

ĆWICZENIE 3

POLE ELEKTRYCZNE POD LINIAMI ELEKTROENERGETYCZNYMI WYSOKICH NAPIĘĆ

3.1. Wprowadzenie

Linie elektroenergetyczne są źródłem pola elektrycznego, które oddziałuje na organizmy żywe znajdujące się w pobliżu linii. W liniach niskich i średnich napięć pole elektryczne wokół poszczególnych przewodów linii nie jest zbyt silne, a dodatkowo ze względu na niewielkie odległości między przewodami następuje naturalna kompensacja przesuniętych w fazie o $2\pi/3$ pól elektrycznych trzech przewodów fazowych. W liniach elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć zarówno ze względu na wyższe napięcie robocze jak i ze względu na duże odległości między przewodami natężenia pól elektrycznych w otoczeniu linii osiągają znaczne wartości.

Natężenie pola elektrycznego E jest wyrażane w kV/m.

3.2. Oddziaływanie pola elektrycznego na organizmy żywe

Przy natężeniu pola elektrycznego wynoszącym 1 kV/m prąd przepływający przez ciało człowieka jest różny w różnych częściach ciała, a największa jego wartość w kończynach dolnych wynosi około $12 \div 15 \mu\text{A}$. Przy natężeniu 10 kV/m prąd będzie dziesięciokrotnie większy. Prądy tej wielkości są nie odczuwane przez człowieka.

Organizmy żywe będące pod działaniem pola elektrycznego mogą być narażone na:

- zmiany przepływu jonów,
- aktywizację enzymów i hormonów,
- aktywność immunologiczną komórek,
- wpływ na układ endokrynologiczny (wewnętrznego wydzielania),
- zmiany w syntezie białek,
- zmiany w budowie kwasów nukleinowych DNA i RNA, co może doprowadzić do rozwoju komórek nowotworowych.

Należy również pamiętać, że pola elektromagnetyczne o różnych częstotliwościach mogą korzystnie oddziaływać na życie biologiczne, co wykorzystywane jest od dawna w medycynie, zarówno w terapii jak i diagnostyce.

W zakresie ochrony ludzi i środowiska przed oddziaływaniem pola elektrycznego żąda się by natężenie pola:

1. nie przekraczało wartości 1 kV/m na wysokości 2 m od poziomu ziemi na obszarze lokalizacji budynków mieszkalnych i innych , ,
2. mieściło się w zakresie od 1 do 10 kV/m na wysokości 2 m od poziomu ziemi na obszarze dostępnym dla ludności.

3.3. Pole elektryczne w otoczeniu ładunku elektrycznego

Pole elektryczne zgodnie z prawem Gaussa występuje w otoczeniu ładunku elektrycznego Q , przy czym natężenie pola elektrycznego E_j wyrażona jest zależnością

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon \cdot r} \quad ; \quad (3.2)$$

gdzie: Q [A·s] - ładunek;

ε - przenikalność dielektryczna ośrodka, w którym występuje pole elektryczne,
dla powietrza podobnie jak dla próżni: $\varepsilon = \varepsilon_0 = 8.8541 \cdot 10^{-12}$ F/m;

r [m] - odległość analizowanego punktu P, dla którego obliczane jest natężenie pola elektrycznego od ładunku Q .

3.4. Pole elektryczne wokół przewodu nad powierzchnią ziemi

Pole elektryczne wokół przewodu liniowego jest we współrzędnych walcowych opisane składową promieniową wektora natężenia pola elektrycznego [1]:

$$E_r = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon \cdot r} \quad (3.3)$$

gdzie: τ - liniowa gęstość ładunku elektrycznego wzdłuż przewodu,

r - odległość od osi przewodu,

ε - przenikalność elektryczna ośrodka.

Ze związku natężenia pola elektrycznego z potencjałem skalarnym:

$$E_r = -\frac{\partial V}{\partial r} \quad (3.4)$$

wynika wzór na potencjał skalarny pola elektrycznego wokół przewodu:

$$V(r) = -\frac{\tau}{2\pi\varepsilon} \ln r + C \quad (3.5)$$

W przypadku przewodu o potencjale U umieszczonego nad powierzchnią doskonale przewodzącą (rys. 3.1a) rozkład pola elektrycznego jest identyczny z rozkładem pola w układzie dwóch przewodów o liniowej gęstości ładunków τ i $-\tau$ oraz potencjałach U i $-U$, czyli przewodu i jego zwierciadlanego odbicia w powierzchni doskonale przewodzącej (rys. 3.1b). Z zasady superpozycji i wzoru (3.5) wynika wówczas, że dla cienkich przewodów ($d \ll h$) związek między napięciem przewodu i gęstością liniową ładunku przyjmuje postać:

$$U = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon} \ln \frac{4h}{d} \quad (3.6)$$

a rozkład potencjału w układzie współrzędnych prostokątnych (x, y) (rys. 3.1b) dany jest zależnością:

$$V(x, y) = \frac{\tau}{4\pi\varepsilon} \ln \frac{x^2 + (y+h)^2}{x^2 + (y-h)^2} \quad (3.7)$$

The figure consists of two parts, (a) and (b). Part (a) shows a wire with potential U and charge density τ at a height h above a ground plane where $V=0$. The distance from the wire to the ground plane is labeled h . Part (b) shows the equivalent system of two wires: one with potential U and charge density τ at height h , and another with potential $-U$ and charge density $-\tau$ at height $2h$ below the ground plane. The ground plane is represented by a dashed line at $V=0$. The vertical axis is y and the horizontal axis is x . The distance between the two wires is $2h$.

Rys. 3.1. Przewód liniowy nad powierzchnią doskonale przewodzącą – a); przewód i jego odbicie zwierciadlane w powierzchni doskonale przewodzącej – b).

Zależności (3.6) i (3.7) odnoszą się również do przewodu nad powierzchnią ziemi, chociaż jest ona słabym przewodnikiem prądu.

3.5. Rozkład pola elektrycznego pod wieloprzewodową linią WN

W typowym przypadku jednotorowej linii trójfazowej z fazami L_1, L_2, L_3 i przewodem odgromowym O jak na rysunku 3.2 maksymalne natężenie pola elektrycznego w pobliżu ziemi otrzymuje się w miejscu największego zwisu przewodów, to znaczy w środku przęsła. Duża odległość od słupów pozwala na pominięcie ich wpływu, a niewielka krzywizna linii łańcuchowej, jaką tworzą swobodnie zwisające przewody, pozwala rozwiązywać problem jako dwuwymiarowy na płaszczyźnie prostopadłej do osi linii. Związek między napięciami i ładunkami przewodów linii trójfazowej wynikający z zależności (3.7) i zasady superpozycji przyjmuje postać:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{L_1} \\ \underline{U}_{L_2} \\ \underline{U}_{L_3} \\ \underline{U}_O \end{bmatrix} = [P] \cdot \begin{bmatrix} \underline{\tau}_{L_1} \\ \underline{\tau}_{L_2} \\ \underline{\tau}_{L_3} \\ \underline{\tau}_O \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

gdzie:

$$\underline{U}_{L_1} = \frac{U_n}{\sqrt{3}}; \quad \underline{U}_{L_2} = \underline{U}_{L_1} \exp\left(-j\frac{2}{3}\pi\right); \quad (3.9)$$

$$\underline{U}_{L_3} = \underline{U}_{L_1} \exp\left(j\frac{2}{3}\pi\right); \quad \underline{U}_O = 0$$

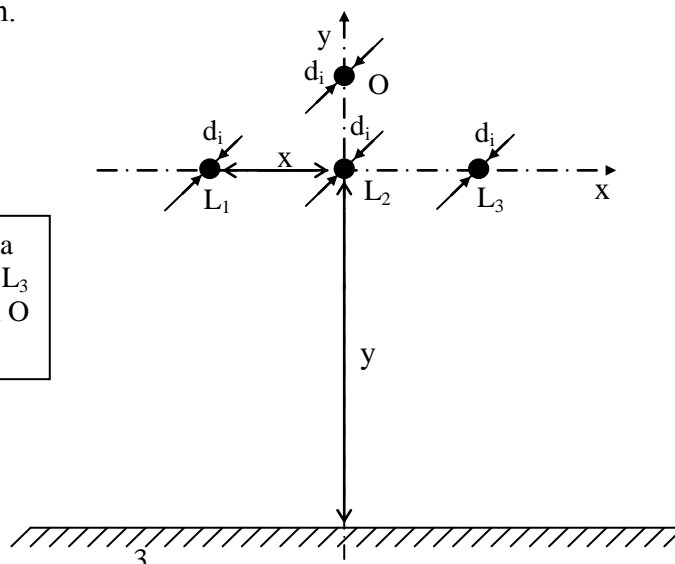
$$[P] = \begin{bmatrix} P_{L_1L_1} & P_{L_1L_2} & P_{L_1L_3} & P_{L_1O} \\ P_{L_2L_1} & P_{L_2L_2} & P_{L_2L_3} & P_{L_2O} \\ P_{L_3L_1} & P_{L_3L_2} & P_{L_3L_3} & P_{L_3O} \\ P_{OL_1} & P_{OL_2} & P_{OL_3} & P_{OO} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{4y_i}{d_i}; \quad i = L_1, L_2, L_3, O \quad (3.11)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \ln \frac{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}; \quad i, j = L_1, L_2, L_3, O; \quad i \neq j \quad (3.12)$$

gdzie: y_i, y_j - wysokość zawieszenia przewodów i oraz j nad ziemią,

x_i, x_j - odpowiednio odległość pozioma przewodów i oraz j od początku układu współrzędnych.



Rys. 3.2. Jednotorowa linia trójfazowa z fazami L_1, L_2, L_3 i przewodem odgromowym O

Jeżeli przewód linii elektroenergetycznej jest przewodem wiązkowym, to jego zastępcza średnica d_z wyrażona jest wzorem

$$d_z = D \cdot n \sqrt{\frac{nd}{D}} \quad (3.13)$$

gdzie: D – średnica wiązki przewodów,
 d – średnica pojedynczego przewodu w wiązce,
 n – liczba przewodów w wiązce.

Dla zadanych potencjałów przewodów linii (3.9) z zależności (3.8) można obliczyć wektor ładunków:

$$\begin{bmatrix} \underline{z}_{L_1} \\ \underline{z}_{L_2} \\ \underline{z}_{L_3} \\ \underline{z}_O \end{bmatrix} = [P]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{L_1} \\ \underline{U}_{L_2} \\ \underline{U}_{L_3} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

a następnie wyznaczyć wartość potencjału skalarnego pola elektrycznego w dowolnym punkcie pola poza przewodami:

$$\underline{V}(x, y) = \left| \sum_{k=L_1, L_2, L_3, O} \frac{\partial p_k(x, y)}{\partial y} \underline{z}_k \right| \quad (3.15)$$

oraz składowe wektora natężenia pola elektrycznego:

$$\underline{E}_x(x, y) = -\frac{\partial \underline{V}(x, y)}{\partial x} = -\sum_{k=L_1, L_2, L_3, O} \frac{\partial p_k(x, y)}{\partial x} \underline{z}_k \quad (3.16)$$

$$\underline{E}_y(x, y) = -\frac{\partial \underline{V}(x, y)}{\partial y} = -\sum_{k=L_1, L_2, L_3, O} \frac{\partial p_k(x, y)}{\partial y} \underline{z}_k \quad (3.17)$$

przy czym:

$$p_k = \frac{1}{4\pi\epsilon} \ln \frac{(x - x_k)^2 + (y + y_k)^2}{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2} \quad (3.18)$$

Miejszem geometrycznym wektora natężenia pola elektrycznego o sinusoidalnie zmiennych składowych $E_x(x, y)$ oraz $E_y(x, y)$ na płaszczyźnie przekroju linii jest elipsa i z tego względu nie można mówić o wartości skutecznej wektora w danym punkcie pola, ale jedynie o kierunkach i półosiach elipsy. W pobliżu ziemi, na przykład na wysokości 1.8 m jak wymagają tego omawiane przepisy, składowa pozioma wektora natężenia pola elektrycznego jest znacznie mniejsza od składowej pionowej i poprzestaje się na wyznaczeniu modułu składowej:

$$\underline{E}_y(x, y) = \left| \sum_{k=L_1, L_2, L_3, O} \frac{\partial p_k(x, y)}{\partial y} \underline{z}_k \right| \quad (3.19)$$

Literatura:

1. Ciok Z.: Podstawowe problemy współczesnej techniki, Ochrona środowiska w elektroenergetyce. PWN, Warszawa 2001r.

| Państwo lub organizacja międzynarodowa | Wartość dopuszczalna natężenia pola elektrycznego E [kV/m] | Uwagi i zalecenia odnośnie stosowania wartości dopuszczalnej |
|--|--|--|
| Austria | 5 | Tzw. poziom odniesienia. Dopuszczalny prąd rozładowania 0,5 mA |
| Belgia | 10 | W miejscach dostępnych dla ludzi |
| | 7 | Na skrzyżowaniu dróg |
| | 5 | Na terenach zabudowy |
| Chorwacja | 5 | Przebywanie w polu bez ograniczeń czasowych. Wartość identyczna, jak zalecana przez ICNIRP |
| Czechy | 5 | Przebywanie w polu bez ograniczeń czasowych. Wartość identyczna, jak zalecana przez ICNIRP |
| Dania | – | Brak przepisów. Zalecane tzw. podejście ostrożnościowe, t.j. ograniczanie budowy linii napowietrznych blisko budynków mieszkalnych i odpowiednio – wznoszenia budynków mieszkalnych w sąsiedztwie linii istniejących |
| Estonia | 5 | Tzw. poziom odniesienia. Wartość zalecana przy ekspozycji długotrwałej wg Recommendation 1991/519EC |
| Finlandia | 15 | Wartość rekomendowana przy ekspozycji krótkotrwałej |
| | 5 | Wartość rekomendowana przy ekspozycji długotrwałej |
| Francja | 5 | Wartość rekomendowana dla ekspozycji w polach wytwarzanych przez nowe i przebudowywane obiekty oraz instalacje systemu elektroenergetycznego pracujące w normalnych warunkach |
| Hiszpania | – | Brak przepisów dla pól o częstotliwości 50 Hz |
| Holandia | 8 | Zalecenie Rady ds. Zdrowia Holandii |
| Niemcy | 10 | Krótkotrwałe przebywanie w polu oraz niewielkie obszary terenów niezabudowanych |
| | 5 | Na pozostałych terenach |
| Polska | 10 | W miejscach dostępnych dla ludzi |
| | 1 | Na terenach przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową |
| Portugalia | 5 | Wartość rekomendowana przy ekspozycji długotrwałej. Dopuszczalny prąd rozładowania 0,5 mA |

| Państwo lub organizacja międzynarodowa | Wartość dopuszczalna natężenia pola elektrycznego E [kV/m] | Uwagi i zalecenia odnośnie stosowania wartości dopuszczalnej |
|---|--|---|
| Słowenia | 10 | W miejscach dostępnych dla ludzi |
| | 0,5 | Na terenach szczególnej ochrony (miejsca lokalizacji budynków mieszkalnych, szkół, szpitali, centrów wypoczynku itp.) |
| Szwajcaria | 5 | W miejscach dostępnych dla ludzi |
| Szwecja | 10 | Zalecenia szwedzkich służb ochrony radiologicznej |
| Węgry | 10 | Przebywanie do kilku godzin dziennie z wyjątkiem terenów zamieszkałych lub przeznaczonych pod zabudowę |
| | 5 | Przebywanie w polu bez ograniczeń czasowych |
| Wielka Brytania | 5 | Tzw. poziom odniesienia. Dopuszczalny prąd rozładowania 0,5 mA |
| Włochy | 5 | Tzw. limit ekspozycyjny |
| ICNIRP ¹⁾ | 5 | Tzw. poziom odniesienia. Przebywanie w polu bez ograniczeń czasowych. Dopuszczalny prąd rozładowania 0,5 mA. ¹⁾ International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection |
| Rekomendacja dla krajów Unii Europejskiej ²⁾ | 5 | Tzw. poziom odniesienia. Wartość zalecana przy ekspozycji długotrwałej wg Recommendation 1991/519/EC. Dopuszczalny prąd rozładowania 0,5 mA. ²⁾ Council of the European Union |

Przygotowano na podstawie opracowania: **EMF** Exposure Standards Applicable in Europe and Elsewhere, Eurelectric, March, 2006 oraz innych źródeł

ROZPORZĄDZENIE MINISTRA ŚRODOWISKA¹⁾

z dnia 30 października 2003 r.

w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów

ZRÓŻNICOWANE DOPUSZCZALNE POZIOMY PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH

Tabela 1

Zakres częstotliwości pól elektromagnetycznych, dla których określa się parametry fizyczne charakteryzujące oddziaływanie pól elektromagnetycznych na środowisko, dla terenów przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową oraz dopuszczalne poziomy pól elektromagnetycznych, charakteryzowane przez dopuszczalne wartości parametrów fizycznych, dla terenów przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową

| Zakres częstotliwości pola elektromagnetycznego | | Parametr fizyczny | Składowa elektryczna | Składowa magnetyczna | Gęstość mocy |
|---|-------|-------------------|----------------------|----------------------|--------------|
| | | 1 | | | |
| 1 | 50 Hz | | 1 kV/m | 60 A/m | — |

Objaśnienia:

- a) 50 Hz — częstotliwość sieci elektroenergetycznej,
- b) podane w kolumnach 2 i 3 tabeli wartości graniczne parametrów fizycznych charakteryzujących oddziaływanie pól elektromagnetycznych odpowiadają wartościom skutecznym natężeń pól elektrycznych i magnetycznych.

Tabela 2

Zakres częstotliwości pól elektromagnetycznych, dla których określa się parametry fizyczne charakteryzujące oddziaływanie pól elektromagnetycznych na środowisko, dla miejsc dostępnych dla ludności oraz dopuszczalne poziomy pól elektromagnetycznych, charakteryzowane przez dopuszczalne wartości parametrów fizycznych, dla miejsc dostępnych dla ludności

| Zakres częstotliwości pola elektromagnetycznego | | Składowa elektryczna | Składowa magnetyczna | Gęstość mocy |
|---|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Parametr fizyczny | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 0 Hz | 10 kV/m | 2 500 A/m | — |
| 2 | od 0 Hz do 0,5 Hz | — | 2 500 A/m | — |
| 3 | od 0,5 Hz do 50 Hz | 10 kV/m | 60 A/m | — |
| 4 | od 0,05 kHz do 1 kHz | — | 3/f A/m | — |
| 5 | od 0,001 MHz do 3 MHz | 20 V/m | 3 A/m | — |
| 6 | od 3 MHz do 300 MHz | 7 V/m | — | — |
| 7 | od 300 MHz do 300 GHz | 7 V/m | — | 0,1 W/m ² |

Objaśnienia:

Podane w kolumnach 2 i 3 tabeli wartości graniczne parametrów fizycznych charakteryzujących oddziaływanie pól elektromagnetycznych odpowiadają:

- a) wartościom skutecznym natężeń pól elektrycznych i magnetycznych o częstotliwości do 3 MHz, podanym z dokładnością do jednego miejsca znaczącego,
- b) wartościom skutecznym natężeń pól elektrycznych o częstotliwości od 3 MHz do 300 MHz, podanym z dokładnością do jednego miejsca znaczącego,
- c) wartości średniej gęstości mocy dla pól elektromagnetycznych o częstotliwości od 300 MHz do 300 GHz lub wartościom skutecznym dla pól elektrycznych o częstotliwościach z tego zakresu częstotliwości, podanej z dokładnością do jednego miejsca znaczącego po przecinku,
- d) f — częstotliwość w jednostkach podanych w kolumnie 1,
- e) 50 Hz — częstotliwość sieci elektroenergetycznej.