

Romuald DUSZA

SONDY I UKŁADY DO AUTOMATYCZNEGO POMIARU NATĘŻENIA
POLA ELEKTRYCZNEGO NA MODELACH NAPOWIETRZNYCH
LINII NAJWYŻSZYCH NAPIĘĆ

Streszczenie. W pracy określono funkcje przetwarzania sond do pomiaru natężenia pola elektrycznego na poziomie ziemi i 1,8 m nad ziemią na fizycznych modelach linii bardzo wysokich napięć. Zbudowano automatyczne urządzenie do pomiaru natężenia pola elektrycznego, które zostało wdrożone w ZPBE "Energopomiar" w Gliwicach.

1. Wstęp

Dynamiczny rozwój techniki powoduje zwiększone zapotrzebowanie na energię elektryczną i konieczne staje się budowanie elektrowni o coraz większych mocach. Przesyłanie energii elektrycznej do odbiorców wymaga wznoszenia linii elektroenergetycznych o coraz to wyższych napięciach. Wpływ linii wysokiego napięcia na środowisko naturalne człowieka jest niekorzystny. Istotnym zagrożeniem dla człowieka są prądy wzbudzone w jego organizmie przez działanie pola elektrycznego pochodzącego od przewodów roboczych.

Jednym z podstawowych kryteriów obowiązujących przy projektowaniu linii przesyłowych najwyższych napięć jest minimalizacja natężenia pola elektrycznego pochodzącego od linii przy powierzchni ziemi.

Niezwykle pomocne przy projektowaniu linii elektroenergetycznych jest modelowanie fizyczne obiektu rzeczywistego. Metoda ta pozwala na uzyskanie pełnej informacji o rozkładzie natężenia pola elektrycznego występującego na modelowanym obiekcie, tj. linii elektroenergetycznej, która dopiero będzie budowana. Dysponując modelem fizycznym o zmiennej konfiguracji przewodów roboczych można w krótkim czasie wybrać optymalny wariant projektowanej linii. W kraju modelowaniem układów elektroenergetycznych zajmuje się "Energopomiar" w Gliwicach. Od 1973 r. Instytut Podstawowych Problemów Elektrotechniki i Energoelektroniki uczestniczy w rozwiązywaniu problemów związanych z modelowaniem. Kolejnym opracowaniem jest urządzenie do zasilania modeli i automatycznego pomiaru rozkładu natężenia pola elektrycznego na modelach linii i stacji najwyższych napięć, zwane AMPE 76.

2. Obliczanie funkcji przetwarzania przetworników pomiarowych - sond

Funkcję przetwarzania przetwornika pomiarowego - sondy, zdefiniowanej jako zależność napięcia (prądu) na wyjściu od natężenia pola elektrycznego panującego w otoczeniu sondy, obliczono przy następujących założeniach:

- pole elektryczne, którego natężenie chcemy mierzyć, ma charakter quasi-statyczny, tzn. występujące opóźnienia potencjałów są pomijalnie małe w przestrzeni pomiarowej,
- pole elektryczne jest jednorodne w otoczeniu sondy przed jej włożeniem, tzn. natężenie pola elektrycznego jest stałe w przestrzeni zajmowanej przez sondę przed jej umieszczeniem w tej przestrzeni,
- aktywne powierzchnie sondy są połączone ze sobą rezystorem (lub kondensatorem) o dostatecznie małej rezystancji (dużej pojemności), tak że występujący spadek napięcia na nim jest pomijalnie mały (kilkanaście miliwoltów) w stosunku do różnicy potencjałów, jaka istnieje w przestrzeni zajmowanej przez sondę, a wynikającej z panującego tam natężenia pola elektrycznego (kilka, kilkanaście kV/m).

2.1. Sonda do pomiaru natężenia pola elektrycznego na poziomie ziemi na modelach powietrznych linii wysokiego napięcia

Bezpośredni pomiar natężenia pola elektrycznego na płaszczyźnie przewodzącej modelującej ziemię można przeprowadzić w układzie przedstawionym na rys. 1.

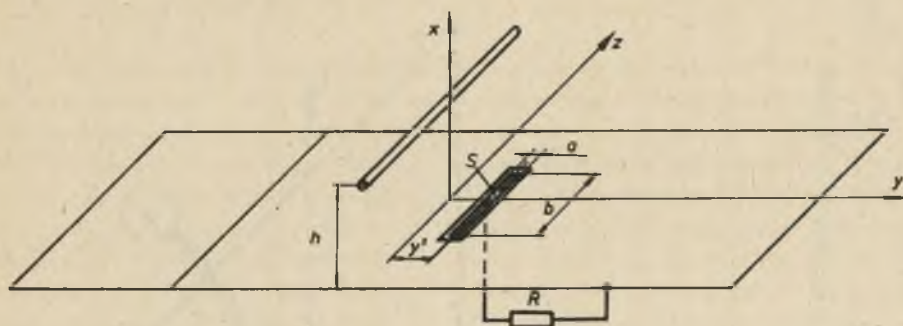
W płaszczyźnie przewodzącej modelującej ziemię wycięto pasek o powierzchni S i połączono go z pozostałą częścią płaszczyzny przewodzącej rezystorem R . Nad płaszczyznę przewodzącą znajdują się przewody posiadające pewien potencjał w stosunku do zerowego potencjału płaszczyzny. Pole elektryczne na płaszczyźnie posiada tylko składową normalną E_n o wartości $E_n = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$, gdzie σ - gęstość powierzchniowa ładunku.

Jeżeli pasek S jest dostatecznie wąski, tzn. jeżeli wzdłuż jego wymiaru a pole elektryczne jest w przybliżeniu stałe, to ładunek, który indukuje się na nim, wynosi:

$$q = \sigma S = \epsilon_0 E_n(y) S \quad (1)$$

Z równania ciągłości prądu wynika:

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = \epsilon_0 S \frac{d E_n(y', t)}{dt} \quad (2)$$



Rys. 1

Dla pola sinusoidalnie zmiennego otrzymujemy wartość skuteczną prądu:

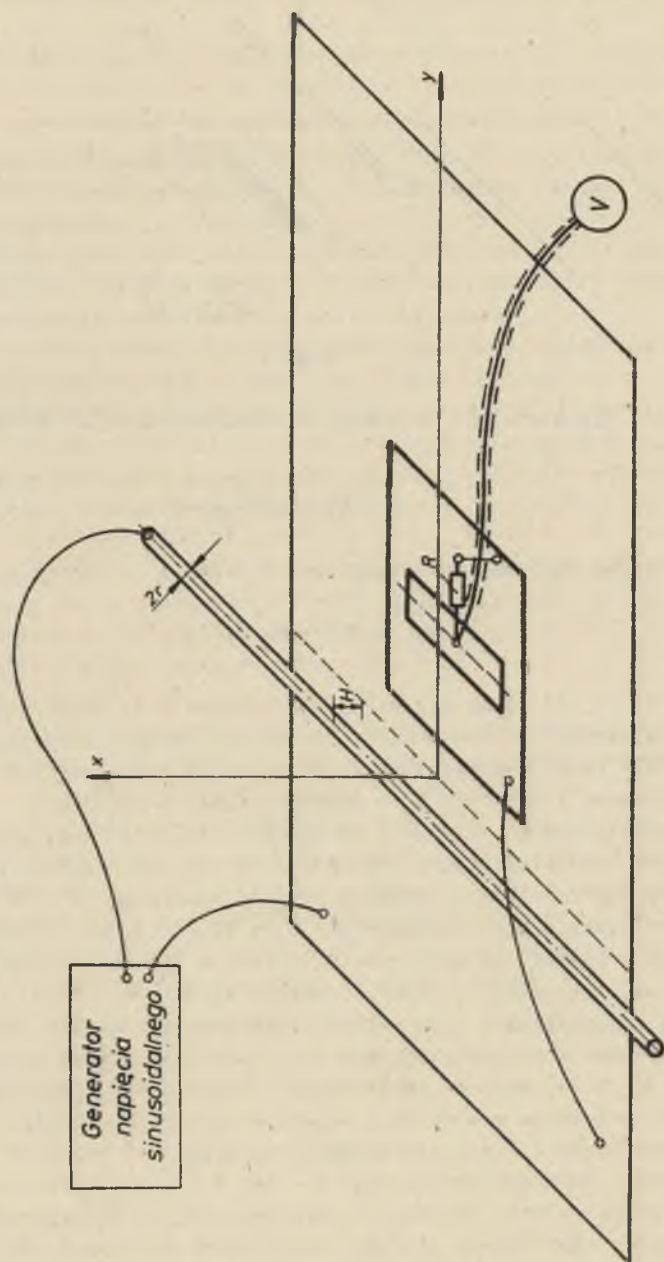
$$I = \epsilon_0 \omega S \frac{E_{nb}(y')}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

Daje on spadek napięcia na rezystorze R równy:

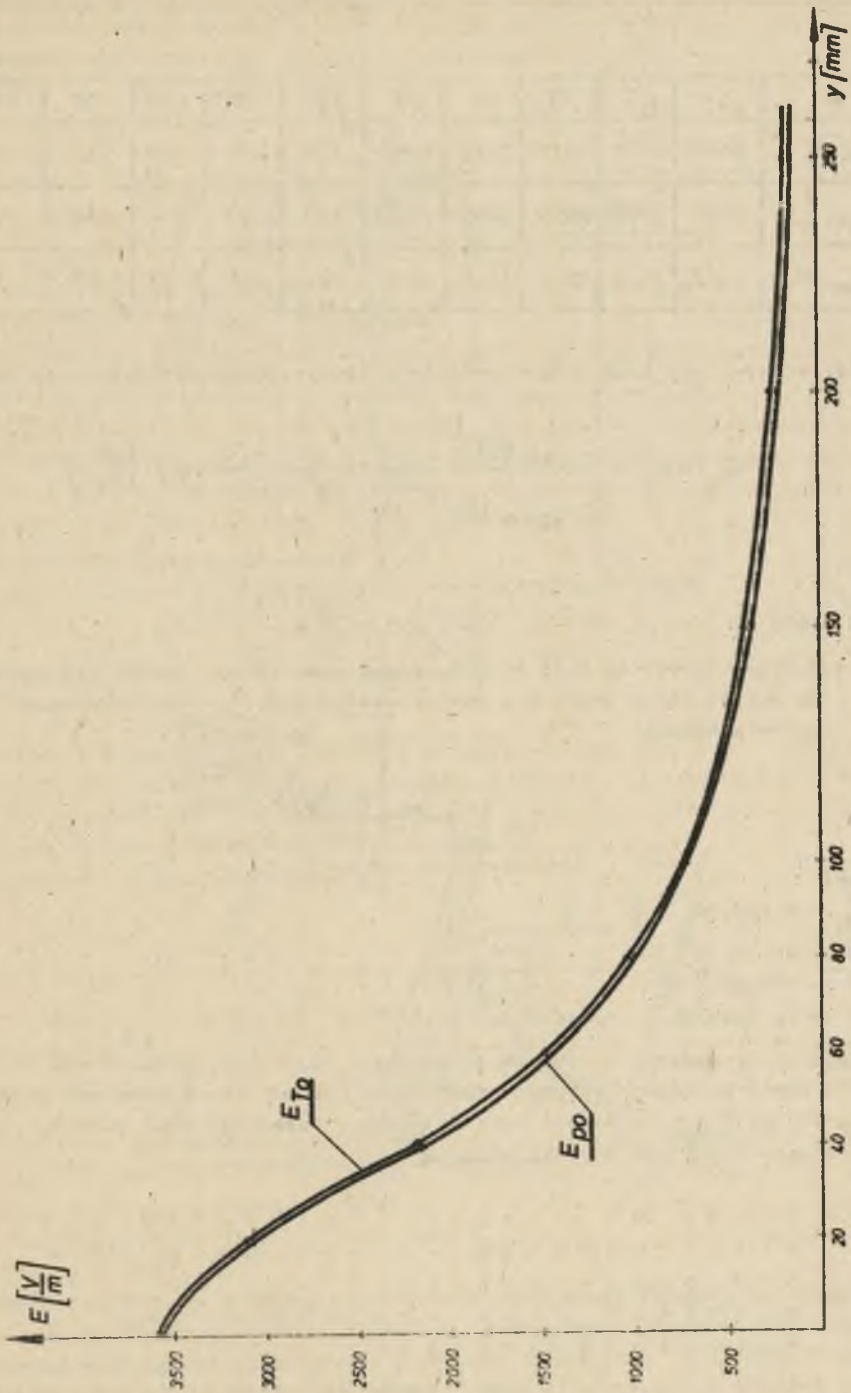
$$U_{s0} = I R = \epsilon_0 R \omega E_n(y') \quad (4)$$

Wzory (3) i (4) pozwalają wyznaczyć rozkład pola elektrycznego sinusoidalnie zmiennego na powierzchni płaszczyzny modelującej ziemię, o ile w danym modelu linii wysokiego napięcia zapewnimy możliwość przemieszczania się płaszczyzny z paskiem S w poprzek wiązki przewodów.

Dla potwierdzenia otrzymanej zależności (4) przeprowadzono następujący eksperyment. Nad płaszczyzną przewodzącą z laminatu jednostronnie miedzianego o powierzchni $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ zawieszono na wysokości $H = 50\text{ mm}$ posrebrzany przewód miedziany o średnicy $d = 0,75\text{ mm}$ - rys. 2. W płycie cienkiego laminatu o grubości $0,2\text{ mm}$ o wymiarach $220\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ wycięto przerwę izolacyjną taką, że wewnątrz powstał pasek o szerokości 5 mm i długości 198 mm . Pasek ten połączono z pozostałą powierzchnią laminatu rezystorem $R = 11,6\text{ k}\Omega$ oraz z miliwoltomierzem typu V 640 przewodem koncentrycznym o średnicy $\Phi = 3\text{ mm}$. Masę miliwoltomierza, a tym samym powierzchnię otaczającą pasek połączono przewodem z płytką przewodzącą. Między płaszczyzną przewodzącą stołu a linią jedнопроводową wymuszono napięcia sinusoidalnie zmiennie o wartości skutecznej $U = 500\text{ V}$ i częstotliwości $f = 20\text{ kHz}$. Przemieszczając płytkę laminatu z naciętym paskiem wzdłuż powierzchni stołu w kierunku poprzecznym do linii obserwowano wskazania miliwoltomierza proporcjonalne do wartości natężenia pola elektrycznego wzdłuż osi y . Otrzymane w trakcie pomiaru wyniki przedstawiono na rys. 3 i w tabeli 1.



Rys. 2



Rys. 3

Tabela 1

y mm	0	20	40	60	80	100	150	200	250	300
$E_{T0} \frac{V}{m}$	3571	3079	2178	1464	1003	714	357	210	137	96
$E_{po} \frac{V}{m}$	3580	3100	2190	1490	1030	730	400	294	159	118
$U_{So} \text{ mV}$	42,7	37,1	26,2	17,8	12,3	8,7	4,8	2,98	1,90	1,41

E_{T0} - teoretyczny rozkład natężenia pola elektrycznego obliczony ze wzoru:

$$E_{T0}(0,y) = \frac{2U \sqrt{H^2 - r^2}}{\text{Ar} \sin h \sqrt{\left(\frac{H}{r}\right)^2 - 1}} \cdot \frac{1}{y^2 + H^2 - r^2} \left[\frac{V}{m} \right]$$

gdzie:

$$U = 500 \text{ V}; \quad H = 50 \cdot 10^{-3} \text{ m}; \quad r = 0,375 \cdot 10^{-3} \text{ m}.$$

E_{po} - rozkład natężenia pola elektrycznego zmierzony pośrednio zgodnie ze wzorem (4) w oparciu o pomiar spadku napięcia na rezystorze R sondy paskowej

$$E_{po} = \frac{U_{so}}{\epsilon_0 S \omega R} \left[\frac{V}{m} \right]$$

gdzie:

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$$

$$\omega = 2\pi \cdot 20 \cdot 10^3 \text{ Hz}$$

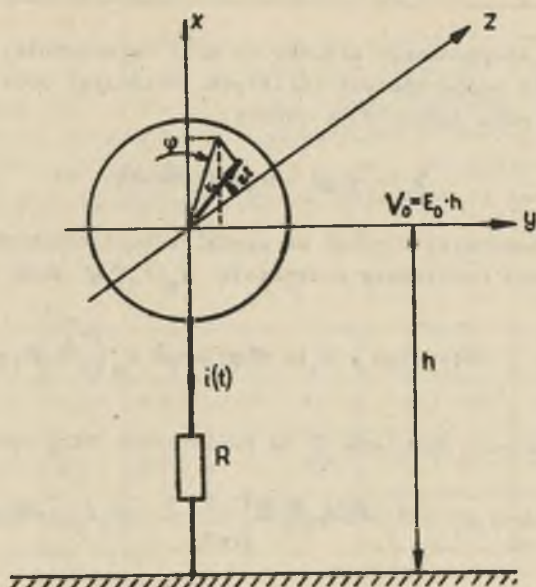
$$S = 990 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$R = 11,6 \cdot 10^3 \Omega$$

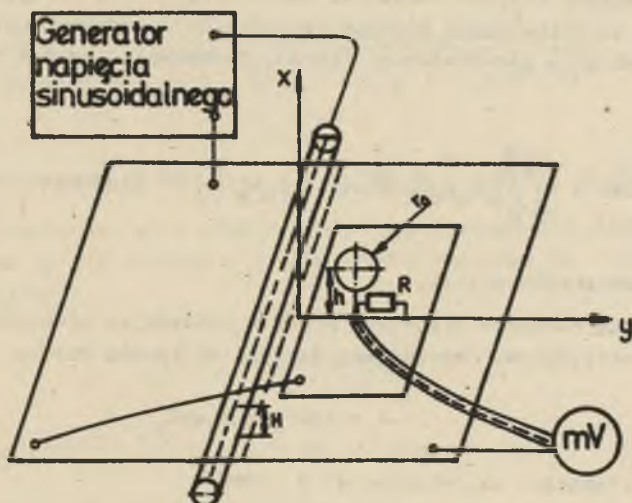
Uzyskana rozbieżność wyników otrzymanych na drodze obliczeń teoretycznych i pomiarów laboratoryjnych jest mała. Pozwala to na wykorzystywanie wzoru (4) przy projektowaniu sond do pomiaru natężenia pola elektrycznego na poziomie ziemi pod liniami wysokiego napięcia.

2.2. Sonda do pomiaru natężenia pola elektrycznego na poziomie 1,8 m nad powierzchnią ziemi na modelach powietrznych linii wysokiego napięcia

Do pomiaru natężenia pola elektrycznego na poziomie 1,8 m nad powierzchnią ziemi zaproponowano sondę składającą się z kuli jako aktywnej części sondy połączonej rezystorem R z powierzchnią modelującą ziemię (rys.4).



Rys. 4.



Rys. 5

Wybór kuli jako aktywnej części sondy wydaje się optymalny, gdyż kula nie posiada kierunku uprzywilejowanego. Proponowana sonda, jak należy przypuszczać, winna cechować się poprawnym działaniem dla różnych kątów wektora natężenia pola elektrycznego.

Obliczenia indukowanego ładunku na kuli najwygodniej jest przeprowadzić w układzie współrzędnych kulistych. Potencjał pola V_0 na poziomie środka kuli w polu jednorodnym wynosi:

$$V_0(r, \vartheta, \varphi) = E_0(r \sin \vartheta \cos \varphi + h) \quad (5)$$

Wypadkowy potencjał $V(r, \vartheta, \varphi)$ na zewnątrz kuli przewodzącej można obliczyć przy znanym rozkładzie potencjału $V_0(r, \vartheta, \varphi)$ pola ze wzoru Kelvina:

$$V(r, \vartheta, \varphi) = V_0(r, \vartheta, \varphi) - \frac{r_0}{r} V_0\left(\frac{r_0}{r}, \vartheta, \varphi\right) \quad (6)$$

Funkcja gęstości ładunków σ na powierzchni kuli wyraża się wzorem:

$$\sigma(r_0, \vartheta, \varphi) = \epsilon_0 E_r = \epsilon_0 \left. \frac{\partial V(r, \vartheta, \varphi)}{\partial r} \right|_{r=r_0} = -3E_0 \epsilon_0 \sin \vartheta \cos \varphi + E_0 \epsilon_0 \frac{h}{r_0} \quad (7)$$

E_r - funkcja natężenia pola elektrycznego na powierzchni kuli.

Ponieważ kula jest połączona rezystorem o dostatecznie małej rezystancji, to możemy przyjąć spadek na rezystorze R za pomijalnie mały (mV) w stosunku do istniejącej różnicy potencjałów w otoczeniu sondy wywołanej istnieniem pola elektrycznego (kV/m). Indukowany ładunek na kuli jest równy:

$$q = \int_S \sigma ds = - \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \left[3\epsilon_0 E_0 \sin \vartheta \cos \varphi + \epsilon_0 E_0 \frac{h}{r_0} \right] r_0^2 \sin \vartheta d\vartheta d\varphi = -4\pi r_0 \epsilon_0 h E_0 \quad (8)$$

gdzie:

S - powierzchnia kuli.

Stosując równanie ciągłości prądu i zakładając sinusoidalne pole elektryczne otrzymujemy następującą wartość skuteczną prądu:

$$I = 4\pi r_0 h \epsilon_0 \omega E_0 \quad (9)$$

i spadek napięcia na rezystorze R sondy:

$$U = I R = 4\pi r_0 \epsilon_0 h R \omega E_0, \quad (10)$$

gdzie:

$$E_0 = \frac{E_{0B}}{\sqrt{2}}$$

Dla doświadczalnego potwierdzenia otrzymanej zależności (10) przeprowadzono następujący eksperyment. W stanowisku pomiarowym opisanym w p.2.1

wymieniono płytkę laminatu z sondą paskową na płytkę z sondą kulową zawieszoną na wysokości $h = 36$ mm, co odpowiada wysokości 1,8 m dla skali geometrycznej modelu 1:50 (rys. 5). Linię jedнопроводową zawieszono na wysokości $H = 140$ mm. Między linię a płaszczyzną przewodzącą przyłożono napięcie $U = 500$ V o częstotliwości $f = 20$ kHz analogicznie jak w poprzednim doświadczeniu. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 6 i w tabeli 2.

Tabela 2

y mm	0	20	40	60	80	100	150	200	250	300
$E_{T36} \frac{V}{m}$	1156	1128	1052	947	769	724	501	952	255	191
$E_{p36} \frac{V}{m}$	1150	1090	1070	963	856	749	516	352	256	188
U_{Sh} mV	54,0	51,0	50,0	45,0	40,0	35,0	24,1	16,5	12,0	8,80

E_{t36} - teoretyczny rozkład natężenia pola elektrycznego pod linię jedнопроводową na poziomie $x=36$ mm obliczamy ze wzoru:

$$E_T(x,y) = \frac{2U \sqrt{H^2 - r^2}}{Ar \sin h \sqrt{\frac{H^2}{r^2} - 1}} \frac{1}{\sqrt{(H^2 - r^2 - x^2 - y^2)^2 + 4y^2(H^2 - r^2)}} \left[\frac{V}{m} \right] \quad (11)$$

gdzie: $U = 500$ V, $H = 140 \cdot 10^{-3}$ m, $r = 0,375 \cdot 10^{-3}$ m, $x = 36 \cdot 10^{-3}$ m

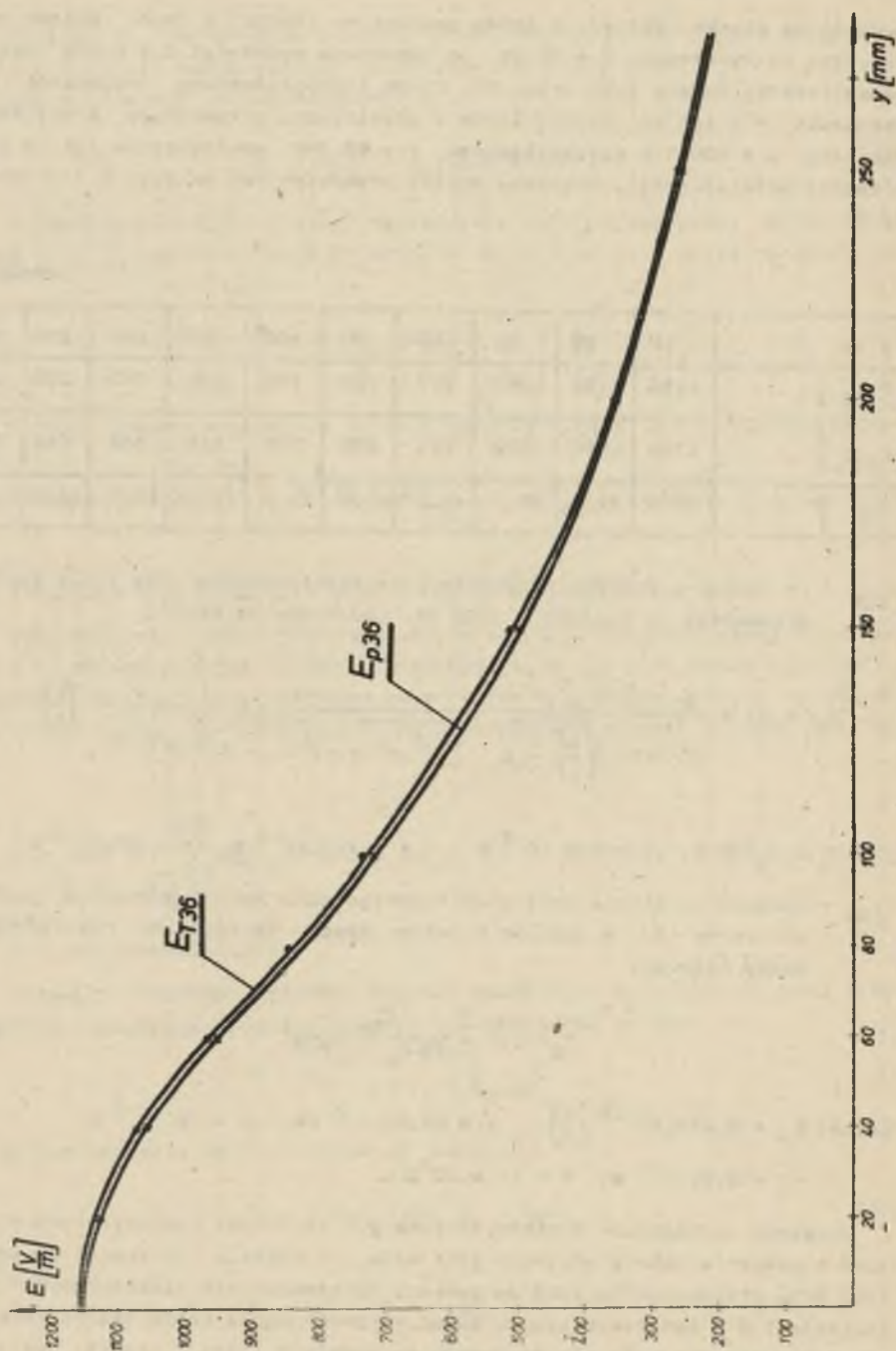
E_{p36} - rozkład natężenia pola elektrycznego zmierzony pośrednio zgodnie ze wzorem (10) w oparciu o pomiar spadku napięcia na rezystorze R sondy kulowej:

$$E_p(h,y) = \frac{U_{Sh}}{4\pi \epsilon_0 r_0 h R} \quad (12)$$

gdzie: $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \left[\frac{F}{m} \right]$; $\omega = 2\pi \cdot 20 \cdot 10^3$ Hz; $h = 36 \cdot 10^{-3}$ m;

$r_0 = 8,0 \cdot 10^{-3}$ m; $R = 11,6 \cdot 10^3 \Omega$.

Uzyskana rozbieżność wyników otrzymanych na drodze teoretycznych obliczeń i pomiarów laboratoryjnych jest mała, co pozwala korzystać ze wzoru (10) przy projektowaniu sond do pomiaru natężenia pola elektrycznego na poziomie 1,8 m nad powierzchnią ziemi. Przedstawiona sonda nadaje się do pomiaru natężenia pola elektrycznego na modelach linii i stacji, jak również na obiektach rzeczywistych.

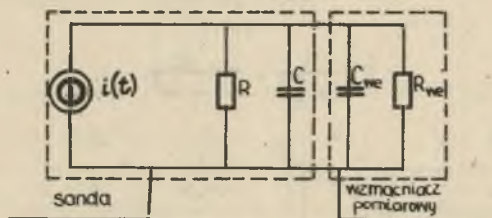


Rys. 6

3. Dobór parametrów sondy

Wyprowadzone w poprzednich punktach na drodze teoretycznej funkcje przetwarzania sond pomiarowych niezależnie od przeznaczenia (do pomiarów na modelach lub w terenie) charakteryzują się tym, że są wprost proporcjonalne do częstotliwości, rezystancji i natężenia pola elektrycznego, które istniało w danym punkcie pomiarowym przed włożeniem w jego otoczenie sondy pomiarowej. Liniowość funkcji przetwarzania występuje tylko w pewnych przedziałach zmian rezystancji i częstotliwości. Ze względu na istotne znaczenie funkcji przetwarzania w procesie pomiarowym przeprowadzono analizę wpływu tych parametrów na funkcję przetwarzania. Przeprowadzona analiza w poprzednich punktach bazowała na założeniu, że różnica potencjałów między aktywnymi powierzchniami sondy, połączonymi rezystorem, jest pomijalnie mała. Mając na uwadze współpracę sondy ze wzmacniaczem pomiarowym określono zakres dopuszczalnych zmian wartości rezystora sondy ze względu na narzucony zakres zmian częstotliwości natężenia pola elektrycznego. Ponadto uwzględniono pojemność, jaka występuje między przewodzącymi powierzchniami sondy i pojemność wejściową wzmacniacza pomiarowego.

Źródłem sygnału pomiarowego sondy jest siła prądomotoryczna, której wartość została określona równaniami (3), (9) zależnie od typu sondy. Odbiornikiem sygnału pomiarowego jest rezystor sondy. Pełni on rolę przetwornika prąd - spadek napięcia, pojemność własna sondy rozumiana jako pojemność elektryczna, występująca między aktywnymi powierzchniami przewodzącymi sondy, rezystancją wejściową wzmacniacza pomiarowego i pojemność wejściowa wzmacniacza pomiarowego. Na rys. 7 przedstawiono schemat zastępczy sondy współpracującej ze wzmacniaczem pomiarowym.



Rys. 7

$i(t)$ - siła prądomotoryczna (3), (9), R - rezystor sondy, C - pojemność własna sondy, R_{we} - rezystancja wejściowa wzmacniacza, C_{we} - pojemność wejściowa wzmacniacza

Wartość skuteczna spadku napięcia na rezystancji wypadkowej R_z , gdy i - pole elektryczne jest quasistatyczne o wymuszeniu sinusoidalnie zmiennym jest określona równaniem:

$$U = I Z_z = I R_z \frac{1}{1 + (\omega C_z R_z)^2} \quad (13)$$

gdzie:

$$R_z = \frac{R R_{we}}{R + R_{we}} \quad C_z = C + C_{we}$$

Ze wzorów (13), (3), (9) wynika, że liniowość funkcji przetwarzania sondy w dziedzinie częstotliwości jest zachowana, jeżeli $\omega C_z R_z \ll 1$, Ma to istotne znaczenie dla sond mierzących natężenie pola elektrycznego w szerokich zakresach zmian częstotliwości pola elektrycznego.

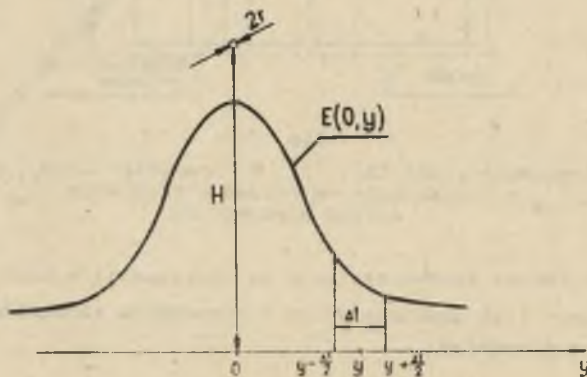
4. Oszacowanie błędu systematycznego sondy paskowej i kulowej ze względu na niejednorodność pola elektrycznego pochodzącego od linii jedнопrzewodowej

Błąd systematyczny pomiaru natężenia pola elektrycznego najłatwiej jest określić dla linii jedнопrzewodowej. Powstaje on na skutek niejednorodności pola elektrycznego i skończonych wymiarów sond pomiarowych. Ze względu na odmienną konstrukcję sond do pomiaru natężenia pola elektrycznego na poziomie 0 i 1,8 m analizę tych błędów przeprowadzono oddzielnie dla obydwu przypadków: w pierwszej kolejności rozpatrzono sondę paskową.

Biorąc pod uwagę rozkład natężenia pola elektrycznego na powierzchni ziemi pod linią jedнопrzewodową otrzymujemy:

$$E(0, y) = \frac{2U \sqrt{H^2 - r^2}}{Ar \operatorname{sinh} \sqrt{\left(\frac{H}{r}\right)^2 - 1}} \cdot \frac{1}{y^2 + H^2 - r^2}$$

$$\approx \frac{U}{\ln \frac{2H}{r}} \cdot \frac{2}{y^2 + H^2} \quad (14)$$



Rys. 8

ładunek indukujący się na jednostkę długości sondy o szerokości paska 1, którego położenie osi symetrii określa współrzędna y , wynosi:

$$q_1(y) = \epsilon_0 \int_{y - \frac{\Delta l}{2}}^{y + \frac{\Delta l}{2}} E(0, y) dy = \frac{2\epsilon_0 U}{\ln \frac{2H}{r}} \int_{y - \frac{\Delta l}{2}}^{y + \frac{\Delta l}{2}} \frac{dy}{y^2 + H^2} = \frac{2\epsilon_0 U}{H \ln \frac{2H}{r}} \left[\operatorname{arctg} \frac{y + \frac{\Delta l}{2}}{H} - \operatorname{arctg} \frac{y - \frac{\Delta l}{2}}{H} \right] \quad (15)$$

W procesie pomiarowym istotne jest czy funkcja rozkładu natężenia pola elektrycznego na powierzchni ziemi dana równaniem (14) i zapisana w postaci względnej $\frac{E(0, y)}{E(0, 0)}$ różni się od względnej funkcji przetwarzania $\frac{q_1(y)}{q_1(0)}$ określonej przy pomocy wzoru (15) dla danej szerokości paska Δl . Miarą względnego błędu systematycznego, którego źródłem jest niejednorodne pole elektryczne pochodzące od linii jedнопроводowej sondy paskowej jest różnica funkcji względnych $\frac{q_1(y)}{q_1(0)}$ i $\frac{E(0, y)}{E(0, 0)}$, odniesiona do względnej funkcji natężenia pola elektrycznego $\frac{E(0, y)}{E(0, 0)}$. Jego wartość procentowa wynosi:

$$\Delta\% = \frac{\frac{q_1(y)}{q_1(0)} - \frac{E(0, y)}{E(0, 0)}}{\frac{E(0, y)}{E(0, 0)}} \cdot 100\% \quad (16)$$

Ze względu na znaczne trudności w rozwikłaniu funkcji (16) obliczono wartość $\Delta\%$ dla najbardziej niekorzystnego przypadku, tj. dla $y = 0,8 H$ (funkcja $E(0, y)$ wykazuje największą stromość) i względnej szerokości paska sondy Δl odniesionej do wysokości zawieszenia przewodu H .

Wyniki przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3

$\frac{\Delta l}{H}$	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4
$\Delta\%$	0,006	0,028	0,112	0,466	1,766

Z przeprowadzonych rozwiązań wynika następujący wniosek. Dla przeciętnego zawieszenia przewodu linii 400 kV rzędu 11 m i szerokości sondy paskowej 0,55 m (co odpowiada na modelu 11 mm) błąd systematyczny wynikający z niejednorodności pola elektrycznego pod linią jedнопроводową nie przekracza 0,028%.

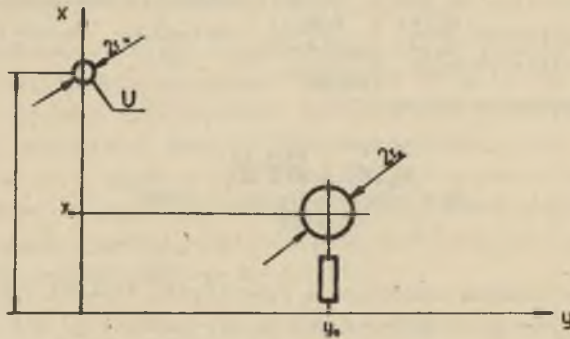
Następnie obliczono błąd systematyczny dla sondy kulowej zawieszanej nad powierzchnią ziemi na wysokości 1,8 m, której potencjał jest równy potencjałowi ziemi, a zanurzonej w polu elektrycznym linii jedнопроводowej.

ładunek jaki indukuje się w tym przypadku na powierzchni kuli obliczono stosując wzór (6)

$$q = \int_S \sigma ds = - \int_S \epsilon_0 \frac{\partial V}{\partial r} ds = \epsilon_0 \int \left[\frac{2 \partial V_0 \left(\frac{r_0^2}{r}, \vartheta, \varphi \right)}{\partial r} \Big|_{r=r_0} + \frac{V_0(r, \vartheta, \varphi)}{r_0} \right] ds \quad (17)$$

gdzie:
$$V(r, \vartheta, \varphi) = V_0(r, \vartheta, \varphi) - \frac{r_0}{r} V_0\left(\frac{r_0}{r}, \vartheta, \varphi\right)$$

$V_0(r, \vartheta, \varphi)$ - potencjał jaki by istniał w otoczeniu środka kuli przed włożeniem kuli przewodzącej o środku (x_0, y_0) , określony we współrzędnych biegunowych.



Rys. 9

Po rozwinięciu funkcji $V_0(x, y)$ w szereg Taylora w otoczeniu punktu (x_0, y_0) z dokładnością do dwóch wyrazów i scałkowaniu otrzymujemy wyrażenie na ładunek indukowany w postaci:

$$q = 4\pi\epsilon_0 V_0 r_0^2(x_0, y_0) + \frac{5\pi}{8}\epsilon_0 r_0^2 \left[\frac{\partial^2 V_0}{\partial x^2} \Big|_{x=x_0, y=y_0} + \frac{\partial^2 V_0}{\partial y^2} \Big|_{x=x_0, y=y_0} \right] \quad (18)$$

Ponieważ funkcja $V_0(x_0, y_0)$ spełnia równanie Laplace'a, wzór (18) przyjmuje ostatecznie postać:

$$q = 4\pi\epsilon_0 r_0 V_0(x_0, y_0) \quad (20)$$

Miarę względnego błędu systematycznego sondy kulowej mierzącej rozkład natężenia pola elektrycznego na poziomie x_0 , pochodzącego od linii jedno-przewodowej, jest różnica względnego potencjału pola elektrycznego zapi-

sana w postaci $\frac{V(x_0, y)}{V(x_0, 0)} = \frac{q(x_0, y)}{q(x_0, 0)}$ i względnego natężenia pola elektrycznego, zapisanego w postaci: $\frac{E(x_0, y)}{E(x_0, 0)}$, odniesiona do względnego natężenia pola elektrycznego.

Procentową wartość błędu systematycznego można określić następująco:

$$\Delta\% = \frac{\frac{V(x_0, y)}{V(x_0, 0)} - \frac{E(x_0, y)}{E(x_0, 0)}}{\frac{E(x_0, y)}{E(x_0, 0)}} \cdot 100\% \quad (21)$$

Wartość natężenia pola elektrycznego pod linią jedнопроводową na poziomie x_0 jest określona wzorem:

$$E(x_0, y) = \frac{2U}{\ln \frac{2H}{r}} \frac{1}{\sqrt{(H^2 - x_0^2 - y^2) + 4y^2 H^2}} \left[\frac{V}{m} \right] \quad (22)$$

Natomiast wartość potencjału pola elektrycznego pod linią jedнопроводową na poziomie x_0 określa wzór:

$$V_0(x_0, y) = \frac{U}{2 \ln \frac{2H}{r}} \ln \frac{(x_0 + H)^2 + y^2}{(x_0 - H)^2 - y^2} \quad (23)$$

Ze względu na znaczne trudności w rozwikłaniu funkcji (21) obliczono procentową wartość błędu systematycznego $\Delta\%$ dla linii jedнопроводowej zawieszanej na wysokości $H = 10$ m i $x_0 = 1,8$ m w funkcji odległości od rzutu przewodu y . Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4

y m	0	0,5	1	2	3	5	8	10	18
$\Delta\%$	0,000	0,016	0,045	0,166	0,331	0,643	0,837	0,812	0,477

Z przeprowadzonych rozważań wynikają następujące wnioski:

- błąd systematyczny nie jest funkcją promienia kuli sondy.
- wartość błędu systematycznego osiąga maksimum dla $y = 0,8 H$ i dla wysokości zawieszenie linii jedнопроводowej $H = 10$ m nie przekracza 0,85%.

5. Realizacja układu do pomiaru natężenia pola elektrycznego na modelach fizycznych

Biorąc za punkt wyjścia dotychczasowe rozważania dotyczące sond i układów pomiarowych zaprojektowano i zrealizowano układ do automatycznego pomiaru natężenia pola elektrycznego na modelach fizycznych linii i stacji najwyższych napięć, spełniający następujące wymagania:

- natężenie pola elektrycznego ma być mierzone na poziomie 0 i 1,8 m pod liniami elektroenergetycznymi, natomiast w rejonie stacji na poziomie 1,8 m,
- pomiar natężenia pola elektrycznego w otoczeniu linii elektroenergetycznych winien być sprzęgnięty z pomiarem odległości punktu pomiarowego względem osi symetrii linii,
- układ pomiarowy winien dokonywać wszelkich przeliczeń wielkości mierzonych tak, by na wyjściach cyfrowym i analogowym otrzymywane wyniki były podawane wprost w wielkościach rzeczywistych, tj. takich, które by wystąpiły na obiekcie rzeczywistym,
- przeliczenia winny być prawidłowe dla następujących współczynników skali: skala odwzorowań geometrycznych 1:50, skala napięć 1:1000, skala częstotliwości 400:1 i 800:1,
- rejestracja wyników pomiarów powinna być dwutorowa, przy czym rejestracja cyfrowa ma być zrozumiała dla translatora maszyny cyfrowej, natomiast sygnały analogowe mają sterować bezpośrednio rejestratorem X, Y,
- zakres pomiaru natężenia pola elektrycznego dla częstotliwości $f_1 = 20$ kHz powinien wynosić od 0 do 4 kV/m na pierwszym zakresie, od 0 do 40 kV/m na drugim zakresie, analogicznie dla częstotliwości $f_2 = 40$ kHz od 0 do 2 kV/m na pierwszym zakresie, od 0 do 20 kV/m na drugim zakresie,
- wybór zakresu pomiarowego powinien być automatyczny, zależny od wartości sygnału pomiarowego.

Uwzględniając powyższe założenia opracowano schemat blokowy urządzenia, którego strukturę przedstawiono na rysunku 10. Pomiar natężenia pola elektrycznego zrealizowano konstruując trzy sondy:

- sondę kubkową 7 do pomiaru natężenia pola elektrycznego na poziomie 1,8 m w rejonie stacji rozdzielczych napięcia,
- sondę kulową 3 do pomiaru natężenia pola elektrycznego na poziomie 1,8 m pod liniami przesyłowymi,
- sondę paskową 1 do pomiaru natężenia pola elektrycznego na poziomie 0 pod liniami przesyłowymi.

Ostatnie dwie sondy zostały zamontowane na ruchomym wózku wraz zewzmacniaczami pomiarowymi 2 i 4. Wózek ten połączony jest z urządzeniem pomiarowym kablem przesyłowym 6 oraz mechanicznie poprzez linki z układem napędowym 35, którego zadaniem jest przemieszczanie sond pomiarowych równoległe do płaszczyzny przewodzącej, modelującej ziemię w kierunku poprzecznym do osi symetrii linii.

Położenie sond pomiarowych lokalizowane jest przez układ do pomiaru odległości 19, z którego sygnał podawany jest do wzmacniacza separującego 21 poprzez kabel przesyłowy 20.

Wstępnie wzmocniony sygnał z sond pomiarowych 1, 2 i 7 steruje wielorezonansowym wzmacniaczem pomiarowym 9, którego pasmo przepuszczania zadawane jest z układu pomiaru częstotliwości 17. Dalsze wzmocnienie sygnału pomiarowego następuje w sterowanym wzmacniaczu 10, którego wzmocnienie uzależnione jest od wartości sygnału pomiarowego poprzez blok sterowania zakresami pomiarowymi 11. Po detekcji i odfiltrowaniu (12) sygnał pomiarowy steruje iteracyjnym przetwornikiem analogowo-cyfrowym 13. Impulsy proporcjonalne do wartości mierzonej zliczane są w zespole liczników dziesiętnych 14, a ich wartość wyświetlana jest na wyświetlaczu wyników 15 i równocześnie podawana jest do bloku komutacji sygnałów cyfrowych 27.

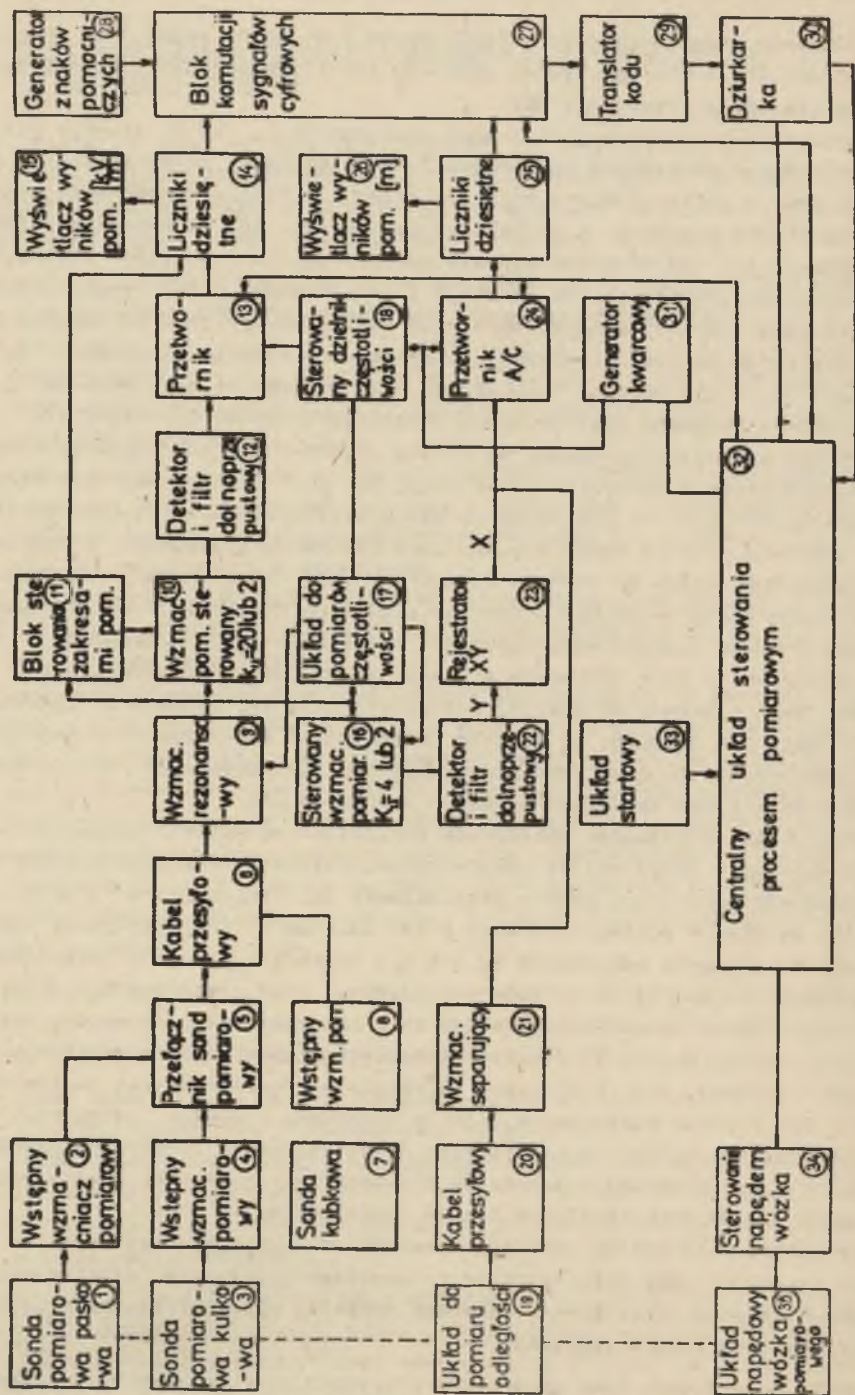
Impulsy taktujące, podawane na bramkę przetwornika analogowo-cyfrowego 13, są pobierane z generatora kwarcowego 31, stanowiącego wzorcowe źródło częstotliwości poprzez sterowany dzielnik częstotliwości 18, którego stopniem podziału steruje układ pomiaru częstotliwości 17 sygnału pomiarowego. Wspomniany układ do pomiaru częstotliwości 17 steruje wzmocnieniem wzmacniacza pomiarowego 16, z którego sygnał po detekcji i odfiltrowaniu 22 bezpośrednio steruje wzmacniaczem Y rejestratora XY. Wzmacniacz X rejestratora XY 22 jest sterowany sygnałem ze wzmacniacza separującego 21 pochodzącego z układu do pomiaru odległości sond 19. Sygnał ze wzmacniacza 21 jest też podawany na wejście przetwornika analogowo-cyfrowego 24 i po przetworzeniu na ciąg impulsów do zespołu liczników 25, wyświetlaczy wyników 26 i bloku komutacji sygnałów cyfrowych 27.

Ze względu na założoną współpracę urządzenia do pomiaru natężenia pola elektrycznego z urządzeniami peryferyjnymi maszyn cyfrowych, konieczne jest wprowadzenie generatora znaków pomocniczych 28 i translatora kodu 29 dla wydruku wyników w postaci cyfrowej przez dziurkarkę 30. Centralny układ sterowania procesem pomiarowym 32 steruje organizacją pracy poszczególnych zespołów, wydrukiem wyników i położeniem sond pomiarowych. Poprzez stosowanie wyżej wymienionego układu 32 proces pomiarowy sprowadza się do podania sygnału startu 33 dla automatycznego układu pomiaru natężenia pola elektrycznego, a po 6 minutach na taśmie perforowanej jest zarejestrowanych 220 punktów pomiarowych (pomiar natężenia i pomiar odległości) i jest wykreślony wykres natężenia pola elektrycznego w funkcji odległości.

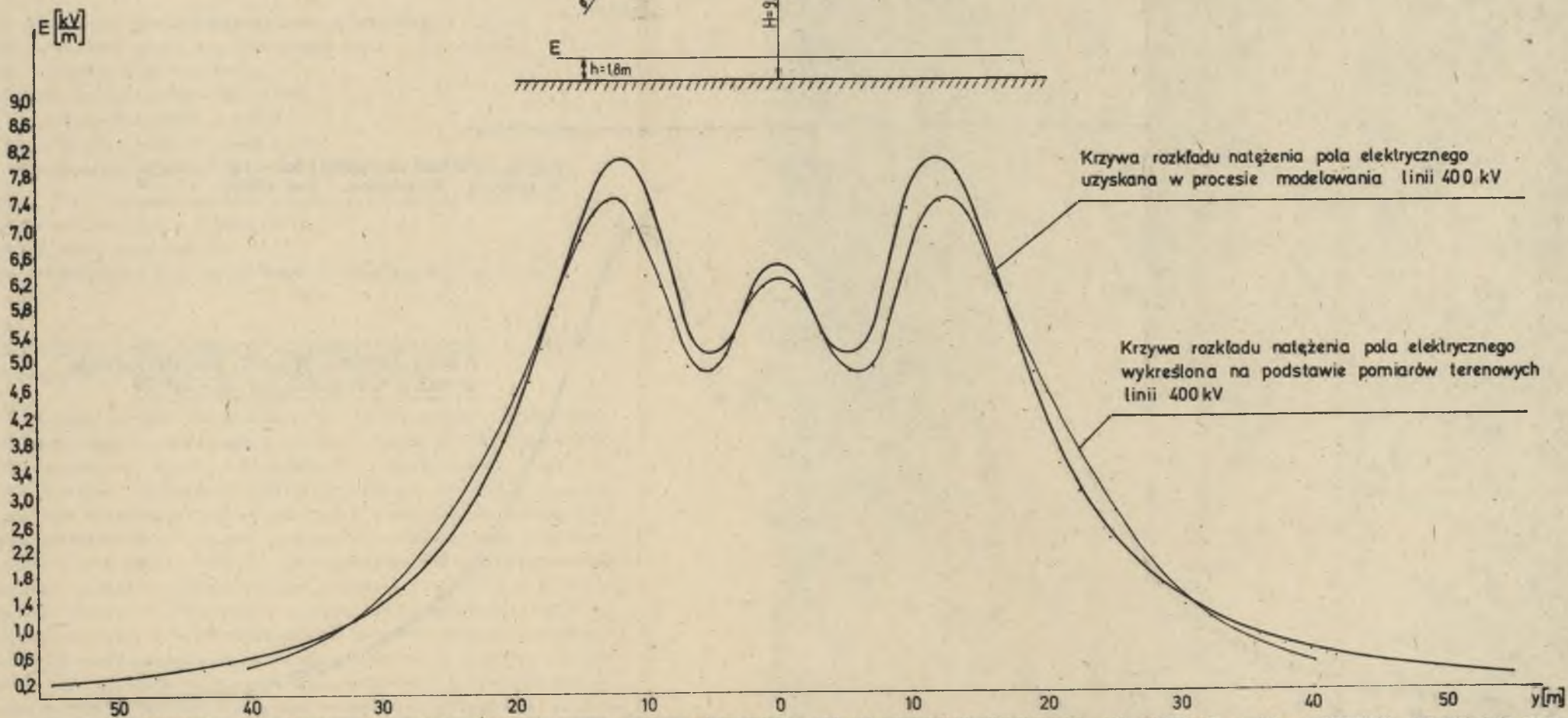
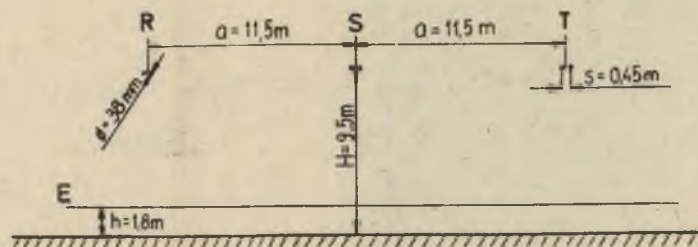
Bazując na opracowanym schemacie blokowym zaprojektowano szczegółowe schematy ideowe poszczególnych bloków funkcjonalnych.

Na zakończenie bardzo ogólnego opisu automatycznego urządzenia do pomiaru natężenia pola elektrycznego na modelach fizycznych elektroenergetycznych układów przesyłowych, zwanego AMPE-76, podano uzyskane parametry techniczne tego urządzenia:

- a) część generacyjna (dwa generatory pracujące synchronicznie) - częstotliwość napięć trójfazowych 20 i 40 kHz $\pm 10^{-5}$.



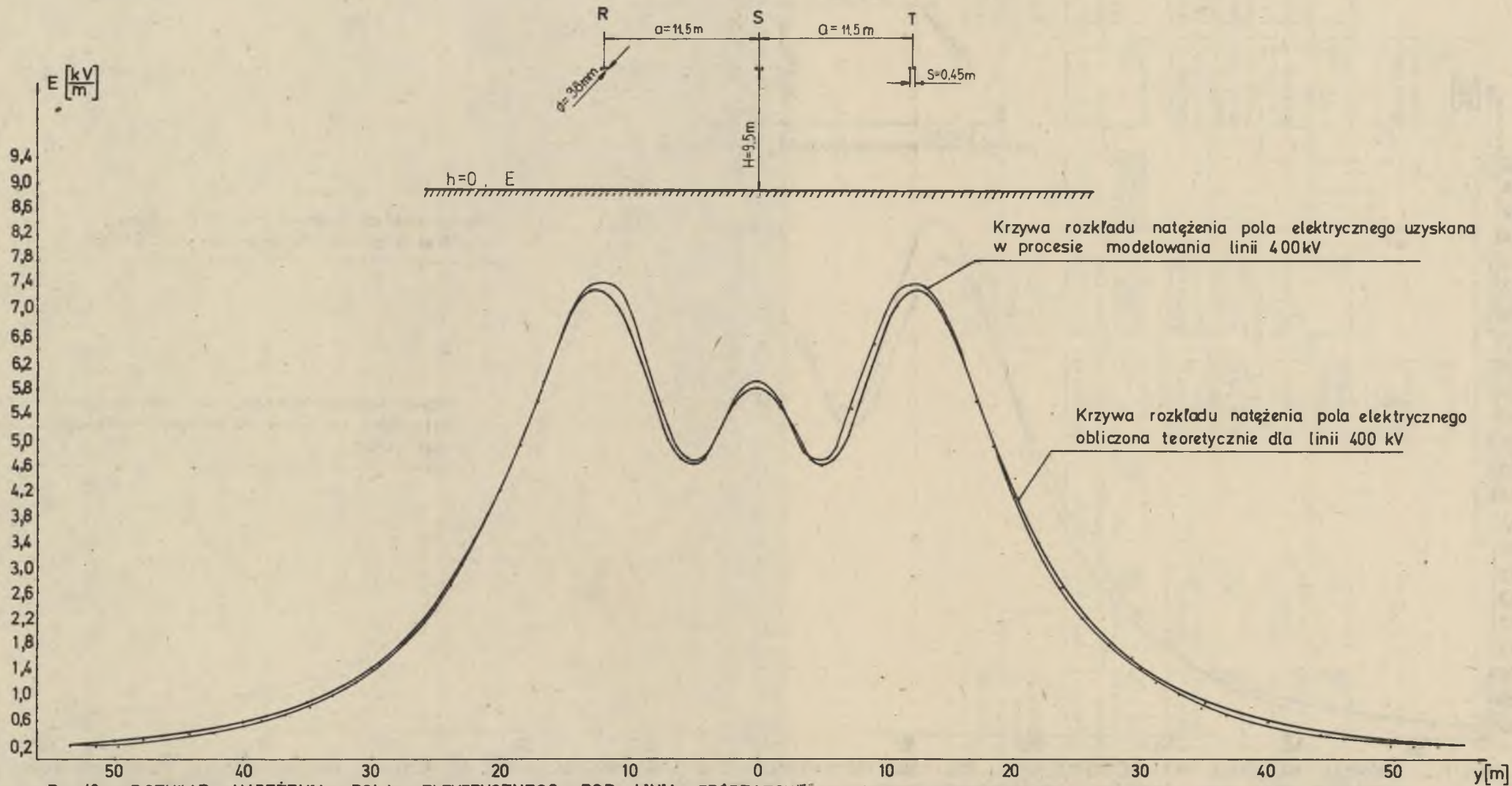
Rys. 10. Schemat blokowy układu do pomiaru natężenia pola elektrycznego na modelach fizycznych linii i stacji wysokiego napięcia



Krzywa rozkładu natężenia pola elektrycznego
uzyskana w procesie modelowania linii 400 kV

Krzywa rozkładu natężenia pola elektrycznego
wykreślona na podstawie pomiarów terenowych
linii 400 kV

Rys. 11 ROZKŁAD NATĘŻENIA POLA ELEKTRYCZNEGO POD LINIĄ TRÓJFAZOWĄ 400 kV MIKULÓWA-JOACHIMÓW NA POZIOMIE $h=1,8\text{ m}$, PRZESŁO NR 586 WE WSI SKRONSKO (DANE LINII I POMIARY DOSWIADCZALNE ZACZERPNIĘTO Z OPRACOWANIA: M.GROSZKO „BADANIE POLA ELEKTRYCZNEGO NA LINIACH I STACJACH ENERGETYCZNYCH DLA OKREŚLENIA STOPNIA ZAGROŻENIA I WARUNKÓW BEZPIECZENSTWA OBSŁUGI” ENERGOPOMIAR 1972 NR EWID. 614/1



Rys. 12. ROZKŁAD NATEŻENIA POLA ELEKTRYCZNEGO POD LINIĄ TRÓJFAZOWĄ 400 kV MIKUŁOWA - JOACHIMOW NA POZIOMIE $h = 0$ m, PRZESŁO NR 586 WE WSI SKRONSKO (DANE LINII ZACZERPNIĘTO Z OPRACOWANIA: M. GROSZKO „BADANIE POLA ELEKTRYCZNEGO NA LINIACH I STACJACH ENERGETYCZNYCH DLA OKREŚLENIA STOPNIA ZAGROŻENIA I WARUNKÓW BEZPIECZENSTWA PRACY I OBSŁUGI” ENERGOPOMIAR 1972r. NR EWID. 614/1)

- amplituda napięć trójfazowych regulowana niezależnie w przedziale od 0 do 600 V (napięcie fazowe),
- przesunięcia $120^{\circ} \pm 1^{\circ}$ el z możliwością inwersji drugiego generatora względem pierwszego,

b) część pomiarowa

- pomiar napięć fazowych od 0 do 600 V z błędem maksymalnym $0 \div 100 \text{ V} \pm 2\%$, $100 \div 600 \text{ V} \pm 1\%$,
- pomiar prądów fazowych $0 \div 200 \text{ mA} \pm 3\%$,
- pomiar natężenia pola elektrycznego na poziomie 0 i 1,8 m z błędem $\pm 1,5\%$,
- czas trwania cyklu pomiarowego łącznie z wydrukiem - 1,6 sek,
- prędkość przemieszczania się sond pomiarowych - 1,6 cm/sek,
- założone współczynniki skalowe:
 - skala geometrycznych odwzorowań 1:50,
 - skala częstotliwości 400:1 i 800:1,
 - skala natężeń pola elektrycznego 1:20,
 - skala sygnałów pomiaru natężenia pola elektrycznego 20:1 i 40:1,

c) zasilanie

- napięcie zasilania 220 V $\pm 15\%$, 50 Hz,
- maksymalny pobór mocy 600 VA,
- aktywne zabezpieczenie przeciążeniowe z sygnalizacją optyczną.

6. Porównanie wyników badań modelowych, pomiarów terenowych i obliczeń teoretycznych dla linii 400 kV Mikułowa - Joachimów

Pomiary w terenie wartości natężenia pola elektrycznego pochodzącego od linii 400 kV Mikułowa - Joachimów w rejonie prześła nr 586 przeprowadził ZPBE "Energopomiar". Wyniki tych pomiarów zostały opublikowane w opracowaniu M. Groszko: "Badania pola elektrycznego na liniach i stacjach energetycznych dla określenia stopnia zagrożenia i warunków bezpieczeństwa obsługi", Energopomiar 1972 r. Mając powyższe dane zamodelowano trójfazową linię 400 kV i przy użyciu AMPE 76 przeprowadzono pomiary natężenia pola elektrycznego w funkcji odległości pod linię na poziomie 1,8 m. Wyniki przedstawiono na rys. 11. Z porównania tych rozkładów wynika, że rozbieżność uzyskanych wyników w obszarze dużych natężeń pola elektrycznego nie przekracza 7% w odniesieniu do wartości zmierzonej w terenie. Tak duża rozbieżność jest spowodowana tym, że przy pomiarach w terenie pomiar wysokości zawieszenia przewodów oraz pomiar wzajemnych odległości był trudny do przeprowadzenia i został wykonany z małą dokładnością.

Mając do dyspozycji wyniki obliczeń teoretycznych natężenia pola elektrycznego w funkcji odległości na poziomie ziemi dla tego samego prześła linii 400 kV (M. Groszko "Prace badawcze, Energopomiar 1977" - materiały nie publikowane) oraz model tego prześła dokonano pomiaru funkcji rozkła-

du natężenia pola elektrycznego na poziomie ziemi. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 12.

Z porównania tych rozkładów wynika, że rozbieżność uzyskanych wyników w obszarze dużych natężeń pola elektrycznego nie przekracza 1,35% w odniesieniu do wartości obliczonej teoretycznie.

Przeprowadzona analiza porównawcza wykazała, że opracowane sondy i zbudowane urządzenie AMPE 76 do modelowania i pomiaru rozkładu natężenia pola elektrycznego na poziomie 0 i 1,8 m nadaje się do prowadzenia prac naukowo-badawczych, których zadaniem sprowadza się do określenia rozkładów natężeń pola elektrycznego w obszarze elektroenergetycznych układów przesyłowych.

Wnioski

1. Opracowane w niniejszej pracy techniki pomiarowe, a w szczególności do pomiaru natężenia pola elektrycznego na fizycznych modelach elektroenergetycznych układów przesyłowych, pozwalają na poszukiwanie optymalnych struktur tych układów. Można bowiem zdejmować rozkład natężenia pola elektrycznego z niedokładnością 1,5% w odniesieniu do obliczeń teoretycznych.
2. Opracowane koncepcje sond pomiarowych natężenia pola elektrycznego quasistatycznego pozwalają na sformułowanie następujących wniosków o charakterze ogólnym:
 - a) sygnał pomiarowy sondy jest proporcjonalny do wartości natężenia pola elektrycznego panującego w bezpośrednim otoczeniu sondy oraz do wartości rezystora sondy i do częstotliwości pola elektrycznego,
 - b) dla sondy obciążonej pojemnościowo sygnał pomiarowy jest proporcjonalny do wartości natężenia pola elektrycznego, odwrotnie proporcjonalny - do pojemności obciążenia i nie jest funkcją częstotliwości,
 - c) stałość funkcji przetwarzania sond pomiarowych w dziedzinie częstotliwości jest zachowana o ile $\omega^2 R^2 C^2 \ll 1$.
3. Praca niniejsza zawiera szczegółowe opracowanie sond do pomiaru natężenia pola elektrycznego na modelach fizycznych, zastosowanych w urządzeniu AMPE 76.

Do pomiaru natężenia pola elektrycznego na poziomie ziemi najkorzystniejsza jest sonda paskowa, a do pomiaru na poziomie 1,8 m nad ziemię sonda kulowa. Szczegółowa analiza teoretyczna tych sond wykazała, że odwzorowują one przebiegi natężenia pola elektrycznego z dostateczną dokładnością. Z analizy tej wynikają następujące wnioski:

- a) jeżeli sonda kulowa jest dostatecznie odległa od powierzchni modelującej ziemię, to jej błąd systematyczny wynikający z niejednorodności pola elektrycznego pochodzącego od linii jedнопроводowej nie zależy od promienia kuli sondy,

- b) funkcja przetwarzania sondy kulowej jest wprost proporcjonalna do promienia kuli oraz do wartości potencjału, który istniał w punkcie będącym jej środkiem przed włożeniem sondy kulowej,
 - c) błąd systematyczny sondy kulowej realizującej pomiar natężenia pola elektrycznego na wysokości 1,8 m pod linią jedнопrzewodową zawieszoną na wysokości $H = 10$ m nie przekracza 0,85% w odniesieniu do wartości natężenia pola elektrycznego, obliczonego teoretycznie,
 - d) błąd systematyczny sondy paskowej realizującej pomiar natężenia pola elektrycznego na poziomie ziemi pod linią jedнопrzewodową, o stosunku szerokości paska do wysokości zawieszenia przewodu równym 0,1, nie przekracza 0,12% w odniesieniu do wartości natężenia pola elektrycznego obliczonego teoretycznie,
 - e) pod linią jedнопrzewodową największy błąd systematyczny wynikający z niejednorodności pola elektrycznego występuje dla obydwu sond w odległości $y = (0,8 \pm 1)H$ licząc od rzutu przewodu w kierunku prostopadłym do osi przewodu.
4. Z porównania wyników otrzymanych w procesie modelowania, pomiarów terenowych i obliczeń teoretycznych dla trójfazowej linii 400 kV z przewodami wiązkowymi uzyskano następujące rozbieżności:
- 7% dla pomiarów modelowych odniesionych do pomiarów terenowych,
 - 1,3% dla pomiarów modelowych odniesionych do obliczeń teoretycznych.
5. Podczas realizacji prototypowego urządzenia AMPE 76 nasunęły się następujące wnioski o charakterze konstrukcyjnym:
- a) najkorzystniejszym układem wstępnego wzmacniacza współpracującego z sondą pomiarową jest wzmacniacz operacyjny z wejściem nieinwersejnym, połączonym z sondą,
 - b) ze względu na zapewnienie zadanej niedokładności pomiaru techniką cyfrową, kompleksową automatyzację procesu pomiarowego i prostotę obsługi należy stosować przetworniki analogowo-cyfrowe iteracyjne z automatyczną kompensacją zera,
 - c) zastosowanie rozbudowanego systemu automatyzacji procesu pomiarowego jest konieczne ze względu na dużą ilość punktów pomiarowych niezbędnych do określenia rozkładu natężenia pola elektrycznego, gdyż brak takiego systemu zwielokrotniłby pracochłonność przy ręcznym prowadzeniu procesu pomiarowego.

LITERATURA

- [1] Miller J.: The Measurement of Electric Fields in Live Line Working IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, kwiecień 1967.
- [2] Barnes H.C., McElroy A.J., Charkow J.H.: Rational Analysis of Electric Fields in Live Line Working. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, kwiecień 1968.

- [3] Schneider K., Studinger J., Weck K., Steinbigler H., Utwisch D., Wiesinger K.: Displacement currents to the human body caused by the dielectric fields under overhead lines CIGRE, Paris 1974.
- [4] Bocker H., Wilhelmy L.: Messung der elektrischen Feldstärke bei hohen transienten und periodisch zeitabhängigen Spannungen. Messung der elektrischen Feldstärke, EZT-A, sierpień 1970.
- [5] Wilhelmy L.: Eine Sonde zur potentialfreien Messung der periodischen und transienten elektrischen Feldstärke. Messung der elektrischen Feldstärke, ETZ-A., sierpień 1974.
- [6] Report on results of electric fields measurements made by members and guests of CIGRE Working Group 36-01, Arnhem April 1976.

ЗОНДЫ И СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА МОДЕЛЯХ НАВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ
ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Р е з ю м е

В статье определяется функция трансформации зонда для измерения напряжения электрического поля на уровне земли и 1,8 м над землей. Измерения проводились на физических моделях линий очень высоких напряжений. В результате опытов построено автоматическое устройство для измерения напряжения электрического поля. Это устройство внедрено в ZPBE (Научно-измерительное учреждение "Энергоизмерение") в городе Гливице.

THE SOUNDS AND MEASURING SETS FOR ELECTRIC FIELD MEASUREMENTS
IN THE MODELS OF HIGH VOLTAGE LINES

S u m m a r y

The transfer functions of the meter of the electric field strength on the ground level and at the height of 1,8 m above the ground with the use of physical models of high voltage lines were measured. The automatic set for measuring electric field strength was constructed and used in ZPBE EnergoPomiar in Gliwice.

Przyjęto do druku w czerwcu 1978 r.

