

**Waldemar SKOMUDEK<sup>1</sup>, Piotr SZPINDLER<sup>2</sup>**<sup>1</sup> POLITECHNIKA OPOLSKA, KATEDRA ZARZĄDZANIA PROJEKTAMI, ul. Luboszycka 5, 45-036 Opole<sup>2</sup> KROMISS-BIS Sp. z o.o., ul. Legionów 92, 42-202 Częstochowa**Rozkład składowych pola elektromagnetycznego wokół przewodów linii napowietrznych wysokich napięć wykonanych na słupach pełnościennych****Dr hab. inż. Waldemar SKOMUDEK**

Kierownik Katedry Zarządzania Projektami Politechniki Opolskiej. Specjalizuje się przede wszystkim w ocenie stopnia zagrożenia i skuteczności ochrony przed oddziaływaniem zjawisk o charakterze falowym (elektromagnetycznym), które towarzyszą wyładowaniom atmosferycznym i stanom zakłóceń w sieciach elektroenergetycznych, a także w zakresie rynku energii elektrycznej oraz problematyki stabilności pracy systemu elektroenergetycznego i rynku energii elektrycznej.



e-mail: w.skomudek@po.opole.pl

**Streszczenie**

Istotnym elementem procesu budowy napowietrznych linii elektroenergetycznych wysokich napięć jest ocena ich oddziaływania na środowisko. W artykule zaprezentowano wybrane przykłady otrzymanych rozkładów pól elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu przewodów linii napowietrznej jedno i dwutorowej, o napięciu znamionowym 110 kV. W analizie uwzględniono dwa rodzaje słupów przelotowych: kratowe oraz pełnościennie z układem izolacyjnym standardowym i zmodyfikowanym. Uzyskane wyniki potwierdzają zasadność stosowania konstrukcji wąskotrzonowych w budownictwie sieciowym.

**Słowa kluczowe:** pole elektromagnetyczne, oddziaływanie na środowisko, słupy pełnościennie.

**Distribution of the electromagnetic field components around high voltage overhead line conductors installed on tubular poles****Abstract**

An important element in the construction process overhead high-voltage power lines is the assessment of their impact on the environment. This article presents some examples of electric and magnetic fields distributions received in the vicinity of one- and two-circuit 110 kV overhead line conductors (Fig. 7, 8, 9, 10). The study analyzes two kinds of suspension towers: lattice and tubular tower with standard and modified insulation system (Fig. 1, 2). The results support the use of towers with a smooth shaft for the construction of power grids. The results also helped to formulate a joint proposal. In each case under consideration, there was no breach of regulations defining the limits of the amplitudes of electric and magnetic fields (Fig. 11). Thus it can be concluded that the reduction of insulation gaps (while maintaining required levels of impact strength of insulation) is possible and reasonable, technically and economically. It leads to have tangible economic benefits. However, to maximize this effect is only possible under existing in the country of investment needs for overhead power lines. Another important factor for the level of benefits received shall be adopted design solutions overhead lines - whether it be one or multi-track lines, and whether the system adopted the cables will be based solely on the traditional solutions or will be introduced modifications described, using solutions among other things to reduce our impact on the environment overhead.

**Keywords:** electromagnetic fields, impact on the environment, tubular towers.

**1. Wstęp**

Wprowadzenie modyfikacji konstrukcji słupa polegającej na zmianie odstępów między przewodami roboczymi linii oraz sposobu ich zamocowania nie pozostaje bez wpływu na środowisko, w którym te urządzenia pracują [1, 2, 3, 9]. Uzyskanie w tym zakresie właściwego poziomu ochrony środowiska jest możliwe wyłącz-

nie poprzez spełnienie wymagań dotyczących projektowania,

**Mgr inż. Piotr SZPINDLER**

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej. W roku 2010 rozpoczął studia doktorskie na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. W pracy naukowo-badawczej zajmuje się problematyką wpływu pełnościennych słupów stalowych na niezawodność i poziom oddziaływania na środowisko linii napowietrznych wysokiego napięcia wykonanych z wykorzystaniem nowych rodzajów słupów.



e-mail: pszpindler@gmail.com

budowy i eksploatacji obiektów elektroenergetycznych. Źródłem tych wymagań są prawne regulacje i dokumenty normalizacyjne. Uwzględniając je przy ocenie wpływu zmiany odstępów izolacyjnych w napowietrznych linii elektroenergetycznych na środowisko oszacowano, że zmiana ta pozwala ograniczyć szerokość pasa ochronnego wzdłuż trasy linii. Tym samym zmniejszy się powierzchnia gruntu, z całkowitym lub znacznym stopniem ograniczenia użytkowania. W przypadku jednotorowej linii napowietrznej o napięciu znamionowym 110 kV efekt zmniejszenia powierzchni pasa ochronnego wskutek proponowanych zmian może wynieść nawet kilka procent.

Zmiana odstępów będzie miała również wpływ na wartość amplitud i rozkład składowych pola elektromagnetycznego wytworzonego wokół przewodów linii (zagadnienie oddziaływania na środowisko pola elektromagnetycznego wytwarzanego m.in. przez linie napowietrzne średniego i wysokiego napięcia jest ujęte w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów). Zgodnie z obowiązującymi w tym zakresie regulacjami prawnymi, dopuszczalne poziomy pola elektromagnetycznego o częstotliwości 50 Hz dla miejsc dostępnych dla ludności wynoszą:

- dla składowej elektrycznej ( $E$ ) 10 kV/m,
- dla składowej magnetycznej ( $H$ ) 60 A/m.

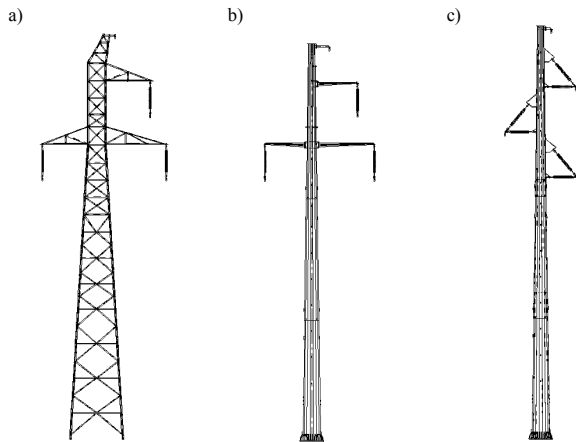
Regulacje te wymagają również, aby na terenach przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową natężenie pola elektrycznego nie przekroczyło wartości 1 kV/m, a natężenie pola magnetycznego wartości 60 A/m.

**2. Wybór obiektów poddanych analizie**

Aby ocenić, czy redukcja odstępów izolacyjnych, a także zmiana układu przewodów zawieszonych na słupach elektroenergetycznej linii napowietrznej są działaniami korzystnymi, które nie naruszają środowiskowych wymagań prawnych sporządzono wykresy przedstawiające rozkłady pól elektrycznego i magnetycznego dla różnych przypadków, a następnie przeprowadzono analizę porównawczą uzyskanych wyników dla wybranych rodzajów słupów oraz na zgodność z wymaganiami środowiskowymi.

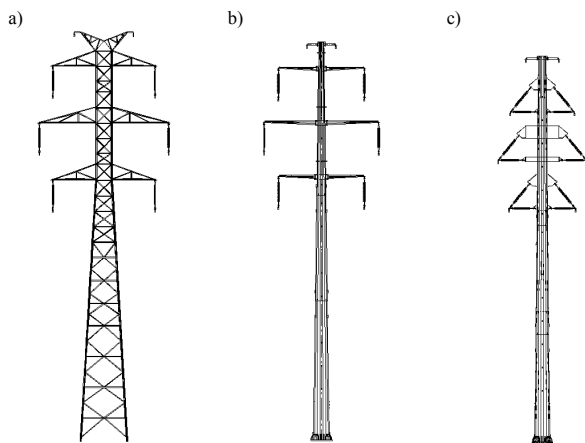
Sylwetki słupów kratowych oraz pełnościennych wybrano spośród typowych rozwiązań słupów stosowanych do budowy linii o napięciu 110 kV [4, 5]. Ponieważ do budowy linii napowietrznej najczęściej wykorzystuje się przelotowe konstrukcje wsporcze, do analizy rozkładów składowych pola elektromagnetycznego wykorzystano właśnie tego rodzaju słupy z przeznaczeniem dla linii jedno- i dwutorowej.

W obliczeniach uwzględniono słupy o wysokości równej 17 m, przy czym jest to odległość liczona od poziomu ziemi do poprzeczника zamocowanego najniżej. Jednocześnie uwzględniając modyfikację konstrukcji części wierzchołkowej słupów zaproponowano nową konstrukcję pełnościenną z poprzecznikami wykonanymi z wykorzystaniem izolatorów kompozytowych [7, 8]. Sylwetki słupów przelotowych linii jednotorowych oraz dwutorowych poddanych analizie ilustrują odpowiednio rysunki 1 i 2.



Rys. 1. Sylwetki słupów przelotowych jednotorowych przyjętych do analizy; a) kratowy typu EB24, b) pełnościenny typu Src, c) pełnościenny ze zmodyfikowanym układem izolacyjnym typu SPPI

Fig. 1. Form of one-circuit suspension towers chosen for the analysis; a) lattice type EB24, b) tubular tower type Src, c) tubular tower with modified insulation system - type SPPI



Rys. 2. Sylwetki słupów przelotowych dwutorowych przyjętych do analizy; a) kratowy typu EO24, b) pełnościenny typu Orc, c) pełnościenny ze zmodyfikowanym układem izolacyjnym typu DPPI

Fig. 2. Form of two-circuit suspension towers chosen for the analysis; a) lattice type EO24, b) tubular tower type Orc, c) tubular tower with modified insulation system - type DPPI

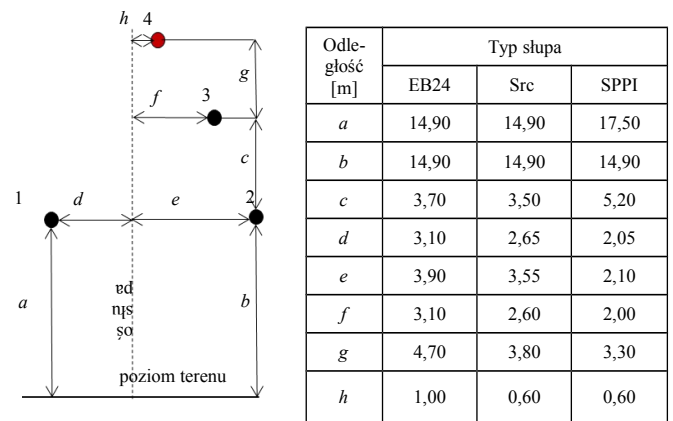
Dla potrzeb prowadzonych analiz składowych pola elektromagnetycznego rozpatrzono różne geometryczne rozmieszczenie przewodów na słupie. Układ geometryczny oraz przyjęte odległości przewodów fazowych i odgromowego od osi konstrukcji wsporczej dla różnych typów słupów linii jednotorowej ilustruje rys. 3, a dla linii dwutorowej rys. 4.

### 3. Analiza rozkładu składowych pola elektromagnetycznego

Analizę rozkładu pól elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu linii napowietrznych wysokiego napięcia poprzedzono oceną

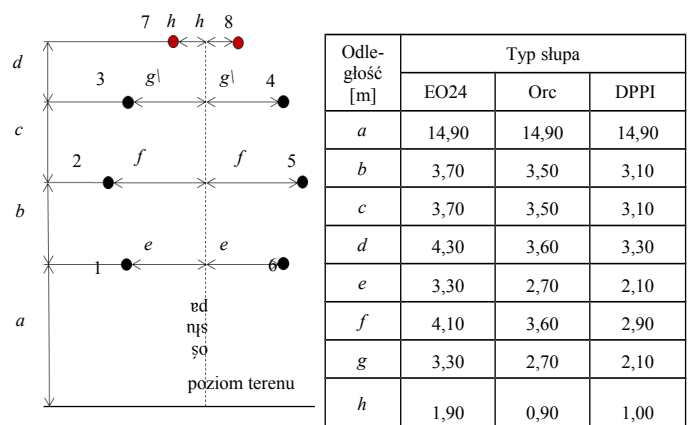
wpływu sylwetki słupa na geometryczne rozmieszczenie przewodów fazowych i odgromowych. Wnioski z przeprowadzonej oceny potwierdzają możliwość uzyskania mniejszych odstępów między przewodami roboczymi i odgromowymi w przypadku zastosowania stalowych słupów pełnościennych (słupy rurowe). Jest to możliwe ze względu na mniejszą średnicę trzonu słupa rurowego w stosunku do alternatywnego obrysu przekroju słupa kratowego.

Zamiana typowego rozwiązania poprzeczników stosowanych w przypadku słupów kratowych na poprzeczniki izolacyjne zastosowane w konstrukcjach pełnościennych pozwala na dodatkowe zmniejszenie odstępów przewodów względem siebie i osi słupa [6, 7]. Wzajemne rozmieszczenie przewodów dla różnych typów słupów linii jednotorowych i dwutorowych przedstawiono na rysunkach 5 i 6



Rys. 3. Schemat rozmieszczenia wraz z zestawieniem wzajemnych odległości przewodów fazowych (1-3) i odgromowego (4) dla wybranych typów słupów przelotowych linii jednotorowej

Fig. 3. Schematic layout with table of mutual distances between conductors (1-3) and earthwire (4) for selected type of one-circuit suspension towers

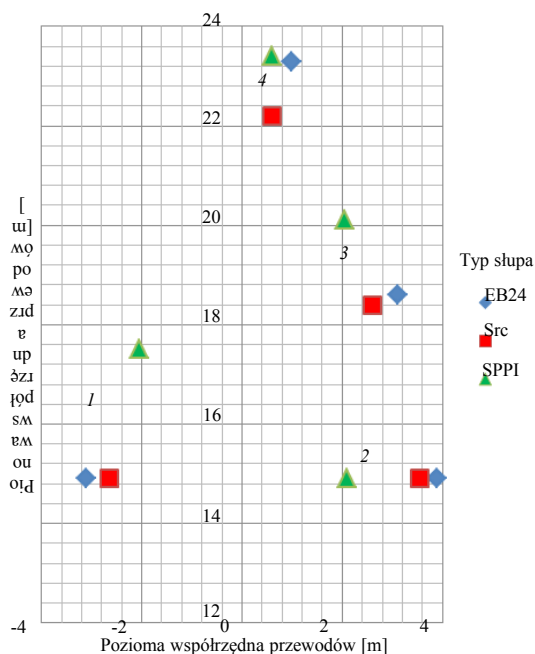


Rys. 4. Schemat rozmieszczenia przewodów fazowych (1-6) i odgromowych (7, 8) dla wybranych typów słupów przelotowych linii dwutorowej wraz z zestawieniem wzajemnych odległości

Fig. 4. Schematic layout with table of mutual distances between conductors (1-6) and earthwire (7, 8) for selected type of two-circuit suspension towers

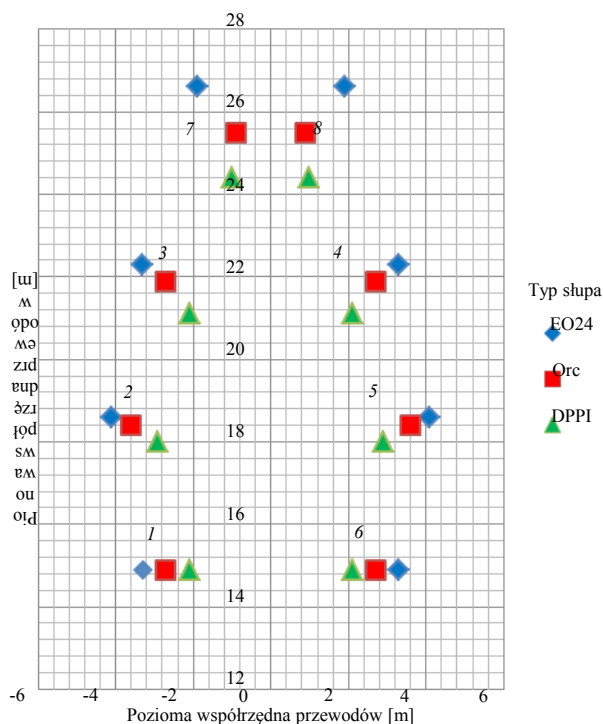
Aby ocenić, czy redukcja odstępów izolacyjnych, a także zmiana układu przewodów zawieszonych na słupach linii napowietrznej są działaniem korzystnym, które nie narusza środowiskowych wymagań prawnych sporządzono wykresy prezentujące rozkłady pól elektrycznego i magnetycznego dla wcześniej określonych przypadków, a następnie przeprowadzono analizę porównawczą uzyskanych wyników.

Rozkłady pól elektrycznego i magnetycznego uzyskano obliczając natężenie tych pól w punktach zlokalizowanych w jednym przęśle pomiędzy dwoma sąsiednimi słupami przelotowymi.



Rys. 5. Rozmieszczenie przewodów fazowych (1-3) i odgromowego (4) przyjęte w obliczeniach rozkładów pól elektrycznego i magnetycznego dla słupów linii jednotorowej

Fig. 5. Arrangement of the conductors (1-3) and earthwire (4) used for calculation of electric and magnetic field distributions around conductors for one-circuit suspension towers



Rys. 6. Rozmieszczenie przewodów fazowych (1-6) i odgromowych (7, 8) przyjęte w obliczeniach rozkładów pól elektrycznego i magnetycznego dla słupów linii dwutorowej

Fig. 6. Arrangement of the conductors (1-6) and earthwires (7, 8) used for calculation of electric and magnetic field distributions around conductors for two-circuit suspension towers

Do obliczeń przyjęto następujące założenia:

- w linii napowietrznej zastosowano przewody fazowe typu AFL-6 o przekroju  $240 \text{ mm}^2$ , a odgromowe typu AFL-1,7 o przekroju  $70 \text{ mm}^2$ ,

- minimalna wysokość zawieszenia przewodu roboczego (wynikająca z dopuszczalnego zwisu przewodu roboczego) wyniosła  $6,3 \text{ m}$ ,
- najwyższe napięcie sieci  $U_m = 123 \text{ kV}$ ,
- maksymalna wartość prądu fazowego  $I_f = 1286 \text{ A}$ ,
- wysokość obliczeniowa (współrzędna  $y$ ) była stała w każdym rozpatrywanym przypadku i wynosiła  $2 \text{ m}$  nad poziomem terenu.

Szerokość rozpatrywanego pasa technologicznego pod linią określała współrzędna obliczeniowa  $x$ , która zawierała się w przedziale od  $-30 \text{ m}$  do  $+30 \text{ m}$ . Przy przyjętym kroku obliczeniowym wynoszącym  $0,5 \text{ m}$  liczba punktów obliczeniowych  $n$  odniesionych na osi  $x$  wyniosła  $121$ . Współrzędna obliczeniowa  $z$  zlokalizowana w kierunku równoległym do osi linii zawierała się w przedziale od  $-160 \text{ m}$  do  $+160 \text{ m}$ . W tym przypadku, przy przyjętym kroku obliczeniowym wynoszącym  $10 \text{ m}$  liczba punktów obliczeniowych  $m$  odniesionych na osi  $z$  wyniosła  $33$ . Początek układu współrzędnych  $x, y, z$  zlokalizowano w osi linii na poziomie terenu w miejscu największego zwisu przewodów.

W celu wykonania analizy wpływu geometrycznego układu przewodów zamocowanych na różnych typach słupów na rozkład pola elektromagnetycznego w miejscu zamocowania przewodów obliczono wartości średnie składowych tego pola, korzystając z następujących zależności (przy założeniu, że współrzędna  $z = 0$ ):

$$E_S = \frac{\sum_{i=1}^n E(x_i)}{n}, \quad (1)$$

$$H_S = \frac{\sum_{i=1}^n H(x_i)}{n}. \quad (2)$$

Analizę rozkładu pól elektrycznego i magnetycznego na odcinku linii między kolejnymi słupami przeprowadzono w oparciu o wyniki uzyskane z wyliczeń, stosując wzory

$$E_{SP} = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n E(x_i, z_j)}{m \cdot n}, \quad (3)$$

$$H_{SP} = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n H(x_i, z_j)}{m \cdot n}. \quad (4)$$

Zestawienie średnich wartości natężenia pól elektrycznego i magnetycznego uzyskanych z obliczeń zawiera tabela 1.

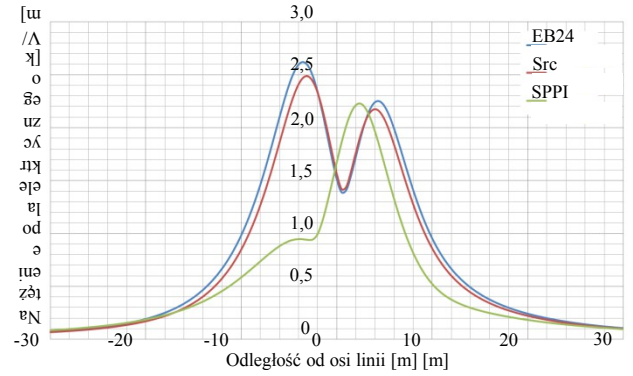
Tab. 1. Średnie wartości natężenia pól elektrycznego i magnetycznego  
Tab. 1. Average values of the electric and magnetic fields intensity

Rodzaj słupa	Jednotorowe			Dwutorowe		
	EB24	Src	SPPI	EO24	Orc	DPPI
$E_S$	0,81	0,75	0,55	0,62	0,57	0,49
$E_{SP}$	0,56	0,52	0,39	0,42	0,39	0,34
$H_S$	12,50	11,33	7,59	10,16	9,18	7,93
$H_{SP}$	8,33	7,48	5,10	6,52	5,99	5,29

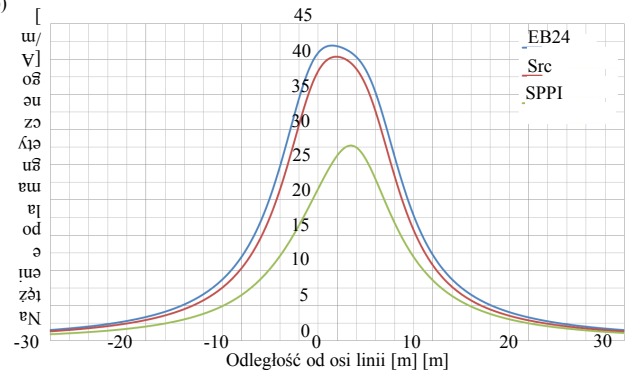
Uzyskane wyniki w postaci rozkładu natężenia pól elektrycznego oraz magnetycznego dla słupów linii jednotorowych przedstawiono na rys. 7, a dla słupów linii dwutorowych przedstawiono na rys. 8.

Prezentację przykładowych trójwymiarowych rozkładów natężenia pól elektrycznego i magnetycznego pod linią jednotorową wykonaną z wykorzystaniem różnych typów słupów przedstawiono na rysunkach 9 i 10.

a)

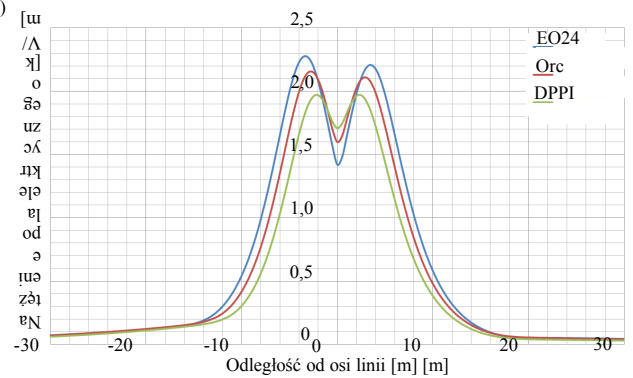


b)

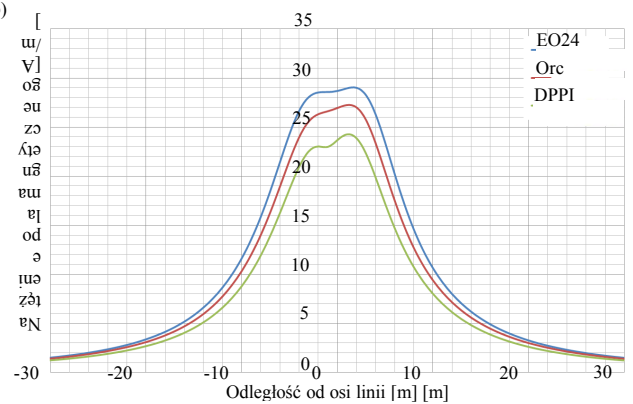


Rys. 7. Rozkład natężenia pól elektrycznego (a) i magnetycznego (b) w miejscu największego zwisu przewodów dla słupów linii jednocircuitowej  
Fig. 7. Intensity distribution of electric field (a) and magnetic field (b) at the biggest sag of conductors for one-circuit suspension towers

a)

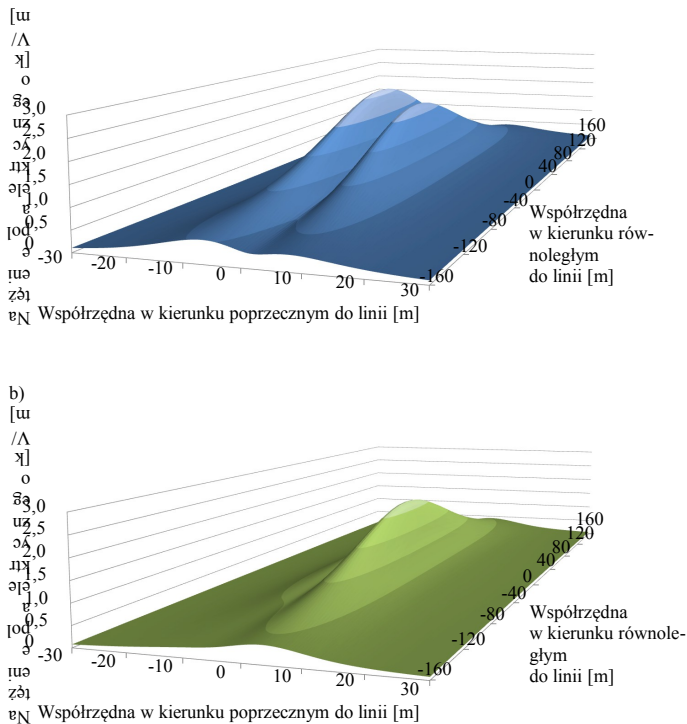


b)



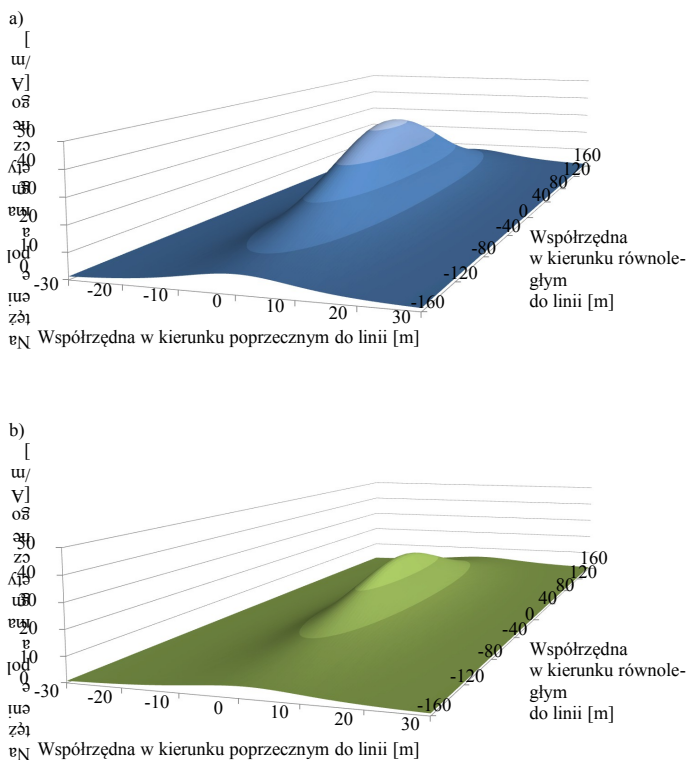
Rys. 8. Rozkład natężenia pól elektrycznego (a) i magnetycznego (b) w miejscu największego zwisu przewodów dla słupów linii dwucircuitowej  
Fig. 8. Intensity distribution of electric field (a) and magnetic field (b) at the biggest sag of conductors for two-circuit suspension towers

a)



Rys. 9. Rozkład natężenia pola elektrycznego pod linią w jednym przęśle między słupami przelotowymi jednorowowymi a) EB24, b) SPPI

Fig. 9. Intensity of the electric field distribution under the overhead line in single span between the one circuit suspension towers a) EB24, b) SPPI

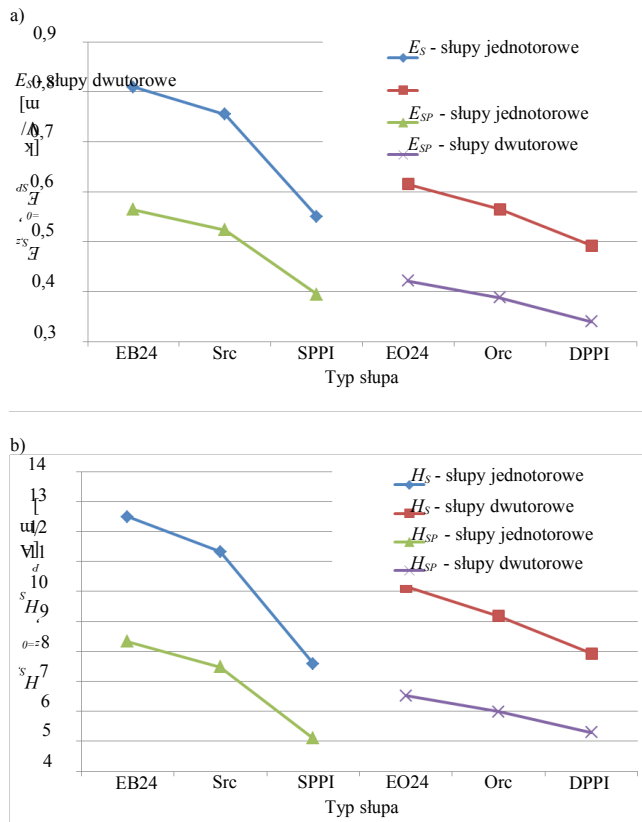


Rys. 10. Rozkład natężenia pola magnetycznego pod linią w jednym przęśle pomiędzy słupami przelotowymi jednorowowymi a) EB24, b) SPPI

Fig. 10. Intensity of the magnetic field distribution under the overhead line in single span between the one circuit suspension towers a) EB24, b) SPPI

Na podstawie uzyskanych średnich wartości natężenia pól elektrycznego i magnetycznego sporządzono zbiorcze zestawienie wy-

ników dla różnych typów słupów (rys. 11). Porównując wartości natężenia pól można stwierdzić, że w przypadku słupów pełnościennych otrzymano najkorzystniejszy rezultat.



Rys. 11. Porównanie średnich wartości natężenia pól a) elektrycznego, b) magnetycznego dla wybranych typów słupów

Fig. 11. Comparison of the field intensity mean values a) electrical b) magnetic, for chosen types of towers

Analiza porównawcza uzyskanych wyników wykazała, że średnie natężenie pola elektrycznego w otoczeniu linii jednorówowej wykonanej z wykorzystaniem słupów pełnościennych z typowymi poprzecznikami jest o 7% mniejsze od średniego natężenia pola elektrycznego występującego w analogicznych warunkach, ale w przypadku zastosowania słupów kratowych. Natomiast przy zastosowaniu stalowych słupów pełnościennych, w których zamocowanie przewodów jest zrealizowane za pomocą układu izolatorów kompozytowych istnieje możliwość obniżenia natężenia pola elektrycznego o 30%.

Na podstawie wyników obliczeń wykonanych dla pola magnetycznego można stwierdzić, że w przypadku linii jednorówowych wykonanych na słupach pełnościennych z typowymi poprzecznikami średnia wartość natężenia tego pola jest o 10% mniejsza od wariantu zastosowania w linii słupów kratowych. Natomiast zastosowanie poprzeczników izolacyjnych do zamocowania przewodów roboczych linii obniża wartość średniego natężenia pola magnetycznego o 38% wobec rozwiązań uwzględniających kratowe konstrukcje wsporcze.

Podobne relacje uzyskano w przypadku rozwiązań stosowanych w liniach napowietrznych dwurówowych. Zastosowanie słupów pełnościennych z typowym rozwiązaniem poprzeczników pozwala uzyskać niższą wartość natężenia pól elektrycznego i magnetycznego o około 8% w stosunku do rozwiązań opartych na słupach kratowych. Natomiast analogiczne porównanie natężenia pól elektrycznego i magnetycznego wykonane w przypadku linii dwurówowych zbudowanych na słupach pełnościennych z kompozytowym układem zamocowania przewodów potwierdza możliwość obniżenia wartości tego parametru o około 19% w stosunku do rozwiązań uwzględniających zastosowanie słupów kratowych.



#### 4. Wnioski

Analiza uzyskanych wyników wykazała, że zmiana rodzaju konstrukcji wsporczej zastosowanej w elektroenergetycznej linii napowietrznej może mieć znaczący wpływ na rozkład pól elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu linii. Stwierdzono, że w przypadku zastosowania słupów kratowych natężenie składowych pola elektromagnetycznego jest istotnie wyższe od rejestrowanego przy zastosowaniu słupów pełnościennych. W szczególności dotyczy to rozwiązań uwzględniających modyfikację sposobu zamocowania przewodów roboczych polegającą na wykorzystaniu izolatorów kompozytowych w miejsce typowych poprzeczników stalowych. Jednocześnie odnotowano większe różnice wartości w przypadku linii jednotorowych.

Uzyskane wyniki pozwoliły również na sformułowanie jednego wspólnego wniosku. Otóż w każdym rozpatrywanym przypadku nie stwierdzono naruszenia regulacji prawnych określających dopuszczalne wartości amplitud pól elektrycznego i magnetycznego. A zatem można stwierdzić, że ograniczenie odstępów izolacyjnych (przy zachowaniu wymaganych poziomów wytrzymałości udarowej izolacji) jest możliwe oraz uzasadnione technicznie i ekonomicznie. Prowadzi bowiem do uzyskania wymiernych korzyści ekonomicznych. Jednak maksymalizacja tego efektu jest możliwa tylko przy uwzględnieniu istniejących w kraju potrzeb inwestycyjnych w zakresie elektroenergetycznych linii napowietrznych. Nie bez znaczenia dla poziomu uzyskanych korzyści będą przyjęte rozwiązania projektowe linii napowietrznych, tj. czy będą to linie jedno czy wielotorowe oraz czy przyjęty system mocowania przewodów będzie opierał się wyłącznie na rozwiązaniach tradycyjnych (poprzeczniki stalowe), czy też zostaną wprowadzone opisane wcześniej modyfikacje, z zastosowaniem roz-

wiązań między innymi ograniczających oddziaływanie linii napowietrznych na środowisko.

#### 5. Literatura

- [1] Chen T., Yang W.: Analysis of Multi-Grounded Four-Wire Distribution Systems Considering the Neutral Grounding. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 16, No. 4, 2001, pp.456-460.
- [2] Hoffmann J. N. Wiedmer, R.W. Bubniak M.J., Moreira I.S: Urban overhead transmission lines of compact design for 69,138 and 230 kV, B2\_102\_2010 CIGRE 2010.
- [3] Hoekstra H.E., Van Wolven J.F., Van der Wekken A.J.P.: Development of a compact bipole 380 kV overhead line, B2\_112\_2010 CIGRE 2010.
- [4] Katalog rozwiązań typowych serii EB24 opracowanych przez Energoprojekt Kraków, wydanie I z 2011r.
- [5] Katalog rozwiązań typowych serii Src opracowanych przez Kromiss-Bis, wydanie I z 2010r.
- [6] Skomudek W.: Development for High and Extra-High Voltage Compact Overhead Voltage. Acta Energetica 3/2011.
- [7] Skomudek W.: Pomiary i analiza przepięć oraz ocena ich skutków w sieciach średniego i wysokiego napięcia. ISBN 978-83-61163-29-9, COSIW Warszawa 2011.
- [8] Szpindler P.: Zastosowanie pełnościennych stalowych słupów rurowych do budowy elektroenergetycznych linii napowietrznych wysokiego i najwyższych napięć. Energetyka 8/2011.
- [9] Skomudek W., Szpindler P.: Innowacyjne słupy stalowe pełnościenne w elektroenergetycznych liniach napowietrznych najwyższych napięć. Przegląd Elektrotechniczny 9a/2012.
- [10] Sauvegrain F.: Conceptualizing a "Sustainable Development" oriented 400 kV overhead line, B2\_104\_2010 CIGRE 2010.

otrzymano / received: 08.04.2013

przyjęto do druku / accepted: 03.06.2013

artykuł recenzowany / revised paper