

Bernard BARON

Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki
Politechniki Śląskiej

DOBÓR UKŁADU PRZEWODÓW LINII PRZESYŁOWEJ 765 kV
ZE WZGLĘDU NA DOPUSZCZALNE WARTOŚCI NATĘŻEŃ POLA
ELEKTRYCZNEGO PRZY POWIERZCHNI ZIEMI

Streszczenie. W pracy opracowano algorytm do poszukiwania konfiguracji geometrycznej prowadzenia przewodów linii przesyłowej usytuowanych możliwie najbliżej ziemi przy równoczesnym spełnieniu pewnych ograniczeń geometrycznych i zachowaniu dopuszczalnych wartości natężenia pola elektrycznego pod linią na wysokości 1,8 m nad ziemię narzuconych względami ochrony środowiska naturalnego.

1. Wstęp

Przebieg energii elektrycznej przy coraz wyższych napięciach linii przesyłowych spowodował wzrost wpływu pola elektrycznego o nadmiernym natężeniu na środowisko naturalne. Niezależnie jednak od tego, czy stwierdza się szkodliwość tego pola na organizm ludzki, czy tylko jego uciążliwość [7] [8], w obydwu przypadkach wartości natężeń pola elektrycznego są ograniczone do kilku kV/m. Badania związane z występowaniem wysokich natężeń pól elektrycznych są prowadzone na szeroką skalę przede wszystkim w Związku Radzieckim, w Stanach Zjednoczonych i w Kanadzie, tzn. w krajach, które pierwsze zbudowały linie o skrajnie wysokich napięciach.

W Związku Radzieckim przyjęto graniczne wartości natężeń pola elektrycznego pod liniami na wysokości 1,8 m nad ziemią. Wnoszą one [7]:

20 kV/m - w terenach trudno dostępnych dla ludzi i niedostępnych dla samochodów i maszyn rolniczych; 15 kV/m - w terenach niezamieszkałych, w których ludzie mogą się znaleźć tylko na krótki okres czasu przypadkowo; 10 kV/m - na skrzyżowaniach linii z drogami, przez które przejeżdżają samochody; 5 kV/m - w terenach zamieszkałych (aglomeracjach); 0,5 kV/m - w miejscu, w którym zezwala się wznosić budynek mieszkalny.

Według National Electrical Safety Code (NESC) [8] graniczne wartości natężeń pola elektrycznego pod liniami przy powierzchni ziemi wynoszą:

13 kV/m - na obszarach leśnych i w strefach niedostępnych dla wielogabarytowych środków transportu; 7,5 kV/m - w rejonach rolniczych i ob-

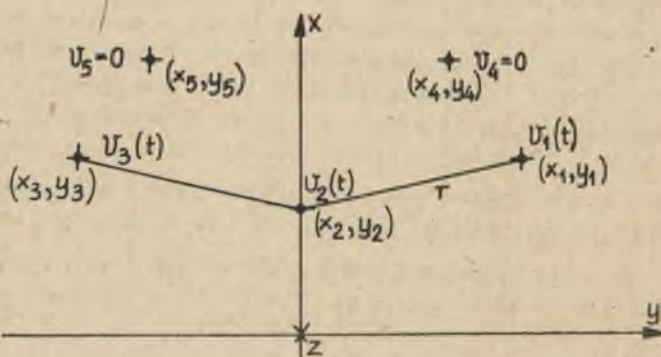
szarach dostępnych dla wielogabarytowych środków transportu; 2 kV/m - na granicy strefy wyłączenia.

Dla linii przesyłowych najwyższych napięć aktualny jest więc problem poszukiwania takich konfiguracji geometrycznych prowadzenia przewodów roboczych linii, przy możliwie najniższym ich usytuowaniu względem ziemi, dla których maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego pod nimi na poziomie 1,8 m nad ziemią nie przekroczy dopuszczalnych wartości. Rozwiązanie tego problemu jest szczególnie ważne ze względu na wysokość, a więc i koszt słupów wsporczych linii przesyłowych. O ile bowiem dla linii przesyłowych do 400 kV wysokość położenia przewodów względem ziemi w miejscu maksymalnego zwisu przewodów narzucona jest wysokością wielogabarytowych środków transportu (przyjmuje się około 9 m), o tyle dla linii powyżej 400 kV przyjęcie jej podyktowane musi być przede wszystkim dopuszczalnymi wartościami natężeń pola elektrycznego pod liniami.

2. Określenie zbioru konfiguracji dopuszczalnych prowadzenia przewodów linii przesyłowych

Największe wartości natężeń pola elektrycznego pod linią przesyłową występują w miejscu maksymalnego zwisu przewodów względem ziemi. Jak wykazano w pracy [9], analizę pola elektrycznego linii przesyłowej w miejscu maksymalnego zwisu przewodów można prowadzić, przyjmując do rozważań model w postaci układu przewodów równoległych względem siebie i płaszczyzny ziemi. Przyjęcie takiego modelu sprowadza analizę pola elektrycznego pod linią przesyłową do zagadnienia dwuwymiarowego.

Przez (x_k, y_k) oznaczono współrzędne prostokątne określające położenie osi przewodów roboczych linii ($k = 1, 2, 3$) oraz przewodów odgromowych dla ($k = 4, 5$) równoległych względem siebie i płaszczyzny y, z ziemi (rys. 1). Niech \mathcal{X} oznacza zbiór elementów $k = (x_1, \dots, x_5, y_1, \dots, y_5)$ odpowiadają-



Rys. 1

cych konfiguracji geometrycznych prowadzenia przewodów linii przesyłowych spełniających następujące ograniczenia:

$$\mathcal{K} = \left\{ k = (x_1, x_5, y_1, \dots, y_5) : (x_1 - x_3 = 0) \wedge ((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 = r^2) \wedge \right. \\ \left. \wedge (y_1 + y_3 = 0) \wedge (y_2 = 0) \wedge \left((x_2 - x_1 \geq 0) \wedge (x_1 - x_2 + \frac{\sqrt{3}}{2} r \geq 0) \right) \vee \right. \\ \left. \vee (x_1 - x_2 \geq 0) \wedge (x_2 - x_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} r \geq 0) \right) \wedge (x_1 > 0) \wedge (y_1 > 0) \wedge \\ \left. \wedge (x_4 - x_5 = 0) \wedge (y_4 + y_5 = 0) \wedge (x_4 - x_1 = x_a) \wedge (y_1 - y_4 = y_a) \right\} \quad (1)$$

Z konstrukcji zbioru \mathcal{K} wynika, że dowolny jego element k odpowiada konfiguracji geometrycznej prowadzenia przewodów linii charakteryzującej się tym, że przewód fazy środkowej znajduje się w płaszczyźnie symetrii linii, natomiast pozostałe dwa przewody faz skrajnych, jak również dwa przewody odgromowe są usytuowane symetrycznie względem niej.

Jak wiadomo, im niżej usytuowane są przewody robocze linii przesyłowej względem ziemi, tym większe wartości natężeń pola elektrycznego występują przy powierzchni ziemi. Dlatego też, mając na uwadze dopuszczalne wartości natężeń pola elektrycznego E_{dop} na wysokości $x = 1,8$ m nad ziemią pod linią przesyłową, należy ograniczyć poszukiwania konfiguracji geometrycznej prowadzenia przewodów linii ze zbioru \mathcal{K} do następującego jego podzbioru:

$$\Omega = \left\{ k = (x_1, \dots, x_5, y_2, \dots, y_5) \in \mathcal{K} : \max_{\substack{y \in (-\infty, \infty) \\ x = 1,8}} \max_{t \in (0, T]} \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \right. \\ \left. = f(x_1, \dots, x_5, y_1, \dots, y_5) \leq E_{\text{dop}} \right\} \quad (2)$$

gdzie: $v(x, y, t) = \sqrt{2} V \cos[\omega t + \varphi(x, y)]$ jest funkcją potencjału quasi-statycznego w obszarze linii przesyłowej.

3. Sformułowanie zadania optymalizacji

Niech potencjały przewodów linii przesyłowej wynoszą (rys. 1):

$$v_k(t) = \sqrt{2} V \cos[\omega t + \varphi_k] \quad (k = 1; 2, 3) \quad (3)$$

gdzie:

$$\varphi_1 = 0; \quad \varphi_2 = \frac{4\pi}{3}; \quad \varphi_3 = \frac{2\pi}{3},$$

natomiast potencjały przewodów odgromowych v_4 i v_5 oraz potencjał ziemi są równe zero.

W dowolnym punkcie na zewnątrz przewodów potencjał quasi-statyczny

$$v(x, y, t) = \sqrt{2} V(x, y) \cos[\omega t + \varphi(x, y)] \quad (4)$$

spełnia równanie Laplace'a

$$\Delta v(x, y, t) = 0 \quad (5)$$

z warunkami brzegowymi:

$$v(x, y, t) \Big|_{(x, y) \in S_k} = \begin{cases} v_k(t) & (k = 1, 2, 3) \\ 0 & (k = 4, 5) \end{cases} \quad (6)$$

$$v(x, y, t) \Big|_{x=0} = 0 \quad (7)$$

gdzie:

S_k - powierzchnia k-tego przewodu.

Należy znaleźć takie położenie przewodów linii przesyłowej określone przez współrzędne prostokątne (x_k, y_k) ($k = 1, 2, \dots, 5$), należące do zbioru rozwiązań dopuszczalnych Ω określonego wzorem (2), dla którego funkcja preferencji

$$J = x_1 + x_2 \quad (8)$$

osiągnie minimum.

Należy zauważyć, że minimalizacja funkcji preferencji (8) oznacza poszukiwanie takiej konfiguracji linii przesyłowej, dla której przewody robocze są usytuowane możliwie najbliżej ziemi, przy równoczesnym zachowaniu dopuszczalnych wartości natężeń pola elektrycznego pod linią przesyłową na wysokości 1,8 m nad ziemię.

Problem numeryczny postawionego zadania sprowadza się do wyznaczenia zbioru Ω , zgodnie z nierównościami (2). W tym celu należy wziąć pod uwagę rozwiązanie równania Laplace'a (5) w postaci (4) z warunkami brzegowymi (6) i (7), którego moduł $V(x, y)$ i argument $\varphi(x, y)$ mogą być wyznaczone jako moduł i argument potencjału zespolonego [3]:

$$\underline{v}(x, y) = v(x, y) e^{j\varphi(x, y)} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^5 \sum_{l=1}^5 c_{kl} \underline{v}_l \ln \left(\frac{\sqrt{(x+x_k)^2 + (y-y_k)^2}}{\sqrt{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2}} \right) \quad (9)$$

gdzie:

c_{kl} - pojemności własne ($k = 1$) oraz wzajemne ($k \neq 1$) przypadające na jednostkę długości linii,

\underline{v}_l - potencjał zespolony l-tego przewodu linii.

Składowe wektora natężenia pola elektrycznego wynoszą:

$$E_x(x,y,t) = -\frac{\partial v(x,y,t)}{\partial x}; \quad E_y(x,y,t) = -\frac{\partial v(x,y,t)}{\partial y} \quad (10)$$

W rozpatrywanym modelu linii przesyłowej pole elektryczne ma tylko dwie składowe i jest funkcją dwóch zmiennych (x,y) . Do jego badania można więc zastosować geometrię płaszczyzny Gaussa. W tym celu należy przyporządkować punktowi o współrzędnych (x,y) liczbę zespoloną:

$$\underline{E}(x,y,t) = -\frac{\partial v(x,y,t)}{\partial y} - j \frac{\partial v(x,y,t)}{\partial x} \quad (11)$$

Moduł funkcji (11) pokrywa się z modułem wektora natężenia pola elektrycznego występującego w nierówności (2)

$$E'(x,y,t) = \left[\left(\frac{\partial v(x,y,t)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v(x,y,t)}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\underline{E}(x,y,t) \underline{E}^*(x,y,t) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

Jak wykazano w pracy [3], natężenie pola elektrycznego zdefiniowane wzorem (11) można przekształcić do postaci:

$$\underline{E}(x,y,t) = \sqrt{2} \left[\underline{E}_1(x,y) e^{j\omega t} + \underline{E}_2(x,y) e^{-j\omega t} \right] \quad (13)$$

gdzie:

$$\underline{E}_1(x,y) = E_1(x,y) e^{j\varphi_1(x,y)} = \frac{1}{2} \left[\underline{E}_y(x,y) + j \underline{E}_x(x,y) \right] \quad (14)$$

$$\underline{E}_2(x,y) = E_2(x,y) e^{j\varphi_2(x,y)} = \frac{1}{2} \left[\underline{E}_y^*(x,y) + j \underline{E}_x^*(x,y) \right] \quad (15)$$

$$\underline{E}_x(x,y) = -\frac{\partial v(x,y)}{\partial x} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_k \sum_l c_{kl} \sqrt{l} \left[\frac{(x-x_k)^2}{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2} - \frac{(x+x_k)}{(x+x_k)^2 + (y-y_k)^2} \right] \quad (16)$$

$$\underline{E}_y(x,y) = -\frac{\partial v(x,y)}{\partial y} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_k \sum_l c_{kl} \sqrt{l} \left[\frac{(y-y_k)}{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2} - \frac{(y-y_k)}{(x+x_k)^2 + (y-y_k)^2} \right] \quad (17)$$

Jak wynika ze wzoru (13), wektor natężenia pola elektrycznego pod linią przesyłową w dowolnym punkcie (x, y) można przedstawić w postaci superpozycji dwóch wektorów wirujących w przeciwnych kierunkach z prędkością kątową ω .

Wektor $\underline{E}(x, y, t)$ zakreśla więc w ciągu okresu T elipsę. Natężenie pola elektrycznego w kierunku półosi dużej tej elipsy można wyrazić wzorem:

$$\max_{t \in (0, T)} |\underline{E}(x, y, t)| = \sqrt{2} (|\underline{E}_1(x, y)| + |\underline{E}_2(x, y)|) = \sqrt{2} E_a(x, y) \quad (18)$$

Uwzględniając wynik operacji (18) oraz wzór (12), można zbiór określony nierównością (2) zapisać w postaci:

$$\Omega = \left\{ k = (x_1, x_2, \dots, x_5, y_1, \dots, y_5) \in \mathcal{X} : \begin{array}{l} \max_{y \in (-\infty, \infty)} E_a(x, y) \Big|_{x=1,8} \\ = f(x, \dots, y_5) \leq E_{\text{dop}} \end{array} \right. \quad (19)$$

Problem numeryczny wyznaczenia zbioru rozwiązań dopuszczalnych sprowadza się do obliczenia maksymalnej wartości natężenia pola $E_a(x, y)$ na wysokości $x = 1,8$ m nad ziemią ze względu na współrzędną y , zgodnie ze wzorami (18), (14), (15), (16) i (17).

Pojemności cząstkowe c_{ki} występujące we wzorach (16) i (17) można obliczyć w oparciu o wzory podane np. w pracy [3] dla promienia zastępczego przewodów wiązkowych obliczanego tak, jak w pracy [1], tj.:

$$R_z = \sqrt[n]{\frac{a^{n-1}}{2 \sin \frac{\pi}{n}}} r_0 \quad (20)$$

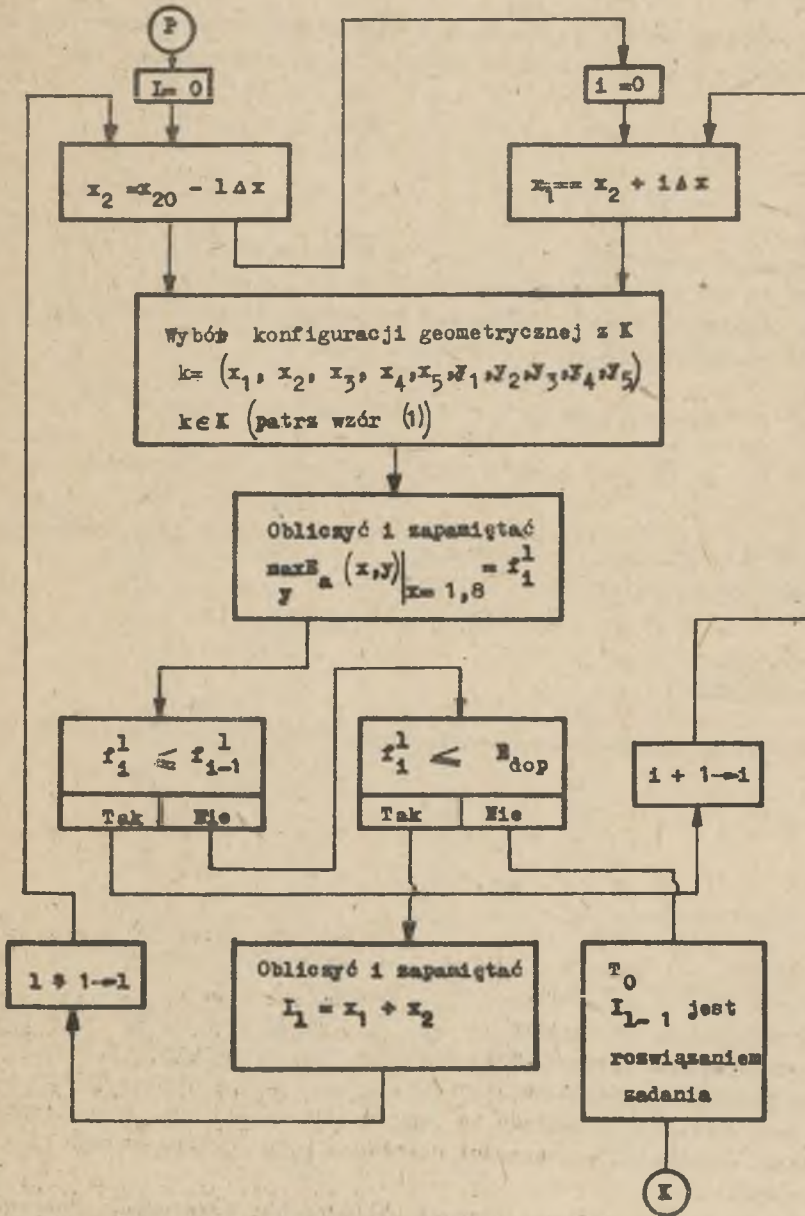
gdzie:

- r_0 - promień przewodu w wiązce,
- a - odległość między przewodami w wiązce.

4. Rozwiązanie zadania optymalizacji

Dla zadania optymalizacji sformułowanego w poprzednim punkcie opracowano sieć działań numerycznych przedstawioną na rys. 2. Rozwiązanie zadania optymalizacji przeprowadzono dla linii przesyłowej 765 kV o potencjałach zespolonych przewodów roboczych wynoszących:

$$\underline{V}_1 = 441,68 \text{ kV}; \quad \underline{V}_2 = 441,68 e^{j\frac{4\pi}{3}}; \quad \underline{V}_3 = 441,68 e^{j\frac{2\pi}{3}}$$



Rys. 2

Przyjęto przewody wiązkowe zawierające cztery przewody w wiązce o średnicy 38 mm, odległe od siebie o $a = 456$ mm [9]. Odległość r między przewodem fazy środkowej a przewodami skrajnymi (rys. 1) przyjęto $r = 13$ m [9].

Położenie przewodów odgromowych w odniesieniu do przewodów faz skrajnych, zgodnie z oznaczeniami we wzorze (1), ustalono następująco [9]:

$$x_4 - x_1 = x_a = 12,2 \text{ m}; \quad y_1 - y_4 = y_a = 5,7 \text{ m}$$

$$x_4 = x_5; \quad y_4 = -y_5.$$

Dopuszczalną wartość natężenia pola elektrycznego na poziomie 1,8 m nad ziemią pod linią przesyłową przyjęto $E_{\text{dop}} = 13$ kV/m.

Dla powyższych danych rozwiązano postawione zadanie na maszynie cyfrowej. Otrzymano następujące rozwiązanie (rys. 3a):

$$x_1 = x_3 = 12 \text{ m}; \quad x_2 = 10,64 \text{ m}; \quad x_4 = x_5 = 24,2 \text{ m}$$

$$y_1 = -y_3 = 12,93 \text{ m}; \quad y_2 = 0; \quad y_4 = -y_5 = 7,23 \text{ m},$$

dla którego $\max_y E_a((1,8)y) \Big|_{x=1,8 \text{ m}} = 13$ kV/m, tzn.: jest równe przyjętej wartości dopuszczalnej (rys. 3c krzywa 1).

5. Wnioski

Na rys. 3b przedstawiono konfigurację linii 765 kV w układzie płaskim [9]:

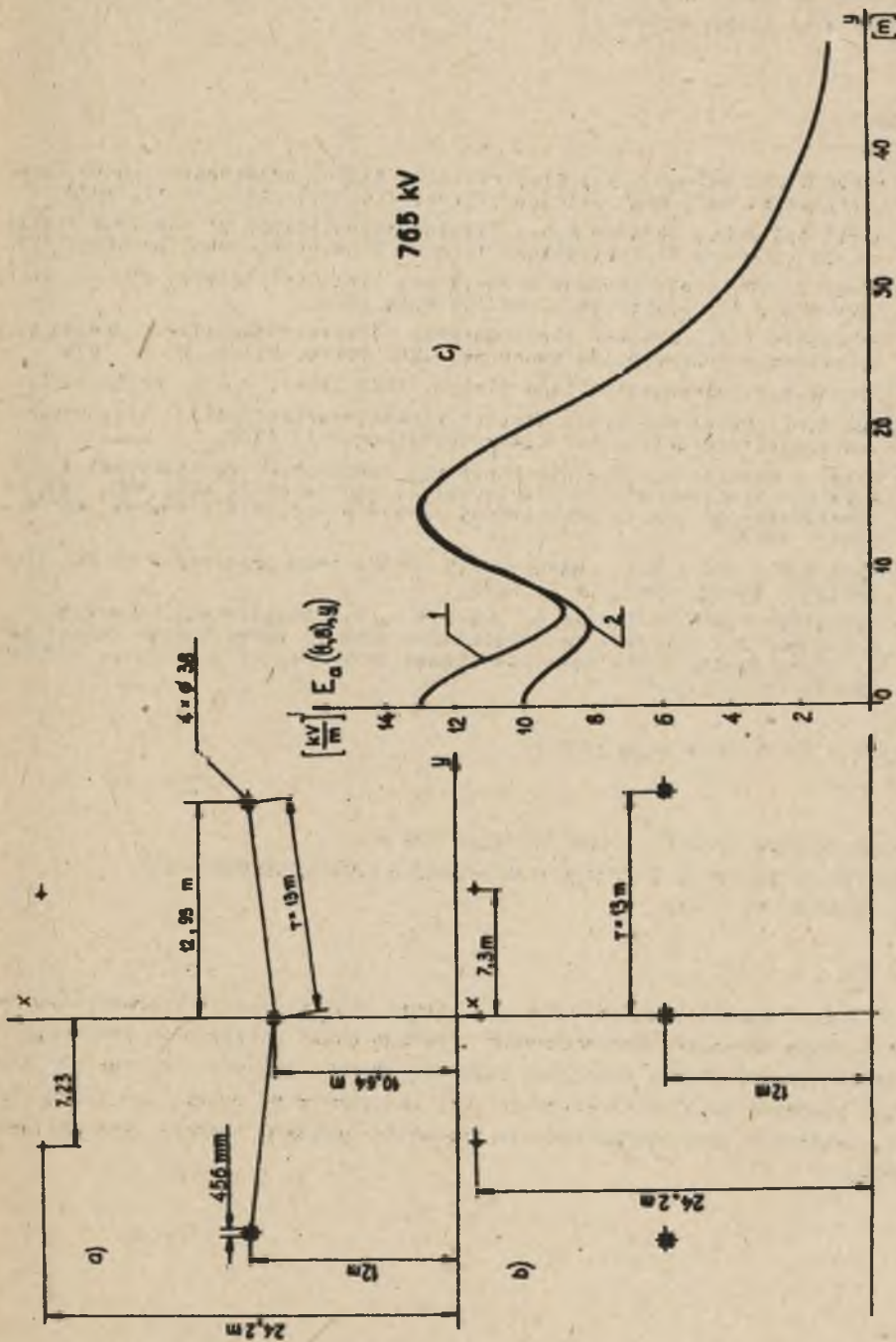
$$x_1 = x_2 = x_3 = 12 \text{ m}; \quad x_4 = x_5 = 24,2 \text{ m}$$

$$y_1 = -y_3 = 13 \text{ m}; \quad y_2 = 0; \quad y_4 = -y_5 = 7,3 \text{ m}$$

dla której $\max_y E_a((1,8)y)$ (rys. 3c, krzywa 2) osiąga tę samą wartość, co pod linią o konfiguracji z rys. 3a.

Z porównania konfiguracji z rys. 3a i 3b wynika jednak, że w pierwszym przypadku osiąga się obniżenie przewodu fazy środkowej o 1,35 m. Pozwala to na ewentualne obniżenie pionowych części głównych konstrukcji słupa, co nie jest obojętne za względu na jego wysoki koszt przy równoczesnym zachowaniu dopuszczalnej wartości natężenia pola elektrycznego pod linią przesyłową.

W oparciu o opracowany algorytm obliczeniowy rozwiązano postawione w pracy zadanie optymalizacji przykładowo dla linii 765 kV. Można go jednak stosować we wszystkich tych przypadkach, w których dobór konfiguracji li-



a) konfiguracja geometryczna prowadzenia przewodów linii przesyłowej 765 kV odpowiadająca rozwiązaniu zadania optymalizacji, b) układ płaski, c) rozkład wektora natężenia pola elektrycznego na wysokości 1,8 m nad ziemią pod linia przebiegająca o konfiguracji 1 - z rys. 3a, 2 - z rys. 3b

niemi możliwie najbliższej ziemi poddyktowane jest dopuszczalnymi wartościami natężenia pola elektrycznego.

LITERATURA

- [1] A Uan R.N., Salman S.K.: Electrostatic fields underneath power lines operated at very high voltages. Proc. IEE, Vol. 121, no 11, 1974.
- [2] Abdel Salam M., Ibrahim A.A.: Digital calculations of electric fields in the vicinity of protrusions from HN conductors. New York IEEE, 1977.
- [3] Baron B.: Pole elektryczne przesyłowej linii trójfazowej 400 kV. Zesz. Nauk. Pol. Śl. Elektryka t. 64, Gliwice 1979.
- [4] Mc Cauley T.M.: EHM and electrostatic effects: Simplified design calculations and preventive measures. IEEE Trans. P.A.S. no 6, 1975.
- [5] Deno D.W.: Transmission line fields. IEEE Trans. P.A.S. no 5, 1976.
- [6] Kac R.A., Perelman L.S.: Rasczot elektriczeskogo pola triechfaznoj linii elektropriewodacz. Elektrichestwo nr 1, 1978.
- [7] Normy i prawila po ochrone truda pri rabotach na podstancjach i wozdusznyh liniach elektropriewodacz i napriazenijs 400, 500, 750 kV pieriemennogo toka promyszlennoj czastoty S.C. N.I.T Energo. NOT Moskwa - 1972.
- [8] Shah K.R., Torri J.F., Hancock I.H.: More than appearance to EHV line design - Energy Inst. nr 7, 1975.
- [9] Schneider K.H., Studinger H., Weck K.H., Steinbigler H., Utmieschi D., Wiesinger J.: Courants de deplacement vers le corps humain causes par le champ dielectrique sous les lignes de transport L energie. CIGRE 36-04, 1974.

Przyjęto do druku w maju 1979 r.

ПОДБОР СИСТЕМЫ ПРОВОДОВ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ 765 КВ
С УЧЕТОМ ДОПУСКАЕМЫХ ЗНАЧЕНИЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
ПРИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Р е з ю м е

В статье представлен алгоритм для поиска геометрической конфигурации проводов линии передачи, расположенных возможно ближе поверхности земли при одновременном исполнении некоторых ограничений и сохранении допускаемых значений напряженности электрического поля под линией на высоте 1,8 м над землей, предиктованных необходимостью учитывать проблемы охраны естественной среды.

SELECTING THE CONFIGURATION OF THE 765 kV TRANSMISSION LINE
WITH GIVEN LIMITING VALUE OF THE ELECTRIC FIELD
STRENGTH NEAR THE GROUND

S u m m a r y

The algorithm for finding geometrical configuration of the transmission line wires, possibly the nearest to the ground, with some geometrical restrictions and with given limiting value of the electric field strength at the height of 1,8 m was presented.