

Marek Szuba

## PRAKTYCZNE ASPEKTY WYKONYWANIA POMIARÓW PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH W OTOCZENIU NAWIETRZNYCH LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH

PRACTICAL ASPECTS OF TAKING MEASUREMENTS OF ELECTROMAGNETIC FIELDS  
IN THE SURROUNDING OF OVERHEAD TRANSMISSION LINES

Politechnika Wrocławska, Wrocław

Zakład Elektroenergetyki Przemysłowej, Instytut Energoelektryki I-8

### STRESZCZENIE

Identyfikacja pól elektromagnetycznych w otoczeniu linii napowietrznych wymaga przeprowadzenia pomiarów i na ich podstawie ustalenia maksymalnych wartości natężenia pola elektrycznego ( $E_{\max}$ ), magnetycznego ( $H_{\max}$ ) oraz szerokości obszaru, w którym natężenie pola elektrycznego przekracza wartość 1 kV/m. Pomiary należy wykonywać w tych przekrojach linii, w których odległość od ziemi przewodów fazowych linii jest najmniejsza, a wyniki pomiarów przeliczać na warunki, jakie wystąpią przy parametrach pracy linii najbardziej niekorzystnych z punktu widzenia wpływu na środowisko. Oznacza to konieczność uwzględnienia maksymalnego dopuszczalnego napięcia i prądu linii, a także najwyższej dopuszczalnej temperatury przewodów. W przypadku linii jednotorowych przeliczenie wartości zmierzonych na spodziewane wartości maksymalne  $E_{\max}$  i  $H_{\max}$  nie jest trudne, chociaż wymaga znajomości profili poprzecznych linii w przęsłach, w których przeprowadzono pomiary. Poważny problem stwarza natomiast przeliczanie wartości natężenia pola magnetycznego wytwarzanego przez linie dwutorowe. Ponieważ w większości przypadków pomiary w otoczeniu linii dwutorowych wykonywane są przy niesymetrycznym obciążeniu każdego toru, przeliczenie wyników pomiarów na jednakowe obciążenie obu torów linii jest praktycznie niemożliwe. W konsekwencji wyniki pomiarów natężenia pola magnetycznego przeprowadzone przy nierównomiernie obciążonych torach linii nie mogą być podstawą do oceny możliwości przekroczenia dopuszczalnej wartości natężenia pola magnetycznego określonej w obowiązujących przepisach. Ocena taka może być przeprowadzona wyłącznie na podstawie wyników obliczeń. Med. Pr. 2009;60(2):159–165

Słowa kluczowe: pole elektromagnetyczne 50 Hz, pomiary, poprawki pomiarowe, obliczenia rozkładów pól, składowa elektryczna pola 50 Hz, składowa magnetyczna pola 50 Hz

### ABSTRACT

Identification of electromagnetic fields in the vicinity of high voltage overhead transmission lines requires taking measurements and determining, on their basis, the maximum values of electric ( $E_{\max}$ ) and magnetic ( $H_{\max}$ ) field strength, as well as the width of the area with electric field strength exceeding 1 kV/m. Measurements should be carried out in the places, where the distance between phase wires and the ground is smallest, and their results converted to conditions expected at the most disadvantageous parameters of the work of line in terms of their effect on the environment. This requires taking into consideration the maximum voltage of the transmission line, as well as the highest acceptable temperature of wires. In a single-circuit line, conversion of the measured values to expected maximum values of  $E_{\max}$  and  $H_{\max}$  is not difficult, although it requires knowledge of cross-profiles in spans, in which measurements were taken. However, recounting the values of magnetic field strength produced by two-circuit lines creates a serious problem. Since in the majority of cases, the measurements in the surrounding of two-circuit lines are carried out at asymmetrical currents in both circuits, converting their results to symmetrical currents of the lines is practically impossible. Therefore, the results of the measurements of magnetic field strength carried out at the asymmetrical current of a two-circuit line cannot provide the basis for assessing the possibility of exceeding the allowable value of magnetic field intensity determined in the binding regulations. Such an assessment can only be done on the basis of the results of relevant calculations. Med Pr 2009;60(2):159–165

Key words: 50 Hz electromagnetic fields, measurements, measurement amendments, calculations of electromagnetic field distributions, 50 Hz electric field component, 50 Hz magnetic field component

Adres autora: Instytut Energoelektryki I-8, Politechnika Wrocławska

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: marek.szuba@pwr.wroc.pl

Nadesłano: 5 grudnia 2008

Zatwierdzono: 16 lutego 2009

### WSTĘP

Jednym z istotnych zadań wykonywanych w ramach kontroli stanu środowiska są pomiary pól elektromagnetycznych, które przeprowadza się zarówno przed

oddaniem do użytkowania obiektów będących źródłem pól, jak również, w uzasadnionych przypadkach, w czasie ich eksploatacji. W przypadku obiektów elektroenergetycznych pomiary obu składowych pola — elektrycznej (E) i magnetycznej (H) — przeprowadza się zgodnie z zasadami określonymi w Rozporządzeniu

\* Referat wygłoszony na warsztatach „Ochrona przed PEM” w Instytucie Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera, 8–10 października 2008, Łódź.

z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów (1), które wymaga zastosowania poprawek pomiarowych umożliwiających uwzględnienie parametrów pracy instalacji, które wytwarzają te pola, najbardziej niekorzystnych z punktu widzenia oddziaływania na środowisko. Wymóg ten wydaje się oczywisty, chociaż w wielu przypadkach prowadzi do znacznych błędów w ustaleniu spodziewanych (maksymalnych) poziomów pól, a niekiedy jest niemożliwy do spełnienia. Prowadzi to do sytuacji, w której wyniki pomiarów, w odniesieniu do których nie uwzględniono stosownych poprawek, mają niewielką wartość dla kontroli stanu środowiska w zakresie występowania w nim pól elektromagnetycznych. Może to powodować niewłaściwe oceny potencjalnej uciążliwości dla środowiska wielu obiektów elektroenergetycznych, przede wszystkim stacji elektroenergetycznych oraz wielotorowych linii napowietrznych wysokiego napięcia, w tym bardzo rozpowszechnionych linii dwutorowych.

### **WYKONYWANIE POMIARÓW POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO W SĄSIĘDZTWIE NAPOWIETRZNYCH LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH**

Dopuszczalne poziomy pole elektromagnetycznych w środowisku oraz sposoby sprawdzania dotrzymania tych poziomów określone zostały w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. (1). Poza sprecyzowaniem wartości dopuszczalnych obu składowych pola elektromagnetycznego 50 Hz, elektrycznej i magnetycznej, wspomniany akt prawny określa metody sprawdzania poziomów tych składowych w środowisku. Wymagania szczegółowe dotyczące przeprowadzania pomiarów w sąsiedztwie linii napowietrznych sprecyzowano w pkt 33, 35 i 36, w załączniku nr 2 do wspomnianego rozporządzenia (1). Stanowią one, że:

- pomiary poziomów pól elektromagnetycznych w otoczeniu napowietrznych linii elektroenergetycznych wykonuje się, jeżeli ich napięcie znamionowe jest równe 110 kV bądź wyższe;
- w otoczeniu napowietrznych linii elektroenergetycznych pomiary pola elektrycznego należy wykonywać:
  - nad powierzchnią ziemi lub nad innymi powierzchniami, na których mogą przebywać ludzie, w szczególności dachami spełniającymi rolę tarasów, tarasami, balkonami, podestami — na wysokości 2 m;

— w pobliżu obiektów budowlanych, w odległości nie mniejszej niż 1,6 m od ścian tych obiektów, ze względu na zakłócający wpływ przewodzących ścian na wskazania przyrządów;

- pomiary pola magnetycznego w otoczeniu linii elektroenergetycznych należy wykonywać w pionach pomiarowych, na wysokościach 0,3–2 m nad powierzchnią ziemi lub nad innymi powierzchniami, na których mogą przebywać ludzie, zwłaszcza dachami spełniającymi rolę tarasów, tarasami, balkonami, podestami (podczas pomiarów przyrządowi pomiarowemu należy nadać takie położenie w stosunku do linii napowietrznych, aby wskazywał maksymalne wartości wielkości mierzonej w danym punkcie pomiarowym).

Powyższe wymagania wydają się dość oczywiste i wynikają zarówno z wieloletniej praktyki pomiarowej, jak i cech metrologicznych większości przyrządów pomiarowych. Niestety, w wielu przypadkach urzędy administracji publicznej nakazując wykonanie pomiarów kontrolnych w sąsiedztwie napowietrznych linii elektroenergetycznych, nie precyzują miejsc, w których należy to zrobić. Jest to zrozumiałe, jeżeli postanowienie o konieczności wykonania pomiarów dotyczy miejsc lokalizacji zabudowy mieszkaniowej lub terenów przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową, chociaż w tym ostatnim przypadku celowe byłoby wskazanie na konieczność zidentyfikowania granicy obszaru, w którym natężenie pola elektrycznego przekracza 1 kV/m.

Zdarzają się też rozstrzygnięcia administracyjne nakazujące wykonanie pomiarów w każdym przęśle linii napowietrznej, co w przypadku linii o długości przekraczającej nierzadko kilkadziesiąt kilometrów wymaga zaangażowania ekipy pomiarowej na wiele dni, a ponadto naraża właściciela obiektu (instalacji) na poważne obciążenie finansowe. Sytuacje takie występują najczęściej w przypadku konieczności wykonania pomiarów pola elektromagnetycznego przed oddaniem linii do użytkowania, a tak szeroki, niczym nieuzasadniony ich zakres, jest najczęściej wynikiem mało precyzyjnych zapisów w raporcie oddziaływania na środowisko, który został sporządzany na etapie uzyskiwania decyzji środowiskowej.

Celem pomiarów kontrolnych natężenia pola elektrycznego i magnetycznego wykonywanych przed oddaniem linii do użytkowania jest sprawdzenie, czy wartości dopuszczalne sprecyzowane w ww. rozporządzeniu (1) nie są przekroczone. Oczywiście jest więc, że głównym zadaniem ekipy pomiarowej jest zidentyfikowanie

maksymalnej wartości natężenia pola elektrycznego ( $E_{\max}$ ) oraz magnetycznego ( $H_{\max}$ ), a także maksymalnej szerokości obszaru, w którym  $E$  przekracza 1 kV/m (teren, na którym niedozwolona jest realizacja zabudowy mieszkaniowej). Jeśli uwzględnić to, że maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu linii napowietrznej zależy m.in. od odległości od ziemi przewodów fazowych oraz ich konfiguracji geometrycznej, to przed przystąpieniem do wykonywania pomiarów należy ustalić miejsca, w których ta odległość jest najmniejsza. Tam bowiem należy spodziewać się maksymalnej wartości, zarówno  $E_{\max}$ , jak i  $H_{\max}$ . W związku z tym, że wartości te zależą od konfiguracji geometrycznej przewodów (odległości przewodów od osi słupa oraz wzajemnej odległości między przewodami) za w pełni wystarczające należy uznać wykonanie pomiarów w przęsłach (w przekroju, w którym odległość przewodów od ziemi jest najmniejsza), które zbudowane są ze wszystkich występujących w linii par słupów. Jeśli zatem w wybudowanej linii występuje kilkanaście przęseł zbudowanych ze słupów typu P (słupy przelotowe), to wystarczy wykonanie pomiarów w tym przęsle, w którym odległość przewodów od ziemi jest najmniejsza.

Nieco inna sytuacja występuje w przypadku konieczności wykonania pomiarów mających na celu ustalenie granic obszaru, na którym natężenie pola elektrycznego może przekroczyć wartość 1 kV/m, a więc takiego, wewnątrz którego, zgodnie z obowiązującymi przepisami (1), niedozwolona jest lokalizacja zabudowy mieszkaniowej. Niestety, w tym przypadku nie wystarczy wykonanie pomiarów w przekroju, w którym odległość przewodów od ziemi jest najmniejsza, ponieważ dla niektórych konfiguracji geometrycznych przewodów linii zwiększenie tej odległości powoduje poszerzenie obszaru, na którym natężenie pola elektrycznego może przekroczyć 1 kV/m. W takiej sytuacji dla każdej charakterystycznej pary słupów tworzących przęsło należy ustalić metodami obliczeniowymi odległość przewodów od ziemi, przy której zasięg obszaru, w którym  $E$  jest większe niż 1 kV/m jest największy, i dla takich właśnie warunków powinny zostać przeprowadzone pomiary.

Niezależnie od pomiarów zmierzających do wyznaczenia maksymalnych wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego w sąsiedztwie linii napowietrznej konieczne jest wykonanie pomiarów w przekrojach prostopadłych do osi linii, w których zlokalizowane są budynki mieszkalne albo inne obiekty budowlane przeznaczone do stałego pobytu ludzi. Doświadczenie

wskazuje, że należy uwzględnić wyłącznie te budynki, które zlokalizowane są w odległościach mniejszych niż 35–40 m od osi linii napowietrznej o napięciu 220 lub 400 kV, a także te, które znajdują się w odległości mniejszej niż 20–25 m od osi linii napowietrznej o napięciu 110 kV.

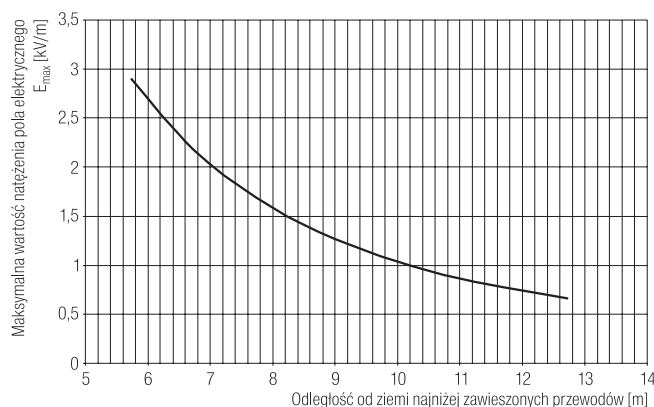
## UWZGLĘDNIANIE POPRAWEK POMIAROWYCH

Jak już wspomniano, poważnym problemem przy pomiarowej identyfikacji poszczególnych składowych pola elektromagnetycznego występującego w sąsiedztwie linii napowietrznej jest konieczność uwzględnienia poprawek pomiarowych, o których mowa w pkt 6 załącznika nr 2 do Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. (1). Ich wprowadzenie ma na celu ustalenie maksymalnych wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, tj. poziomów pola najbardziej niekorzystnych z punktu widzenia oddziaływania na środowisko, i w konsekwencji ich porównanie z wartościami dopuszczalnymi sprecyzowanymi w wymienionym rozporządzeniu (1). Taki sposób postępowania wydaje się w pełni uzasadniony, jeśli uwzględnić, że w przypadku linii napowietrznych praktycznie nie ma możliwości przeprowadzenia pomiarów poszczególnych składowych pola elektromagnetycznego w takich warunkach pracy linii, przy których natężenia obu składowych pola będą maksymalne.

Uwzględnienie poprawki niezbędnej do przeliczenia natężenia pola elektrycznego, zmierzonego przy określonym napięciu roboczym linii ( $E_{(\text{pom})} = E_{U_r}$ ), na poziom, który wystąpi przy najwyższym dopuszczalnym napięciu linii ( $E_{U_{rdop}}$ ) jest wyjątkowo proste (np. dla linii o napięciu znamionowym 110 kV największe dopuszczalne napięcie robocze wynosi 123 kV). Jak wskazuje literatura (2), sprowadza się ono do zastosowania przelicznika  $K_u$  określonego wzorem:

$$K_u = U_r / U_{rdop} \quad [1]$$

Nieco większym problemem jest wprowadzenie poprawki uwzględniającej różnicę między odległością od ziemi przewodów, zmierzoną w czasie wykonywania pomiarów, a odległością, która wystąpi w najbardziej niekorzystnych warunkach pracy linii. Wartość zmierzona natężenia pola elektrycznego i wartość przeliczona mogą w skrajnych warunkach różnić się dość znacznie, jeśli uwzględnić to, że dwukrotne zmniejszenie odległości między przewodem fazowym a ziemią powoduje prawie czterokrotny wzrost natężenia pola elektrycznego. Zilustrowano to na rycinach 1. i 2., odpowiednio dla linii jedno- i dwutorowej.



**Ryc. 1.** Zależność maksymalnej wartości natężenia pola elektrycznego  $E_{\max}$  od odległości od ziemi najniższego zawieszono przewodu wyznaczona obliczeniowo w przekroju jednocircuitowej linii o napięciu 110 kV, którą zbudowano na słupach serii B2 typu P (przelotowe).

**Fig. 1.** Dependence of the maximum value of electric field intensity ( $E_{\max}$ ) on the distance from the earth of the lowest conductors. Data obtained from the calculations conducted in the cross-section of a one-circuit overhead line of 110 kV built on poles of series B2 type P.

Do przeliczeń o charakterze szacunkowym można w takich przypadkach posługiwać się współczynnikiem  $K_f$  wyrażonym zależnością (3):

$$K_f = [(h_t - 2)/(h_{\min} - 2)]^2 \quad [2]$$

gdzie:

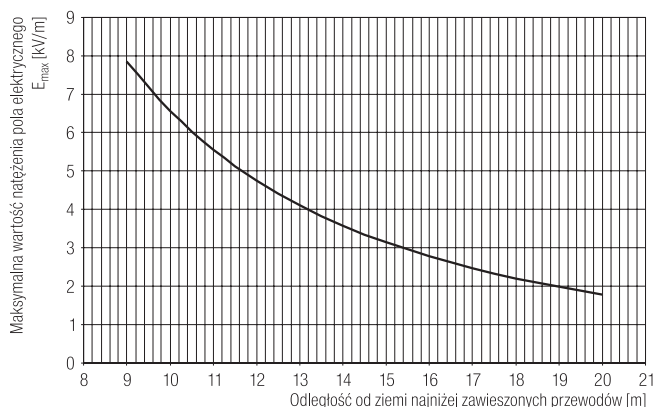
$h_t$  — odległość przewód fazowy–ziemia w miejscu wykonywania pomiaru, w temperaturze, przy której wykonywano pomiar,

$h_{\min}$  — najmniejsza dopuszczalna odległość przewód fazowy–ziemia w miejscu wykonywania pomiarów, wyznaczona w oparciu o zasady określone w normie (4) (największy zwis normalny to odległość przy temperaturze +40°C lub +60°C, ew. -5°C przy obciążeniu przewodów sadzią normalną).

O ile odległość między przewodem fazowym a ziemią w miejscu wykonywania pomiaru ( $h$ ) można zmierzyć jedną z wielu dostępnych metod, o tyle informacje dotyczące najmniejszej możliwej odległości od ziemi przewodów ( $h_{\min}$ ) w tym miejscu można uzyskać, jeśli ma się do dyspozycji profile podłużne linii. Uwzględnienie poprawki wynikającej z różnicy odległości  $h$  i  $h_{\min}$  pozwala na wyznaczenie spodziewanego (w najbardziej niekorzystnych warunkach pracy linii) natężenia pola elektrycznego w interesującym punkcie, które wynosić będzie:

$$E_{\max} = K_u \times K_f \times E_{(pom)} \quad [3]$$

Podobnie postępować należy przy uwzględnianiu poprawek w przypadku przeliczania wyników pomiarów natężenia pola magnetycznego. Trzeba jednak



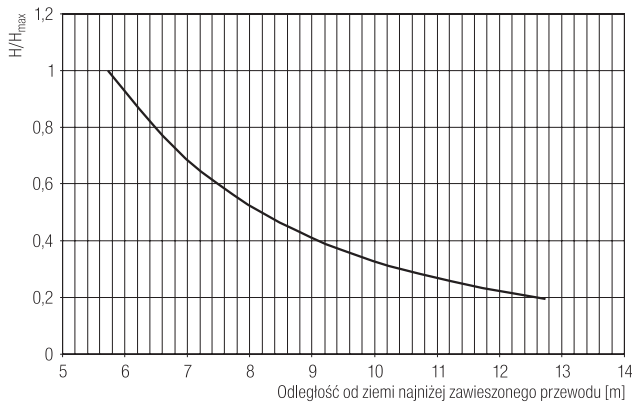
**Ryc. 2.** Zależność maksymalnej wartości natężenia pola elektrycznego  $E_{\max}$  od odległości od ziemi najniższego zawieszono przewodu, wyznaczona obliczeniowo w przekroju dwucircuitowej linii o napięciu 400 kV, którą zbudowano na słupach serii Z52 typu P (przelotowe).

**Fig. 2.** Dependence of the maximum value of electric field intensity ( $E_{\max}$ ) on the distance from the earth of the lowest conductors. Data obtained from the calculations conducted in the cross-section of a two-circuit overhead line of 400 kV built on poles of series Z52 type P.

zwrócić uwagę, że zależność maksymalnej wartości natężenia pola magnetycznego, jakie występuje pod linią, od odległości między przewodem fazowym a ziemią jest nieco inna dla linii jednocircuitowych i dwucircuitowych (wiektorowych) (ryc. 3 i 4).

W przypadku symetrycznie obciążonych linii jednocircuitowych do przeliczenia wartości zmierzonej przy określonym prądzie roboczym linii ( $H_{lr}$ ) na wartość najbardziej niekorzystną z punktu widzenia ochrony środowiska — tj. natężenie pola magnetycznego ( $H_{\max}$ ), jakie wystąpi przy największym dopuszczalnym obciążeniu linii ( $I_{rdop}$ ) i najmniejszej dopuszczalnej odległości przewodu fazowego od ziemi — konieczne jest uwzględnienie dwóch parametrów korygujących, wzajemnie ze sobą powiązanych. Trzeba bowiem zauważyć, że odległość przewodów fazowych od ziemi w dowolnym punkcie pomiarowym zależy zarówno od temperatury otoczenia (powietrza), jak i prądu obciążenia linii (5). Ponieważ zależność ta nie jest prosta, szczególnie w przypadku coraz powszechniej stosowanych przewodów niskozwisowych (wysokotemperaturowych) (6), do dokonania niezbędnych przeliczeń konieczna jest znajomość nie tylko wartości  $I_{rdop}$ , ale także wartości zwisów linii w różnych temperaturach.

Trzeba wyraźnie podkreślić, że przeliczanie zmierzonych wartości na najbardziej niekorzystne warunki pracy linii napowietrznej jest niezwykle istotne, ponieważ różnice między wartościami nieprzeliczonymi a przeliczonymi mogą być znaczne. Ilustrują to wyniki



Maksymalny prąd obciążenia:  $I_{rdop} = 735$  A.

**Ryc. 3.** Zależność  $H/H_{max}$  od odległości od ziemi najniżej zawieszonoego przewodu, wyznaczona obliczeniowo w przekroju jednocircuitowej linii o napięciu 110 kV, którą zbudowano na słupach serii B2 typu P (przelotowe).

**Fig. 3.** Computationally appointed dependence of  $H/H_{max}$  on the distance from the earth of the lowest line wire. Data obtained from the calculations conducted in the cross-section of a one-circuit 110 kV overhead line built on poles of series B2 type P.

pomiarów wykonanych w celu zidentyfikowania maksymalnych wartości natężenia pola elektrycznego ( $E_{max}$ ) i magnetycznego ( $H_{max}$ ). Przeprowadzono je w przekroju prostopadłym do osi jednocircuitowej linii 110 kV, w miejscu największego zwisu przewodów linii zbudowanej na słupach serii B2 typu P. Podstawowe parametry linii w analizowanym prześle były następujące:

- długość przęsła: 300 m,
- przewody fazowe: AFL-6 240 mm<sup>2</sup> ( $I_{rdop} = 735$  A),
- naprężenie przewodów: 88,29 N/mm<sup>2</sup>.

Pomiary wykonywano przy temperaturze przewodów wynoszącej +10°C, napięciu roboczym linii ( $U_r$ ) — 110 kV i prądzie obciążenia ( $I_r$ ) — 146 A, w miejscu, w którym zmierzona odległość od ziemi najniżej zawieszonoego przewodu ( $h$ ) wynosiła 8,4 m. W tych warunkach otrzymano następujące wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego:

$$E_{max(pom)} = 1,30 \text{ kV/m,}$$

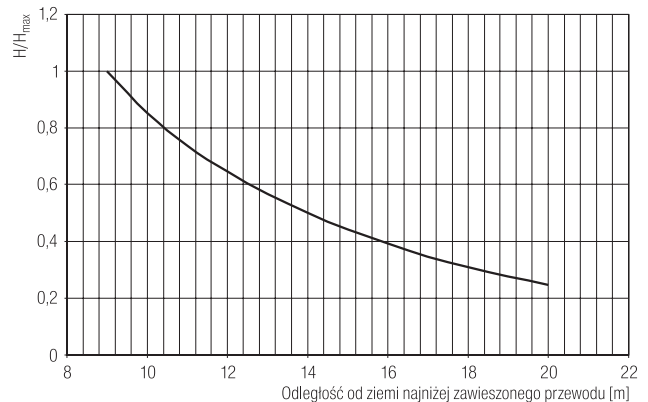
$$H_{max(pom)} = 2,58 \text{ A/m.}$$

Po przeliczeniu zmierzonych wartości na najwyższe dopuszczalne napięcie robocze linii ( $U_{rdop} = 123$  kV) i maksymalny prąd obciążenia linii ( $I_{rdop} = 735$  A) uzyskano następujące wyniki:

$$E = 1,45 \text{ kV/m,}$$

$$H = 13,0 \text{ A/m.}$$

Po uwzględnieniu maksymalnego zwisu przewodów (temperatura +40°C) otrzymano poprawnie przeliczone



Maksymalny prąd obciążenia:  $I_{rdop} = 2440$  A.

**Ryc. 4.** Zależność  $H/H_{max}$  od odległości od ziemi najniżej zawieszonoego przewodu wyznaczona obliczeniowo w przekroju dwucircuitowej linii o napięciu 400 kV, którą zbudowano na słupach serii Z52 typu P (przelotowe).

**Fig. 4.** Computationally appointed dependence of  $H/H_{max}$  on the distance from the earth of the lowest line wire. Data obtained from the calculations conducted in the cross-section of a two-circuit 400 kV overhead line built on poles of series Z52 type P.

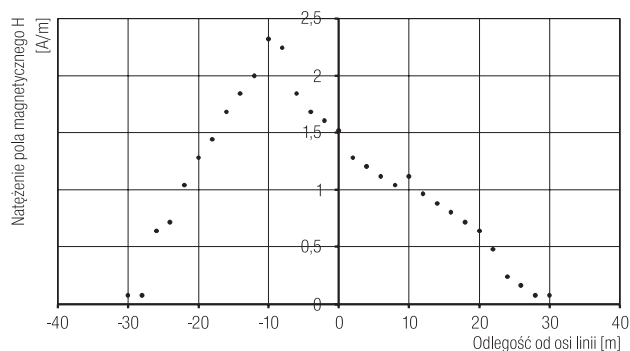
maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, które wynosiły:

$$E_{max} = 1,82 \text{ kV/m,}$$

$$H_{max} = 16,8 \text{ A/m.}$$

Jeszcze trudniejsza sytuacja występuje w przypadku konieczności przeliczenia na najbardziej niekorzystne warunki pracy linii wartości natężenia pola magnetycznego, które zmierzono w otoczeniu linii dwucircuitowej (wielocircuitowej). Praktyka wskazuje, że podczas przeprowadzania pomiarów natężenia pola magnetycznego wokół linii dwucircuitowych obciążenie poszczególnych torów różni się, najczęściej dość znacznie. Uwarunkowania sieciowe powodują, że nie ma praktycznie żadnej możliwości przeprowadzenia takich pomiarów przy równych obciążeniach obu torów linii, a tym bardziej przy obciążeniach maksymalnych ( $I_{rdop}$ ). W rezultacie rozkład natężenia pola magnetycznego w przekroju poprzecznym linii, wyznaczony na podstawie wyników pomiarów przeprowadzonych przy różnych wartościach prądów obciążenia każdego toru, wykazuje znaczną niesymetrię, co zilustrowano na rycinie 5.

Dla takiej sytuacji — tj. nierównomiernego obciążenia torów, która jak wspomniano w liniach dwucircuitowych występuje prawie zawsze — niemożliwe staje się przeliczenie wartości zmierzonych na najbardziej niekorzystne warunki pracy linii, tj. maksymalne obciążenie obu torów linii oraz najmniejszą dopuszczalną odległość przewodów fazowych od ziemi. W konsekwencji



Odległość od ziemi najniższej zawieszonych przewodów:  $h = 12,8$  m.  
Obciążenie poszczególnych torów:  $I_{tor1} = 59,1$  A oraz  $I_{tor2} = 343,1$  A.  
Maksymalny dopuszczalny prąd obciążenia każdego toru:  $I_{rdop} = 2440$  A.

**Ryc. 5.** Rozkład natężenia pola magnetycznego w przekroju dwutorowej linii o napięciu 400 kV zbudowanej na słupach serii Z52 typu P (przelotowe).

**Fig. 5.** Distribution of the magnetic field strength (H) on the cross-section of the 400 kV two-circuit overhead line built on poles of series Z52 type P.

wyniki pomiarów przeprowadzonych przy nierównomiernym obciążeniu torów linii mają bardzo niewielką przydatność do oceny możliwości przekroczenia wartości dopuszczalnej ustalonej w przepisach (1).

Niełatwe okazuje się też wyznaczenie granic obszaru w sąsiedztwie linii, wewnątrz którego natężenie pola elektrycznego może przekroczyć wartość dopuszczalną ustaloną w przepisach (1) dla terenów przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową, tj. 1 kV/m. Również i w tym przypadku konieczne jest przeliczenie wyników pomiarów uwzględniające możliwość wzrostu napięcia linii z wartości  $U_r$  do  $U_{rdop}$  oraz wyznaczoną dla konkretnego przęsła zależność szerokości obszaru, w której E jest większe niż 1 kV/m, od odległości od ziemi najniższej zawieszonych przewodów. Chociaż przy różnych odległościach przewodu fazowego od ziemi szerokość obszaru, w którym natężenie pola elektrycznego może przekraczać 1 kV/m, nie zmienia się w szerokich granicach (tab. 1), to trzeba pamiętać, że ustalenie powierzchni tego obszaru skutkuje:

- wyłączeniem z możliwości zabudowy określonej powierzchni terenu,
- wypłatą odszkodowania właścicielowi nieruchomości za istotne zmniejszenie wartości nieruchomości (np. z funkcji budowlanej na inną).

Wyniki zaprezentowane w tabeli 1. wskazują, że dla analizowanej linii szerokość obszaru, na którym natężenie pola elektrycznego jest większe niż 1 kV/m, rośnie wraz ze zmniejszaniem się odległości między przewodem fazowym a ziemią. Należy jednak zwrócić uwagę, że o ile maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego ( $E_{max}$ ) dla dowolnej konfiguracji

**Tabela. 1.** Szerokość obszaru, w którym natężenie pola elektrycznego może przekroczyć wartość 1 kV/m w oparciu o jego pomiary wykonane w wybranym przekroju pomiarowym (przy najmniejszej odległości przewodów od ziemi)\*

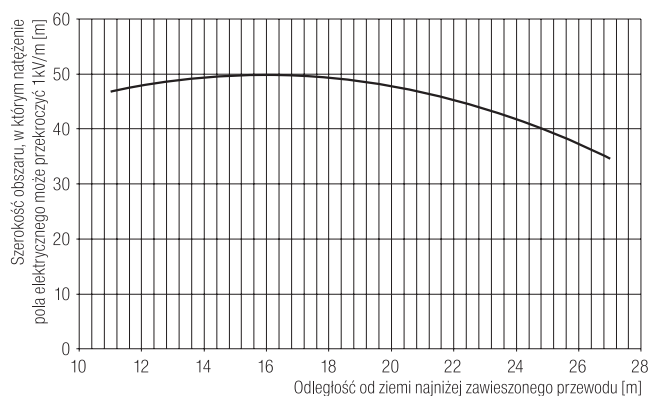
**Table 1.** The width of area with the electric field intensity (E), which may exceed 1 kV/m. Data obtained from the measurements conducted in the cross-section of the 110 kV overhead line (in the cross-section of minimum clearance)

Temperatura otoczenia	Szerokość obszaru, w którym $E > 1$ kV/m**
0°C	od -10 m do +8 m
10°C	od -10 m do +9 m
20°C	od -10 m do +9 m
30°C	od -10 m do +10 m
40°C (maks. przewodów)	od -10 m do +11 m

\* Przeszło jednotorowej linii 110 kV zbudowane na słupach przelotowych (typ P) serii B2.  
\*\* Odległości mierzone względem osi linii.

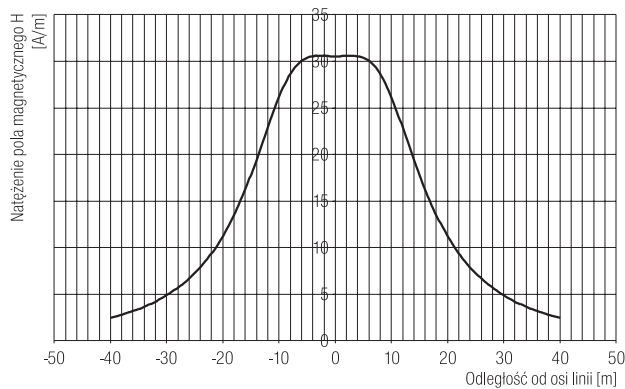
geometrycznej linii maleje zawsze wraz ze zwiększaniem się tej odległości, o tyle dla niektórych układów linii (pionowy układ przewodów) szerokość obszaru, w którym  $E > 1$  kV/m, do pewnego momentu rośnie w miarę zwiększania się odległości przewodu fazowego od ziemi (ryc. 6).

Jak już wspomniano, przeliczanie — czy jak nazwano to w rozporządzeniu (1), stosowanie poprawek pomiarowych, które umożliwią uwzględnienie parametrów pracy linii napowietrznej najbardziej niekorzystnych z punktu widzenia oddziaływania na środowisko — komplikuje się poważnie, kiedy dotyczy wartości natężenia pola magnetycznego, które zmierzono w sąsiedztwie linii dwutorowej (wielotorowej). Na skutek sumowania się w przestrzeni wektorów natężenia pola magnetycznego,



**Ryc. 6.** Zależność szerokości obszaru, w którym natężenie pola elektrycznego jest większe niż 1 kV/m, w funkcji odległości od ziemi najniższej zawieszonych przewodów linii (h), w przęsle złożonym ze słupów serii E33 typu P.

**Fig. 6.** Dependence of the width of the area with  $E > 1$  kV/m on the distance from the earth of the lowest conductors (h) in span of the line built on poles of series E33 type P.



Odległość od ziemi najniższych zawieszonych przewodów:  $h = 11$  m.  
Maksymalny dopuszczalny prąd obciążenia każdego toru:  $I_{\text{dop}} = 2440$  A.

**Ryc. 7.** Rozkład natężenia pola magnetycznego w przekroju dwutorowej linii o napięciu 400 kV zbudowanej na słupach serii Z52 typu P (przelotowe).

**Fig. 7.** Distribution of the magnetic field strength (H) in the cross-section of the 400 kV two-circuit overhead line built on poles of series Z52 type P.

wypadkowa, skuteczna wartość natężenia pola magnetycznego pod linią nie jest wprost proporcjonalna do natężenia prądu płynącego przez linię, ponieważ w liniach dwutorowych prądy płynące w każdym z torów są od siebie niezależne. Z oczywistych powodów rozkład natężenia pola magnetycznego w przekroju prostopadłym do osi linii wyznaczony (pomiarowo — ryc. 5, lub obliczeniowo) przy różnym obciążeniu torów jest niesymetryczny.

Rozkład natężenia pola magnetycznego uzyskany z pomiarów (ryc. 5) warto porównać z rozkładem wyznaczonym obliczeniowo dla najbardziej niekorzystnych warunków pracy linii (ryc. 7).

Wyniki obliczeniowej identyfikacji maksymalnej wartości natężenia pola magnetycznego dla najbardziej niekorzystnych warunków pracy linii z punktu widzenia oddziaływania na środowisko ( $H_{\text{max}} = 30,6$  A/m) nie pozostają w żadnym prostym związku z wartością  $H_{\text{max}}$  wyznaczoną pomiarowo dla tej linii przy różnych obciążeniach jej torów (ryc. 5). Oznacza to, że ustalenie maksymalnej wartości natężenia pola magnetycznego, jakie może wystąpić pod linią dwutorową w najbardziej niekorzystnych warunkach jej pracy na podstawie pomiarów natężenia pola magnetycznego w innych warunkach (tj. przy nierównomiernym obciążeniu torów linii), nie jest możliwe. Jest zatem oczywiste, że wyniki pomiarów natężenia pola magnetycznego, które przeprowadzono

przy niesymetrycznym obciążeniu obu torów nie mogą służyć do oceny przekroczenia wartości dopuszczalnej tej wielkości.

## WNIOSKI

1. W większości przypadków pomiary rozkładów natężenia pola elektrycznego (E) i magnetycznego (H), które przeprowadzane są w określonych warunkach pracy linii napowietrznych, nie pozwalają na ustalenie maksymalnych możliwych do wystąpienia wartości  $E_{\text{max}}$  i  $H_{\text{max}}$ .
2. Przeliczanie zmierzonych wartości na najbardziej niekorzystne warunki pracy linii możliwe jest wyłącznie w przypadku linii jednotorowych, przy czym nie jest łatwe uwzględnienie przelicznika związane z temperaturą przewodów.
3. W przypadku linii wielotorowych (dwutorowych) ustalenie maksymalnych wartości E i H jest możliwe jedynie drogą obliczeniową, podobnie jak określenie maksymalnej szerokości obszaru, w którym E może przekroczyć wartość 1 kV/m.

## PIŚMIENNICTWO

1. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów. DzU z 2003 r. nr 192, poz. 1883
2. Instytut Energetyki. Natężenie pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu linii 220–750 kV. Katalog parametrów, charakterystyk i stref ochronnych. Instytut, Warszawa 1994
3. Bieńkowski P., Papliński P.: Podstawy metrologii PEM o częstotliwości przemysłowej w otoczeniu urządzeń elektroenergetycznych. Materiały z XXII Szkoły Jesiennej PTBR „Pola elektromagnetyczne w środowisku — problemy zdrowotne, ekologiczne, pomiarowe i administracyjne”, Zakopane 2008, ss. 160–170
4. Polska Norma PN-E-05100-1:1998. Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Projektowanie i budowa. Linie prądu przemiennego z przewodami roboczymi gołymi
5. Biuro Studiów i Projektów Energetycznych „Energoprojekt-Kraków”. Tablice zwisów i naprężeń przewodów elektroenergetycznych linii napowietrznych wykonanych z zastosowaniem przewodów typu AFL. Biuro, Kraków 1994
6. Sokolik W.A.: Nowoczesny sposób na szybkie zwiększenie zdolności przesyłowych linii napowietrznych za pomocą przewodów o małych zwisach [prezentacja]. Zircon Poland, Warszawa 2008