



Wiesław NOWAK, Andrzej JACKOWICZ-KORCZYŃSKI, Barbara FLORKOWSKA

Akademia Górniczo Hutnicza w Krakowie, Katedra Elektroenergetyki

## Komputerowa identyfikacja pól elektrycznych o częstotliwości sieciowej w otoczeniu obiektów elektroenergetycznych

**Streszczenie.** W artykule wskazano możliwości modelowania pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz w otoczeniu urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia. Rozważania zilustrowano praktycznymi przypadkami analizy obrazów pól elektrycznych.

**Abstract.** (Computer identification of 50 Hz electric fields around electrical power objects). The paper presents the 50 Hz electric field modeling around high voltage electrical power devices. The analysis refers to the practical aspects of this problem in environment.

**Słowa kluczowe:** wysokie napięcie, urządzenia elektroenergetyczne, pole elektromagnetyczne, modelowanie.

**Keywords:** high voltage, electrical power devices, electromagnetic field, modeling.

### Wstęp

Prawidłowe funkcjonowanie systemu elektroenergetycznego uwarunkowane jest opanowywaniem problemów o charakterze interdyscyplinarnym, a w szczególności zagadnień technicznych, ekonomicznych i ekologicznych, wynikających z przesyłania dużych ilości energii na znaczne odległości. Wzrost zdolności przesyłu i minimalizacja strat energii w wyniku zwiększania napięcia przesyłowego implikują określone warunki, istotne ze względu na konstrukcję układu elektroenergetycznego i jego eksploatację. Napięcie przesyłowe jest czynnikiem nie tylko decydującym o cechach techniczno-ekonomicznych danego rozwiązania konstrukcyjnego, ale także o potencjalnych skutkach oddziaływania układów elektroenergetycznych na środowisko – głównie w aspekcie pól elektromagnetycznych.

Znajomość stanu elektromagnetycznego przestrzeni w otoczeniu wysokonapięciowych układów przesyłowo-rozdzielczych [1, 2, 3] jest niezbędna dla analizy i oceny skutków oddziaływań – szczególnie w odniesieniu do składowej elektrycznej pola o częstotliwości sieciowej. Jej identyfikacja może być przeprowadzana metodami pomiarowymi lub obliczeniowymi.

Obecnie coraz częściej wyznaczanie rozkładu pola elektrycznego realizowane jest w oparciu o metody numeryczne i odpowiednie programy komputerowe. Metody te, polegające na aproksymacji rozwiązania równania Laplace'a bądź Poissona w oparciu o metodę residuów ważonych lub wariacyjną, umożliwiają dzięki rozwojowi techniki informatycznej identyfikację pola elektrycznego w przestrzeni trójwymiarowej dla układów o znacznym stopniu komplikacji. Możliwe przy tym staje się przyjęcie mniejszej liczby założeń upraszczających co do np.: zwisu przewodów między przęsłami, wpływu słupów, profilu powierzchni ziemi, obecności człowieka, budynków itp.

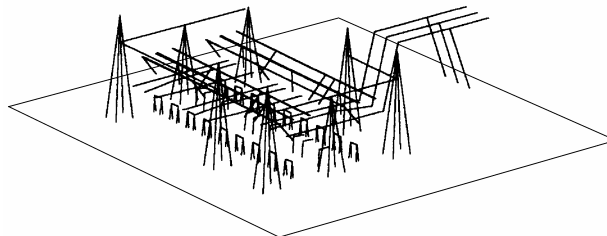
W komputerowej analizie pola elektrycznego zastosowanie znajdują zarówno metody brzegowe (np. metoda ładunków symulowanych czy elementów brzegowych), jak i metody skończone (np. metoda różnic skończonych czy elementów skończonych).

W niniejszym artykule przedstawiono wybrane aplikacje metody ładunków symulowanych oraz metody elementów skończonych, do identyfikacji obrazów pola elektrycznego o częstotliwości sieciowej w otoczeniu obiektów elektroenergetycznych.

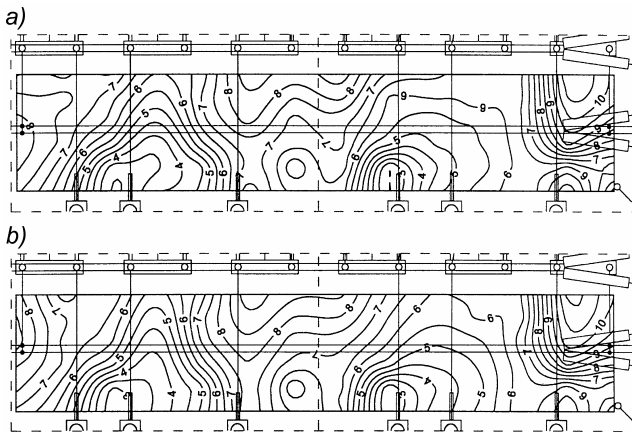
### Metoda ładunków symulowanych

Metoda ładunków symulowanych, podobnie jak i inne metody brzegowe, jest szczególnie użyteczna dla analizy pola elektrycznego w obszarach nieograniczonych. Rzeczywisty rozkład ładunków na powierzchniach przewodników o zadanych wartościach potencjałów, jest zastępowany zbiorem ładunków fikcyjnych (symulowanych) tak, aby ich pole elektryczne było zbliżone do pola ładunków rzeczywistych. Jako ładunki symulowane przyjmuje się proste pod względem geometrycznym formy, takie jak: ładunki punktowe, ładunki liniowe rozłożone równomiernie na liniach prostych i pierścieniach oraz ich odcinkach, ładunki powierzchniowe rozłożone równomiernie na krzywoliniowych elementach trójkątnych i prostokątnych. Umożliwiają one modelowanie np. różnych elementów stacji, takich jak oszyrowanie, konstrukcje wsporcze, kadzie transformatorów itp. Jednak stosowanie tej metody w środowiskach o różnych parametrach materiałowych oraz w środowiskach anizotropowych i nieliniowych wymaga specjalnych procedur, co znacznie komplikuje proces identyfikacji pola elektrycznego.

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe odwzorowanie istotnych elementów konstrukcyjnych rozdzielni 220 kV przy pomocy ładunków liniowych [4]. Otrzymane wyniki analizy przedstawiono na rysunku 2a w postaci obrazu, który stanowią izolynie jednakowej wartości natężenia pola elektrycznego na wysokości 1,8 m. Przeprowadzona weryfikacja pomiarowej (rysunek 2b) potwierdziła dobrą zgodność wyników zmierzonych z obliczonymi.



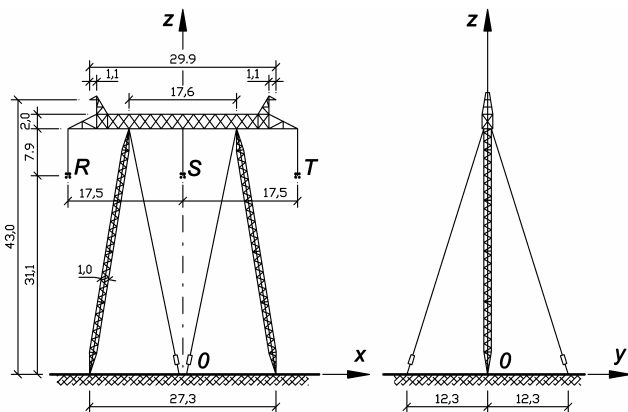
Rys.1. Odwzorowanie rozdzielni 220 kV w postaci układu liniowych ładunków symulowanych



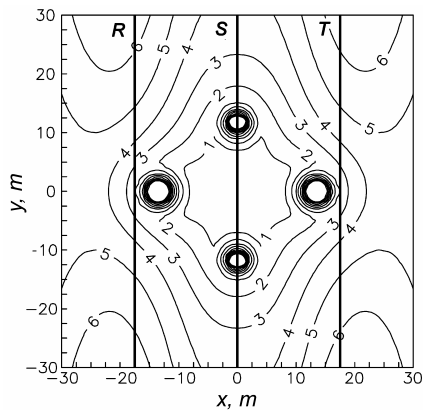
Rys.2. Fragment obrazu natężenia pola elektrycznego w rozdzielni 220 kV w otoczeniu odłączników szynowych: a) obliczenia, b) pomiary (kolejne izolinie co 0,5 kV/m)

Obrazy takie, jak przedstawione na rysunku 2, stanowią podstawę wyznaczania stref ochronnych związanych z oddziaływaniem pola elektrycznego w środowisku pracy, szczególnie na etapie projektowania stacji.

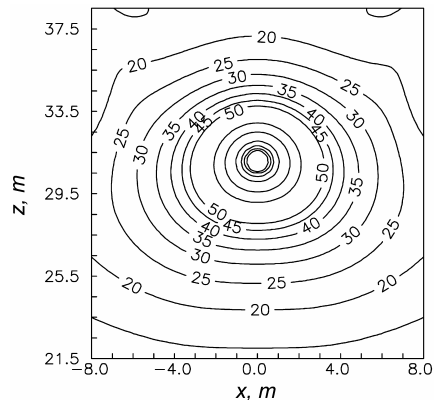
Inny przykład zastosowania metody ładunków symulowanych dotyczy badań pola elektrycznego w otoczeniu konstrukcji wsporczych linii napowietrznych [5] – rysunek 3. Otrzymywane obrazy kompleksowo identyfikują obszary, w których natężenie posiada różne wartości, zarówno z punktu widzenia oddziaływań w środowisku ogólnym (rys. 4), jak i oddziaływań w środowisku pracy (rys. 5), na przykład w pracach pod napięciem.



Rys.3. Słup serii U45P linii 750 kV w układzie współrzędnych 0xyz



Rys.4. Obraz natężenia pola elektrycznego wysokości 1,8 m w otoczeniu słupa serii U45P linii 750 kV (kolejne izolinie co 1 kV<sub>max</sub>/m)



Rys.5. Obraz natężenia pola elektrycznego w odstępie izolacyjnym słupa serii U45P linii 750 kV w otoczeniu fazy środkowej (kolejne izolinie dotyczą wartości: 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300 kV<sub>max</sub>/m)

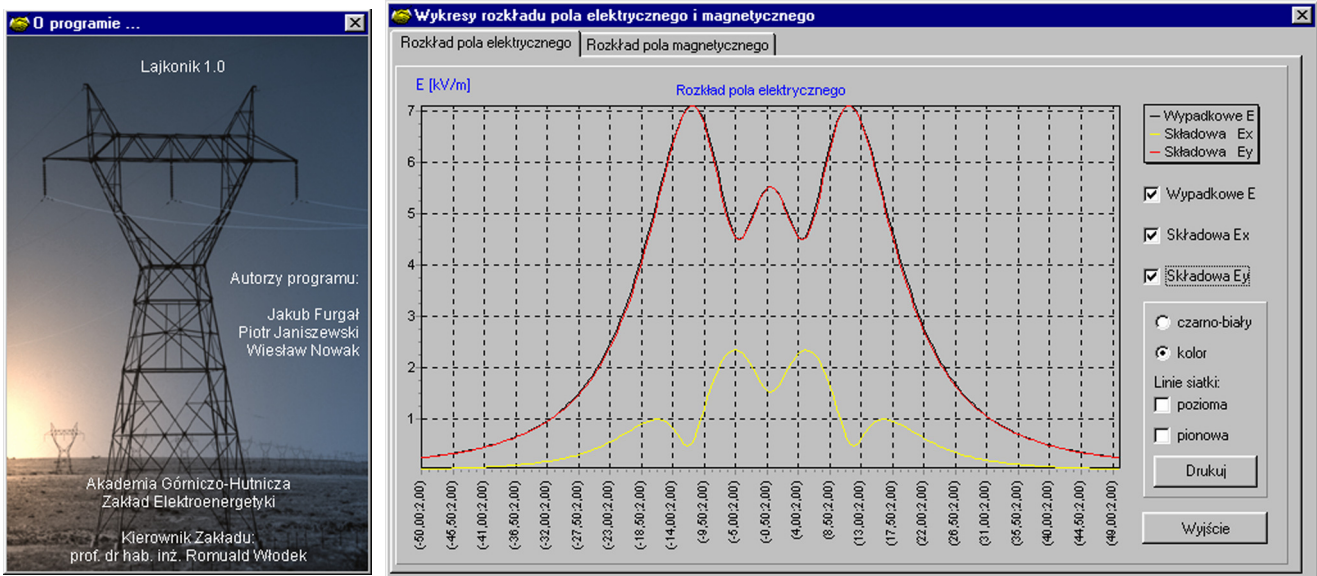
Bardzo dobrą zgodność wyników zmierzonych z wynikami otrzymanymi przy zastosowaniu metody ładunków symulowanych otrzymuje się w identyfikacji pola elektrycznego linii napowietrznych, niezakłóconego obecnością obiektów postronnych, jak słupy, drzewa itp. [6]. Dalsze uproszczenie dotyczyć mogą analizy w przestrzeni dwuwymiarowej, co zaimplementowane zostało np. w programie LAJKONIK opracowanym w Zakładzie Elektroenergetyki (obecnie Katedra Elektroenergetyki) AGH dla Instytutu Energetyki w Warszawie – rysunek 6. Program umożliwia ponadto identyfikację pola magnetycznego, jak również uwzględnia w uproszczony sposób wpływ obiektów budowlanych na obraz pola elektrycznego.

#### Metoda elementów skończonych

Zastosowanie metody elementów skończonych (MES) pozwala efektywnie uwzględniać warunki brzegowe, niejednorodność, anizotropię i nieliniowość parametrów środowiskowych rozważanego obszaru. Współczesne pakiety MES (np. ANSYS) pozwalają także na analizę w obszarach nieograniczonych oferując specjalne elementy z tzw. „procedurami brzegowymi” i/lub z zastosowaniem hybrydowych wirtualnych ładunków umieszczonych w obszarze analizy i poza nim. Z uwagi na geometrię obszaru, nierzadko trudną do odwzorowania metodami całkowitymi, aplikacja MES do identyfikacji pól elektrycznych wydaje się obecnie najbardziej efektywna.

Kluczowym zagadnieniem w MES jest przygotowanie geometrii analizowanego układu i podział tego obszaru na odpowiednie elementy. W większości przypadków analiza dotyczy konkretnych konfiguracji (np. linia elektroenergetyczna, budynek, profil terenu), konieczne jest zatem przygotowanie trójwymiarowego modelu geometrycznego obszaru z uwzględnieniem geometrii linii, słupów, budynków oraz rzeźby terenu.

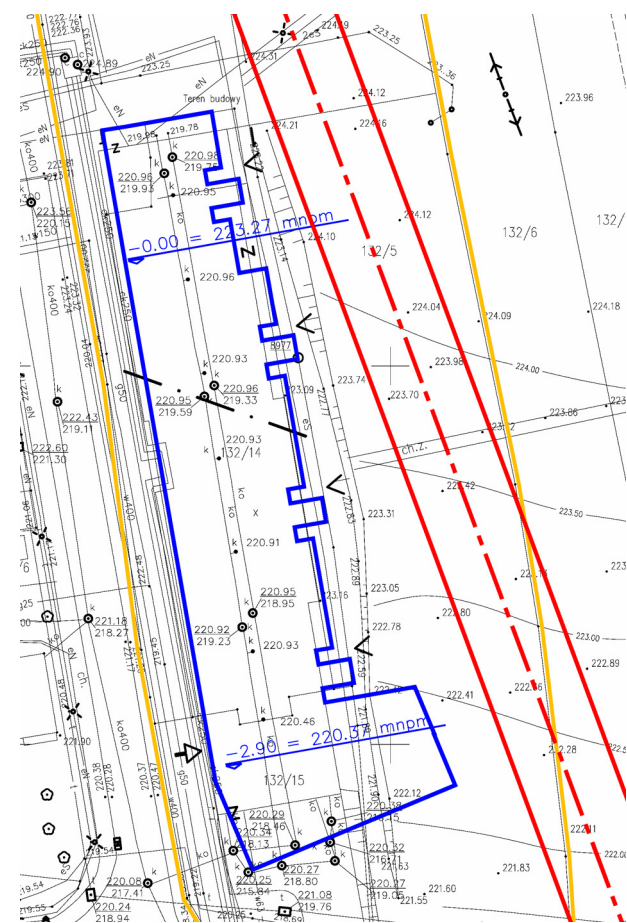
Większość pakietów MES umożliwia przygotowanie geometrii w oparciu o proste figury 3D (tzw. „prymitywy”) oraz transformacje i operacje algebry Boole’a. Z uwagi na popularność analizy MES w zagadnieniach wytrzymałościowych istnieje również często możliwość przygotowania geometrii w programach typu CAD (AutoCAD, CATIA, itp.). Ułatwia to znacznie proces przygotowania modelu. Należy przy tym pamiętać, że mimo gwałtownego rozwoju techniki obliczeniowej oraz zasobów obliczeniowych model zawsze stanowi swego rodzaju kompromis między dokładnością odwzorowania a możliwościami obliczeniowymi stacji lub serwera prowadzącego symulację.



Rys.6. Program LAJKONIK do analizy pola elektrycznego i magnetycznego w przestrzeni dwuwymiarowej

### Aplikacje MES do oceny lokalizacji obiektów budowlanych o otoczeniu linii elektroenergetycznych

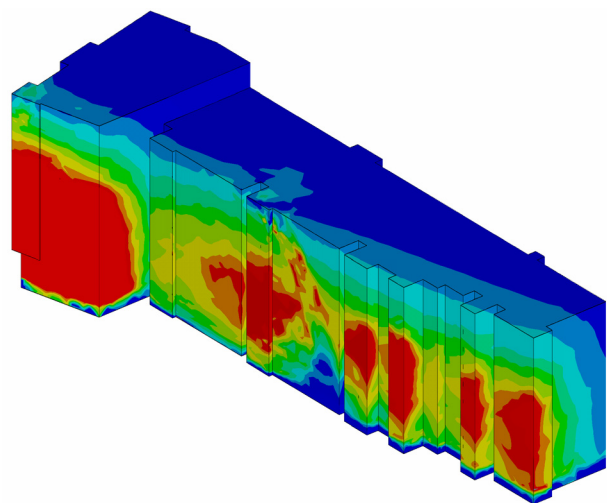
Lokalizacja obiektów budowlanych w otoczeniu urządzeń elektroenergetycznych jest jednym z przykładów możliwości aplikacji systemów CAD do modelowania geometrii, pakietów MES do obliczeń i wizualizacji wyników. Najczęściej zagadnienia tego typu dotyczą lokalizacji budynków w sąsiedztwie linii wysokich napięć – rysunek 7.



Rys.7. Przykład lokalizacji budynku mieszkalnego w pobliżu dwutorowej linii 110 kV

Możliwość lokalizacji budynków mieszkalnych w sąsiedztwie obiektów stanowiących źródło promieniowania elektromagnetycznego uzależniona jest od poziomu promieniowania występującego w miejscu lokalizacji budynku. Dopuszczalne wartości promieniowania zróznicowane są dla terenów przeznaczonych pod zabudowę mieszkaniową oraz dla miejsc dostępnych dla ludności. Na terenie planowanej lokalizacji zabudowy mieszkaniowej składowa elektryczna pola elektromagnetycznego nie może przekraczać wartości skutecznej 1 kV/m, zaś składowa magnetyczna – 60 A/m. W miejscach dostępnych dla ludności dopuszczalna wartość składowej elektrycznej wynosi 10 kV/m, a składowej magnetycznej – również 60 A/m.

Przepisy [7, 8] stwarzają konieczność wyznaczenia rozkładu pola elektrycznego na terenie inwestycji, a więc w całej jej kubaturze. Pole to wyznaczone jest jak pole „pierwotne”, tj. dla stanu terenu przed rozpoczęciem inwestycji. W takich przypadkach uzasadnione są uproszczenia bryły budynku, co pozwala ograniczyć czas obliczeń i pozostaje bez wpływu na efekty modelowania.

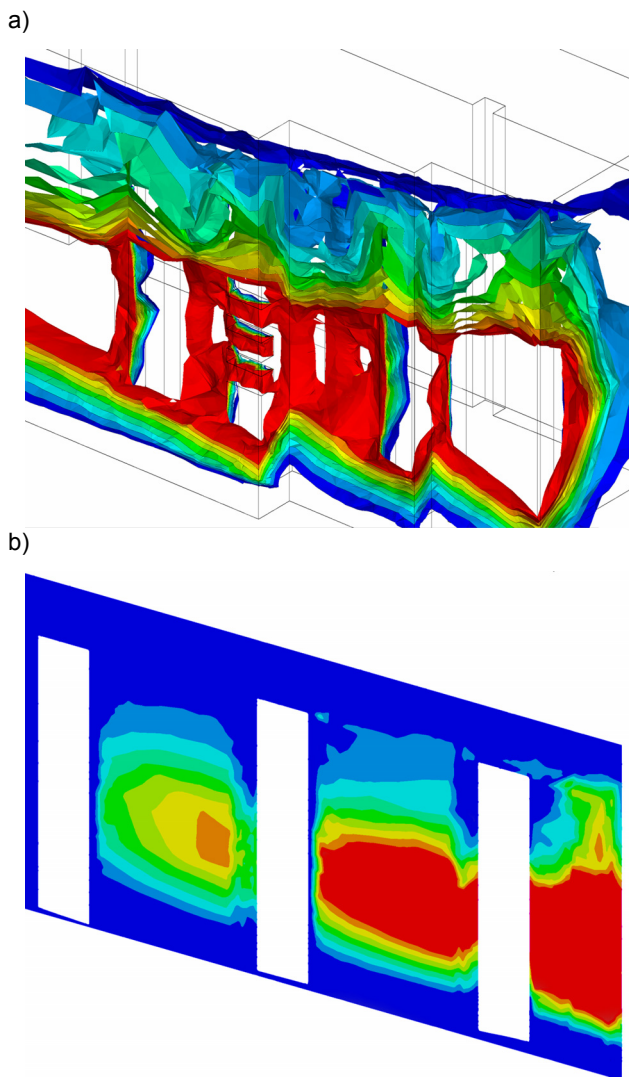


Rys.8. Rozkład pierwotnego pola elektrycznego na elewacji budynku z rysunku 7 – kolorem czerwonym oznaczono obszary, w których natężenie pola elektrycznego przekracza 1kV/m

W analizie układu z rysunku 7 zastosowano model trójwymiarowy, uwzględniający między innymi skomplikowaną rzeźbę terenu oraz konstrukcje wsporcze linii 110 kV. W obliczeniach przyjęto wartości napięć fazowych odpowiadające największemu napięciu robocznemu  $U_r = 123$  kV oraz maksymalne zwisy przewodów linii. Model budynku uwzględniał lokalizację balkonów oraz wysokości trzonu głównego budynku i jego wyższej części południowej.

Rozkład pola pierwotnego można przedstawić w postaci pola rzutowanego na elewację budynku lub w izometrii, co przedstawiono na rysunku 8. W praktyce taka metoda wizualizacji wyników jest najbardziej efektywna i wskazuje kierunki ewentualnych zmian układu dla spełnienia wymagań ochrony przed oddziaływaniem pola.

Przeprowadzona analiza wykazała, że lokalizacja projektowanego budynku w sąsiedztwie linii 110 kV w wynikającej z projektu formie oraz sposobie zagospodarowania wnętrza nie spełnia przepisów ustawy *Prawo Ochrony Środowiska* i rozporządzeń jej towarzyszących. Przyczyną jest przekroczenie wartości dopuszczalnej natężenia pola elektrycznego (1 kV/m) w miejscu projektowanych lokali mieszkalnych, znajdujących się powyżej drugiej kondygnacji i przy elewacji wschodniej budynku.



Rys.9. Fragment rozkładu pola elektrycznego z uwzględnieniem budynku (a) i przekrój rozkładu w płaszczyźnie pionowej 1,6 m od ścian budynku (b)

Należy jednak zaznaczyć, że realizacja projektu zabudowy wpłynie na obraz pola elektrycznego. Związane jest to zarówno z projektowaną konstrukcją budynku z zastosowaniem żelbetowych ścian nośnych, jak i z planowaną niwelacją terenu. Deformację pola elektrycznego i efekty lokalizacji inwestycji można ocenić poprzez modyfikację geometrii i warunków brzegowych również, jednak analiza jest znacznie bardziej złożona, jak i utrudniona jest też wizualizacja wyników.

Na rysunku 9a przedstawiono fragment obrazu pola elektrycznego, który uwzględnia obecność budynku. Ponadto na rysunku 9b pokazano przekrój rozkładu pola elektrycznego w płaszczyznach pionowych odległych 1,6 m od ścian budynku. Przeprowadzona analiza wykazała, że dla takiej sytuacji w obszarze dostępnym dla ludności nie zostanie przekroczona dopuszczalna wartość natężenia pola elektrycznego 10 kV/m.

### Podsumowanie

Znajomość obrazów pola elektrycznego jest niezbędna na etapie zarówno projektowania obiektów elektroenergetycznych, jak i późniejszej ich eksploatacji. Obecnie, dzięki rozwojowi technik komputerowych możliwe staje się uściślenie numeryczne identyfikacji obrazów i efektywne ich wykorzystanie do oceny potencjalnych skutków oddziaływania w aspekcie środowiskowym oraz zawodowym.

Szczególne znaczenie posiadają przedstawione w artykule metody analizy pola, których programowa realizacja daje możliwość kompleksowej identyfikacji obrazów pola elektrycznego w przestrzeni trójwymiarowej, uwzględniając przy tym wiele istotnych czynników.

### LITERATURA

- [1] Florkowska B., Furgał J., Nowak W., Włodek R., *Analiza stanu elektrycznego przestrzeni w otoczeniu linii przesyłowych wysokiego napięcia*, *Archiwum Elektrotechniki*, t.XLIII, Z.1, 1994, 87-99
- [2] Florkowska B., Furgał J., Nowak W., Włodek R., *Modelling of Electric State in the Space Surrounding High Voltage Overhead Lines*, 9th International Symposium on High Voltage Engineering, Graz 1995. Proceedings, pp. 8369/1-8369/4
- [3] Włodek R., Nowak W., *Electromagnetic Field in the Space Surrounding High Voltage Overhead Line*, 12th International Symposium on High Voltage Engineering ISH2001, Bangalore, India 2001
- [4] Nowak W., *Analiza pola elektrycznego w stacjach elektroenergetycznych*, V Ogólnopolskie Sympozjum „Inżynieria Wysokich Napięć” IW-2000, Poznań-Kiekrz, 22-24 maja 2000. Materiały konferencyjne, 305-310
- [5] Nowak W., Włodek R., *Analiza pola elektrycznego w odstępach izolacyjnych słupów linii wysokiego napięcia*, II Ogólnopolskie Sympozjum „Inżynieria Wysokich Napięć”, Poznań-Kiekrz, 1994. Materiały konferencyjne, 201-204
- [6] Nowak W., *Pomiary natężenia pola elektrycznego pod liniami przesyłowymi wysokiego napięcia*, AGH, *Kwartalnik Elektrotechnika*, t.12, Z.1, 1993, 27-35
- [7] Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. *Prawo ochrony środowiska*. (Dz. U. Nr 62, poz. 627)
- [8] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów (Dz. U. Nr 192, poz. 1883)

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Barbara Florkowska, AGH, Katedra Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: [beflor@agh.edu.pl](mailto:beflor@agh.edu.pl); dr inż. Andrzej Jackowicz-Korczyński, AGH, Katedra Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: [ajk@agh.edu.pl](mailto:ajk@agh.edu.pl); dr inż. Wiesław Nowak, AGH, Katedra Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: [wiesio@agh.edu.pl](mailto:wiesio@agh.edu.pl)