



Linie napowietrzne wysokich napięć — środowisko elektromagnetyczne a ograniczenia w użytkowaniu terenów

JACEK PAŚ

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych,
00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2, jpas@wat.edu.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono wpływ eksploatacji linii napowietrznych wysokich napięć WN na użytkowanie terenów, które są przeznaczone pod zabudowę. Występowanie w pobliżu budynków mieszkalnych stacji rozdzielczych i linii napowietrznych WN to obecność w ich otoczeniu szeregu czynników fizycznych i chemicznych, które w pewnych warunkach i przy odpowiednio dużych poziomach mogą być uciążliwe dla środowiska. Oddziaływanie na środowisko tych czynników to złożone zagadnienia, które są analizowane zarówno pod kątem technicznym, jak i biologiczno-medycznym.

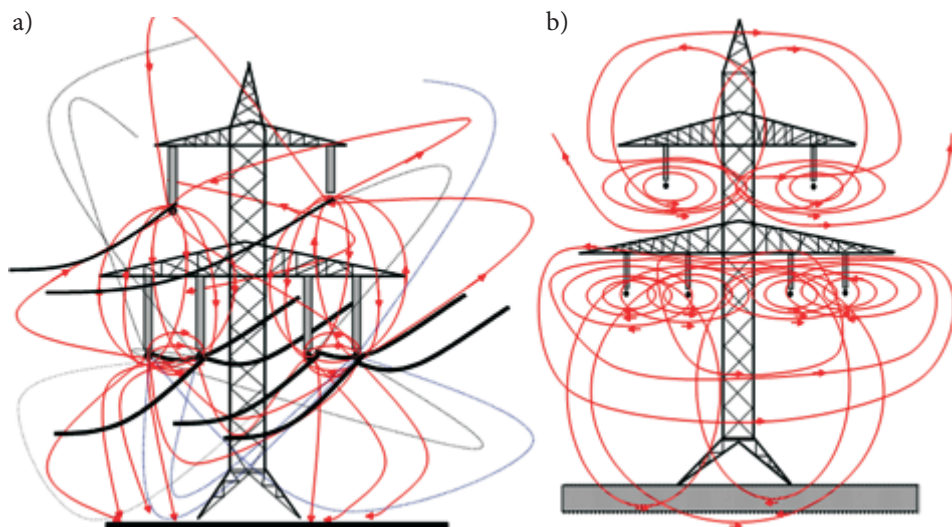
Słowa kluczowe: linie napowietrzne, pole elektryczne i magnetyczne, linie sił

DOI: 10.5604/12345865.1116827

1. Wstęp

Pod wpływem napięcia i przepływającego prądu linie napowietrzne WN generują niezamierzone pole elektromagnetyczne (PEM) (rys. 1). PEM jest to stan energetyczny przestrzeni wokół ładunków elektrycznych mających energię potencjalną i kinetyczną. Pole elektromagnetyczne składa się z pola elektrycznego i pola magnetycznego (wg PN-77/T-01025). Wyróżniamy dwa rodzaje pola elektromagnetycznego — pole stałe oraz zmienne w czasie. Zmienność pola wyrażana jest przez częstotliwość f [Hz]. W biosferze istnieje szeroki zakres częstotliwości PEM. Przyjęto umownie dwa zakresy częstotliwości PEM, które oddziałują na materię żywą (w tym człowieka), tj. promieniowanie jonizujące i niejonizujące. Kryterium podziału to energia jonizująca H_2O równa 17,6 eV. Do zakresu częstotliwości

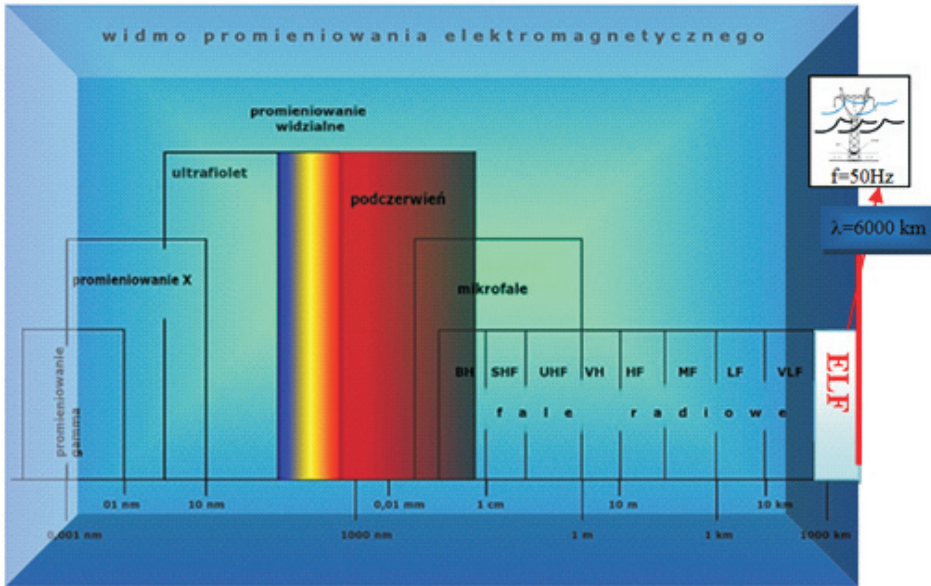
promieniowania jonizującego zaliczamy promieniowanie o najwyższych energiach. Jest to m.in. promieniowanie rentgenowskie (X), radioaktywne (gamma, beta, alfa) i kosmiczne. Do zakresu promieniowania niejonizującego zaliczamy pozostałe pola zmienne, które nie mają wystarczającej energii, aby spowodować jonizację H_2O — np. pola o częstotliwości: np. prądu sieci energetycznej 50 Hz, stacji radiowych (rys. 1). W otaczającej nas biosferze występuje tzw. naturalne PEM. Wyróżniamy stałe ziemskie pole magnetyczne i elektryczne. Składową magnetyczną tego pola można wykryć między innymi za pomocą kompasu (wartość tego pola to 32-40 A/m). Pole to może podlegać niewielkim zmianom o natężeniu na ogół nieprzekraczającym wartości 0,1 A/m. Fluktuację tę zwykle powodują zmiany aktywności Słońca. Zmiany ziemskiego pola magnetycznego sprawiają, że zmienia się ziemskie pole elektryczne. Pomiędzy zjonizowanymi górnymi warstwami atmosfery ziemskiej i powierzchnią Ziemi istnieje różnica potencjałów przyjmująca zwykle wartość ok. 400 kV. Występowanie wyładowań atmosferycznych powoduje generację niezwykle silnych, udarowych zmiennych pól elektrycznych.



Rys. 1. Linie sił pola elektrycznego a) i magnetycznego b) wokół przewodów linii napowietrznych wysokiego napięcia pod obciążeniem

Obok wymienionych naturalnych pól elektromagnetycznych wyróżniamy pola sztuczne generowane w sposób zamierzony (np. nadajniki telefonii komórkowej, nadajniki RTV i telewizyjne, stacje radarowe itd.) lub niezamierzony, tj. efekt uboczny powstający przy przesyłaniu i przetwarzaniu energii elektrycznej [1, 2]. W środowisku, które nas otacza, mamy do czynienia z różnego rodzaju PEM o różnym zakresie wartości amplitud i częstotliwości (rys. 2). Stosunkowo nieduży zakres

częstotliwości zajmują pasma fal odbierane (wyczuwalne) przez zmysły człowieka (słuch, wzrok). Wykorzystując różne zjawiska fizyczne, można poszerzyć zakres odbieranych częstotliwości celem poznania otaczającego nas świata.



Rys. 2. Widmo pola elektromagnetycznego z zaznaczonym zakresem ekstremalnie niskich częstotliwości ELF

Pola elektromagnetyczne są kierunkowe — co oznacza, że w każdym punkcie trójwymiarowej przestrzeni pola występują odpowiednio trzy składowe natężenia tego pola. Do obliczenia wypadkowego natężenia pola należy wykonać trzy pomiary wzajemnie prostopadłych składowych B_x , B_y , B_z i obliczyć pierwiastek z sumy tych kwadratów (1).

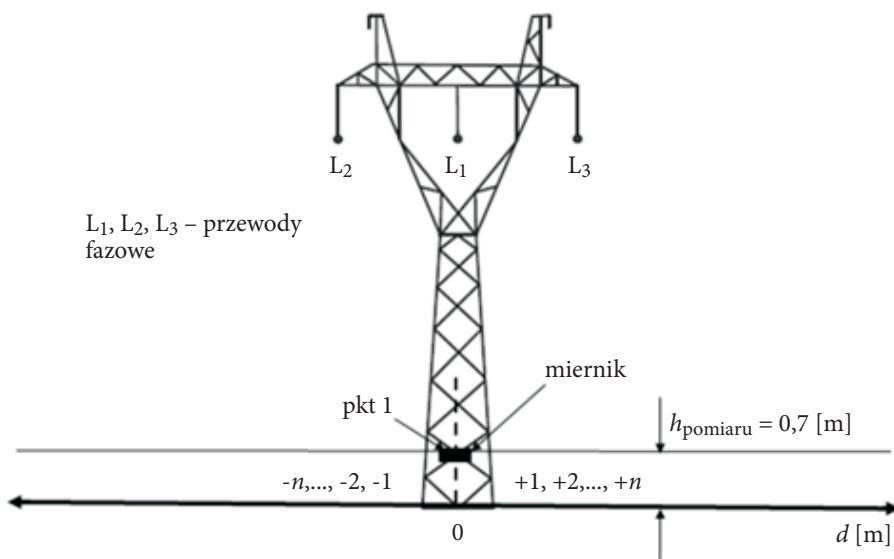
$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}. \quad (1)$$

Zmienne PEM może występować jako pole bliskie lub dalekie. Podział uwarunkowany jest zakresem, częstotliwością oraz rozmiarami i odległością od struktury wytwarzającej pole, czyli anteny (źródła PEM — w tym przypadku to elektroenergetyczne linie napowietrzne WN). Zjawisko promieniowania i energia promieniowania może zaistnieć tylko w przypadku pól dalekich, gdy rozmiar elektroenergetyczny l anteny (źródła) jest porównywalny z długością fali, czyli gdy $l > \lambda/10$. Dość płynną granicę między tymi kategoriami wyznacza odległość d od źródła, równa w dużym przybliżeniu bez uwzględnienia rozmiarów anteny trzem długościom fali

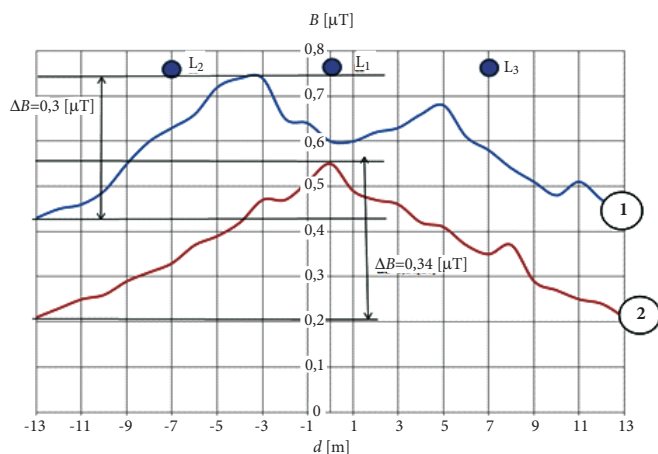
($d = 1000/f$, gdzie: d [m] i f [MHz]). Długość fali o częstotliwości 50 Hz wynosi około 6000 kilometrów — zatem PEM o tak małej częstotliwości należy do kategorii pól bliskich. W polach bliskich musimy wyróżnić i odrębnie mierzyć obydwie składowe PEM: tzn. składową elektryczną E i magnetyczną H . Ze względów pomiarowych zakres małych częstotliwości jest umownie dzielony na dwa podzakresy: ELF (5-2000) Hz oraz VLF (2-100) kHz [3, 4].

2. Indukcja B pola magnetycznego oraz natężenia E pola elektrycznego pod liniami WN

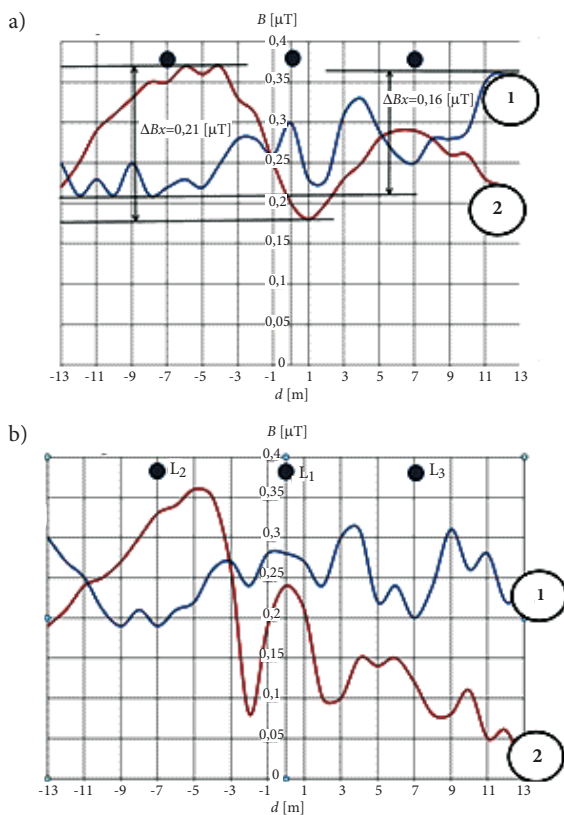
Pomiary ww. składowych pola zostały przeprowadzone przy dodatniej temperaturze zewnętrznej. Zakres zmian temperatury podczas wykonywania badań wynosił odpowiednio od +4 do +12°C. Badania wykonano w godzinach porannych 8-13 oraz popołudniowych 14-19 według rysunku 3: gdzie: d — odległość od pkt. 0 oznaczonego na rysunku jako środek geometryczny linii toru przesyłowego — słupa energetycznego WN. Pomiary poszczególnych składowych PEM wykonano na wysokości $h = 0,7$ m od powierzchni ziemi w lewo i prawo od punktu 0 do osiągnięcia wartości tła pola. Wartości PEM na wykresach obrazujących zakres oddziaływania na naturalne środowisko elektromagnetyczne Ziemi przyjęto, sytuując punkty pomiarowe co 1 m od pkt. 0 na wysokości 0,7 m.



Rys. 3. Schemat stanowiska do pomiaru oddziaływania składowych pola elektromagnetycznego E, H na środowisko pod jednotorowymi liniami WN

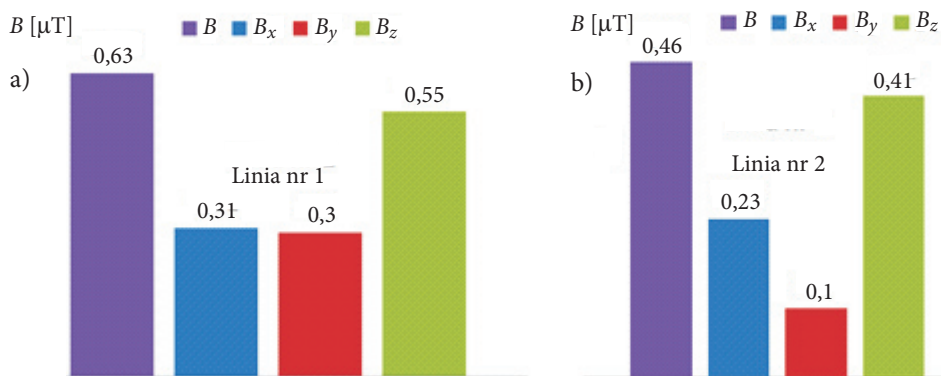


Rys. 4. Indukcja B pola magnetycznego pod liniami WN: nr 1 — 220 kV (linia niebieska) i nr 2 — 110 kV (linia czerwona) dla zakresu częstotliwości pomiarowej ELF



Rys. 5. Indukcja B pola magnetycznego: składowe B_x (a) oraz B_y (b) pod liniami WN: nr 1 — 220 kV (linia niebieska) i nr 2 — 110 kV (linia czerwona) dla zakresu częstotliwości pomiaru ELF

Wartości indukcji B pola magnetycznego oraz ich składowych B_x , B_y , B_z dla eksploatowanych linii WN zostały przedstawione odpowiednio na rysunkach 4-6. Maksymalne wartości składowej B_z (dominującej — osiągnęła maksymalne wartości) indukcji B pola magnetycznego wynoszą odpowiednio 0,55 [μT] dla linii nr 1 i 0,41 [μT] dla linii nr 2. Najmniejsze wartości otrzymano dla składowych B_y pola magnetycznego, które wynoszą 0,31 [μT] dla linii nr1 i 0,10 [μT] dla linii nr 2 (rys. 6). Linia WN nr 1 (wartość napięcia znamionowego 220 kV) posiada większe wartości indukcji B pola magnetycznego (rys. 4).



Rys. 6. Wartość indukcji B pola magnetycznego oraz ich składowych B_x , B_y , B_z w odległości $d = 3$ [m] od pkt. 0 (w tym punkcie pomiarowym zlokalizowano max wartość pola) pod liniami WN nr 1 — 220 kV (a) i nr 2 — 110 kV (b) dla zakresu częstotliwości ELF

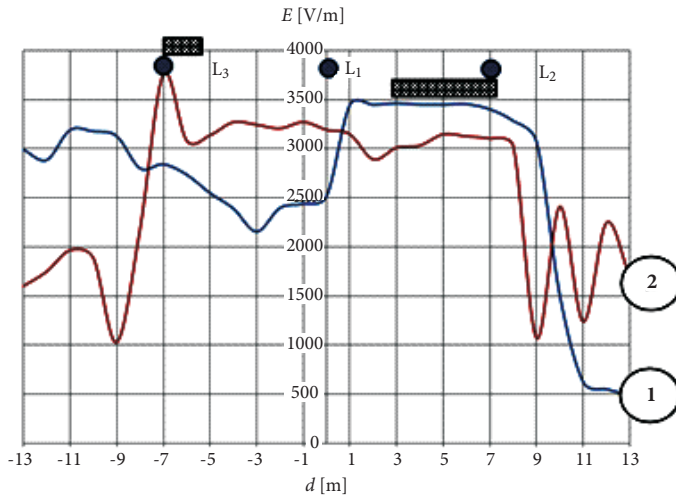
Różnice między wartościami maksymalnymi i minimalnymi indukcji B pola magnetycznego wynoszą odpowiednio:

- $\Delta B = 0,3$ [μT] dla linii nr 1 i $\Delta B = 0,34$ [μT] dla linii nr 2 (rys. 4),
- $\Delta B_x = 0,15$ [μT] dla linii nr 1 i $\Delta B_x = 0,16$ [μT] dla linii nr 2 (rys. 5a),
- $\Delta B_y = 0,21$ [μT] dla linii nr 1 i $\Delta B_y = 0,35$ [μT] dla linii nr 2 (rys. 5b),
- $\Delta B_z = 0,58$ [μT] dla linii nr 1 i $\Delta B_z = 0,41$ [μT] dla linii nr 2.

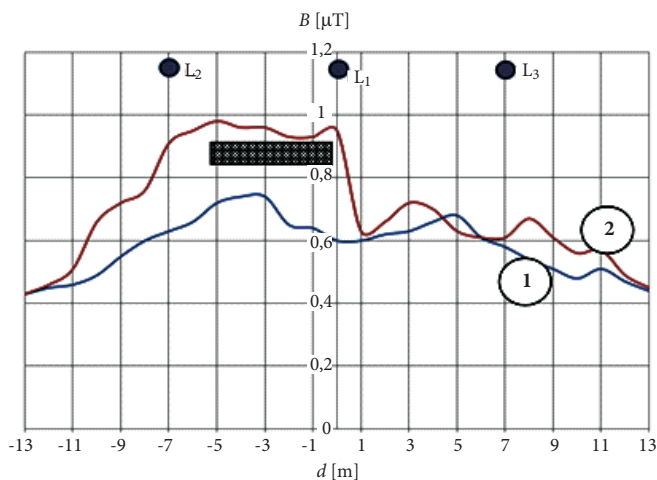
Na rysunkach 7-10 przedstawiono rozkłady natężenia E pola elektrycznego oraz indukcji B pola magnetycznego dla przypadku linii WN o napięciu znamionowym 220 kV zlokalizowanej na innym obszarze przesyłowym polskich sieci energetycznych (linia energetyczna przesyłowa znajdowała się w pobliżu elektrowni, układ geometryczny toru przesyłowego poszczególnych faz L_1 , L_2 , L_3 podobny do układu poprzedniego).

W odległości 18-20 [m] od punktu 0 oznaczonego jak na rysunku 3 — wartość natężenia E pola elektrycznego osiągnęła poziom tła pola w środowisku naturalnym, ogólnodostępnym, tj. bez zniekształceń — wartość tego pola równa 20-30 [V/m]. Natężenie E pola elektrycznego z zakresu częstotliwości VLF utrzymywało się na stałym poziomie i wynosiło odpowiednio od 0,1 do 0,3 [V/m]. Indukcja B pola

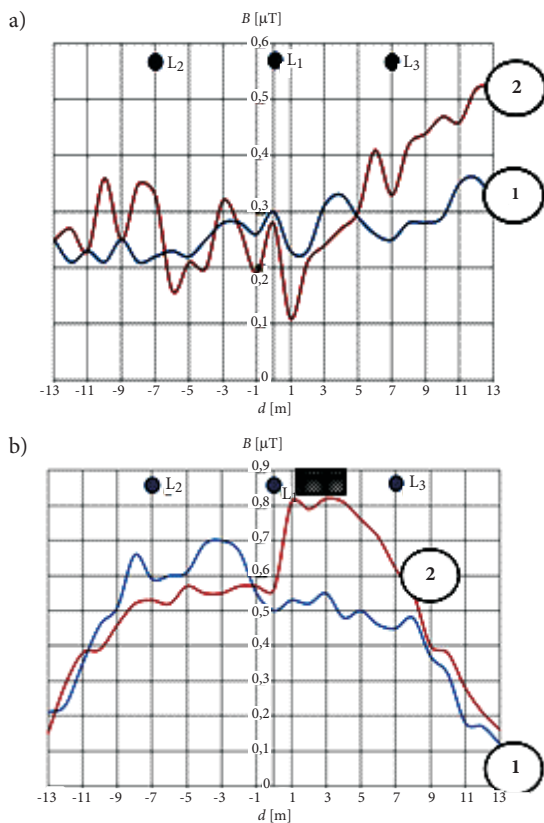
magnetycznego z zakresu wyższych częstotliwości VLF utrzymywała się także na stałym poziomie równym $B = 0,8-0,14$ [nT]. Na rysunkach 7-10 zaznaczono graficznie obszary, gdzie występują podwyższone wartości pola dla poszczególnych składowych PEM — składowa E i B . Z przedstawionych wykresów na rysunkach 9-10 wynika, że zakres oddziaływania pola elektromagnetycznego pod liniami wysokiego napięcia jest dosyć szeroki — podwyższona wartość indukcji B pola magnetycznego utrzymuje się w zakresie ± 13 m od punktu 0 oznaczonego na rysunku 3. Indukcja B



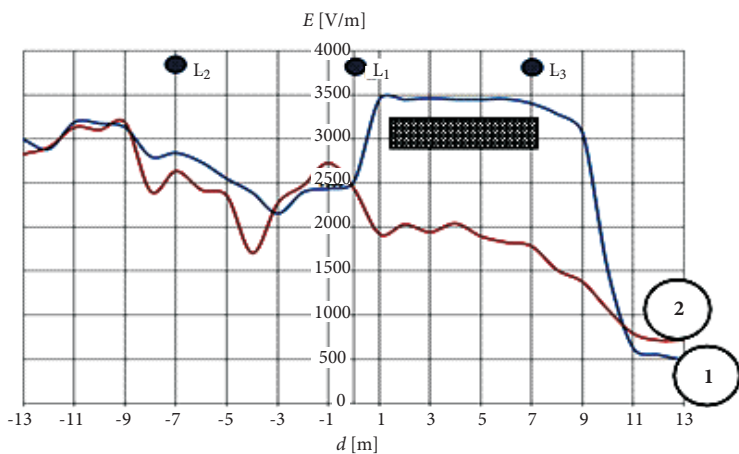
Rys. 7. Natężenie E pola elektrycznego pod liniami WN: nr 1 — 220 kV (linia niebieska) i nr 2 — 220 kV (linia czerwona) dla zakresu częstotliwości ELF



Rys. 8. Indukcja B pola magnetycznego B pod liniami NN: nr 1 — 220 kV (linia niebieska) i nr 2 — 220 kV (linia czerwona) dla zakresu częstotliwości ELF



Rys. 9. Indukcja B pola magnetycznego — składowe pola B_x (a) oraz B_z (b) pod liniami WN: nr 1 — 220 kV (linia niebieska) i nr 2 — 220 kV (linia czerwona) dla zakresu częstotliwości ELF



Rys. 10. Natężenie E pola elektrycznego pod liniami WN: nr 1 — 220 kV (linia niebieska) i nr 2 — 220 kV (linia czerwona) dla zakresu częstotliwości ELF

poła magnetycznego oraz natężenie E pola elektrycznego w zakresie pomiarowym równym 26 m wykazuje duże tendencje do zmian wartości. W pewnych obszarach pomiarowych występuje zjawisko interferencji poszczególnych składowych pola E i B — składowe pola dodają się lub odejmują, tworząc obszary o podwyższonych lub obniżonych wartościach.

3. Analiza wpływu pola elektrycznego i magnetycznego na środowisko naturalne Ziemi

W trakcie wykonywania pomiarów wartości natężenia E pola elektrycznego pod linią WN przewyższały wartość 1 kV/m (rys. 7, 10). Wartości indukcji B pola magnetycznego osiągały maksymalną wartość równą 0,74 [μ T]. Są to wartości znacznie mniejsze od uznawanych za dopuszczalne w uprzednio obowiązujących unormowaniach prawnych [tab. 1]. Zgodnie z nimi, dla składowych PEM o częstotliwości 50 Hz, w środowisku zawodowym za obszar bezpieczny uważano taki, w którym natężenie E pola elektrycznego jest mniejsze od 1 kV/m, zaś wartość indukcji magnetycznej B nie przekracza 500 μ T. W tabeli nr 1 przedstawiono dopuszczalne poziomy promieniowania elektromagnetycznego niejonizującego charakteryzowane poprzez wartości graniczne wielkości fizycznych wynikające z Rozporządzenia Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dn. 11.08.1998 r. w sprawie szczegółowych zasad ochrony przed promieniowaniem szkodliwym dla ludzi i środowiska.

TABELA 1

Dopuszczalne wartości PEM [8]

| Zakres częstotliwości promieniowania | Natężenie E pola elektrycznego | Natężenie H pola magnetycznego | Gęstość prądu jonowego |
|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| Pola stałe | 16 kV/m | 8 kA/m | 100 nA/m ² |
| Pola 50 Hz | 10 kV/m | 80 A/m | – |
| 0,001-0,1 MHz | 100 V/m | 10 A/m | – |

W tym rozporządzeniu została wprowadzona wartość dopuszczalna indukcji magnetycznej równa $B = 100 \mu$ T w środowisku publicznym (co odpowiada natężeniu pola magnetycznego $H = 80$ A/m), natomiast jako dopuszczalne na terenach zabudowanych przyjęto natężenie pola elektrycznego na poziomie $E = 1$ kV/m. Z przedstawionych danych wynika, że zmierzone wartości natężenia E pola elektrycznego są większe, a indukcji B pola magnetycznego mniejsze od określonych w przytoczonym rozporządzeniu.

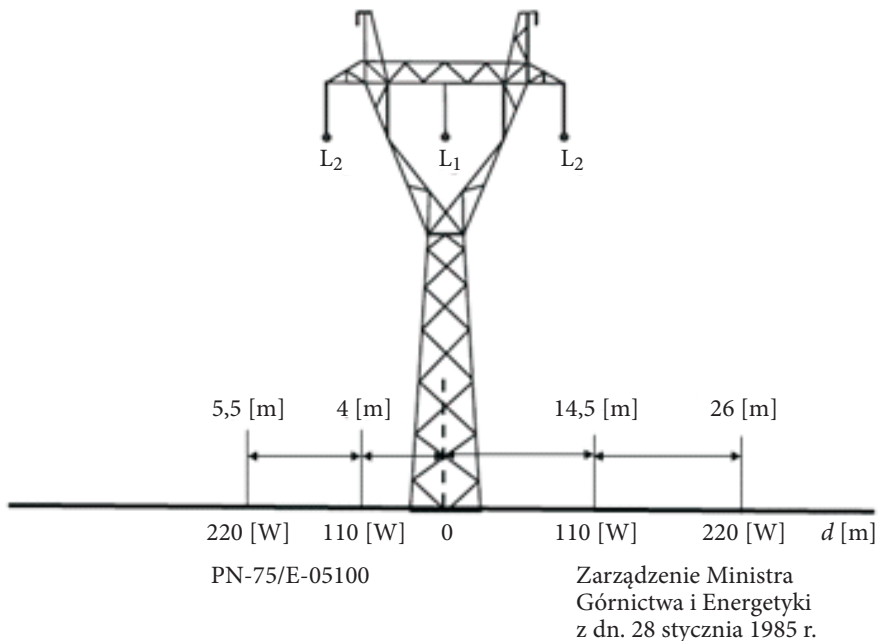
Mimo przyjętych ograniczeń dopuszczalnych wartości składowych PEM, w kwestii szkodliwego oddziaływania tych pól na materię żywą nadal nie ma zgody poglądów w ośrodkach naukowych, które zajmują się tym zagadnieniem. W niektórych pracach naukowych poświęconych temu zagadnieniu uważa się, że bardzo istotny wpływ na zdrowie ma iloczyn indukcji B pola magnetycznego i czasu przebywania w jego zasięgu. W środowisku pracy przyjmuje się jako dopuszczalny średnioroczny iloczyn równy $400 \mu\text{T}\cdot\text{h}$ („dawka” czterystu mikrotlesli razy godzina w ciągu całego roku). Dokonując prostych obliczeń, można określić, jakiej dawki pola magnetycznego dziennie nie powinno się przekraczać. Przyjmując w ciągu roku roboczego 2000 godzin wykonywanej pracy, w czasie jednej godziny pracy dawka pola magnetycznego powinna wynosić $0,20 \mu\text{T}\cdot\text{h}$. Powyższy przykład pozwala określić, jak duże są rozbieżności w ocenie zagrożeń występujących w ramach omawianego problemu.

Wnioski

Otrzymane wyniki badań pozwalają na stwierdzenie, że elektroenergetyczne linie napowietrzne WN wpływają na środowisko elektromagnetyczne (zniekształcają ziemskie naturalne pole magnetyczne i elektryczne). Mimo stwierdzenia występowania parametrów pola elektrycznego i magnetycznego znacznie mniejszych od uznawanych za dopuszczalne w obowiązujących w Polsce unormowaniach prawnych, należy liczyć się z możliwością niekorzystnego oddziaływania na materię żywą i nieżywą. Z punktu widzenia kompatybilności elektromagnetycznej pola o takich natężeniach mogą powodować zakłócenia w pracy urządzeń elektronicznych, np. pogorszenie jakości zobrazowania na ekranach monitorów komputerowych CRT m.in. przez zwiększenie drgań pionowych obrazu z częstotliwością 50 Hz. Skutek występowania takiego zjawiska to zmęczenie wzroku i wydatne obniżenie jakości wykonywanej pracy.

Wartości indukcji B pola magnetycznego oraz natężenia E pola elektrycznego są zróżnicowane i stanowią funkcję prądu i napięcia obciążenia linii WN. Wartość indukcji B pola magnetycznego zależy od odległości od przewodów fazowych L_1 , L_2 , L_3 (dawne oznaczenie R, S, T) [6, 7]. Wartości pola zarówno elektrycznego, jak i magnetycznego dodają się lub odejmują w pewnych obszarach zaznaczonych na wykresach (zjawisko interferencji). W obecności pól elektrycznych i magnetycznych pod liniami WN należy liczyć się z przepływem prądów indukowanych w ciałach osób przebywających w tych polach. Są to z pewnością zbyt małe prądy (rzędu μA), by wywołać zauważalne efekty biologiczne, jednak ich obecność w organizmie może być przyczyną swego rodzaju „szumów” zakłócających przebiegi własnych bioprądów i przyczyniać się do szybszego zmęczenia pracowników. Należy zwrócić uwagę, że występuje duże zróżnicowanie tego efektu między różnymi osobami. Wiąże się

to z różną przewodnością elektryczną poszczególnych organizmów. Rozpatrując oddziaływanie elektroenergetycznych napowietrznych linii przesyłowych na środowisko elektromagnetyczne, należy liczyć się ze szczególnie niekorzystną sytuacją w czasie występowania zwarć lub przepięć w tych liniach [7]. W takich przypadkach może dochodzić do wytwarzania pól magnetycznych o wartościach znacznie przekraczających uznane za dopuszczalne. W przypadku linii WN może dochodzić także do niekontrolowanego przesyłania PEM o innych częstotliwościach wzdłuż linii, które stają się dla nich swego rodzaju niezamierzonymi przewodnikami (falowodami). Szczególnie niekorzystne jest to przy pojawianiu się mocy mikrofalowych w otoczeniu linii. Nie bez znaczenia jest również czynnik psychologiczny połączony z odczuwaniem potencjalnego zagrożenia związanego z bardzo bliską obecnością linii wysokiego napięcia. W celu zapobiegania takim sytuacjom, dla ochrony przed polami elektrycznymi i magnetycznymi, w kraju obowiązywała wcześniej norma PN-75/E-05100, która ustaliła minimalne odległości, w jakich zezwalano na wznoszenie budowli przy elektroenergetycznych liniach przesyłowych. W normie tej (rys. 11) przyjęto ograniczenia odpowiednio: 4 m od linii o napięciu 110 kV oraz 5,5 m od linii o napięciu 220 kV. W następnych latach zastrzono wymagania: w zarządzeniu Ministra Górnictwa i Energetyki z 1985 r. zwiększono te odległości do 14,5 m od linii o napięciu 110 kV oraz 26 m od linii o napięciu 220 kV [3, 5, 6, 8]. Zapewnienie



Rys. 11. Minimalne odległości, jakie należy zapewnić podczas wznoszenia budynków przy elektroenergetycznych liniach przesyłowych WN [6, 7, 8]

takich odległości od przewodów skrajnych linii WN związane jest z oddziaływaniem PEM, które wytwarzane jest w sposób niezamierzony (efekt uboczny przesyłu energii elektrycznej). Istniejące lub planowane do oddania w przyszłości linie WN należy nanieść na ogólny plan zagospodarowania przestrzennego opracowywany przez jednostki samorządu terytorialnego (w pasie ochronnym linii WN występuje zakaz sytuowania budowli o różnym przeznaczeniu, w tym także użytkowym). Podczas wykonywania pomiarów PEM i określania obszaru oddziaływania na środowisko naturalne należy także uwzględnić harmoniczne napięcia zasilającego — parzyste lub nieparzyste, które występują w widmie przesyłanego podstawowego sygnału napięcia o częstotliwości przemysłowej równej 50 Hz.

Badania i artykuł finansowane z Projektu Badawczego Statutowego nr 833.

Artykuł wpłynął do redakcji 12.02.2014 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 3.06.2014 r.

LITERATURA

- [1] KALISZ J., *Pomiary pól elektromagnetycznych*, Radioelektronik, 8, 1999, 14-16.
- [2] BREJWO W., PAŚ J., *Wybrane narzędzia i metody diagnozowania promieniowania elektromagnetycznego małej częstotliwości*, V Krajowa Konferencja: „Diagnostyka techniczna urządzeń i systemów”, Ustroń 13-17.10.2003, 51- 62.
- [3] KALISZ J., *Mierniki z serii TRACER do pomiaru szkodliwych pól elektromagnetycznych*, Informacja, 1998.
- [4] BREJWO W., PAŚ J., *Wpływ elementów sieci komputerowych na warunki klimatyczne w pomieszczeniu biurowym*, INSTAL, Warszawa, 2000.
- [5] BIAŁASZEWSKI P., *Pola elektromagnetyczne w środowisku — opis źródeł i wyniki badań*, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, Warszawa, 2007.
- [6] KOSZMIDER A., *Praktyczny poradnik — Certyfikat CE w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej*, Wyd. Alfa-Weka, 1997.
- [7] KORNIEWICZ H., KARPOWICZ J., *Pomiar pól elektromagnetycznych częstotliwości przemysłowej. Projekt polskiej normy opracowany na podstawie normy IEC 833*.
- [8] Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 20 grudnia 2004 r. w sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznych, ruchu i eksploatacji tych sieci, rozdział 6: *Standardy jakościowe obsługi odbiorców oraz parametry techniczne energii elektrycznej*.
- [9] Rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dnia 11 sierpnia 1998 r. *Szczegółowe zasady ochrony przed promieniowaniem szkodliwym dla ludzi i środowiska*.
- [10] Norma PN-75/E-05100 *Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Projektowanie i budowa*.
- [11] Zarządzenie Ministra Górnictwa i Energetyki z dnia 28 stycznia 1985 r. w sprawie szczegółowych wytycznych projektowania i eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych w zakresie ochrony ludzi i środowiska przed oddziaływaniem pola elektromagnetycznego, Monitor Polski, 3, poz. 24, 1985.

J. PAŚ

**Overhead high-voltage lines — an electromagnetic environment restrictions
on use areas**

Abstract. The paper presents the influence of exploitation of high voltage overhead lines in the vicinity of the lands that are intended for built-up areas. Near distribution stations and high voltage overhead lines can be present some physical and chemical factors which under certain conditions and at their high levels will be inconvenient to the environment. The environmental impacts of these factors are complex problems which are analysed both in technical and biological-medical aspects.

Keywords: overhead lines, electric field and magnetic, lines of force