

Analiza pola elektrycznego i magnetycznego wokół linii elektroenergetycznych i wybranych urządzeń elektroenergetycznych

Michał Zeńczak

Linie elektroenergetyczne oraz stacje elektroenergetyczne są przyczyną występowania pól elektromagnetycznych o częstotliwości 50 Hz. Problem szkodliwości tych pól dla organizmów żywych nie jest do końca wyjaśniony, chociaż dość dużo zjawisk związanych z oddziaływaniem tych pól na przyrodę ożywioną jest dość dobrze poznanych i przeanalizowanych [1, 2, 3]. Dlatego na obecnym etapie rozwoju wiedzy ważnym problemem jest identyfikacja pola elektromagnetycznego na drodze pomiarowej lub obliczeniowej w celu oceny oddziaływania danego obiektu elektroenergetycznego na środowisko [4].

Dla 50 Hz spełniony jest warunek quasi-stacjonarności i obie składowe: elektryczną (PE) i magnetyczną (PM) można rozpatrywać osobno. Rozkłady pól pod liniami są zagadnieniem dość dobrze znanym [1, 2, 3, 4]. Dokładna znajomość natężenia PE i PM pod liniami elektroenergetycznymi oraz na stacjach elektroenergetycznych jest bardzo ważna z praktycznego punktu widzenia. Przede wszystkim chodzi o oddziaływanie PE i PM na środowisko naturalne, w tym na człowieka. Poza tym znajomość natężeń pól jest bardzo ważna, jeśli chodzi o zagospodarowanie terenów bezpośrednio pod liniami czy w ich pobliżu. Podobnej weryfikacji wymagają tereny sąsiadujące ze stacjami elektroenergetycznymi i bezpośrednio na stacjach w celu ochrony pracowników.

Pole elektryczne wokół linii elektroenergetycznej

Istnieje wiele algorytmów do wyznaczania natężenia PE pod liniami. Jednym z nich jest algorytm wykorzystujący metodę odbić zwierciadlanych i zasadę superpozycji. Przyjmuje się następujące założenia:

- przewody są nieskończenie długimi walcami prostoliniowymi, równoległymi względem siebie i ziemi;
- przenikalność dielektryczna powietrza jest równa przenikalności próżni;
- przewodność powietrza jest równa zeru;
- nie uwzględnia się wpływu sąsiednich mas przewodzących;
- odległości pomiędzy poszczególnymi przewodami, jak również między każdym przewodem i ziemią, są bardzo duże w porównaniu z promieniem danego przewodu lub wiązki przewodów.

Przewody fazowe mają pewien potencjał względem ziemi oraz przepływa przez nie prąd roboczy. Właśnie napięcie decyduje głównie o wartości natężenia PE, natomiast prąd o wartości natężenia PM. Na rozkłady natężeń PE i PM pod liniami

Streszczenie: Wokół linii elektroenergetycznych powstają pola elektryczne i magnetyczne o częstotliwości 50 Hz. Pola elektryczne powstają wskutek istnienia na przewodach nierównoważonych ładunków elektrycznych. Natomiast pola magnetyczne są spowodowane przepływem prądów. W artykule przedstawione są rozkłady pola elektrycznego i magnetycznego wokół linii elektroenergetycznych dla różnych konfiguracji prowadzenia przewodów oraz wokół innych urządzeń elektroenergetycznych. Otrzymane wartości natężeń pól skonfrontowane są z obowiązującymi przepisami.

ANALYSIS OF ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS NEAR POWER TRANSMISSION LINES AND OTHER ELECTRICAL POWER EQUIPMENT

Abstract: There are electric and magnetic fields of frequency 50 Hz near power transmission lines. Electric fields are caused by unbalanced electrical charge, while magnetic fields are caused by flowing currents. The paper presents analysis of electric and magnetic fields near power transmission lines for different configuration of wires. The results of calculations are compared to regulations.

ma wpływ także konfiguracja prowadzenia przewodów. Ogólny układ przewodów trójfazowej linii elektroenergetycznej przedstawiono na rys. 1.

Z powodu przesunięcia w czasie napięć na poszczególnych przewodach fazowych PE pod linią jest superpozycją dwóch pól wirujących w przeciwnych kierunkach z prędkością kątową ω :

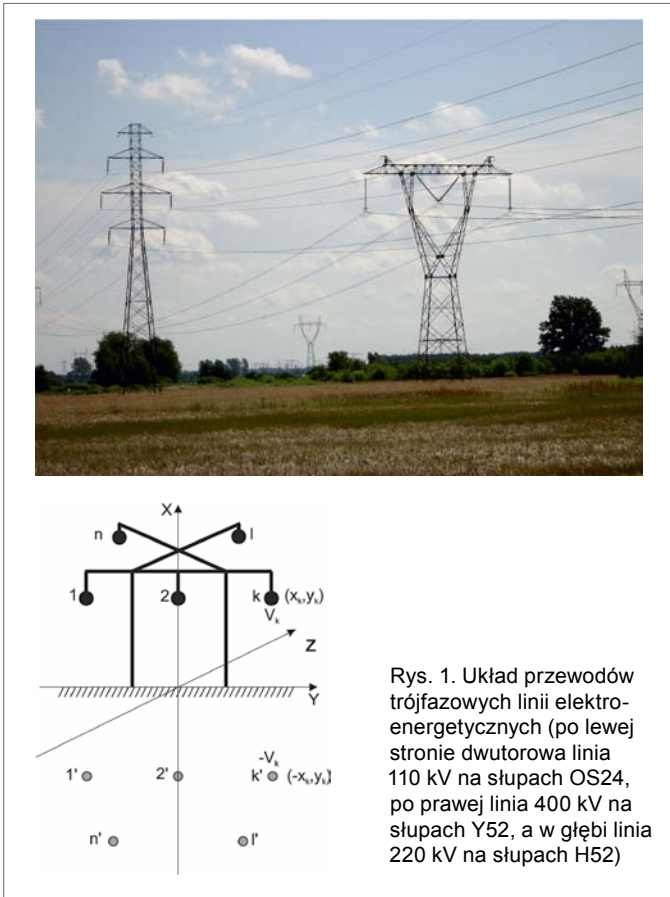
$$\underline{E}(x, y, t) = \sqrt{2}\underline{E}_1(x, y)e^{j\omega t} + \sqrt{2}\underline{E}_2(x, y)e^{-j\omega t} \quad (1)$$

gdzie:

$$\underline{E}_1(x, y) = 0,5[\underline{E}_y(x, y) + j\underline{E}_x(x, y)] = E_1(x, y)e^{j\beta_1(x, y)} \quad (2)$$

$$\underline{E}_2(x, y) = 0,5[\underline{E}_y^*(x, y) + j\underline{E}_x^*(x, y)] = E_2(x, y)e^{j\beta_2(x, y)} \quad (3)$$

gdzie: \underline{E}_x^* , \underline{E}_y^* – liczby sprzężone do \underline{E}_x , \underline{E}_y (składowa pionowa (OX) i pozioma (OY)).



Rys. 1. Układ przewodów trójfazowych linii elektroenergetycznych (po lewej stronie dwutorowa linia 110 kV na słupach OS24, po prawej linia 400 kV na słupach Y52, a w głębi linia 220 kV na słupach H52)

Wektor natężenia pola elektrycznego zakreśla w ciągu jednego okresu elipsę o półosi dłuższej:

$$E_a(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2}} \max_{t \in (0, T)} E(x, y, t) \quad (4)$$

i półosi krótszej:

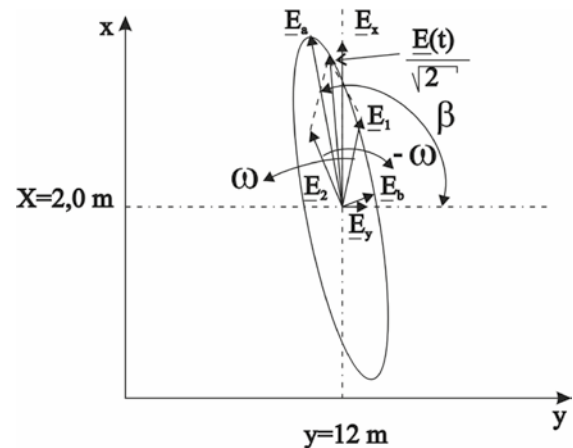
$$E_b(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2}} \min_{t \in (0, T)} E(x, y, t) \quad (5)$$

Kąt $\beta(x, y)$ wyznacza położenie półosi dłuższej elipsy względem poziomu (oś OY):

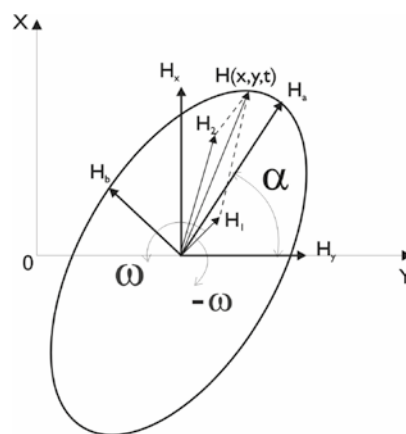
$$\beta(x, y) = 0,5[\beta_1(x, y) + \beta_2(x, y)] \quad (6)$$

Poszczególne przykładowe składowe wektora natężenia PE przedstawiono na rys. 2. W celu jednoznacznego określenia stanu PE w danym punkcie przestrzeni wystarczą wartości skuteczne $E_a(x, y)$, $E_b(x, y)$ oraz wartość kąta $\beta(x, y)$. W celu stwierdzenia ewentualnego zagrożenia wystarczy podać przebieg składowej E_a , ponieważ ma ona wartość największą. Wektor E_a jest praktycznie prostopadły do powierzchni ziemi z odchyleniem do około $\pm 10^\circ$.

W przypadkach rzeczywistych, które najczęściej odbiegają od powyższego modelu, obliczenia są obciążone dość dużym błędem. Wówczas można stworzyć dokładny model do obliczeń numerycznych (w fazie projektowania) lub posłużyć się pomiarami (na obiekcie istniejącym).



Rys. 2. Wektory składowe natężenia PE pod linią trójfazową



Rys. 3. Składowe wektora natężenia PM pod linią trójfazową

Pole magnetyczne wokół linii elektroenergetycznej

Przy obliczaniu PM aktualne są wszystkie założenia wykorzystywane przy polu elektrycznym z tym, że dodatkowo zakłada się:

- przenikalność magnetyczna powietrza i ziemi jest taka sama jak próżni;
- pomija się wpływ przewodów odgromowych.

Jeśli przez przewód o współrzędnych x_k, y_k płynie prąd I_k , to wartość wektora natężenia PM H w punkcie o współrzędnych x, y można wyliczyć analogicznie jak dla pola elektrycznego. Wartości skuteczne H_a, H_b oraz kąt α wystarczają do określenia stanu pola w danym punkcie przestrzeni. Największą wartość osiąga składowa H_a i dlatego tylko ona będzie przedstawiona na wykresie. Na rys. 3 przedstawione są składowe wektora natężenia PM.

W przypadku PM w rzeczywistych sytuacjach konfiguracja pola odbiega od modelu i należy skonstruować dokładny model numeryczny lub posłużyć się pomiarami. Z uwagi na to, że większość materii ożywionej i nieożywionej w skali makro nie wykazuje właściwości ferromagnetycznych, wektor natężenia pola magnetycznego przenika przez tę materię praktycznie niezakłócony, więc jego nachylenie względem ziemi przybiera praktycznie wszystkie wartości i PM jest mniej zaburzone przez otaczające obiekty.

Przepisy dotyczące ochrony przed PE i PM

Obecnie obowiązuje 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. nr 192, poz. 1883, Warszawa, 14 listopada 2003 r.) [5]. Według tego rozporządzenia wartości natężenia PE 50 Hz w środowisku nie powinny przekraczać 10 kV/m. Na obszarach przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową natężenie PE nie powinno przekraczać 1 kV/m.

Dopuszczalna wartość natężenia PM 50 Hz w środowisku wynosi 60 A/m. Taka sama wartość dopuszczalna jest na terenach przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową.

W otoczeniu linii elektroenergetycznych pomiary kontrolne PE należy wykonywać nad powierzchnią ziemi lub nad innymi powierzchniami, na których mogą przebywać ludzie, w szczególności nad dachami, tarasami, balkonami, podestami – na wysokości 2 m.

Pomiary kontrolne PM w otoczeniu linii elektroenergetycznych należy wykonywać w pionach pomiarowych, na wysokościach od 0,3 do 2 m nad powierzchnią ziemi lub innymi powierzchniami, na których mogą przebywać ludzie, w szczególności dachami, tarasami, balkonami, podestami. Podczas pomiarów kontrolnych należy nadać osi pomiarowej sondy takie położenie w stosunku do stacji i linii elektroenergetycznej, aby przyrząd pomiarowy wskazywał maksymalne wartości wielkości mierzonej w danym punkcie.

Przy pomiarach uwzględnia się poprawki pomiarowe, umożliwiające uwzględnienie parametrów pracy instalacji wytwarzających pola najbardziej niekorzystnych z punktu widzenia oddziaływania na środowisko.

Pomiary pól wykonuje się w otoczeniu stacji i linii elektroenergetycznych, jeżeli ich napięcie znamionowe jest równe lub wyższe niż 110 kV.

Obecnie pracowników zatrudnionych w pobliżu źródeł pól elektromagnetycznych obowiązuje Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz.U. nr 217, 23.12.2002, poz. 1833) [6].

W otoczeniu źródeł pól elektromagnetycznych powinny być wyznaczone i oznakowane, zgodnie z Polską Normą, obszary występowania silnych pól elektromagnetycznych jako zasięg trzech stref ochronnych:

- niebezpiecznej – rozumianej jako obszar, w którym przebywanie pracowników jest zabronione;
- zagrożenia – rozumianej jako obszar, w którym dopuszczone jest przebywanie pracowników zatrudnionych przy źródłach przez czas ograniczony zgodnie z zasadami podanymi poniżej;
- pośredniej – rozumianej jako obszar, w którym dopuszczone jest przebywanie pracowników zatrudnionych przy źródłach w ciągu całej zmiany roboczej.

Obszar poza zasięgiem stref ochronnych jest obszarem strefy bezpiecznej.

Wyróżnia się trzy graniczne wartości natężenia pola elektrycznego $E_0(f)$, $E_1(f)$, $E_2(f)$ i magnetycznego $H_0(f)$, $H_1(f)$, $H_2(f)$ o ogólnym działaniu na organizm człowieka, określone w poszczególnych zakresach częstotliwości:

- $E_0(f)$ i $H_0(f)$ – natężenia pól o częstotliwości f , rozgraniczające strefę pośrednią od strefy bezpiecznej;

- $H_1(f)$ i $H_1(f)$ – natężenia pól o częstotliwości f , rozgraniczające strefę zagrożenia od strefy pośredniej;

- $E_2(f)$ i $H_2(f)$ – natężenia pól o częstotliwości f , rozgraniczające strefę niebezpieczną od strefy zagrożenia.

Dla 50 Hz obowiązują następujące wartości:

$E_0(f) = 5 \text{ kV/m}$	$E_1(f) = 10 \text{ kV/m}$	$E_2(f) = 20 \text{ kV/m}$
$H_0(f) = 66,67 \text{ A/m}$	$H_1(f) = 200 \text{ A/m}$	$H_2(f) = 2000 \text{ A/m}$

Wartość dozy dopuszczalnej dla PE 50 Hz wynosi $D_{dE}(f) = 800 \text{ (kV/m)}^2 \times h$, a dla PM 50 Hz: $D_{dH}(f) = 0,32 \text{ (kA/m)}^2 \times h$.

W strefie zagrożenia ekspozycja powinna spełniać jednocześnie następujące warunki:

- $D_E(f) \leq D_{dE}(f)$,

- $D_H(f) \leq D_{dH}(f)$,

- $W \leq 1$,

gdzie:

$D_E(f)$ – doza rzeczywista pola elektrycznego o częstotliwości f ;

$D_H(f)$ – doza rzeczywista pola magnetycznego o częstotliwości f ;

W – wskaźnik ekspozycji.

Przykładowe rozkłady natężeń pól

Linie elektroenergetyczne o napięciach 110 kV, 220 kV i 400 kV charakteryzują się dużą różnorodnością, jeśli chodzi o konstrukcję słupów i wynikającą z tego dużą różnorodnością konfiguracji prowadzenia przewodów. Są jednak parametry wynikające z przepisów, które wpływają na poziomy natężeń pól. Są to najwyższe napięcia robocze linii oraz minimalne wysokości przewodów nad ziemią, które przedstawione są w tabeli 1. Wartości te podane są według obowiązującej normy [7].

Minimalne odległości pomiędzy przewodami fazowymi też wynikają z normy [7], ale do obliczeń przyjmuje się odległości wynikające z danej konstrukcji słupa. W tabeli 2 przedstawione są konfiguracje typowych linii stosowanych w Polsce: linii 110 kV na słupach przelotowych S24, linii 220 kV na słupach przelotowych H52 oraz linii 400 kV (rys. 1) na słupach przelotowych Y52 (rys. 1), a na rys. 4 przedstawione są wartości natężeń pól dla tych linii 110 kV, 220 kV i 400 kV.

Najistotniejszą wielkością jest wartość największa, która dla linii w układzie płaskim (H52, Y52) występuje minimalnie na zewnątrz poza skrajnymi przewodami. Natomiast dla linii 110 kV wartość największa występuje pod przewodem skrajnym, który znajduje się samotnie po jednej stronie słupa.

Drugą ważną wartością jest szerokość strefy, w której natężenie PE przekracza 1 kV/m. W tej strefie nie wolno stawiać budynków mieszkalnych, szkół, żłobków, przedszkoli itp. Dla rozpatrywanej linii 110 kV odległość ta wynosi ok. 9,5 m w obu kierunkach, czyli szerokość pasa 19 m. Dla linii 220 kV szerokość pasa wynosi ok. 39 m, a dla linii 400 kV szerokość pasa

Tabela 1. Najwyższe napięcia robocze U_{rmax} , odstęp izolacyjny D_{el} i minimalna odległość od powierzchni ziemi H

Linia	Najwyższe napięcie robocze [kV]	D_{el} [m]	$H = 5 + D_{el}$ [m]
110 kV	123	0,85	5,85
220 kV	245	1,70	6,70
400 kV	420	2,80	7,80

Tabela 2. Konfiguracje linii 110 kV, 220 kV i 400 kV			
Przewód	Przekrój przewodu [mm ²]	Odległ. od osi linii [m]	Wysokość nad ziemią wg [1] [m]
Linia 110 kV na słupach serii S24			
L1	240	-2,85	5,85
L2	240	2,85	9,15
L3	240	3,65	5,85
Odgr.	95	0,5	12,15
Linia 220 kV na słupach H52			
L1	525	-7,60	6,70
L2	525	0,00	6,70
L3	525	7,60	6,70
Odgr. 1	70	-5,60	10,80
Odgr. 2	70	5,60	10,80
Linia 400 kV na słupach Y52			
L1	2 × 525 (0,4 m)	-10,30	7,80
L2	2 × 525 (0,4 m)	0,00	7,80
L3	2 × 525 (0,4 m)	10,30	7,80
Odgr. 1	70	-8,20	13,70
Odgr. 2	70	8,20	13,70

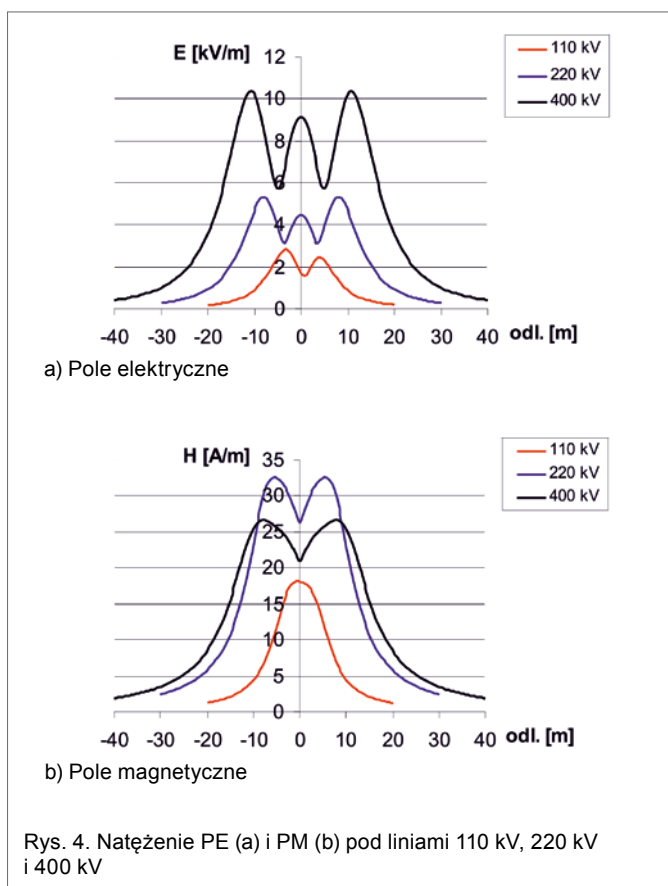
Tabela 3. Konfiguracja dla linii dwutorowej 110 kV na słupach przelotowych serii OS24								
Przewód		Przekrój [mm ²]	Odległość od osi linii [m]	Wysokość nad ziemią [m]				
I tor								
L1		240	-3,0	13,45				
L2		240	-3,8	9,65				
L3		240	-3,0	5,85				
II tor (6 wariantów)								
a	b	c	d	e	f			
L1	L1	L2	L2	L3	L3	240	3,0	13,45
L2	L3	L3	L1	L2	L1	240	3,8	9,65
L3	L2	L1	L3	L1	L2	240	3,0	5,85
Odgr. 1						50	-1,8	16,15
Odgr. 2						50	1,8	16,15

wynosi ok. 60 m. Jeśli jednak wykonuje się pomiary dokładnie, to ze względu na zwis przewodów (zmieniająca się odległość przewodów od ziemi) pas taki ma zmieniającą się szerokość.

Na rysunku 4 b przedstawiono natężenie PM pod tymi samymi liniami. Przez linie 110 kV przepływa prąd 500 A, przez linie 220 kV i 400 kV przepływa 1000 A. Aby obliczyć natężenie pola magnetycznego dla danego prądu obciążenia I_{obc} i należy wykonać proste obliczenia $H_{obc} = H_{500A} \times I_{obc} / 500$.

Rysunek 4 b sugerować może, że pod linią 220 kV występuje większe natężenie PM niż 400 kV. Trzeba jednak pamiętać, że linia 400 kV wyposażona jest w przewód wiązkowy 2 × 525 o obciążalności dwa razy większej niż pojedynczy przewód 525 (tablica 2).

Mimo że brak jest przekonujących dowodów o dużej szkodliwości PE i PM 50 Hz o wartościach nieprzekraczających 10 kV/m, to na pewno warto obniżyć wartości natężeń tych pól.



Rys. 4. Natężenie PE (a) i PM (b) pod liniami 110 kV, 220 kV i 400 kV

W celu obniżenia natężenia PE pod liniami najczęściej stosuje się:

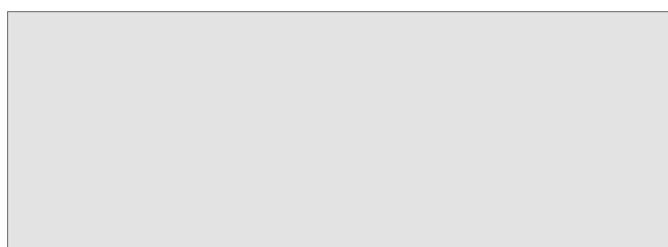
- odpowiedni dobór konfiguracji linii (geometria, linie typu kompakt);
- stosowanie ekranów;
- stosowanie linii wielotorowych lub wielonapięciowych.

Chociaż wartości natężeń PM pod liniami przesyłowymi są przeważnie mniejsze od wartości dopuszczalnych ustalonych przez przepisy, dąży się jednak do ograniczania natężeń PM pod tymi liniami. Stosuje się następujące sposoby:

- odpowiedni dobór konfiguracji linii (geometria, linie typu kompakt);
- stosowanie pętli kompensacyjnych odmagnesowujących;
- stosowanie przewodów skręconych i przeplecionych;
- stosowanie linii wielotorowych lub wielonapięciowych;
- optymalny rozptyw prądów pomiędzy liniami.

Właśnie w liniach dwutorowych bardzo istotna jest kolejność prowadzenia przewodów. W tabeli 3 podane są dane linii dwutorowej 110 kV prowadzonej na słupach przelotowych OS24 (konfiguracja „beczka” rys. 1). Na rys. 5 pokazano natomiast rozkłady natężeń pól elektrycznych i magnetycznych przy płynącym prądzie 500 A w każdym przewodzie fazowym dla różnych kolejności faz. Na rysunku pokazano tylko najbardziej

reklama



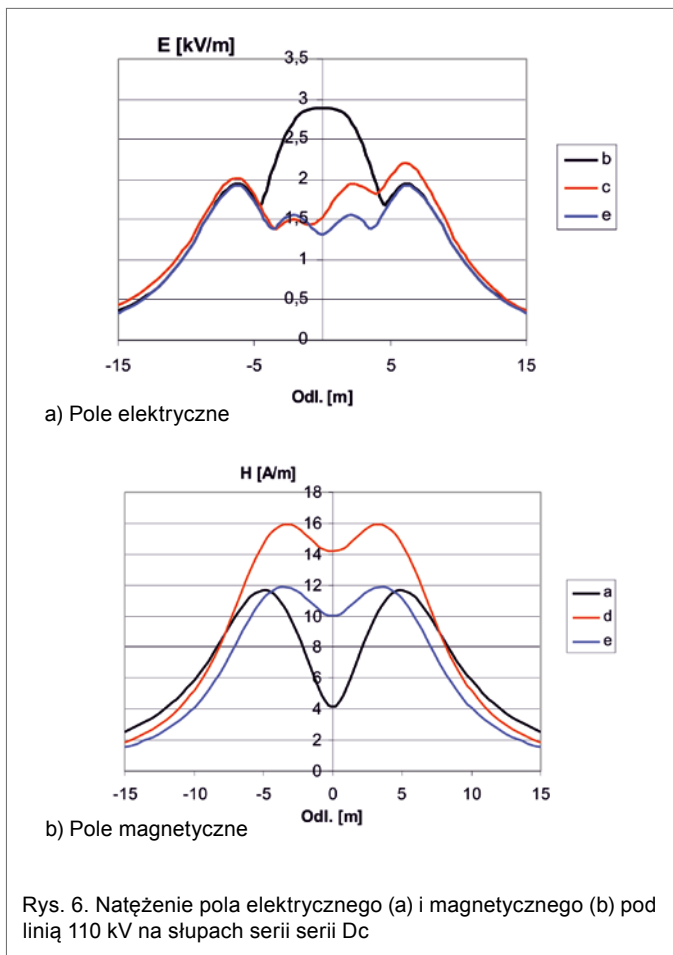
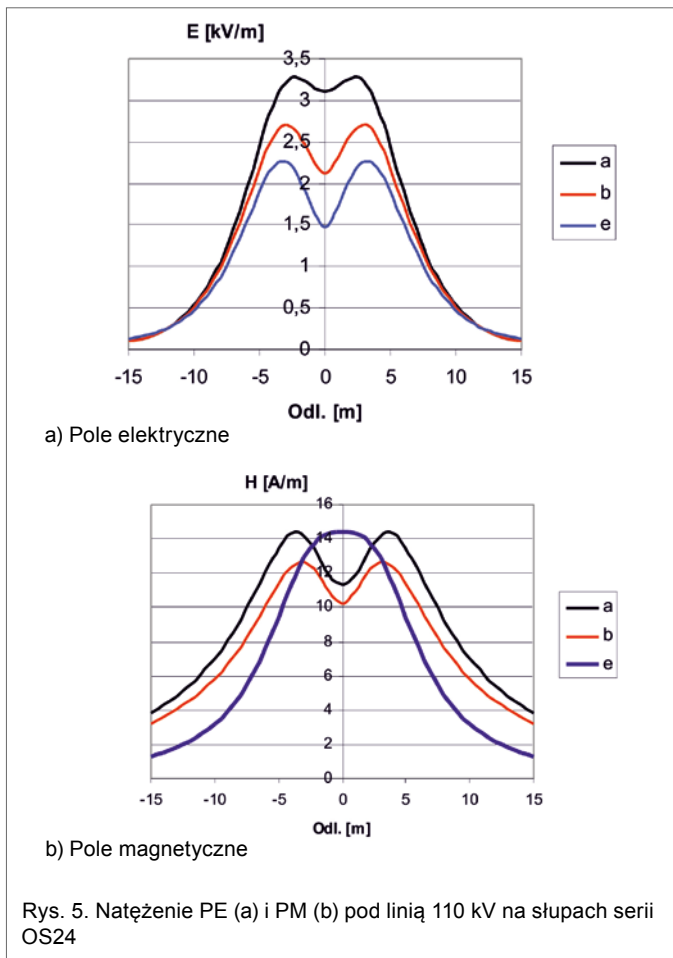


Tabela 4. Konfiguracja dla linii dwutorowej 110 kV na słupach przelotowych serii Dc

Przewód	Przekrój [mm ²]	Odległość od osi linii [m]	Wysokość nad ziemią [m]					
I tor								
L1	240	-4,1	9,05					
L2	240	-5,7	5,85					
L3	240	-2,5	5,85					
II tor (6 wariantów)								
a	b	c	d	e	f			
L1	L1	L2	L2	L3	L3	240	4,1	9,05
L2	L3	L1	L3	L1	L2	240	2,5	5,85
L3	L2	L3	L1	L2	L1	240	5,7	5,85
Odgr. 1						50	-2,0	11,95
Odgr. 2						50	2,0	11,95

charakterystyczne konfiguracje. Natężenie PE jest największe dla konfiguracji (a), kiedy to w obu torach jest ten sam układ przewodów. Najmniejsze wartości występują natomiast, gdy w drugim torze układ przewodów jest odwrócony (e).

Jeszcze lepiej widoczny jest wpływ konfiguracji prowadzenia przewodów w linii dwutorowej 110 kV na słupach przelotowych serii Dc (dwa trójkąty), których konfiguracje przedstawiono w tabeli 4. Na rys. 6 pokazany jest rozkład natężenia pola elektrycznego i magnetycznego przy płynącym prądzie 500 A we wszystkich przewodach fazowych.

Na rys. 6 przedstawiono także tylko najbardziej charakterystyczne konfiguracje. Najmniej korzystna dla PE jest konfiguracja (b), kiedy to przewody fazy L3 obu linii są najbliżej siebie.

Tego typu analizy są bardzo ważne w celu obniżania wartości natężeń pól nie tylko pod liniami, lecz także w innych układach, np. redukcja natężenia PM wokół szyn wyprowadzających energię elektryczną z generatorów w elektrowniach.

Największy wpływ na wartość natężenia PM ma aktualny prąd roboczy urządzenia. Dlatego wykresy rysunków 4 b, 5 b i 6 b podczas eksploatacji linii zmieniają proporcjonalnie swoje wartości praktycznie od 0 do wartości odpowiadającej maksymalnemu prądowi obciążenia linii. Natężenie PE z rys. 4 a, 5 a i 6 a zmienia się natomiast proporcjonalnie do napięcia w linii, czyli nieznacznie (najwyżej o kilka do kilkunastu procent wartości występującej przy napięciu znamionowym).

Podczas gdy istotne (odnośnie przepisów) wartości natężeń PE w obszarach dostępnych dla osób postronnych występują właściwie tylko pod liniami (tereny stacji 110 kV wwyż są niedostępne dla osób postronnych) o napięciu 110 kV i większym, tak istotne wartości natężeń PM istnieją wokół różnych urządzeń elektrycznych zasilanych praktycznie napięciem z całego używanego zakresu. Na przykład na obudowie urządzeń gospodarstwa domowego występują wartości od kilku do kilkadziesiąt A/m. Wokół stacji kontenerowych 15/0,4 kV można spotkać wartości natężenia PM dochodzące do kilkunastu A/m. Wokół linii kablowych zakopanych w ziemi PE jest niemierzalne, natomiast wartości natężeń PM dochodzą do kilku A/m [2].

W stacjach elektroenergetycznych napowietrznych spotyka się wartości natężeń pól dochodzące do 20 kV/m. Natomiast

w rozdzielniach stacji zawodowych i przemysłowych nawet po stronie 15 kV i 0,4 kV spotyka się stosunkowo duże wartości natężeń PM nawet w nieoczekiwanych miejscach, np. na podłodze umieszczonej nad przewodami szynowymi lub przy ścianie, za którą znajduje się dławikownia.

Problemy związane z wyznaczaniem natężeń pól

Obecnie istnieją dokładne mierniki do pomiarów natężeń PE i PM. Bardzo dobrze rozwinięte są też metody obliczeniowe do wyznaczania natężeń PE i PM. Dobre mierniki i dokładne metody obliczeniowe nie ułatwiają jednak sprawy do końca. Nadal linie elektroenergetyczne stwarzają poważny problem środowiskowy wieloaspektowy. Pierwszym problemem jest panująca powszechnie w społeczeństwie obawa przed polami elektromagnetycznymi. Nawet obowiązujące przepisy i istniejące poziomy natężeń pól znacznie poniżej dopuszczalnych wartości nie pozwalają unikać poważnych sporów przy budowie nowych linii. Jest to częsta przyczyna spowalniania realizacji inwestycji sieciowych.

Samo wyznaczanie natężeń pól jest też niepozbawione pewnych trudności. Pomiar wykonuje się w konkretnych warunkach terenowych (temperatura, nasłonecznienie, wiatr, ukształtowanie terenu, istniejąca roślinność, zwisy aktualne przewodów, panujące napięcie oraz przepływający prąd). Jeśli chcemy znać natężenia pól w najbardziej niekorzystnych warunkach, to należy bieżące warunki pomiarowe przeliczyć na warunki odpowiadające najbardziej niekorzystnej sytuacji, a nie jest to proste. Konieczne jest dokładne zsynchronizowanie pomiarów pól z pomiarami prądów i napięć w linii. Sytuacja szczególnie komplikuje się, jeśli pomiary wykonuje się w celu wyznaczenia obszaru wokół linii przeznaczonego pod zabudowę mieszkaniową, czyli strefy, w której natężenie PE wynosi poniżej 1 kV/m, a natężenie pola magnetycznego poniżej 60 A/m (ten warunek najczęściej jest spełniony, jeśli spełniony jest warunek dla pola elektrycznego $E < 1$ kV/m). W czasie pomiarów teren często jest niewyrównany, zarośnięty, a dopiero podczas budowy część nawierzchni ziemi zostaje usunięta lub nawieziona. Zmienia to w istotny sposób zasięg strefy $E < 1$ kV/m.

Inną sprawą są pomiary na balkonach, tarasach, które w fazie projektowania są niemożliwe, natomiast metody obliczeniowe nie mogą prowadzić do otrzymania dokładnych wyników, ponieważ do obliczeń musi być znana nie tylko konfiguracja budynku, ale też dokładny rozkład użytych materiałów i ich własności elektryczne.

Innym problemem jest odchylenie przewodów przez wiatr. Przy silnym wietrze linia zmienia swoją konfigurację. Linie tak się projektuje względem istniejących budynków, aby nawet przy silnym wietrze zachowane były bezpieczne odległości. Niemniej odchylenie przewodów zmienia zasięg strefy $E < 1$ kV/m.

Kolejnym ciekawym problemem są uprawy zbóż. Roślinność gęsto rosnąca tworzy warstwę przewodzącą uziemioną. W ten sposób obszar uprawy zbóż o wysokości 1 m można traktować jak ziemię wyniesioną o 1 m wyżej, czyli przewody pozornie znajdują się na wysokości $h = 1$ m, a obliczenia robione są na wysokości 1 m nad uprawami. Daje to wyniki do kilkunastu procent wyższe niż bez upraw [8].

Nie bez znaczenia na poziomy natężeń pól elektrycznych i magnetycznych może być wpływ zastosowania najnowszych technologii. Ostatnio coraz częściej stosowane są napowietrzne przewody wysokotemperaturowe (HTLS) charakteryzują-

ce się dużą wartością prądu dopuszczalnego długotrwale oraz niewielkim, i mało zależnym od obciążenia, zwisem. W konsekwencji przewody takie umożliwiają przesył znacznie większych prądów niż tradycyjne przewody AFL. W ten sposób przy wzrastającym obciążeniu linii z przewodami HTLS zwis będzie zwiększał się wolniej niż przy tradycyjnych przewodach AFL i natężenie pola elektrycznego będzie też zwiększać się wolniej. Natomiast natężenie pola magnetycznego wokół linii z przewodami HTLS będzie wyższe, z powodu znacznie większych prądów w przewodach fazowych. Czynnikiem „spowalniającym” wzrost natężenia pola magnetycznego będzie mniejszy przyrost zwisu. Jeśli jednak dwie linie o tym samym przekroju przewodów i tym samym napięciu roboczym mają maksymalny dopuszczalny zwis, który jest identyczny, to wokół linii z przewodami HTLS będzie znacznie większe natężenie pola magnetycznego niż wokół linii z przewodami tradycyjnymi. Natomiast natężenie pola elektrycznego praktycznie powinno być takie samo wokół obu linii.

Jako wniosek ostateczny można przyjąć konieczność opracowywania dokładnych algorytmów obliczeniowych, jak też z drugiej strony opracowywanie i doskonalenie metod ograniczania natężeń pól pod liniami i wokół innych urządzeń elektroenergetycznych.

Literatura

- [1] Linie i stacje elektroenergetyczne w środowisku człowieka, Informator PSE – Operator, Warszawa 2008, www.pse-operator.pl.
- [2] ZEŃCZAK M.: *Analiza technicznych problemów związanych z dozymetrią pól elektromagnetycznych o częstotliwości przemysłowej*. Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1998.
- [3] JAWORSKI M., WRÓBLEWSKI Z.: *Możliwości określania narażenia ludzi na pole magnetyczne wytwarzane przez linie napowietrzne*. „Wiadomości Elektrotechniczne”, nr 1 (2011), s. 30–33.
- [4] SZUBA M.: *Identyfikacja pola elektromagnetycznego w otoczeniu linii napowietrznych najwyższych napięć na potrzeby sporządzenia ekspertyz środowiskowych*. „Przegląd Elektrotechniczny”, nr 5 (2010), s. 288–292.
- [5] 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. nr 192, poz. 1883, Warszawa, 14 listopada 2003 r).
- [6] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz.U. nr 217, 23.12.2002, poz. 1833).
- [7] Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV, Część 3: Zbiór normatywnych warunków krajowych, Polska wersja EN 50341-3-22:2001.
- [8] ZEŃCZAK M.: *Estimation of electric and magnetic field intensities under power transmission lines in real country conditions*. „Przegląd Elektrotechniczny”, nr 7 (2008), s. 174–177.

dr hab. inż. Michał Zeńczak, prof. nadzw. – Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie; e-mail: michal.zenczak@zut.edu.pl