

Krzysztof KRÓL, Wojciech MACHCZYŃSKI*, Krzysztof BUDNIK*
Jan SZYMENDERSKI*

REDUKCJA NATĘŻENIA POLA ELEKTRYCZNEGO I MAGNETYCZNEGO W OTOCZENIU NAPOWIETRZNEJ LINII ELEKTROENERGETYCZNEJ

W artykule dokonano optymalizacji parametrów napowietrznej linii elektroenergetycznej w celu redukcji rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego przy zastosowaniu algorytmu genetycznego (GA) oraz roju cząstek (PSO). Symulacje rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wykonano dla różnych wysokości na ścianie szczytowej budynku zlokalizowanego w różnych odległościach od osi linii elektroenergetycznej.

SŁOWA KLUCZOWE: natężenie pola elektrycznego, natężenie pola magnetycznego, napowietrzna linia elektroenergetyczna, optymalizacja, algorytm genetyczny, algorytm roju cząstek.

1. WSTĘP

Linie elektroenergetyczne są źródłem pola elektromagnetycznego niskiej częstotliwości. W wielu publikacjach, min. [9, 10, 11], donosi się o możliwości negatywnego oddziaływania tego pola na organizmy żywe. Między innymi poprzez wpływ na funkcje fizjologiczne (układ nerwowo-mięśniowy, wydzielanie gruczołowe, budowę i rozwój komórek oraz wzrost i regenerację tkanek), a także zwiększenie ryzyka zachorowania na choroby (białaczkę, raka piersi, Alzheimer, depresję, zaburzenia neuropsychologiczne).

Oprócz szkodliwego oddziaływania na materię żywą pole to może powodować zakłócenia w łączności radiowej, telewizyjnej i telekomunikacyjnej, a także negatywnie oddziaływać na metalową infrastrukturę podziemną (np. rurociągi stalowe). Na długich metalowych obiektach liniowych ułożonych w ziemi w pobliżu linii elektroenergetycznych występuje zagrożenie związane z indukowaniem napięć. Wymuszony w ten sposób prąd przemienny może powodować korozję w miejscach uszkodzenia powłoki izolacyjnej rurociągu. Stanowi to zagrożenie dla rurociągów chronionych biernie i aktywnie (ochrona katodowa) [11].

* Politechnika Poznańska

Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 roku w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów [14] wartość natężenia pola elektrycznego w miejscu zamieszkania nie może przekraczać 1 kV/m, natomiast w miejscu dostępnym dla ludzi musi być mniejsza od 10 kV/m. Natężenie pola magnetycznego dla obu tych obszarów nie może być większe od 60 A/m. Pomiary natężeń pól należy wykonywać na wysokości 2 metrów i w odległości nie mniejszej niż 1,6 metra od ściany budynku.

W wielu przypadkach dopuszczalne wartości natężeń pól mogą być znacznie przekroczone. Norma PN-EN 50341 zakłada, że nowo budowane linie elektroenergetyczne nie mogą znajdować się w odległości mniejszej niż 3 metry od budynków, a jeżeli jest to niemożliwe do spełnienia, należy zachować odległość pionową od dachu do przewodów linii. Odległość ta uzależniona jest od rodzaju dachu i kąta nachylenia do poziomu.

Aby sprostać wymaganiom stawianym przez [14], należy zastanowić się nad sposobami redukcji natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu istniejących obiektów oraz dla nowo projektowanych linii elektroenergetycznych, w tym również na wysokościach powyżej 2 metrów [1, 2, 5, 6, 9, 11, 12].

Zaprezentowany artykuł jest kontynuacją badań [5, 6].

2. ZALEŻNOŚCI OGÓLNE

Podjęta problematyka związana jest z zagadnieniem modelowania i optymalizacji 3-wymiarowego pola elektromagnetycznego generowanego przez linie przesyłowe WN i NN. W obliczeniach natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wokół linii elektroenergetycznej uwzględnia się zwis przewodów, obecność przewodów odgromowych i prądy w nich indukowane. Na rys. 1 przedstawiono pojedyncze przęsło linii elektroenergetycznej o rozpiętości d , wysokości zawieszenia przewodu H , wysokości przewodu w miejscu maksymalnego zwisu h (w tym wypadku, w połowie rozpiętości przęsła). Przewód ze zwisem należy podzielić na n jednakowych segmentów ($s_1, s_2, \dots, s_{i-1}, s_i, s_{i+1}, s_n$).

Kształt przewodu linii elektroenergetycznej można opisać za pomocą równania krzywej łańcuchowej:

$$z(x) = h + 2\alpha \sinh^2\left(\frac{x}{2\alpha}\right) \quad (1)$$

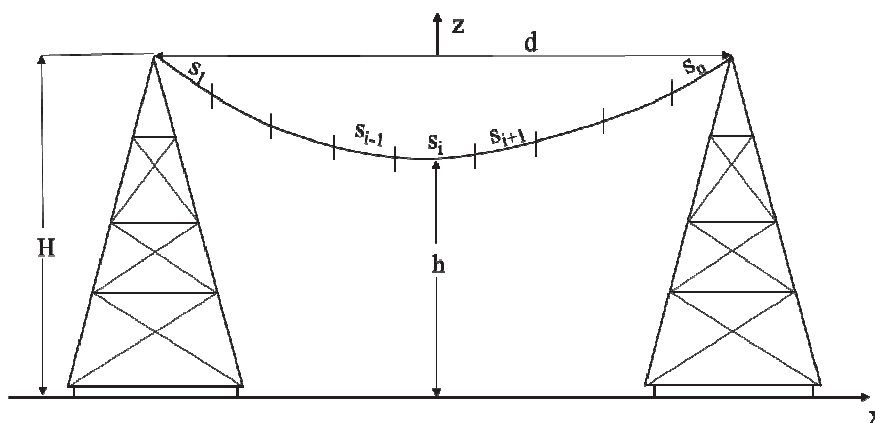
$$\alpha = \frac{T_h}{w} \quad (2)$$

gdzie:

α – współczynnik związany z mechanicznymi parametrami linii,
 T_h – współczynnik naprężeń mechanicznych w połowie rozpiętości przęsła,

w – ciężar przewodu na jednostkę długości; jeżeli te współczynniki nie są znane, to α można obliczyć w sposób iteracyjny z zależności [5, 6, 11, 12]:

$$H = h + 2\alpha \sinh^2 \left(\frac{d}{2\alpha} \right) \quad (3)$$



Rys. 1. Przewód napowietrznej linii elektroenergetycznej ze zwisem

2.1. Natężenie pola elektrycznego

Do obliczania natężenia pola elektrycznego wykorzystuje się metodę ładunków symulacyjnych oraz metodę odbić zwierciadlanych. Na rys. 2 przedstawiono i -ty segment przewodu i jego odbicie zwierciadlane. Współrzędne punktu obserwacji oznaczono jako $P(x, y, z)$, natomiast współrzędne punktu źródłowego $N(x', y', z')$, a dla jego odbicia zwierciadlanego $N'(x', y', z')$. Symbol r' jest odległością od początku układu współrzędnych punktu źródłowego na krzywej $c_{si}(r')$, natomiast r'_l jest odległością od początku układu współrzędnych punktu źródłowego na krzywej $c_{sil}(r'_l)$ dla odbicia lustrzanego, a r jest odległością punktu obserwacji od początku układu współrzędnych.

W rozpatrywanym przypadku potencjał pola elektrycznego w punkcie obserwacji P przedstawia zależność:

$$V_{si}(P) = \frac{\lambda_{si}}{4\pi\epsilon_0} \left(\int_{c_{si}(r')} \frac{dl'_{si}}{R_{si}^2} - \int_{c_{sil}(r'_l)} \frac{dl'_{sil}}{R_{sil}^2} \right) \quad (4)$$

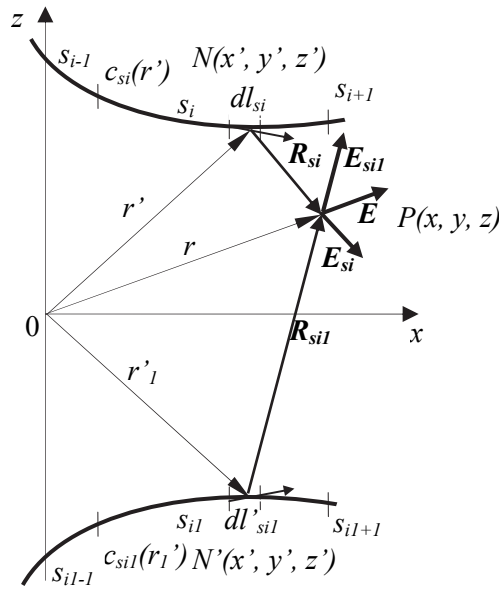
$$\mathbf{R}_{si} = (x - x')\mathbf{a}_x + (y - y')\mathbf{a}_y + (z - z')\mathbf{a}_z \quad (5)$$

$$\mathbf{R}_{sil} = (x - x')\mathbf{a}_x + (y - y')\mathbf{a}_y + (z + z')\mathbf{a}_z \quad (6)$$

gdzie:

ϵ_0 – przenikalność elektryczna próżni,

λ_{si} – gęstość liniowa ładunku symulacyjnego segmentu s_i ,
 \mathbf{R}_{si} – wektor odległości punktów źródłowych segmentu i do punktu obserwacji,
 \mathbf{R}_{sil} – wektor odległości punktów źródłowych odbicia zwierciadlanego segmentu i do punktu obserwacji, $\mathbf{a}_x, \mathbf{a}_y, \mathbf{a}_z$ – wektory jednostkowe w układzie współrzędnych prostokątnych.



Rys. 2. Segment przewodu napowietrznego ze zwisem – geometria

Ładunki poszczególnych segmentów wyznacza się z zależności:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{s1} \\ \lambda_{s2} \\ \vdots \\ \lambda_{sn} \end{bmatrix} = 4\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} I1_{11} - I2_{11} & I1_{12} - I2_{12} & \dots & I1_{1n} - I2_{1n} \\ I1_{21} - I2_{21} & I1_{22} - I2_{22} & \dots & I1_{2n} - I2_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ I1_{n1} - I2_{n1} & I1_{n2} - I2_{n2} & \dots & I1_{nn} - I2_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ \vdots \\ V_{sn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Przy czym współczynniki potencjałowe $I1$ i $I2$ mają następującą postać:

$$I1_{ij} = \int_{c_{si}} \frac{\cosh\left(\frac{x_j'}{\alpha}\right) dx_j'}{\sqrt{(x_i - x_j')^2 + (y_i - y_j')^2 + (z_i - h - 2\alpha \sinh^2\left(\frac{x_j'}{2\alpha}\right))^2}} \quad (8)$$

$$I2_{ij} = \int_{c_{si1}} \frac{\cosh\left(\frac{x_j'}{\alpha}\right) dx'}{\sqrt{(x_i - x_j')^2 + (y_i - y_j')^2 + (z_i + h + 2\alpha \sinh^2\left(\frac{x_j'}{2\alpha}\right))^2}} \quad (9)$$

W przypadku, gdy linia elektroenergetyczna składa się z m przewodów ($m > 1$), ładunki wywołane na n segmentach każdego przewodu m są obliczane z zależności (10):

$$\begin{bmatrix} [\lambda_s]_1 \\ [\lambda_s]_2 \\ \vdots \\ [\lambda_s]_m \end{bmatrix} = 4\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} [P_s]_{11} & [P_s]_{12} & \cdots & [P_s]_{1n} \\ [P_s]_{21} & [P_s]_{22} & \cdots & [P_s]_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [P_s]_{m1} & [P_s]_{m2} & \cdots & [P_s]_{mn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [V_s]_1 \\ [V_s]_2 \\ \vdots \\ [V_s]_m \end{bmatrix} \quad (10)$$

gdzie:

$[P_s]_{ij}$ – macierz współczynników potencjałowych obliczanych przez analogię do równania (7), (8) i (9), między segmentami przewodu i a przewodem j , $[\lambda_s]_{ij}$ – poszukiwany wektor gęstości liniowej wyindukowanych ładunków segmentów przewodów,

$[V_s]_{ij}$ – wektor napięć między segmentami przewodu i a przewodem j .

Całkowite natężenie pola elektrycznego E_T w punkcie obserwacji P dla wszystkich m przewodów wyznacza się z zasady superpozycji [1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 11, 12]:

$$E_T(P) = \sum_{j=1}^m \frac{1}{4\pi\epsilon_0} [I_3 - I_4] \quad (11)$$

gdzie:

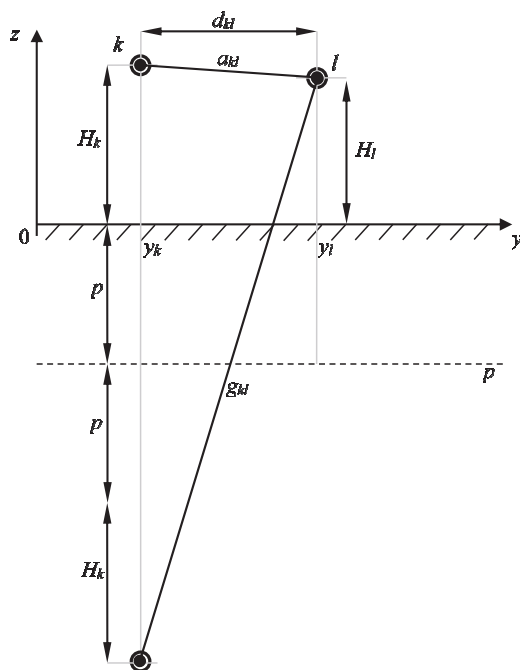
$$I_3 = \sum_{i=1}^n \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \lambda_{sn}(r') \frac{((x-x')\mathbf{a}_x + (y-y')\mathbf{a}_y + (z-z')\mathbf{a}_z) \cosh\left(\frac{x'}{\alpha}\right)}{\left(\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}\right)^3} dx' \quad (12)$$

$$I_4 = \sum_{i=1}^n \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \lambda_{sn}(r') \frac{((x-x')\mathbf{a}_x + (y-y')\mathbf{a}_y + (z+z')\mathbf{a}_z) \cosh\left(\frac{x'}{\alpha}\right)}{\left(\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z+z')^2}\right)^3} dx' \quad (13)$$

2.2. Pole magnetyczne

Przed wyznaczeniem rozkładu natężenia pola magnetycznego należy wyznaczyć impedancje własne oraz wzajemne wszystkich przewodów w układzie, co umożliwi wyznaczenie prądów w przewodach odgromowych.

Do obliczania impedancji własnych i wzajemnych przewodów wykorzystuje się zmodyfikowaną metodę odbić zwierciadlanych, która pozwala zastąpić skomplikowaną metodę Carsona [5, 6, 13]. Odbicie zwierciadlane następuje od fikcyjnej płaszczyzny przewodzącej, umieszczonej na głębokości p o wartości zespolonej (rys. 3). Wysokości zawieszenia rozpatrywanych przewodów oznaczono symbolami H_k , H_l , natomiast d_{kl} jest odległością poziomą między tymi przewodami.



Rys. 3. Geometria przewodników k i l w płaszczyźnie y, z

Impedancję własną przewodu k wyznacza się zależności:

$$Z_{kk} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2(h_k + p)}{r_k} \quad (14)$$

gdzie:

h_k – wysokość przewodu odgromowego

r_k – promień przewodu k ,

μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni,

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0\gamma}} \quad (15)$$

gdzie:

γ – konduktywność gruntu,

ω – pulsacja.

Impedancje wzajemne między przewodami k i l oblicza się z zależności:

$$Z_{kl} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{g_{kl}}{a_{kl}} \quad (16)$$

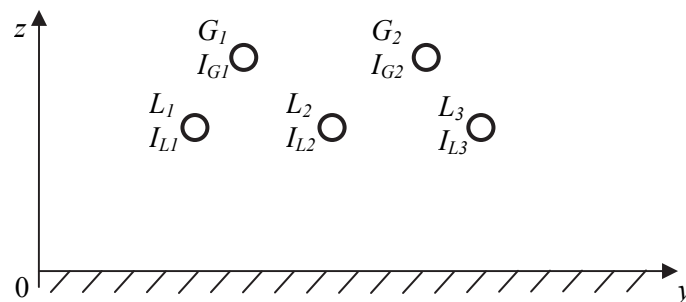
$$g_{kl} = \sqrt{(H_k + H_l + 2p)^2 + d_{kl}^2} \quad (17)$$

$$a_{kl} = \sqrt{(H_k - H_l)^2 + d_{kl}^2} \quad (18)$$

W przypadku impedancji własnej i wzajemnej przewodów k i l , w układzie z większą liczbą przewodów niż 2 obliczenia wykonuje się w sposób analogiczny. Znając impedancje własne i wzajemne, liczbę przewodów odgromowych i fazowych, geometrię układu oraz fazory prądów roboczych można obliczyć prądy w przewodach odgromowych.

Na rysunku 4 przedstawiono schematycznie przykład linii, składającej się z 3 przewodów roboczych, oznaczonych L_1, L_2, L_3 z fazorami prądów I_1, I_2, I_3 oraz dwóch przewodów odgromowych oznaczonych G_1, G_2 . Zakłada się ponadto, że znana jest geometria układu. Prądy w przewodach odgromowych I_{G1}, I_{G2} wyznacza się z zależności (19):

$$\begin{bmatrix} I_{G1} \\ I_{G2} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z_{G1G1} & Z_{G1G2} \\ Z_{G2G1} & Z_{G2G2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_{G1L1} & Z_{G1L2} & Z_{G1L3} \\ Z_{G2L1} & Z_{G2L2} & Z_{G2L3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ I_{L3} \end{bmatrix} \quad (19)$$



Rys. 4. Przykład linii wieloprzewodowej

W celu obliczenia natężenia pola magnetycznego w punkcie obserwacji $P(x, y, z)$ wykorzystuje się prawo Biota Savarta:

$$\mathbf{B}(P) = \mu_0 \left(\int_{c_{si}} \frac{\mathbf{I}(l) d\mathbf{l}'_{si} \times \mathbf{R}(l)}{4\pi |\mathbf{R}_{si}(l)|^2} \right) \quad (20)$$

gdzie:

$\mathbf{I}(l)$ – prąd,

$\mathbf{R}_{si}(l)$ – wektor odległości punktu obserwacji od punktu źródłowego,

$\mathbf{R}(l)$ – wektor jednostkowy w kierunku $\mathbf{R}_{si}(l)$.

Natężenie pola magnetycznego w dowolnym punkcie $P(x, y, z)$ nad powierzchnią ziemi wyznacza się z zależności:

$$\mathbf{H}(x, y, z) = \frac{I}{4\pi} \left[\int_{-d/2}^{d/2} \frac{((x-x')\mathbf{a}_x + (y-y')\mathbf{a}_y + (z-z')\mathbf{a}_z) \cosh\left(\frac{x'}{\alpha}\right)}{\left(\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}\right)^3} dx' \right] \quad (21)$$

Wypadkowe natężenie pola magnetycznego m przewodów linii elektroenergetycznej jest równe sumie geometrycznej składowych x, y, z [1, 5, 6, 8, 12]:

$$H_T = \sqrt{\sum_{j=1}^m H_x^2 + \sum_{j=1}^m H_y^2 + \sum_{j=1}^m H_z^2} \quad (22)$$

3. REDUKCJA NATĘŻEŃ PÓL Z WYKORZYSTANIEM ALGORYTMÓW OPTYMALIZACYJNYCH

Optymalizacja rozkładu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego została wykonana przy pomocy algorytmu genetycznego GA oraz roju cząstek PSO. Algorytmy zostały zaimplementowane w programie Matlab.

Obliczenia wykonano w przestrzeni trójwymiarowej wokół napowietrznej linii elektroenergetycznej w połowie długości przęsła (w miejscu maksymalnego zwisu), w odległości od 1 metra do 25 metrów mierzonej poprzecznie do osi linii (wzdłuż osi y) oraz dla różnych wartości wysokości z zakresu od 1 metra do 6 metrów nad powierzchnią ziemi.

Dla powyższych założeń sformułowano funkcję celu, polegającą na minimalizacji wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w rozpatrywanym obszarze.

Parametry algorytmów zostały dobrane na podstawie przeglądu literatury i wstępnych wielowariantowych badań. Liczba populacji dla algorytmu genetycznego jest równa 40, współczynnik krzyżowania wynosi 0,85, natomiast współczynnik mutacji 0,07. Algorytm roju cząstek charakteryzuje się następującymi parametrami: rój składa się z 40 cząstek, współczynniki przyśpieszenia wynoszą 1,2, a bezwładność maleje liniowo od 0,9 do 0,4.

Zmienne decyzyjne reprezentowane są przez parametry geometryczne linii jak: odległości między przewodami fazowymi oraz odległość między przewo-

dami odgromowymi a osią słupa, wysokość zawieszenia przewodów fazowych, wysokość zawieszenia przewodów odgromowych, wysokość przewodów fazowych w połowie rozpiętości przęseł, wysokość przewodów odgromowych w połowie rozpiętości przęseł. Wprowadzono dodatkowo ograniczenia dla wymienionych parametrów, wynikające z dopuszczalnych wartości naprężeń mechanicznych przewodów i minimalnych odległości między nimi.

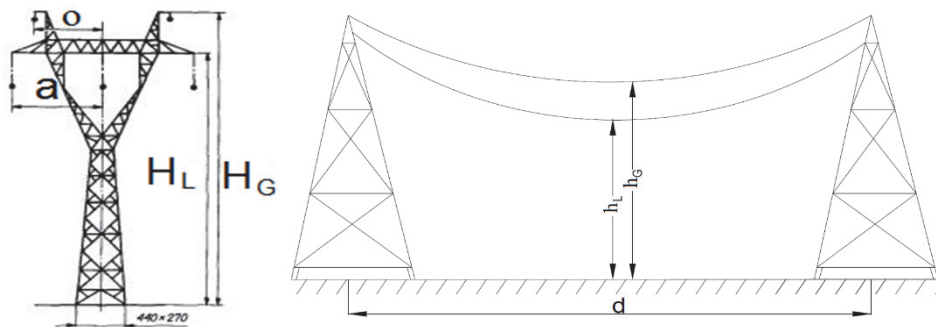
Obliczenia wykonano dla pojedynczego przęsła linii przy następujących założeniach: ziemia jest środowiskiem jednorodnym i półnieskończonym, układ prądów i napięć jest symetryczny [4, 5, 6].

4. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

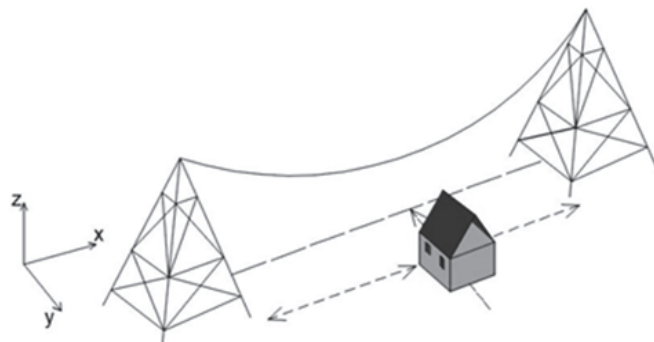
Obliczenia wykonano dla napowietrznej linii elektroenergetycznej o napięciu znamionowym 220 kV (rys. 5), przewodach fazowych typu AFL-8 525 mm² oraz przewodach odgromowych AFL-1,7 70 mm², wartość skuteczna prądu w przewodach fazowych o wartości 570 A. Długość przęsła $d = 400$ m. Wybrany słup typu H52 charakteryzuje się następującymi parametrami: odległość między przewodami fazowymi $a = 7,6$ m, wysokość zawieszenia przewodów fazowych $H_L = 26,5$ m, wysokość przewodów fazowych w połowie rozpiętości przęseł $h_L = 6,7$ m, wysokość zawieszenia przewodów odgromowych $H_G = 30,6$ m, wysokość przewodów odgromowych w połowie rozpiętości przęseł $h_G = 10,8$ m, odległość między przewodami odgromowymi a osią przęsła $o = 5,6$ m.

Zakłada się, że budynek mieszkalny o wysokości 6 m znajduje się w pobliżu linii elektroenergetycznej (rys. 6). Natężenie pola elektrycznego i magnetycznego obliczono na różnych wysokościach, na przedniej ścianie budynku (1 – 6 m), umiejscawianego w odległościach od 1 do 25 metrów poprzecznie od osi przęsła.

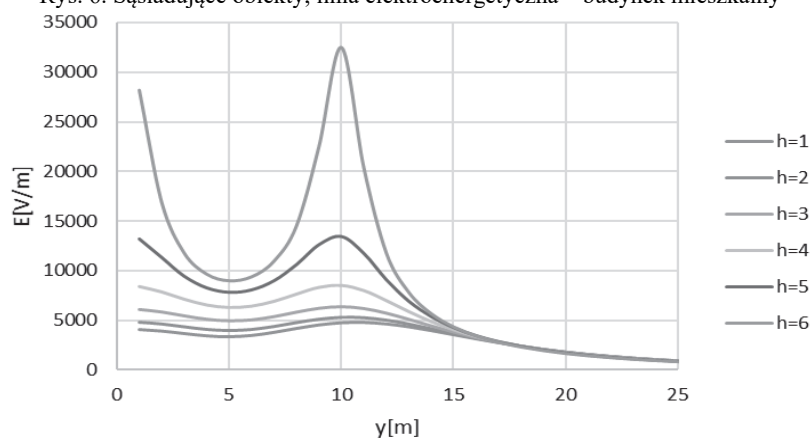
Rozkłady natężenia pola elektrycznego oraz magnetycznego przedstawiono na rys. 7 i rys. 8.



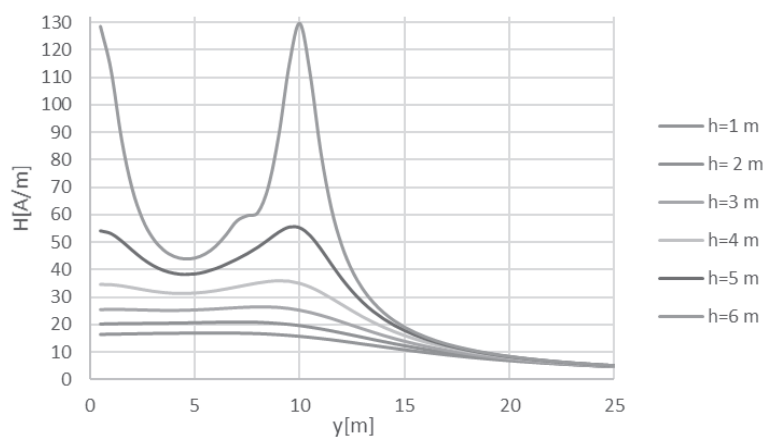
Rys. 5. Geometria linii elektroenergetycznej 220 kV



Rys. 6. Sąsiadujące obiekty, linia elektroenergetyczna – budynek mieszkalny



Rys. 7. Rozkład natężenia pola elektrycznego przed optymalizacją



Rys. 8. Rozkład natężenia pola magnetycznego przed optymalizacją

Maksymalne wartości skuteczne natężenia pola elektrycznego $E_{max} = 30306,6$ V/m i magnetycznego $H_{max} = 128$ A/m zostały obliczone na wysokości $h = 6$ metrów, w odległości 10 m od osi przęsła. W tych i innych punktach, które można odczytać z rys. 7 i rys. 8, dopuszczalne poziomy natężeń pól, dla obszarów zamieszkałych, zostały przekroczone [14].

W obszarze jak wyżej, postanowiono przeprowadzić optymalizację w celu redukcji wartości natężeń pól. Optymalizację wykonano dla następujących założeń:

- $6 \text{ m} \leq a \leq 9 \text{ m}$,
- $18 \text{ m} \leq H_L \leq 26,5 \text{ m}$,
- $6 \text{ m} \leq h_L \leq 19 \text{ m}$,
- $4 \text{ m} \leq o \leq 7 \text{ m}$,
- $28 \text{ m} \leq H_G \leq 34 \text{ m}$,
- $21 \text{ m} \leq h_G \leq 23 \text{ m}$.

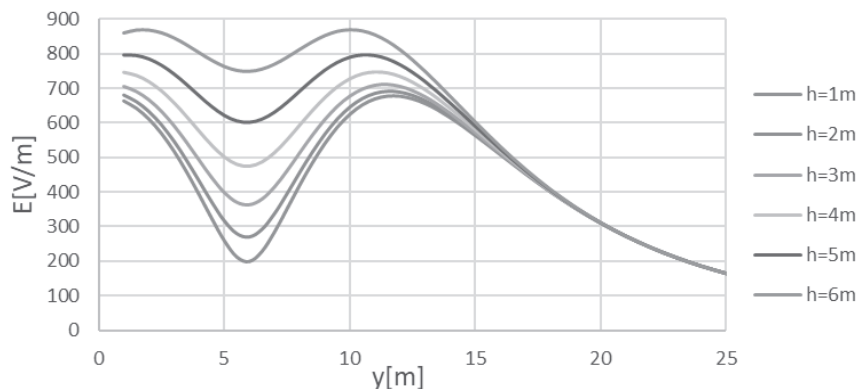
W tabeli 1 przedstawiono parametry linii przed i po optymalizacji. Optymalizację przeprowadza się wykorzystując algorytm genetyczny i roju cząstek, a następnie porównuje wyniki. Maksymalna wartość skuteczna natężenia pola elektrycznego obliczona przy użyciu algorytmu genetycznego $E_{max} = 867,1$ V/m, natomiast dla pola magnetycznego $H_{max} = 9,9$ A/m. Prąd wzbudzony w przewodach odgromowych jest równy $I_G = 118,1$ A. Dla algorytmu roju cząstek maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego po optymalizacji wyniosła $E_{max} = 868,8$ V/m, natomiast dla pola magnetycznego $H_{max} = 9,6$ A/m, przy prądach wzbudzonych w przewodach odgromowych $I_G = 62,1$ A.

Tabela 1. Porównanie wyników obliczeń.

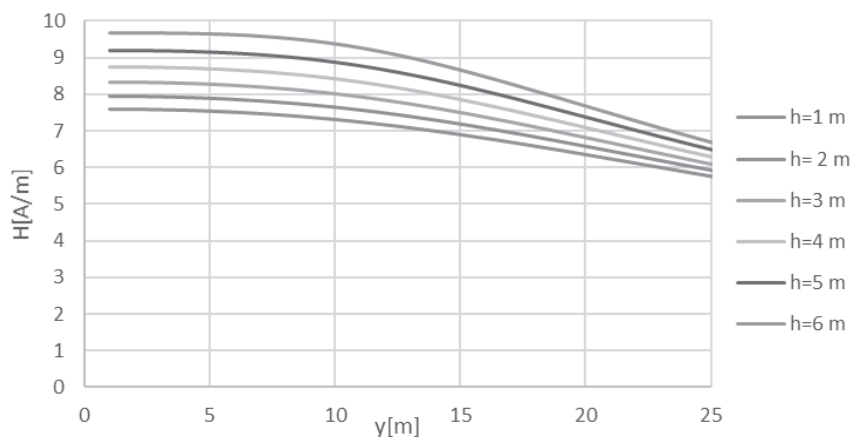
	o [m]	a [m]	h_L [m]	H_L [m]	h_G [m]	H_G [m]	E_{max} [V/m]	$ I_{G1} \approx I_{G2} $ [A]	H_{max} [A/m]
Przed optymalizacją	5,6	7,6	6,7	26,5	10,8	30,6	32438,6	118,1	128,0
Algorytm Genetyczny	4,3	6,1	18,5	26,1	22,8	30,2	867,1	60,7	9,9
Algorytm roju cząstek	4,2	6,0	18,9	26,0	22,9	30,0	868,8	62,1	9,6

Rozkłady natężenia pola elektrycznego i magnetycznego uzyskane dla obu metod optymalizacyjnych są podobne i zostały przedstawione na rys. 9 i rys. 10.

Czas wykonywania optymalizacji za pomocą algorytmu genetycznego wynosił 1262,18 sekund, podczas gdy algorytm PSO wykonywał obliczenia w czasie 448,98 sekund. W wyniku optymalizacji zmniejszono maksymalną wartość skuteczną natężenia pola elektrycznego i magnetycznego do poziomów dopuszczalnych w całym rozpatrywanym obszarze [14].



Rys. 9. Rozkład natężenia pola elektrycznego po optymalizacji



Rys. 10. Rozkład natężenia pola magnetycznego po optymalizacji

5. WNIOSKI

Celem prowadzonych badań była analiza rozkładu pola elektromagnetycznego w otoczeniu napowietrznych linii elektroenergetycznych oraz określenie potencjalnej przydatności wykorzystania metod optymalizacyjnych w celu redukcji wartości natężeń pola elektrycznego i magnetycznego. Założenia zostały zrealizowane z wykorzystaniem dwóch metod optymalizacyjnych wykorzystujących kolejno algorytm genetyczny (GA) oraz metodę roju cząstek (PSO). Wykorzystując te metody dokonano analizy rozkładu pól elektrycznego i magnetycznego dla wybranego przypadku. Parametrami modyfikowanymi podczas obliczeń były wyłącznie wielkości opisujące geometrię linii elektroenergetycznej. Zarówno w przypadku metody GA jak i PSO otrzymane wyniki były do siebie zbliżone, a wyznaczone wartości maksymalne natężeń pól zostały znacząco

zredukowane poniżej progów wyszczególnionych w rozporządzeniu. Na tej podstawie można stwierdzić, że korelacja pomiędzy parametrami geometrycznymi linii oraz wartością natężenia pola elektromagnetycznego jest bardzo duża. Należy w takim przypadku podczas projektowania nowych instalacji lub też modyfikowania istniejących uwzględnić ten fakt jako jeden z parametrów odpowiedzialnych za bezpieczeństwo osób stale przebywających w otoczeniu linii elektroenergetycznych, a w szczególności linii najwyższych napięć. Zastosowane metody optymalizacyjne mogą być przydatnym narzędziem inżynierskim (projektowanie) oraz naukowym do oceny wpływu innych czynników na rozkład pola elektromagnetycznego, m. in. dodatkowych przewodów ekranujących, zmiany kolejności faz lub uwzględnienia zastosowania przewodów wiążkowych.

LITERATURA

- [1] Adel Z. El Dein, Optimal Arrangement of Egyptian Overhead Transmission Lines' Conductors Using Genetic Algorithm, *Electrical Engineering*, 2013, pp. 1049–1059.
- [2] Adel Z. El Dein, Parameters affecting the charge distribution along overhead transmission lines' conductors and their resulting electric field, *Electrical Power and Energy Systems*, 2014, pp. 198–210.
- [3] Amiri R., Hadi H., Marich M. The influence of sag in the electric field calculation around high voltage overhead transmission lines. In: *Conference of Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Kansas City, Missouri USA, 2006*, pp. 206–209.
- [4] Foryś P., Numerical optimization with particle swarms, *Proc. of 10th International Conference on Numerical Methods in Continuum Mechanics, Zilina, August 23–26, 2005, (CD-ROM)*, 13.
- [5] Król K., Machczyński W., Optimization of electric and magnetic field intensities in proximity of power lines using Genetic and Particle Swarm Algorithms, *Archives of Electrical Engineering*, 2018, Vol.67, pp. 829–843.
- [6] Król K., Budnik K., Jarek P., Calculation of electric and magnetic field intensity under power line with taking into account conductor sag, *ITM Web of Conferences*, 2018, vol. 19 pp. 1–2.
- [7] Machczyński W., Zastosowanie "charge simulation method" (CSM) w analizie zagadnień uziomowych, *XII Seminarium z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, Gliwice-Wiśła, 1989*, pp. 278–286.
- [8] Krakowski M., *Obwody ziemnopowrotne*. WNT, Warszawa 1979.
- [9] Fereidouni, A., Vahidi, B., Shishehgar F., Induced current calculation in embryo due to high voltage transmission line, *Science International (Lahore)*, 2015, vol. 27, pp.1855–1859.
- [10] Fereidouni, A., Vahidi, B., Shishehgar, F., Hosseini Mehr T., Tahmasbi M., Human body modeling in the vicinity of high voltage transmission lines, *Science International (Lahore)*, 2014, vol. 26, pp. 1017–103.

- [11] Rynkowski A., Zarys metodyki i przykłady obliczeń oraz oceny oddziaływania indukcyjnego linii napowietrznych 400 kV na gazociągi przesyłowe, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, Nr 56, 2017, pp. 83–87.
- [12] Ranković A., Novel Multi-Objective Optimization Method of Electric and Magnetic Field Emissions from Double-Circuit Overhead Power Line, European Transactions on Electrical Power, vol. 27, no. 2, pp. 2243, 2017.
- [13] Budnik K., Machczyński W., Contribution to studies on calculation of the magnetic field under power lines, European Transactions on Electrical Power ETPE, 2006, 16, pp. 345–364.
- [14] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów, Dz.U. 2003 nr 192 poz. 1883.

REDUCTION OF ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS OF POWER TRANSMISSION LINE

The paper presents optimization of line parameters in order to reducing the intensity of the electric and magnetic fields with the use of genetic algorithm (GA) and particle swarm optimization (PSO). Simulations of the electric and magnetic field intensities have been performed for different heights on a wall of a building located in different distances from the power line.

(Received: 26.02.2019, revised: 18.03.2019)