

Stefan WIECZOREK

POMIAR INDYWIDUALNEJ DAWKI EKSPOZYCJI
POLA ELEKTRYCZNEGO QUASISTATYCZNEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono sposób pomiaru oraz urządzenie służące do pomiaru stopnia zagrożenia człowieka od strony quasistatycznego pola elektrycznego o dużym natężeniu. Szczególną uwagę zwrócono na dobór rezystancji sondy, z której zbierany jest sygnał pomiarowy.

1. Wstęp

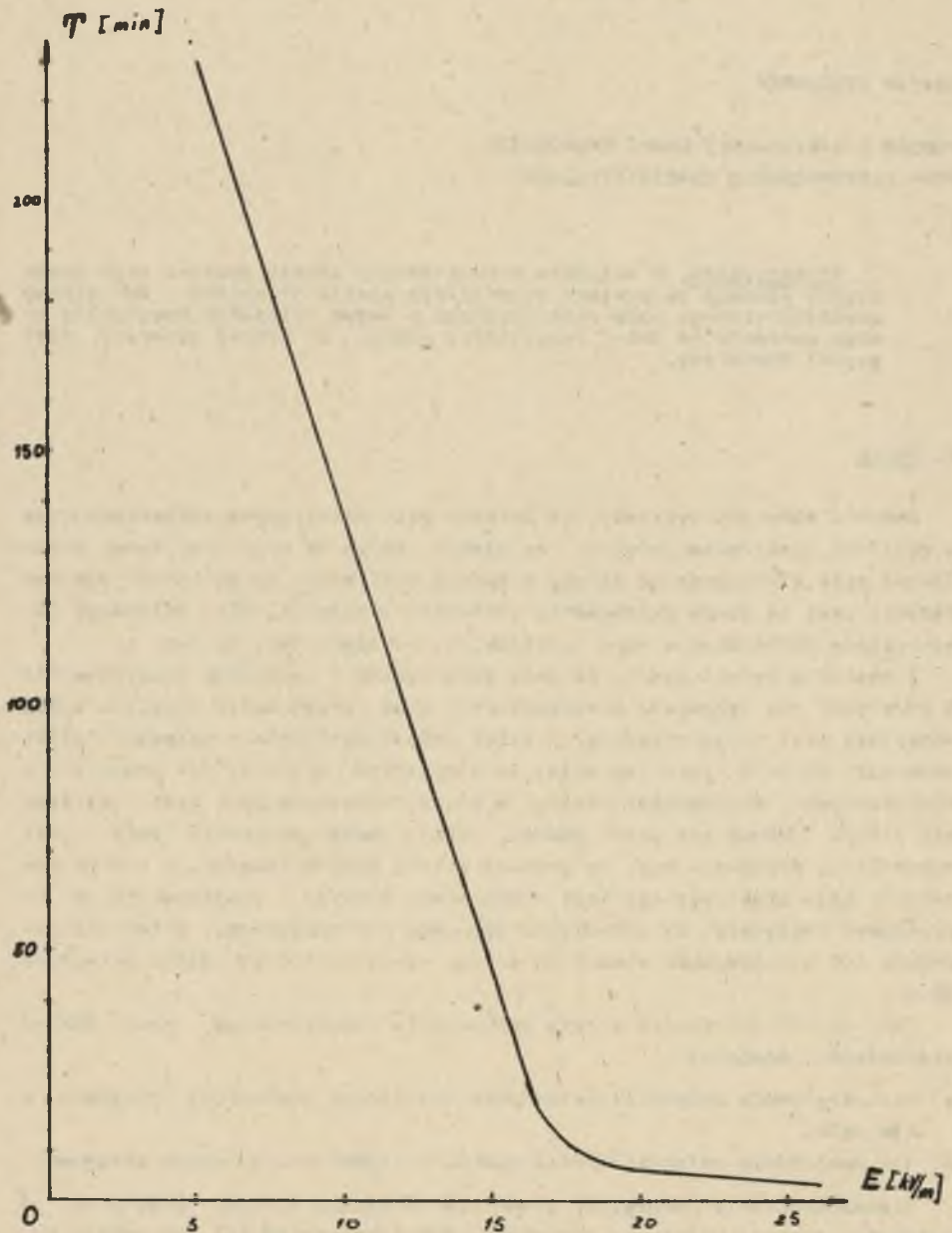
Badania medyczne wykazały, że zmienne pole elektryczne, wytwarzane przez urządzenia elektroenergetyczne, ma ujemny wpływ na organizmy żywe. Szkodliwość pola elektrycznego zależy w sposób nieliniowy od wartości jego natężenia oraz od czasu przebywania człowieka w polu [1, 2]. Zależność ta, wykreślona na podstawie norm radzieckich, pokazana jest na rys. 1.

Z charakterystyki widać, że pole elektryczne o natężeniu mniejszym niż 5 kV/m jest dla człowieka nieszkodliwe i czas przebywania w polu o takim natężeniu jest nieograniczony. Z kolei szkodliwość pola o natężeniu większym niż 25 kV/m jest tak duża, że w zasadzie człowiek nie powinien w nim przebywać. Wyznaczanie strefy, w której natężenie pola jest większe niż 5 kV/m, odbywa się przez pomiar. Jeżeli pomiar natężenia pola jest niemożliwy, przyjmuje się, że granica strefy wpływu (obszar, w którym natężenie pola elektrycznego jest większe niż 5 kV/m), znajduje się w określonej odległości od urządzenia będącego pod napięciem. I tak dla napięcia 500 kV odległość wynosi 20 m, dla napięcia 750 kV odległość wynosi 30 m.

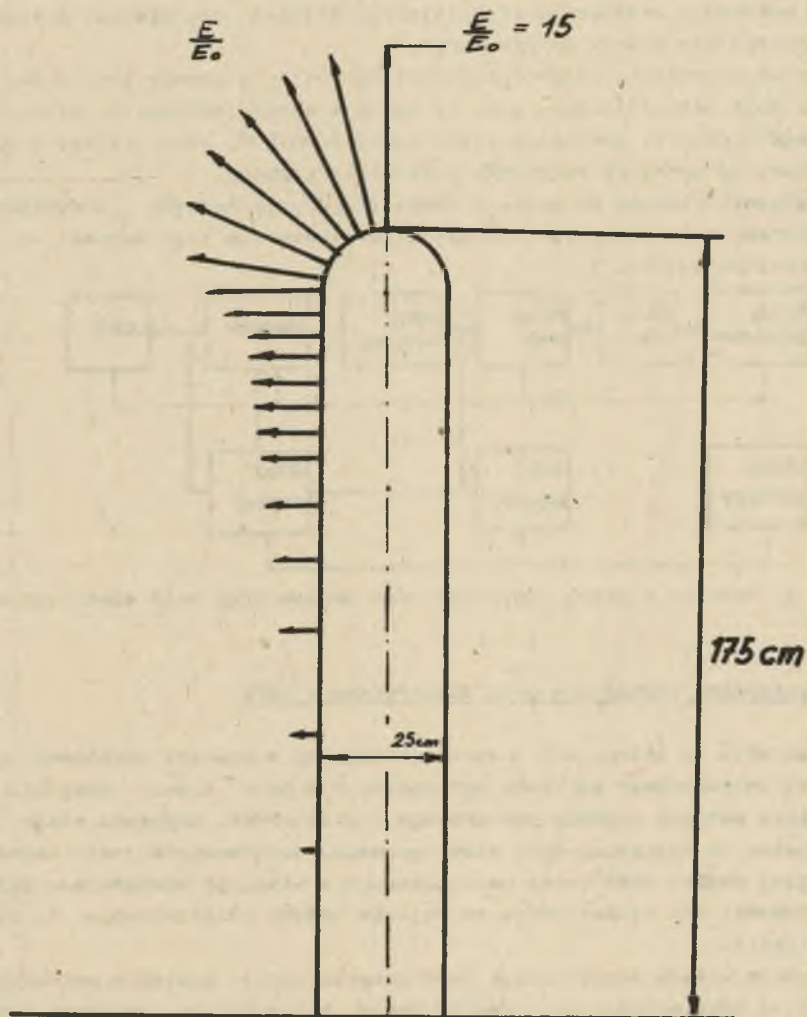
Taki sposób określania strefy wpływu pola elektrycznego jest bardzo niedokładny, ponieważ:

- a) nie uwzględnia zniekształcenia pola wywołanego obecnością człowieka w tym polu,
- b) nie uwzględnia zniekształcenia wywołanego obecnością innych urządzeń.

Nieuwzględnienie powyższych czynników wprowadza znaczny błąd przy określaniu stopnia narażenia człowieka. Wykazano bowiem [2], że jeżeli cylinder metalowy o wymiarach podanych na rys. 2 umieścimy w jednorodnym polu elektrycznym, to spowoduje on znaczne zniekształcenie tego pola. Jeżeli przyjąć, że cylinder taki przy odpowiednich założeniach jest mode-



Rys. 1. Zależność dopuszczalnego czasu przebywania człowieka w polu elektrycznym quasistatycznym od wartości natężenia tego pola



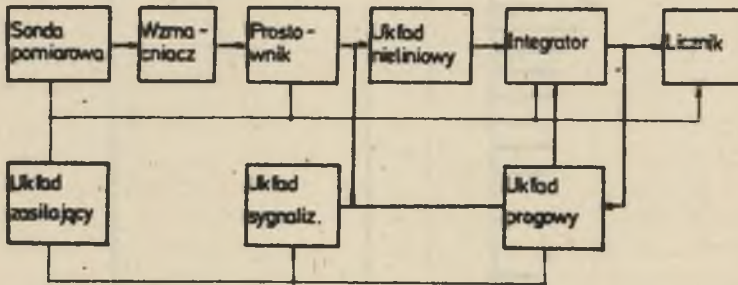
Rys. 2. Rozkład intensywności pola elektrycznego E w zależności od intensywności pola elektrycznego E_0 przed włożeniem metalowego cylindra w to pole

lem człowieka, to widać, że pole działające na człowieka będzie znacznie różniło się od pola elektrycznego, które istniało przed wejściem człowieka w jego obszar działania.

Ze względu na rozwój techniki przesyłu energii elektrycznej z zastosowaniem coraz wyższych napięć a co za tym idzie, większe zagrożenie pracowników obsługujących urządzenia będące pod wysokim napięciem zaszła potrzeba wykonania urządzenia określającego stopień zagrożenia pracownika znajdujacego się w polu elektrycznym.

Stopień zagrożenia człowieka określony jest za pomocą tzw. dawki ekspozycji pola elektrycznego; jest to całka z modułu natężenia pola elektrycznego w czasie, pomnożona przez współczynnik K, który zależy w sposób nieliniowy od wartości natężenia pola elektrycznego.

Urządzenie służące do pomiaru dawki ekspozycji nazwano indywidualnym dawkomierzem pola elektrycznego quasistatycznego, a jego schemat blokowy przedstawiono na rys. 3.

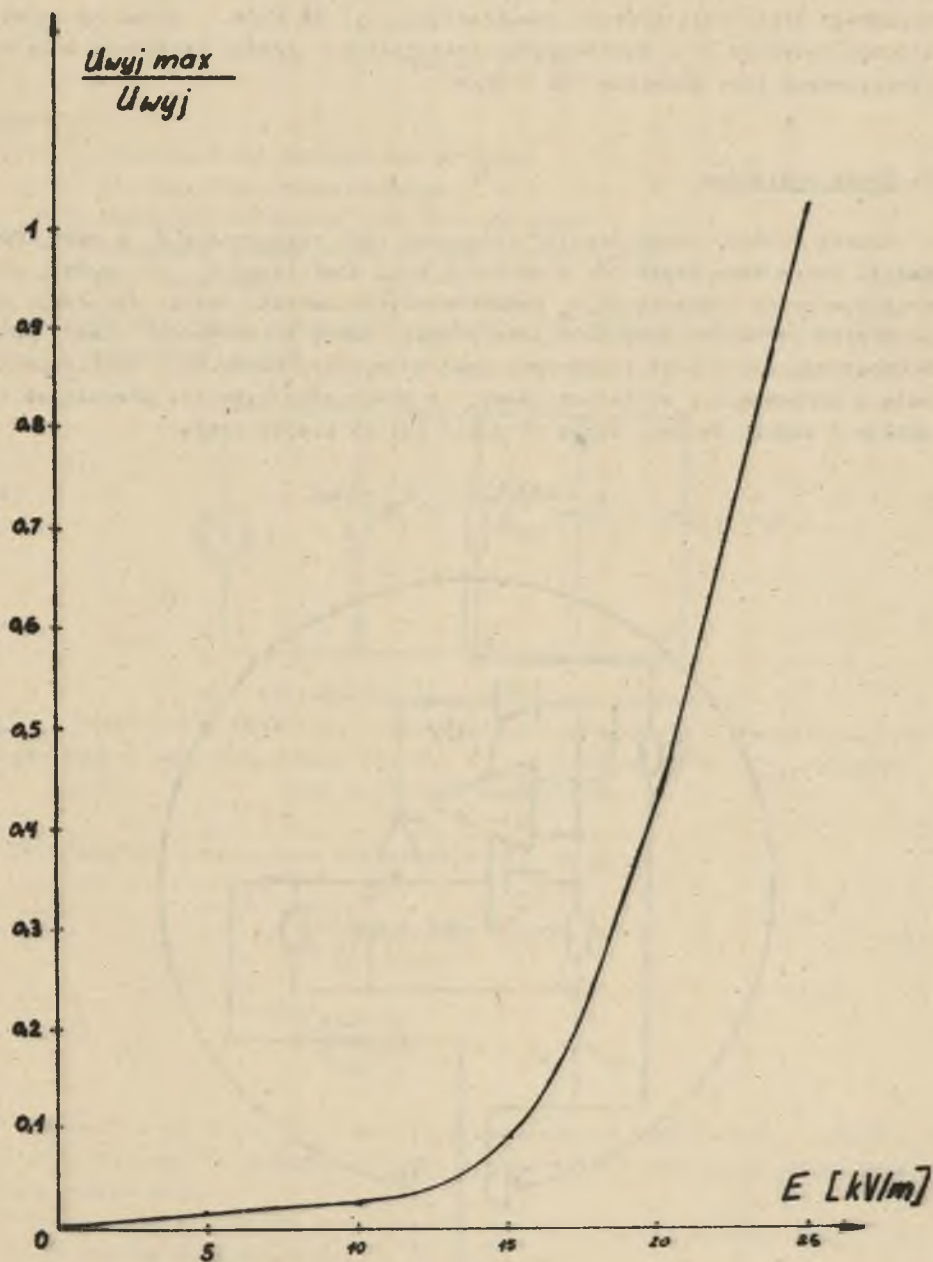


Rys. 3. Schemat blokowy indywidualnego dawkomierza pola elektrycznego

2. Indywidualny dawkomierz pola elektrycznego IDPE

Urządzenie to składa się z sondy pomiarowej w postaci metalowej czaszy kulistej umieszczonej na kasku ochronnym. W środku czaszy znajduje się wzmacniacz wstępny sygnału pomiarowego i prostownik. Napięcie stałe, proporcjonalne do natężenia pola elektrycznego, doprowadzane jest kabelkiem do drugiej części urządzenia umieszczonego w kieszeni kombinezonu pracownika. Wchodzi ono bezpośrednio na wejście układu nieliniowego i układu sygnalizacji.

Zadaniem układu nieliniowego jest przetworzenie napięcia wejściowego, tak aby na jego wyjściu otrzymać napięcie, które byłoby związane z natężeniem pola elektrycznego quasistatycznego, przy pomocy funkcji przedstawionej na rys. 4. Z kolei to napięcie jest całkowane a wartość całki zamieniana jest na postać cyfrową. Informacja o aktualnej dawce ekspozycji zakumulowanej w człowieku wyświetlana jest w postaci cyfrowej.



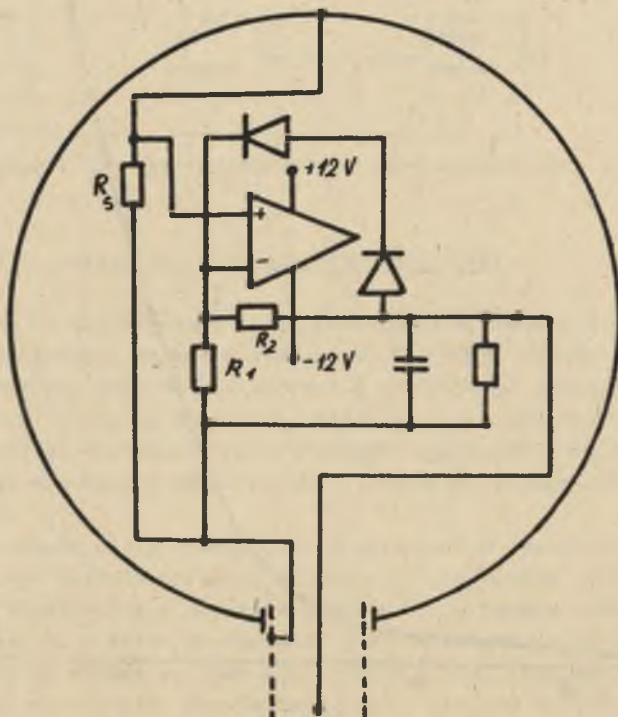
Rys. 4. Zależność napięcia na wyjściu układu nieliniowego od natężenia pola elektrycznego.

IDPE posiada szereg układów pomocniczych, takich jak: układ sygnalizacji, który akustycznie ostrzega pracownika, jeżeli natężenie pola elektrycznego przekroczy wartość dopuszczalną, tj. 25 kV/m, układ progowy, którego zadaniem jest zablokowanie integratora, jeżeli natężenie pola elektrycznego jest mniejsze niż 5 kV/m.

3. Sonda pomiarowa

Czasza kulista sondy (rys.5) połączona jest rezystancją R_s z masą IDPE. Jeżeli sondę taką umieścimy w zmiennym polu elektrycznym, to wywoła ono przepływ przez rezystancję R_s ładunków elektrycznych. Jeżeli założymy, że potencjał człowieka oraz IDPE jest prawie równy potencjałowi ziemi, pole w otoczeniu głowy jest jednorodne oraz że wymiary sondy są dostatecznie małe w porównaniu z wymiarami głowy, to wtedy prąd wywołany przepływem ładunków z czaszy do masy można określić [4] za pomocą wzoru:

$$i = 4\pi\epsilon_0 \omega h r_0 E_m \sin\omega t \quad (1)$$



Rys. 5. Schemat ideowy wzmacniacza wstępnego z prostownikiem

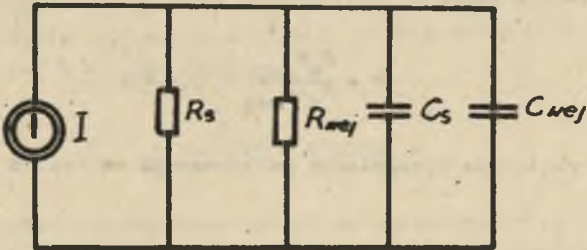
Wartość skuteczna tego prądu wynosi:

$$I = 4\pi\epsilon_0\omega h r_0 \frac{E_0}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

gdzie:

- ϵ_0 - przenikalność elektryczna próżni,
- ω - pulsacja pola elektrycznego,
- E_0 - amplituda natężenia pola elektrycznego,
- h - odległość środka sondy od powierzchni głowy,
- r_0 - promień sondy.

Schemat zastępczy sondy można przedstawić w postaci obwodu równoległego [5] pokazanego na rys. 6.



Rys. 6. Schemat zastępczy sondy pomiarowej

R_{wej} - rezystancja wejściowa wzmacniacza wstępnego, R_s - rezystancja łącząca czaszę metalową z masą układu, C_s - pojemność sondy, C_{wej} - pojemność wejściowa wzmacniacza

W obwodzie tym napięcie na rezystancji R_s wynosi:

$$U = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} 4\pi\epsilon_0 R\omega h_0 E \quad (3)$$

$$R = \frac{R_{wej} R_s}{R_{wej} + R_s}; \quad C = C_s + C_{wej}$$

Jak wynika ze wzoru (3), funkcja przetwarzania jest funkcją nieliniową. Nieliniowość ta spowodowana jest pojemnościami oraz rezystancją wejściową wzmacniacza.

Okazuje się jednak, że przy odpowiednim doborze rezystancji sondy R_s można z bardzo dużą dokładnością przyjąć, że:

$$U = K R_s E \quad (4)$$

gdzie:

δ_c - błąd względny pomiaru spowodowany bocznikującym działaniem pojemności

$$\delta_c = \left| \frac{KRE - \frac{KRE}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}}{\frac{KRE}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}} \right|$$

$$\delta_c = \left| \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} - 1 \right|$$

Jeżeli założymy, że pojemność $C = 100 \text{ pF}$ oraz błąd względny $\delta_c < 0,001$, wtedy rezystancja wynosi:

$$R = \frac{R_s R_{wej}}{R_s + R_{wej}} < 1,4 \text{ M}\Omega$$

Rezystancja wejściowa wzmacniacza pokazywanego na rys. 5 wynosi:

$$R_{wej} = \frac{K_o}{K} R_r$$

gdzie:

- K_o - wzmacnienie wzmacniacza z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego,
- K - wzmacnienie wzmacniacza z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego,
- R_r - rezystancja różnicowa wzmacniacza operacyjnego.

Błąd bezwzględny spowodowany bocznikującym działaniem rezystancji wejściowej wynosi:

$$\Delta U_{wyj} = U_{wyj} - \frac{U_{wyj} K_o \frac{R_r}{K}}{R_s + K_o \frac{R_r}{K}}$$

gdzie:

U_{wyj} - napięcie wyjściowe wzmacniacza.

Ponieważ:

$$I R_s K = U_{wyj}$$

$$U_{wyj} = U_{wyj} - \frac{U_{wyj} K_o R_r}{U_{wyj} + K_o R_r}$$

stąd błąd względny spowodowany bocznikującym działaniem rezystancji wejściowej wynosi:

$$\delta_R = \frac{U_{wyj}}{U_{wyj} + K_o R_r} = \frac{K R_s}{K R_s + K_o R_r}$$

Ponieważ iloczyn $K R_s$ ma dla danego współczynnika proporcjonalności między natężeniem pola elektrycznego E a napięciem wyjściowym wartość stałą, więc błąd względny spowodowany bocznikującym działaniem rezystancji wejściowej zależy tylko od parametrów wzmacniacza operacyjnego i od przyjętego współczynnika proporcjonalności układu K_c .

Dla rozpatrywanego przypadku przyjęto, że natężeniu 25 kV/m odpowiada napięcie wyjściowe 8 V, wobec tego:

$$K_c = \frac{U_{wyj}}{E} = 0,00032 \text{ m}$$

Wzmacniacz pomiarowy wykonany został na bazie wzmacniacza operacyjnego MAA 502, dla którego na podstawie danych katalogowych przyjęto rezystancję różnicową $R_r = 700 \text{ k}\Omega$ i współczynnik wzmocnienia wzmacniacza z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego $K_o = 25 \cdot 10^3 \text{ V/V}$. Dla powyższych parametrów wzmacniacza operacyjnego oraz współczynnika proporcjonalności $K_c = 32 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ błąd względny spowodowany bocznikującym działaniem rezystancji wynosi 0,04%. Od wzmocnienia wzmacniacza a tym samym również od rezystancji sondy R_s zależy błąd pomiaru wynikający z dryftu temperaturowego napięcia nierównoważenia:

$$\Delta U_n = K U_n$$

gdzie:

U_n - napięcie nierównoważenia.

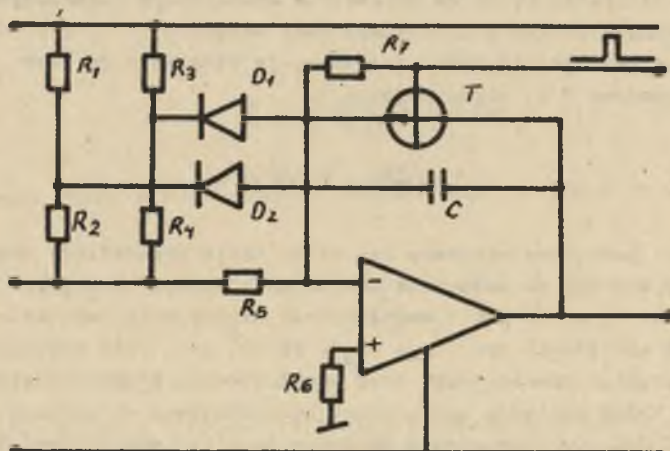
Dla wzmacniacza MAA 502 dryft temperaturowy wynosi $4,8 \text{ uV}/^\circ\text{C}$. Ponieważ błąd bezwzględny pochodzący od dryftu napięcia nierównoważenia nie zależy od sygnału pomiarowego, to największy błąd względny wystąpi przy pomiarze małych sygnałów:

$$\delta = \frac{K U_n}{U_{wyj \text{ min}}}$$

Przy założeniach że minimalne mierzone natężenie pola elektrycznego wynosi 5 kV/m, zmiany temperatury wynoszą $\pm 30^{\circ}\text{C}$ oraz błąd względny powinien być mniejszy od 0,001, wzmacnienie wzmacniacza K powinno być mniejsze od 11. Dla takiego wzmacnienia rezystancja sondy R_s musi być większa od 1,3 M.

4. Układ nieliniowy i integrator

Napięcie stałe proporcjonalne do mierzonego natężenia pola elektrycznego doprowadzone jest kabelkiem na wejście układu nieliniowego, składającego się z rezystorów $R_1 - R_4$ oraz diody D_1, D_2 , (rys. 7), który formuje żadaną charakterystykę fizjologiczną pokazaną na rys. 1.



Rys. 7. Schemat ideowy układu nieliniowego i integratora

Na wyjściu układu nieliniowego otrzymywane jest napięcie:

$$U = K(E) E$$

Po scałkowaniu tego napięcia w czasie otrzymujemy wartość dawki ekspozycji pola elektrycznego quasistatycznego D

$$D = \int_0^t K(E) E dt$$

Przy projektowaniu indywidualnego dawkomierza pola elektrycznego przyjęto, że dawka ekspozycji pola elektrycznego będzie mierzona metodą cyfrową, a wynik wyświetlany na wyświetlaczu segmentowym, dlatego też zachodzi konieczność przetwarzania wartości całki na wielkość cyfrową.

Można napisać, że dawka ekspozycji pola elektrycznego, zakumulowana w człowieku w czasie T , wynosi:

$$D = \int_0^T K(E) E dt = \int_0^{t_1} K(E) E dt + \\ + \int_{t_1}^{t_2} K(E) E dt + \dots + \int_{t_n}^T K(E) E dt$$

Jeżeli integrator w każdym cyklu pracy całkuje do tego samego napięcia, to:

$$\int_0^{t_1} K(E) E dt = \int_0^{t_2} K(E) E dt = \dots = \int_{t_n}^T K(E) E dt = C$$

wtedy:

$$D = N C$$

gdzie:

N - liczba cykli całkowania,

C - wartość stała.

Widzimy więc, że dawka ekspozycji pola elektrycznego jest proporcjonalna do liczby cykli całkowania. Liczba cykli całkowania zliczana jest w liczniku i wyświetlana na wyświetlaczu cyfrowym.

5. Podsumowanie

Podstawą projektowania urządzenia była krzywa fizjologiczna wykreślana w oparciu o normy radzieckie, określające dopuszczalne dawki ekspozycji w odniesieniu do pola elektrycznego jednorodnego, które istniało przed wejściem w to pole człowieka. Normy te nie uwzględniają deformacji pola spowodowanej obecnością człowieka oraz obecnością innych urządzeń w rzeczywistych warunkach pracy.

Skonstruowane urządzenie pozwala mierzyć rzeczywistą dawkę ekspozycji zakumulowaną w człowieku, a więc uwzględnia zarazem deformację pola elektrycznego. Ma to duże znaczenie w badaniach medycznych, gdyż pozwala na uściślenie dopuszczalnych dobowych dawek ekspozycji. Poza tym konstrukcja urządzenia umożliwia zmianę zamodelowanej charakterystyki fizjologicznej, o ile zajdzie potrzeba jej uściślenia wynikająca z badań medycznych.

LITERATURA

- [1] Korobkova V.P., Morozow A.X., Stolarow M.D., Jakubow A.: Influence du Champ Electrique dans les Postes A 500 et 750 kV, sur les Equipes D'Entretien et les Moyens de leur Protection. CIGRE Paryż 1972.
- [2] Schneider K.H., Studinger H., Weck K.H., Steinbigler H., Utmischi D., Wiesinger I.: Courants de Deplacement vers le Corps Humain Causes par le Champ Dielectrique sous les Lignes de Transport D'Energie. CIGRE Paryż 1974.
- [3] Bernes H.C., McElroy A.J., Charkow J.H.: Analiza pola elektrycznego w miejscu pracy na linii pod napięciem. Materiały z sesji IEEE w Nowym Orleanie, lipiec 1966.
- [4] Dusza R.: Sondy do pomiaru pól elektrycznych quasistatycznych w otoczeniu linii i stacji najwyższych napięć. Praca doktorska. Politechnika Śląska Gliwice 1977.
- [5] Krzycki A.: Opracowanie koncepcji i dokumentacji indywidualnego dawkomierza natężenia pola elektrycznego. Praca badawcza ZPBE "Energo-pomiar" 1975.

ИЗМЕРЕНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ДОЗЫ ЭКСПОЗИЦИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КВАЗИ-СТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Р е з ю м е

В статье рассматривается метод измерения, а также приспособление для измерения степени угрожения человека работающего в квазистатическом электрическом поле большого напряжения. Особенно большое внимание обращено на подбор резистора зонда из которого собирается измерительный сигнал.

THE MEASUREMENT OF THE INDIVIDUAL EXPOSURE DOSE
OF QUASISTATIC ELEKTRICAL FIELD

S u m m a r y

The paper presents the measurement method and the device for measuring the degree of danger to human life due to electric quasistatistical fields of high intensity. Special attention was paid to the choice of a measurement resistance probe.

Przyjęto do druku w czerwcu 1978 r.