrycznej. Składowe natężenie pola w kierunku prostopadłym do tej osi powinny dawać zerowy sygnał pomiarowy czujnika. Taką sytuację może zapewnić czujnik kulisty z elektrodami w kształcie półkul (rys. 4a) lub czujnik w kształcie walcowym, pokazanym na rys. 4b. W rozwiązaniach praktycznych czujnik jest podtrzymywany w czasie pomiarów za pomocą pręta lub rurki izolacyjnej. Podparcie może być przyczyną znacznego pogorszenia właściwości czujnika z następujących powodów: zachwia-



Rys. 4. Kształty elektrod i sposoby podparcia czujników kierunkowych Fig. 4. Shape of electrodes and methods of supporting directional sensors nia symetrii geometrycznej czujnika, innej deformacji pola w czasie pomiarów niż w czasie wzorcowania i z powodu odprowadzania ładunków elektrycznych z czujnika do ziemi.

Aby czujnik nie przetwarzał składowych natężenia pola prostopadłych do jego osi,powinien być podparty w sposób pokazany na rys. 4a lub 4b. W obu przypadkach, gdy pole pierwotne ma kierunek zaznaczony na rysunku, ładunki zgromadzone na każdej elektrodzie mają w każdej chwili wartości zerowe. Nie płynie więc prąd pomiarowy i_n.



Rys. 5. Konstrukcja miernika z czujnikiem kierunkowym Fig. 5. Construction of measuring instrument with directional sensor

W opracowanym mierniku przyjęto rozwiązanie przedstawione na rys. 5. Czujnik w kształcie walcowym, jak wykazano w pracy [5], może mieć przy odpowiedniej proporcji wymiarów mniejszą wrażliwość na zbliżenie do płaskich powierzchni przewodzących niż czujnik kulisty o takiej samej czułości. Mniejsze może być także spiętrzenie pola na jego powierzchni.Podparcie czujnika w płaszczyźnie jego symetrii umożliwia zmianę kierunku osi czujnika bez zmiany położenia jego środka. Brak symetrii osiowej w tym przypadku, jak wykazały badania praktyczne czujnika, niewiele wpływa na właściwości miernika.

Opracowany i wykonany miernik ma czujnik połączony ze statywem lub rękojeścią 3 za pomocą dielektrycznej rurki 1 i przegubu 2 (patrz rys. 5). Długość rurki 1, której położenie nie zmienia się względem czujnika, ustalono eksperymentalnie tak, by przegub i rękojeść nie wpływały na wskazania miernika.

Sygnał pomiarowy z czujnika jest transmitowany do układu odczytu wskazań za pomocą światłowodu, co zapewnia wymaganą izolację elektryczną czujnika. Takie rozwiązanie umożliwia odczyt wskazań przy dowolnym położeniu czujnika. Schemat blokowy układu elektronicznego miernika pokazano na rys.6.

Konstrukcja i badania właściwości miernika...







Rys. 6. Schemat blokowy układu elektronicznego miernika Fig. 6. Block diagram of the electronic system of the measuring instrument

Czujnik zawiera układ 1 całkowania w czasie prądu płynącego pomiędzy elektrodami pomiarowymi, prostownik napięcia 2, przetwornik napięcia na częstotliwość 3, układ 4 formowania impulsów sterowania elektroluminescencyjnej diody nadawczej 5. Układy elektroniczne są zasilane z akumulatorków poprzez przetwornicę napięcia 8. Pomiędzy układy 1 i 2 może być włączony dodatkowo filtr dolnoprzepustowy 16 w przypadku zakłóceń pomiarów przez pola o wyższych częstotliwościach, istniejące w niektórych obszarach stacji rozdzielczych wysokiego napięcia.

Układ odczytu wskazań zawiera fotodiodę 9 odbierającą sygnał z czujnika poprzez światłowód 6, przetwornik częstotliwości na napięcie stałe 11, przetwornik A/C 12 sterujący również wyświetlaniem wskazań na wyświetlaczu ciekłokrystalicznym 13. Miernik posiada układ kontroli działania 7 pozwalający sprawdzić poprawność pracy całego toru przetwarzania i układ sygnalizacji akustycznej wskazań, ułatwiający przeprowadzanie pomiarów. Czestotliwość

(5)

emitowanego dźwięku jest proporcjonalna do wartości mierzonej.Pomiary mogą się odbywać w czterech podzakresach: 2, 6, 20, 60 kV/m.

Wykonany układ odczytu wskazań ma wymiary 142x86x21 mm, średnica czujnika wynosi 127 mm, a jego wysokość 80 mm. Obecnie jest konstruowany czujnik o wymiarach 98x49 mm. Wymiary czujnika i ich proporcja wpływają istotnie na jego właściwości. Analizę tego wpływu można przeprowadzić w oparciu o model matematyczny czujnika przedstawiony w pracy [5].

5. Badania praktyczne właściwości miernika

Właściwości metrologiczne miernika zależą przede wszystkim od konstrukcji jego czujnika pomiarowego oraz od warunków pracy. Warunki normalne przyjęto w postaci pola jednorodnego o polaryzacji liniowej istniejącego w przestrzeni swobodnej. Istotnymi czynnikami wpływającymi są oddziaływanie elementów otoczenia i czujnika, niejednorodność mierzonego pola, warunki otoczenia (temperatura, wilgotność powietrza). Dwa pierwsze czynniki są w przypadku ogólnym trudne do opisu liczbowego. Prektycznie badano przypadki szczególne: oddziaływanie czujnika i płaszczyzny przewodzącej, wpływ niejednorodności pola linii jednoprzewodowej.

5.1. Wzorcowanie miernika

Do wzorcowania zastosowano wzorzec natężenia pola elektrycznego o elektrodach kwadratowych opisany w pracy [5]. Wymiary elektrod wynosiły 2x2 m, a odległość pomiędzy nimi 0,998 m. Wartość natężenia pola odtwarzana w środku geometrycznym wzorca jest obliczana na podstawie zależności E == 0,993 U/h_e (U - zmierzone napięcie pomiędzy elektrodami wzorca, h_e - odległość pomiędzy nimi), a błąd graniczny wzorca wynosi 0,65% (na podstawie pracy [5]). Czujnik pomiarowy miernika był umieszczony podczas wzorcowania nieruchomo na statywie w środku geometrycznym wzorca, osią równolegle do kierunku linii sił pola. Takie warunki wzorcowania odpowiadają praktycznie warunkom normalnym pomiaru. W czasie wzorcowania zmieniano natężenie pola w granicach od 0,2 do 2 kV/m. Ze względów technicznych nie przeprowadzano wzorcowania dla większych wartości natężeń pola.

Błędy względne \mathcal{T}_E miernika obliczono na podstawie wartości natężenia pola E odtwarzanej przez wzorzec i wskazań miernika E:

$$J_E = \frac{E - \widetilde{E}}{\widetilde{E}} \cdot 100$$

Największa wartość błędu wynosiła 0,5%. Wskazanie wzorca jest jednak obarczone stosunkowo dużym błędem 0,65%. Nie można więc przyjąć tego wskazania w tym wypadku za wartość prawdziwą natężenia pola. Dodano w tej sytuacji obydwa błędy (przypadek najmniej korzystny), otrzymując graniczny błąd miernika równy 1,15% w odniesieniu do wartości mierzonej, a 0,8% w odniesieniu do wartości zakresu.

5.2. Wrażliwość miernika na zbliżenie elementów zewnętrznych do czujnika pomiarowego

Załóżmy, że pole jest wytworzone w układzie elementów o pewnych własnościach przewodzących i dielektrycznych. Jeżeli pomiaru pola dokonuje się w pobliżu tych elementów, to w wyniku oddziaływania czujnika zmienia się rozkład ich ładunków (dla dielektryków zmiana polaryzacji i ładunków polaryzacyjnych). Nowy rozkład ładunków wytwarza w przestrzeni pole inne niż pierwotne (bez składowej pola generowanej przez ładunki czujnika), które obecnie jest mierzone przez czujnik. Powstaje z tego powodu pewien błąd pomiaru. Oszacowanie wartości tego typu błędu przeprowadzono dla czujnika położonego nad płaszczyzną przewodzącą dla jednorodnego pola pierwotnego. W badaniach zastosowano wzorzec nateżenia pola o parametrach podanych w p. 5.1. Zależność błędu pomiaru 🔏 , obliczanego na podstawie wzoru (5), od wartości stosunku d/h, podano w tab. 1 (d - odległość środka czujnika od elektrody wzorca, h - wysokość elektrody czujnika). Oś czujnika była prostopadła do powierzchni elektrody wzorca. Ze względu na nieduża wartość stosunku odległości d od długości boków elektrod wzorca wyniki pomiarów błedu można również odnieść do układu czujnik-płaszczyzna przewodząca. Błąd pomiaru jest dodatni i možna go praktycznie pominać, jeżeli d/h>10.

Tabela 1

d/h	1,75	2	2,5	3 30	4	5	7	10			
γ _z [%]	12,0	8,1	4,6	2,9	1,3	0,7	0,1	0,1			

Wartości błędów miernika spowodowanych zbliżeniem czujnika do płaszczyzny przewodzącej

Jeżeli powierzchnie elementów otoczenia czujnika mają dowolny kształt, to analiza ilościowa błędu związanego z efektem zbliżenia jest praktycznie niemożliwa. Dodatkowo w polu niejednorodnym występuje składnik błędu spowodowany tą niejednorodnością. W przypadku dielektryków znajdujących się w pobliżu czujnika błędy pomiarowe są mniejsze niż w przypadku przewodników – - ładunki polaryzacyjne są równe ładunkom na powierzchniach przewodzących, gdy Ł→∞{dla tych samych warunków zewnętrznych).

of limit he warhed notpients only wreats deloayon haden, his select office

Franciszek Machnik

5.3. Badania czujnika w polu niejednorodnym linii jednoprzewodowej

Badania przeprowadzono w układzie modelu fizycznego linii jednoprzewodowej o wymiarach podanych na rys. 7. Przewód linii był pod napięciem 2 kV w stosunku do ziemi. Przeprowadzono pomiary między innymi w punktach położonych na osi z przyjętego układu współrzędnych prostokątnych (patrz rys. 7). Wyniki pomiarów są odnoszone do położenia środka geometrycznego czujnika. Ze względu na niejednorodność pola duży wpływ na wynik pomiaru ma niedokładność ustawienia czujnika w punkcie pomiarowym o zadanych współrzędnych. Na przykład w odległości 0,2 m od przewodu natężenie pola na osi z pod linią zmienia swoją wartość o 0,5% na odcinku 1 mm.



Rys. 7. Układ pomiarowy czujnika w polu linii jednoprzewodowej Fig. 7. Meter circuit of the sensor in the field of the single-conductor transmission line

Otrzymane wyniki pomiarów porównano z rozkładem teoretycznym natężenia pola linii jednoprzewodowej o nieskończonej długości. Na rys. 8 przedstawiono względne różnice zmierzonych wartości natężenia E, i obliczonych E;

$$\delta_{1} = \frac{\bar{E}_{z} - E_{z}}{E_{z}} \cdot 100\%$$

Stała wartość $V_1 = -4,9\%$ dla d/h > 9 może wynikać przede wszystkim ze skończonej długości przewodu linii, błędu pomiaru wysokości zawieszenia przewodu oraz nierówności terenu pod linią. Wyznaczenie wpływu skończonej długości linii na wartości natężenia pola wymaga dalszych badań. Dla małych odległości czujnika od linii wzrost bezwzględnej wartości \int_1^{1} jest spowodowany niejednorodnością pola i wzajemnym oddziaływaniem czujnika i przewodu linii.

Konstrukcja i badania właściwości miernika...



Rys. 8. Wartości względne wyników pomiarów pod linią jednoprzewodową odniesione do rozkładu teoretycznego pola

Fig. 8. Relative values of the results of measurements under the single--conductor transmission line referred to the theoretical field distribution



Rys. 9. Wyniki pomiarów składowych wektora pola pod linią jednoprzewodową Fig. 9. Results of measurements of the field vector components under the single-conductor transmission line

Właściwości kierunkowe czujnika badano podczas pomiarów składowych E ψ wektora natężenia pola (stosowane oznaczenia wyjaśniono na rys. 7). Na rys. 9 przedstawiono w sposób graficzny wyniki pomiarów w punkcie P_o(x,y,z) o wartościach współrzędnych (O; -1; 1,2 m). Końce wektora E ψ zakreślają dwa styczne okręgi. Kąt ψ dla którego wartość natężenia pola jest największa, wynosi 48°. Wartość tego kąta obliczona z rozkładu teoretycznego jest równa 49,4°. Czujnik nie reaguje na natężenie pola o kierunku prostopadłym do jego osi.

5.4. Badania wrażliwości na inne czynniki wpływające

1) Wilgotność powietrza

Podczas dużej wilgotności powietrza elementy izolacyjne podpierające czujnik mają pewną konduktancję powodującą przepływ prądu pomiędzy czujnikiem a ziemią. Całkowity ładunek na powierzchni elektrod czujnika nie jest wtedy równy zeru, co zmienia dyfrakcję pola na tej powierzchni w stosunku do warunków normalnych i w efekcie także sygnał pomiarowy czujnika. Zmiana własności elektrycznych materiału podparcia powoduje także dodatkową deformację pola w otoczeniu czujnika, nie uwzględnianą w procesie wzorcowania.

Oszacowanie wpływu wilgotności na błąd miernika przeprowadzono na podstawie wyników pomiarów pod liniami przesyłowymi 400 kV w Sośnicowicach k. Gliwic i w Rybniku. Dla wilgotności względnej mniejszej od 80% wpływ ten może być praktycznie pominięty. Większa wilgotność powietrza powoduje wzrost wartości wskazań miernika w stosunku do warunków normalnych (dla wilgotności bliskiej 100% o 5,5%). Pogarszają się także właściwości kierunkowe czujnika. Wyniki pomiarów w czasie badań porównywano z wartością sygnału czujnika kulistego uziemionego.

2) Wpływ osoby dokonującej pomiarów

Podczas eksperymentów czujnik był umieszczony na statywie na wysokości 1,8 m nad powierzchnią ziemi. Ustalono, że wpływ na wskazanie miernika człowieka stojącego w odległości od czujnika większej niż 2 m może być praktycznie pominięty. Dla mniejszej odległości wpływ ten szybko rośnie - dla odległości wynoszącej 1 m wskazanie miernika wzrasta o 6%. Jest to spowodowane spietrzeniem pola przez ciało człowieka.

5.5. Badania miernika w polu linii przesyłowej 400 kV

Badania prowadzono pod linią przesyłową 400 kV w Sośnicowicach k. Gliwic. W czasie pomiarów czujnik był umocowany na statywie. Przeprowadzono pomiary składowych wektora natężenia pola w różnych miejscach przekroju poprzecznego linii. W tabeli 2 przestawiono wyniki pomiarów składowych wektora pola w kierunkach określonych przez kąt Ψ i w punkcie A o położeniu podanym na rys. 10. Wykres graficzny wartości amplitud składowych w punkcie B podano na rys. 11. Dorysowano również elipsę wektora natężenia pola.



Rys. 10. Położenie czujnika pomiarowego pod linią przesyłową 400 kV Fig. 10. Position of sensor under the 400 kV transmission line

Na wysokości 1,8 m nad powierzchnią ziemi pole ma już wyraźną polaryzację eliptyczną. Wartości stosunków długości półosi małej do dużej na osi przekroju poprzecznego linii wynoszą na wysokościach 1,8; 1,0; 0,6 m odpowiec 10 0,460; 0,249; 0,148.

Tabela 2

ψ [°]	0	20	40	60	80	90
E_{ψ} [kV/m]	0,495	0,572	0,754	0,925	1,058	1,076
ψ [°]	100	120	140	160	180	a Jalo -
$E \psi [kV/m]$	1,067	0,976	0,818	0,600	0,495	THE R. P.

Wyniki pomiarów składowych wektora natężenia pola pod linią przesyłową 400 kV w punkcie A (rys. 10)

ne estuelne prirzeny) stakoleodol elerative sopralle földfildidte böldfild. state erstedelade de starte dom internative beden to pole i villa fold Villa villa e ktörege ergine bost brövy jast signe reventle press internationes do millar syftrenge ederyte wented.

the intra successful the second and second

Na warbuid bigen pedatakowan sistrika (w warunkan noraslnych - pula jednárzéna w pravstravi zvehočnaj) w dużys stepniu wplywa niedokládanáć



Rys. 11. Wyniki pomiarów składowych wektora pola pod linią przesyłową 400kV w punkcie B z rys. 10:

 $E_a = 1,604 \text{ kV/m}, \quad E_b = 0,292 \text{ kV/m}$ Fig. 11. Results of measurements of the field vector components under the 400 kV transmission line in the point B (fig. 10): $E_a = 1,604 \text{ kV/m}, \quad E_b = 0,292 \text{ kV/m}$

6. Wnioski

Parametrami charakteryzującymi wektor natężenia pola elektrycznego urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia są w ogólnym przypadku długości i kierunki w przestrzeni półosi elipsy tego wektora. Do pomiaru tych parametrów, szczególnie pod liniami przesyłowymi, można zastosować miernik z czujnikiem kierunkowym natężenia pola. Wystarczające dobre (ze względu na aktualne potrzeby) właściwości miernika zapewnia rozwiązanie konstrukcyjne zawierające dwuelektrodowy czujnik natężenia pola w kształcie walcowym, z którego sygnał pomiarowy jest transmitowany poprzez światłowód do układu cyfrowego odczytu wskazań.

Na wartość błędu podstawowego miernika (w warunkach normalnych - pole jednorodne w przestrzeni swobodnej) w dużym stopniu wpływa niedokładność

Konstrukcja i badania właściwości miernika...

jego wzorcowania. Najważniejszymi czynnikami wpływającymi są: oddziaływanie czujnika pomiarowego i elementów jego otoczenia w czasie pomiarów (źródła pola, elementy konstrukcyjne urządzeń), niejednorodność mierzonego pola i wilgotność powietrza. W przypadkach praktycznych czynniki te są trudne do opisania ilościowego. Na podstawie przeprowadzonych badań można przyjąć, że założony błąd podstgwowy miernika o wartości 1,5% nie będzie przekroczony, gdy odległość czujnika pomiarowego od elementów jego otoczenia w czasie pomiarów jest pięć razy większa od największego wymiaru liniowego czujnika, a wilgotność względna powietrza jest mniejsza od 80%. Podczas pomiarów natężenia pola w kierunku prostopadłym do płaskich powierzchni przewodzących można określić (na podstawie tab. 1) błąd dodatkowy o wartości dodatniej spowodowany oddziaływaniem czujnika i przewodzącej powierzchni.

Wyznaczone podczas badań błędy pomiarowe odnoszą się do zakresu pomiarowego 2 kV/m. Badanie nieliniowości funkcji przetwarzania czujnika dla zakresu 20 kV/m przeprowadzono w sposób pośredni w układzie dwóch płaskich równoległych elektrod oddalonych od podstaw elektrod czujnika o 0,02 m i zasilanych napięciem o częstotliwości 50 Hz i wartości skutecznej do 2,5 kV. Otrzymano w ten sposób na powierzchni elektrod czujnika natężenia pola do wartości 60 kV, odpowiadającej maksymalnemu spiętrzeniu pola na powierzchni czujnika podczas pomiarów pola o natężeniu 20 kV/m w warunkach normalnych (na podstawie pracy [5]). Nieliniowość zmian wskazań miernika w czasie badań wynosiła 0,4% (w odniesieniu do największego wskazania). Na tej podstawie ląd podstawowy miernika o wartości 1,5% można także odnieść do zakresu pomiarowego 20 kV/m. Badania nieliniowości funkcji przetwarzania czujnika będą także przeprowadzone dla większych wartości natężeń pól w powiązaniu ze zmianą wilgotności powietrza. Przyczyną nieliniowości może być wówczas jonizacja powietrza w pobliżu elektrod czujnika.

LITERATURA

- Baron B.: Pole elektryczne linii przesyłowych trójfazowych najwyższych napięć. Zeszyty Naukowe Politechniki Sl., s. Elektryka, z. 73, Gliwice 1980
- [2] Baron B., Groszko M., Handzlik S.: Sonda kulowa do pomiaru potencjału i natężenia pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz. Przegląd Elektrotechniczny 5/1981, ss. 185-186
- [3] Feser K., Pfaff W.: Potential Free Spherical Sensor for the Measurement of Transient Electric Fields. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 10. October 1984, pp. 2904-2911.
- [4] Machnik F.: Izmieritieli elektriczieskowo polia niskoj czastoty i elektrostaticzieskowo polia. II Międzynarodowa Konferencja SEW, Plovdiv--Bułgaria, październik 1984.
- [5] Machnik F.: Analiza właściwości i konstrukcja czujnika pola elektrycznego quasistacjonarnego oraz problemy jego wzorcowania. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1986.

- Mesures des champs electriques a proximite des ouvrages a haute tension resultats et enseignements. Rapport presente au nom du Comite d Etudes 6 36 par le Groupe de Travail 36-01, CIGRE, Session de 1978, 30 aout - 7 septembre.
- 7 Near Field Strength Meter NFM1, Pracitronik Dresden, DDR, karta katalogowa.
- 8 Rotkiewicz W .: Ochrona człowieka od szkodliwego wpływu pól elektromagnetycznych sztucznych i niektórych naturalnych ziemskich. Cz. I, Pomiary Automatyka Kontrola, 7/1982, s. 197.
- [9] Takuma T., Kawamoto T., Sanaga Y.: Analysis of Calibration Arrangements for AC Field Strength Meters. IEEE Trans. on Power Apparatus and System. PAS-104, No. 2, February 1985, pp. 489-496.

ware 2 W/m. Medente religiour remont prevent and an average and

lanych napleolwa o cassicaliwalci 50 m 1 wartokol shokacaw

contraine soders howlards mis a newspanic of syle a second

- test i a 50,0 a silciono bontela valmbar os davolabe a detra a final

sont sivetabag sol (51 is rotos Recenzent: doc. dr hab. inż. Marian Miłek

Wpłynęło do redakcji 10 kwietnia 1987 r.

КОНСТРУКЦИЯ И ИЗСЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ НАПРЯЖЕННОСТИ SJEKTPNYECKOFO NOJH NPOMHELLEHHON YACTOTH

Printerelung Leosableverter

Резюме

Рассматриваются существенные для измерений особенности вектора напряженности электрического поля, создаваемого электроэнергетической установкой высокого напряжения: эллиптическая поляризация, изменения во времени модуля вектора, и зависимость составляющих вектора от направления в пространстве. Рассматриваются применяемые конструктивные решения измерителей напряженности электрического поля промышленной частоты.

В результате анализа особенностей вектора поля разработан измеритель составляющих вектора напряженности поля, конструкция которого рассматривается в статье. Измеритель оснащен двухэлектродным датчиком с передачей измеряемого сигнала по светопроводу.

Методом экспериментальных исследований определены основные особенности ИЗМЕРИТЕЛЯ: ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ, ВОСПРИИМЧИВОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТАКИХ ИСТОЧНИков, как элементы окружающей среды и измерительного датчика, неоднородность поля. особенности направлений. В исследованиях применялся эталон напряженности поля и модель однопроводной линии.

В статье приводятся также результаты измерений напряженности врадарщегося поля под линией передачи 400 кВ.

CONSTRUCTION AND EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE PROPERTIES OF AN ELECTRIC FIELD INTENSITY METER WITH A POWER FREQUENCY

Summary

The characteristic features of the intensity vector of the electric field generated by high voltage power engineering installations found to be essential in the conduction of measurements, such as the elliptic polarization, the process of changes with the passage of time of the absolute value of the vector and the dependence of the vector components on the direction in space, have been presented. Design solutions of field intensity meters with a power frequency are described. On the basis of the analysis of the properties of the field intensity vector. an instrument for the measurement of the vector components of the field intensity, the design of which is described in the paper, has been elaborated. The meter is provided with a double-electrode sensor with a light pipe type measuring signal transmission. In the course of experimental investigations, the following most important properties of the measuring instrument, such as the sensitivity, susceptibility to influential factors including the interaction of environmental elements and the sensor, the field heterogeneity and directional proporties, have been determined. The field intensity standard and a single--conductor transmission line model have been used in the experiments. The results of measurements of the spinning field intensity under the 400 kV transmission line are also given in this paper.