

Wojciech KRAJEWSKI

GENERATOR SIATEK MEB I MEL DO ANALIZY ZAGROŻEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH W WARUNKACH WYKONYWANIA PRAC POD NAPIĘCIEM W ELEKTROENERGETYCE*)

STRESZCZENIE *W artykule zaproponowano realistyczne, całkowo-brzegowe modele obiektów elektroenergetycznych, na których wykonywane są prace pod napięciem. Siatki elementów liniowych i brzegowych są automatycznie generowane przez specjalnie opracowany w tym celu program DanGen 3D. Przedstawiono uproszczony całkowo-brzegowy model sylwetki człowieka, który jest również automatycznie generowany przez program DanGen 3D. Stosując własny pakiet oprogramowania BEMsolver 3D, wykorzystujący metodę hybrydową łączącą metodę elementów liniowych z metodą elementów brzegowych oraz stosując wspomniany generator siatek DanGen 3D, przeprowadzono przykładowe obliczenia natężenia pola elektrycznego w przestrzeni roboczej elektromontera wykonującego pracę pod napięciem. Wykonano obliczenia natężenia pola elektrycznego z uwzględnieniem i bez uwzględnienia wpływu obecności elektromontera na jego rozkłady. Rozkłady natężenia pola magnetycznego wyznaczono stosując prawo Biot-Savarta. Analizując wyniki obliczeń określono maksymalny dopuszczalny czas wykonywania rozważanych operacji.*

Słowa kluczowe: *pole elektromagnetyczne, metody numeryczne, metoda elementów brzegowych, prace pod napięciem*

*) Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2006 – 2008 jako projekt badawczy.

dr hab. inż. Wojciech KRAJEWSKI,
e-mail: w.krajewski@iel.waw.pl

Zakład Metrologii i Badań Nieniszczących
Instytut Elektrotechniki

1. WSTĘP

Obserwowany w ostatnich latach szybki rozwój numerycznych metod analizy pól oraz wzrost mocy obliczeniowej komputerów, umożliwiają rozwiązywanie coraz bardziej skomplikowanych zagadnień z zakresu teorii pola elektromagnetycznego, pozwalając na coraz precyzyjniejsze odwzorowywanie rzeczywistych warunków technicznych występujących w praktyce. Jednym z zagadnień wymagającym stosunkowo złożonej, trójwymiarowej analizy pól jest identyfikacja zagrożeń elektromagnetycznych w warunkach wykonywania prac pod napięciem w elektroenergetyce.

Prowadzenie prac pod napięciem podyktowane jest względami ekonomicznymi, a także dążeniem do zwiększenia niezawodności dostaw energii elektrycznej. Tego typu prace dość powszechnie wykonywane są w krajach zachodnich, a także od pewnego czasu coraz szerzej wprowadzane są przez elektroenergetykę krajową [1–7].

Metody i technologie wykonywania prac pod napięciem opracowywano przede wszystkim tak, aby wyeliminować możliwość wyładowania zupełnego (przeskoku) między pracownikiem a urządzeniem, w mniejszym stopniu biorąc pod uwagę oddziaływania na monterów pól elektrycznych i magnetycznych o znacznych natężeniach.

Obowiązujące oraz sukcesywnie uściślane przepisy określające dopuszczalne wartości natężeń pól elektrycznych i magnetycznych w środowisku [8] i na stanowiskach pracy [9] pociągają za sobą konieczność analizy warunków elektromagnetycznych w jakich przebywają elektromonterzy wykonujący prace pod napięciem. Ważnym narzędziem w identyfikacji rozważanych pól są programy komputerowe wykorzystujące numeryczne metody analizy pól.

Pracami pod napięciem nazywa się różnego rodzaju operacje wykonywane przy urządzeniach elektroenergetycznych lub w ich pobliżu bez wyłączenia ich z ruchu. Są to prace konserwacyjne, remontowe, montażowe, demontażowe, a także pomiary.

Prace pod napięciem prowadzone są zarówno na obiektach o najwyższych napięciach znamionowych, jak i w przypadku napięć średnich i niskich. Stosowane są różne metody ich wykonywania.

I tak w przypadku metody „w kontakcie” pracownik zabezpieczony jest przed porażeniem prądem przez użycie rękawic izolacyjnych i wykonuje prace w bezpośrednim kontakcie z częściami czynnymi. ze zrozumiałych względów, technika ta stosowana jest jedynie w przypadku napięć niskich i średnich, gdzie natężenia pola elektrycznego osiągają stosunkowo niewielkie wartości.

W przypadku pracy metodą „z odległości” (rys. 1) elektromonterzy znajdują się na elementach uziemionych, np. na elementach kratownicy słupa WN

i wykonują poszczególne operacje stosując narzędzia osadzone na drążkach izolacyjnych. Odległość elektromonterów od elementów pod napięciem nie może być mniejsza od minimalnego odstęp roboczego R . W Polsce prace pod napięciem metodą „z odległości” wykonywane są najczęściej na liniach 110 kV, a minimalny odstęp roboczy dla tych obiektów ustalono metodą prób i analiz na 1,15 m [2]. W pewnych przypadkach, w przestrzeni roboczej spełniającej powyższe ograniczenie, natężenie pola elektrycznego może przekraczać 10 kV/m, co zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. [8] oznacza dopuszczalną wartość natężenia pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz w środowisku, w miejscach dostępnych dla ludzi. Dla ekspozycji zawodowej dopuszcza się w Polsce wyższe wartości natężenia pola elektrycznego, przy założeniu, że nie są przekroczone odpowiednie dozy promieniowania. Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. [9] dopuszczalna wartość natężenia pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz na stanowiskach pracy nie może przekraczać 20 kV/m, natomiast natężenie pola magnetycznego nie może przekraczać 2000 A/m. Ponadto dla pola magnetycznego o natężeniu z zakresu $200 \text{ A/m} < H < 2000 \text{ A/m}$, podobnie jak w przypadku pola elektrycznego nie mogą być przekroczone dozy promieniowania określone w powołanych przepisach.

Dozy rzeczywiste określone są wartościami wyrażen: $D_E = E^2 t$ dla pola elektrycznego i $D_H = H^2 t$ dla pola magnetycznego, gdzie E i H są natężeniami pól, w których przebywa pracownik w czasie t , przy czym $t \leq 8 \text{ h}$. Dla pól tej strefy dozy rzeczywiste: D_E i D_H nie mogą przekraczać wartości dopuszczalnych. Dla pola elektrycznego wartość ta wynosi: $Dd_E = 800 (\text{kV/m})^2 \times \text{h}$ a dla pola magnetycznego: $Dd_H = 0,32 (\text{kA/m})^2 \times \text{h}$.

Jednocześnie wskaźnik ekspozycji: $W = [D_E/Dd_E] + [D_H/Dd_H]$ ma spełniać warunek: $W < 1$.

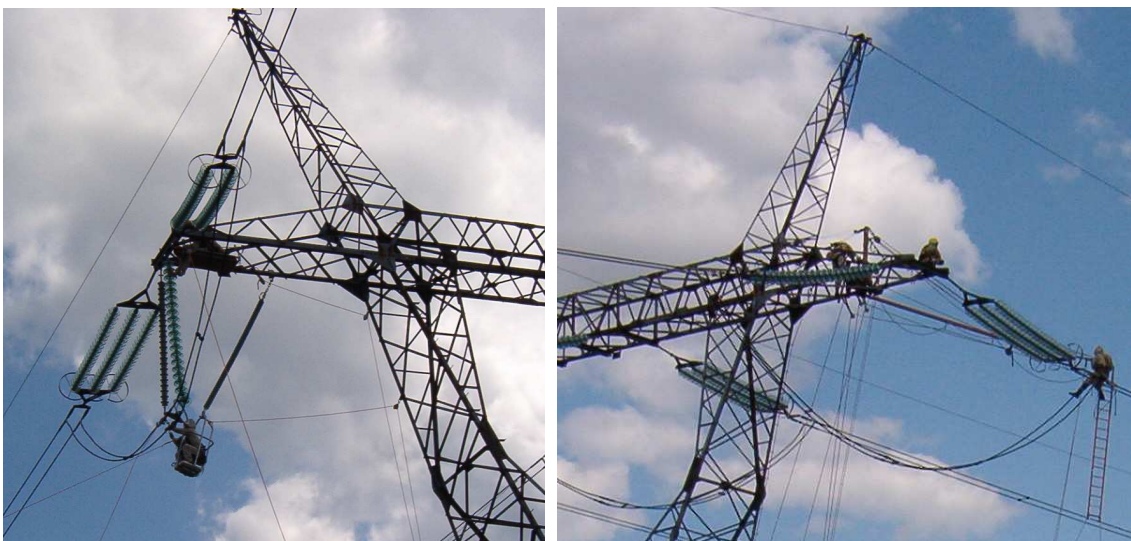
W przypadku pracy pod napięciem metodą „na potencjale” (rys. 2) pracownicy odizolowani są od elementów uziemionych, np. znajdują się na drabinach czy podestach izolacyjnych, ubrani są w specjalne kombinezony ekwipotencjalne [5, 7], które z kolei podpięte są do dotykanych przez nich elementów pod napięciem. Technika ta stosowana jest zwykle w Polsce na obiektach o napięciach 220 i 400 kV, a elektromonter chroniony jest przed oddziaływaniem pola elektrycznego niskiej częstotliwości przez wspomniany wyżej skafander przewodzący, działający jak klatka Faraday’a. Jednak zdarza się, że w wyniku wyładowań niepełnych na skafandrze, wokół pracownika generowane są pola elektromagnetyczne wysokiej częstotliwości, charakteryzujące się dużą przenikliwością. Jak wskazują pomiary, np. [7], poziomy tych pól mogą przekraczać dopuszczalne przepisami wartości. W warunkach prac metodą „na poten-

„ciale” istnieje także niebezpieczeństwo przekroczenia dopuszczalnych wartości natężenia pola magnetycznego o częstotliwości 50 Hz [20].

W niniejszej pracy przedstawiono własne modele geometryczne wybranych obiektów elektroenergetycznych, a także model sylwetki człowieka, które są wykorzystywane w numerycznej analizie omawianych tutaj pól przy zastosowaniu metody hybrydowej [10–13], łączącej metodę elementów brzegowych (MEB) [14] z wariantem metody ładunków symulowanych (MŁS) [15] zwanym metodą elementów liniowych (MEL). Obiekty te generowane są automatycznie przez opracowany specjalnie w tym celu program DanGen 3D, który współpracuje z opracowanym wcześniej pakietem oprogramowania BEMsolver 3D.



Rys. 1. Przykłady prac pod napięciem – metoda „z odległości”



Rys. 2. Przykłady prac pod napięciem – metoda „na potencjale”

2. ZAŁOŻENIA UPRASZCZAJĄCE

W analizie pola elektrycznego uwzględnia się wpływ kratownic słupów oraz innych konstrukcji wsporczych, elementów ceramicznych bądź kompozytowych (izolatory), a także wpływ człowieka (elektromonter).

W tym celu, jak wspomniano we wstępie, opracowano modele geometryczne tych obiektów, które później dyskretyzowane są, w procesie zastosowania MEL bądź MEB.

Obiekty wykonane z okrągłych prętów, płaskowników i kątowników, to znaczy z elementów, których jeden z wymiarów jest znacznie większy od dwóch pozostałych, zastępuje się ładunkami elektrycznymi umieszczonymi w ich wnętrzu, z jednoczesnym założeniem, że potencjał w wybranych punktach na ich powierzchni przyjmuje znaną wartość. Do takich obiektów należą przewody linii WN, szynoprzewody w rozdzielniach, oszynowanie aparatury, konstrukcje wsporcze (kratownice słupów WN, bramek stacyjnych) itp. Ogólnie rzecz biorąc do identyfikacji pola elektrycznego wytwarzanego bądź deformowanego przez te obiekty stosowana jest MEL. W przypadku, gdy interesuje nas rozkład pola w bezpośrednim sąsiedztwie rozważanych elementów, dla uzyskania większej dokładności rozwiązania, można stosować udokładniony wariant MEL, który dla kątowników opisano w artykule [16]. W sytuacji, gdy zachodzi konieczność wyznaczenia natężenia pola elektrycznego na samej powierzchni rozważanego elementu, należy ten element zamodelować stosując elementy brzegowe.

Izolatory linii WN oraz bramek stacyjnych zastępuje się walcami o znanej przenikalności elektrycznej. Potencjał na ich powierzchniach ma wartość nieznaną. Znane są tam jedynie warunki zgodności pola, które wykorzystywane są dla sformułowania odpowiednich równań całkowo-brzegowych.

Modele aparatury rozdzielczej, transformatorów (autotransformatorów) ze względu na dużą różnorodność występujących w praktyce konstrukcji, nie są generowane automatycznie. Można je jednak zbudować wykorzystując bogatą bibliotekę figur płaskich oraz przestrzennych brył podstawowych, w jakie wyposażony jest program DanGen 3D.

Rozkłady natężenia pola magnetycznego zdeterminowane są wartością prądu w przewodach roboczych, ich konfiguracją geometryczną, a także wpływem znajdujących się w sąsiedztwie obiektów metalowych, zniekształcających jego rozkłady. Należy tutaj wspomnieć, że pole magnetyczne, w odróżnieniu od pola elektrycznego, praktycznie nie jest deformowane przez obecność człowieka. Jak pokazano w [12], nie jest ono również tak silnie jak pole elektryczne odkształcane przez stalowe, ażurowe konstrukcje wsporcze (kratownice słupów WN i bramek stacyjnych, wsporniki aparatów itp.). Dlatego też, gdy nie ma w pobliżu ekranów magnetycznych bądź elektromagnetycznych lub innych litych

obiektów metalowych, można oszacować rozkłady pola magnetycznego stosując prawo Biota-Savarta.

W przypadku obecności ekranów bądź innego rodzaju litych obiektów metalowych konieczne jest zastosowanie bardziej skomplikowanego modelu matematycznego pola, który uwzględni zjawisko prądów wirowych. Podobny model niezbędny jest przy analizie prądów indukowanych w organizmie człowieka. Analiza prądów wirowych w organizmie człowieka będzie przedmiotem innego artykułu i nie będzie tutaj rozważana.

3. ZARYS METODY NUMERYCZNYCZNEJ

Jak już wspomniano, do analizy pola elektrycznego w przestrzeni roboczej elektromontera zastosowano metodę hybrydową łączącą MEL z MEB. Metoda ta, stosowana przez autora do analizy pól elektromagnetycznych w środowisku człowieka [10–13], została szczegółowo opisana w pracach [11, 12] oraz uściślona w artykule [18]. Tutaj podano jedynie wyjściowe równania całkowerzególne, stanowiące podstawę omawianej techniki numerycznej.

Dla punktów obserwacji P_i położonych na powierzchniach obiektów o znanym potencjale (powierzchnia ziemi, model człowieka, przewody robocze i odgromowe, elementy kratownic słupów) spełnione jest następujące równanie Fredholma pierwszego rodzaju:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{n1} \int_{\Gamma_{Dj}} G(P, P_i) \sigma(P) dP + \sum_{j=1}^{n2} \int_{\Gamma_{Cj}} G(P, P_i) \sigma(P) dP + \int_{\Gamma_g} G(P, P_i) \sigma(P) dP + \\ + \sum_{j=1}^{n3} \int_{K_j} G(P, P_i) \tau(P) dP = \varphi(P_i) \quad \text{dla } P_i \in \bigcup_{j=1}^{n2} \Gamma_{Cj} \bigcup_{j=1}^{n3} \Gamma_{Kj} \bigcup \Gamma_g \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

Γ_{Dj} – powierzchnia j -tego dielektryka (izolatora),

Γ_{Cj} – powierzchnia j -tego modelu człowieka,

Γ_g – powierzchnia ziemi,

K_j – krzywa reprezentująca j -ty obiekt modelowanego za pomocą elementów liniowych,

σ – gęstość ładunku powierzchniowego,

τ – gęstość ładunku liniowego,

$\varphi(P_i)$ – potencjał elektryczny w punkcie P_i ,

$n1, n2$ – liczby obiektów modelowanych elementami brzegowymi, odpowiednio o nieznanym i znanym potencjale na ich powierzchni,

$n3$ – liczba obiektów modelowanych elementami liniowymi,

$G(P, P_i)$ jest rozwiązaniem podstawowym równania Laplace'a podzielonym przez stałą elektryczną:

$$G(P, P_i) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (2)$$

przy czym:

$$r = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (3)$$

Dla punktów obserwacji P_i położonych na powierzchniach obiektów o nieznanym potencjale (izolatory) można sformułować następujące równanie Fredholma drugiego rodzaju [10, 12]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\epsilon_0} \frac{\epsilon_d + \epsilon_0}{\epsilon_d - \epsilon_0} \sigma(P_i) + \sum_{j=1}^{n1} \int_{\Gamma_{Dj}} \frac{\partial G(P, P_i)}{\partial n_i} \sigma(P) dP + \sum_{j=1}^{n2} \int_{\Gamma_{Cj}} \frac{\partial G(P, P_i)}{\partial n_i} \sigma(P) dP + \\ + \int_{\Gamma_g} \frac{\partial G(P, P_i)}{\partial n_i} \sigma(P) dP + \sum_{j=1}^{n3} \int_{K_j} \frac{\partial G(P, P_i)}{\partial n_i} \tau(P) dP = 0 \quad \text{dla } P_i \in \bigcup_{j=1}^{n1} \Gamma_{Dj} \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie ϵ_d jest przenikalnością elektryczną izolatora.

Układ równań całkowych (1) i (4) stanowi podstawę do zastosowania rozważanej metody numerycznej. Powyższe równania całkowe podlegają algebraizacji poprzez dyskretyzację obiektów elementami brzegowymi i liniowymi a następnie aproksymację poszukiwanych gęstości ładunków na powyższych elementach.

Dla uniknięcia konieczności dyskretyzacji nieskończenie rozległej, płaskiej części powierzchni ziemi stosuje się metodę odbić zwierciadlanych, tak jak to pokazano w [12].

W niniejszej pracy rozważane obiekty podzielono na płaskie trójkątne bądź czworokątne elementy brzegowe oraz prostoliniowe elementy liniowe. W obu przypadkach zastosowano aproksymacje zerowego rzędu gęstości ładunków na elementach.

W wyniku rozwiązania układu równań algebraicznych otrzymuje się rozkłady gęstości ładunków na poszczególnych elementach liniowych i brzegowych. Znajomość powyższych rozkładów pozwala na obliczenie skalarnego potencjału elektrycznego w dowolnym punkcie przestrzeni powietrznej:

$$\varphi(P_i) = \sum_{j=1}^{n_S} \int_{S_k} G^*(P, P_i) \sigma(P) dP + \sum_{j=1}^{n_L} \int_{L_m} G^*(P, P_i) \tau(P) dP \quad (5)$$

gdzie n_S jest całkowitą liczbą elementów brzegowych, natomiast n_L jest liczbą elementów liniowych. $G^*(P, P_i)$ jest antysymetrycznym względem płaszczyzny xy rozwiązaniem podstawowym równania Laplace'a [14], podzielonym przez stałą elektryczną:

$$G^*(P, P_i) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right) \quad (6)$$

$$r' = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z+z_i)^2} \quad (7)$$

Natężenie pola elektrycznego, \mathbf{E} , wyznacza się ze znanego wzoru:

$$\mathbf{E} = -\text{grad}\varphi \quad (8)$$

Stosuje się w tym celu schematy różnicowe, tak jak to uczyniono np. w [11, 12], bądź też następujące formy całkowe:

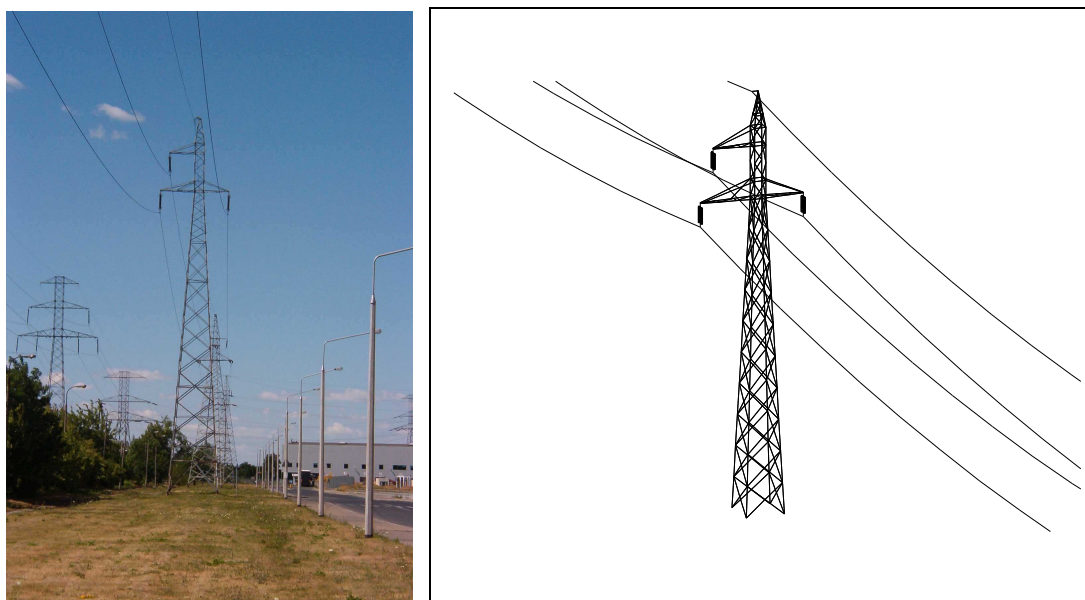
$$\mathbf{E}(P_i) = - \sum_{j=1}^{n_S} \int_{\Gamma_j} \sigma(P) \text{grad}_i G^*(P, P_i) dP - \sum_{k=1}^{n_L} \int_{K_k} \tau(P) \text{grad}_i G^*(P, P_i) dP \quad (9)$$

Ze względu na trójfazowy charakter wymuszenia, miejscem geometrycznym końca wektora natężenia pola elektrycznego, \mathbf{E} (magnetycznego, \mathbf{H}), w dowolnym punkcie przestrzeni, są elipsy (pole eliptyczne). W pracy przez natężenie pola elektrycznego \mathbf{E} (magnetycznego \mathbf{H}) rozumiana jest długość długiej półosi elipsy podzielona przez $\sqrt{2}$. Wyznacza się ją ze wzorów podanych np. w pracach [10, 16].

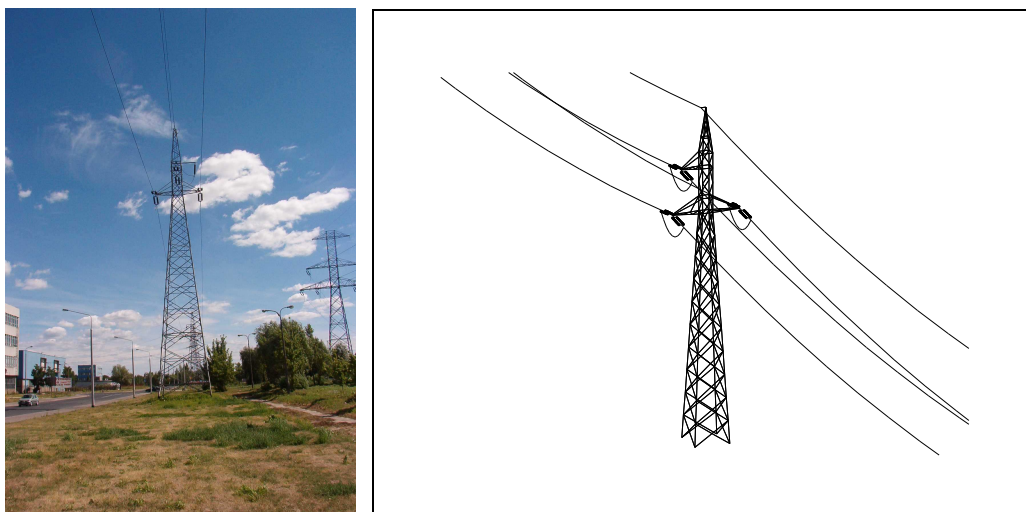
4. MODELE NUMERYCZNE OBIEKTÓW ELEKTROENERGETYCZNYCH

W niniejszym punkcie przedstawiono opracowane przez autora geometryczne modele wybranych obiektów elektroenergetycznych, które są automa-

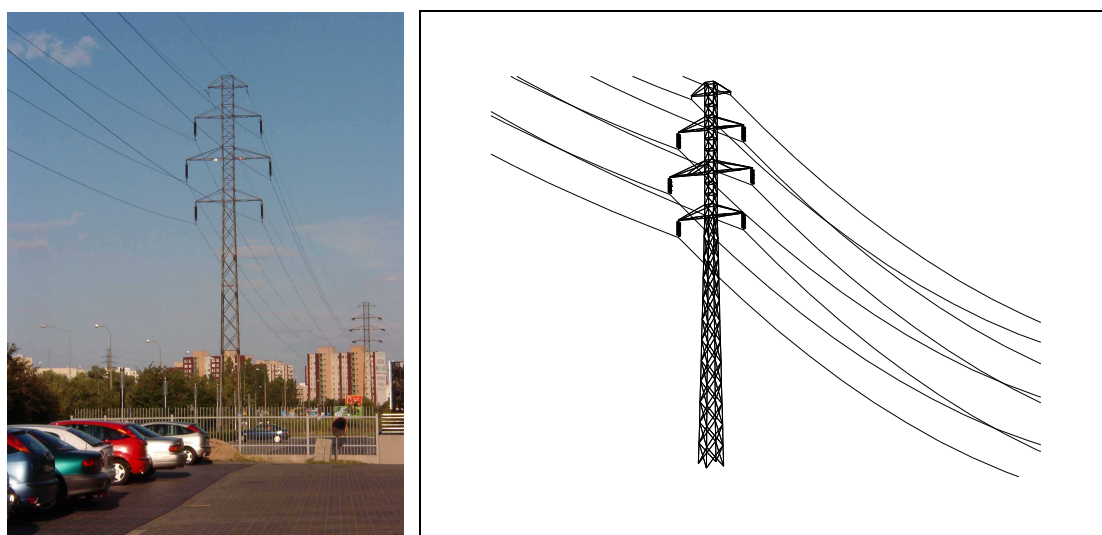
tycznie generowane przez wspomniany we wstępie, autorski program Dan-Gen 3D. Współpracuje on z opracowanym w Instytucie Elektrotechniki autorskim programem obliczeniowym BEMsolver 3D. Należy stwierdzić, że modele te muszą znacznie dokładniej odwzorowywać kształty rozważanych obiektów fizycznych niż ma to miejsce w przypadku numerycznej analizy pól w środowisku człowieka (ekspozycja środowiskowa). Generator obiektów umożliwia modelowanie różnych konfiguracji kratownic słupów linii WN występujących w polskim systemie elektroenergetycznym. W omawianym programie uwzględniono słupy przelotowe, odporowo-narożne, a także słupy krańcowe z przejściem na linię kablową 110 kV. Program DanGen 3D umożliwia automatyczne generowanie wybranych, najczęściej występują w praktyce konfiguracji układów (łańcuchów) izolatorów stosowanych zarówno na słupach WN, jak i na bramkach stacyjnych. Automatycznie modelowane są także mostki obejściowe pod izolatorami odciągowymi. Poniżej zaprezentowano wygenerowane modele niektórych słupów WN, które porównano z rzeczywistymi ich odpowiednikami (rys. 3 – 15). Pokazano tam także modele numeryczne wybranych bramek stacyjnych (rys. 16 – 18).



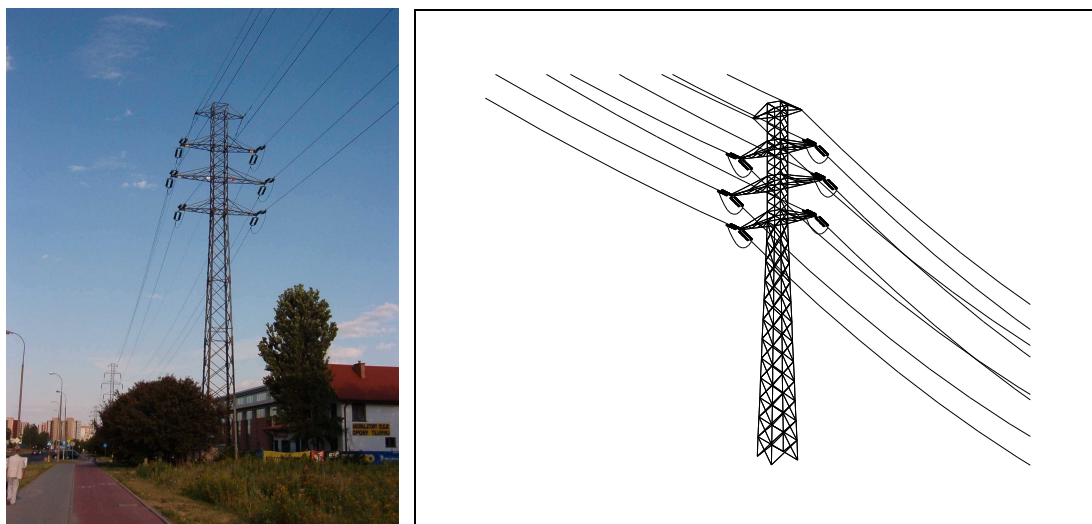
Rys. 3. Słup przelotowy serii S24, typu P, 110 kV



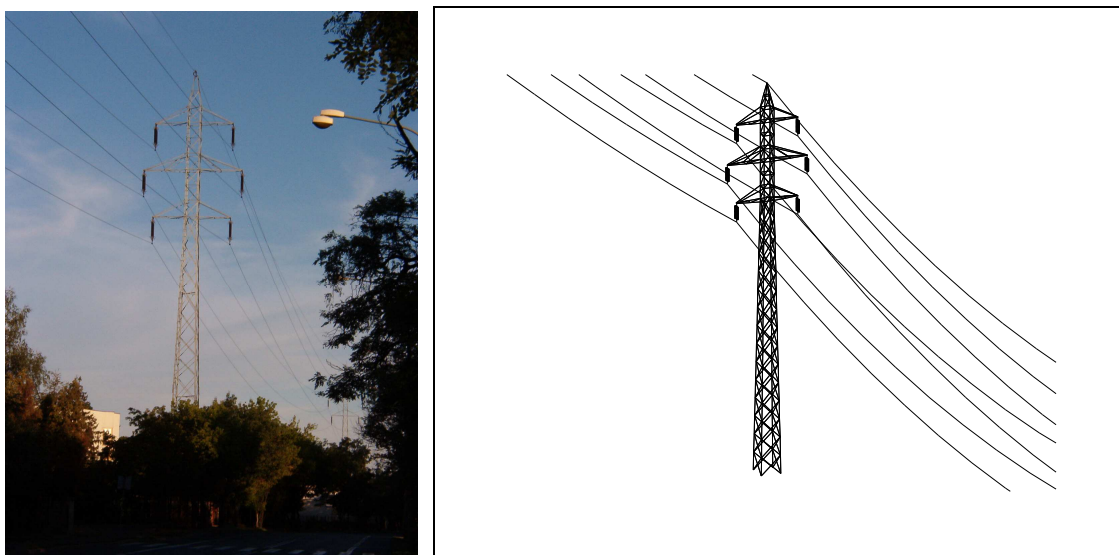
Rys. 4. Słup odporowo-naróżny serii S12, typu ON150, 110 kV



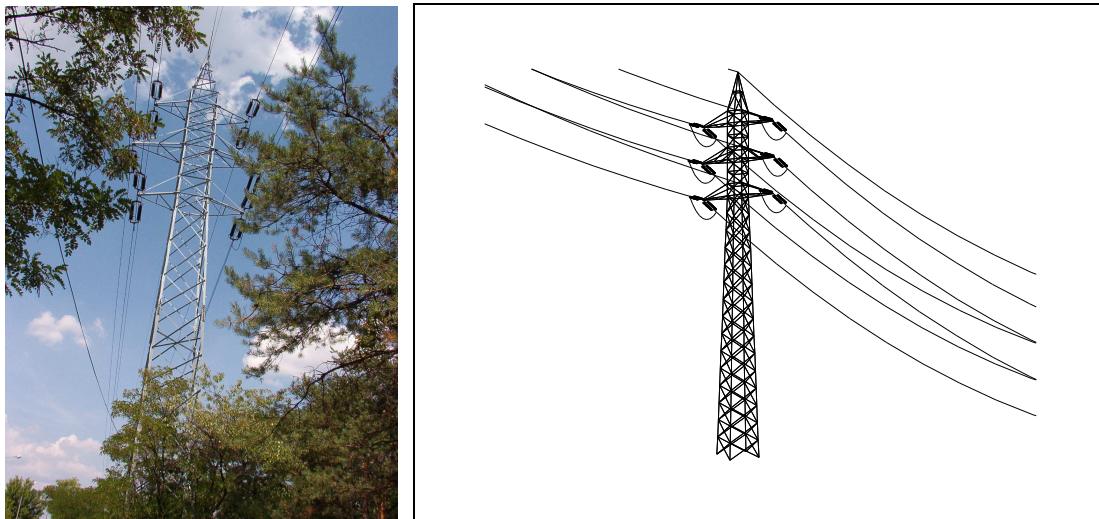
Rys. 5. Słup przelotowy serii O24, typ P, 110 kV



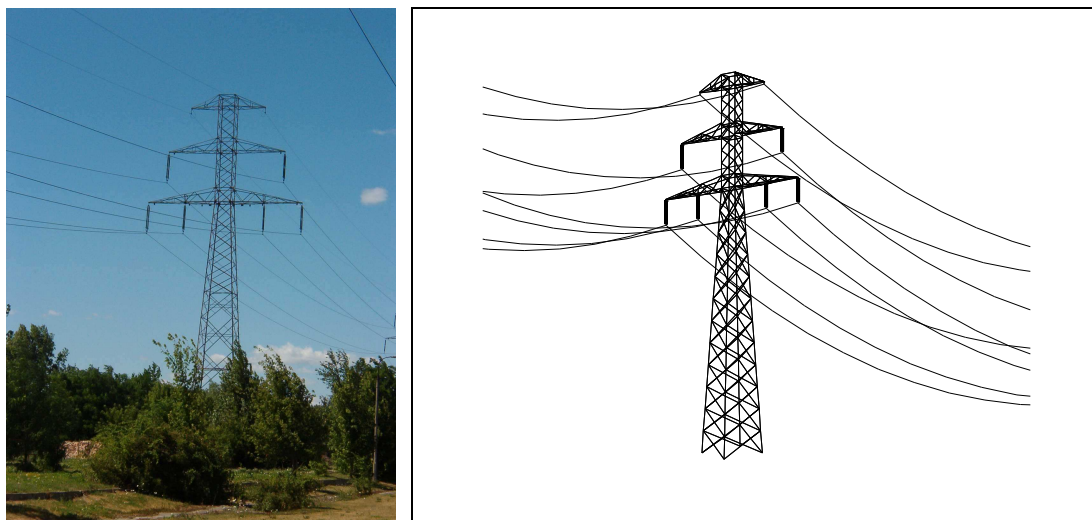
Rys. 6. Słup odporowo-naróżny serii O24, typ ON150, 110 kV



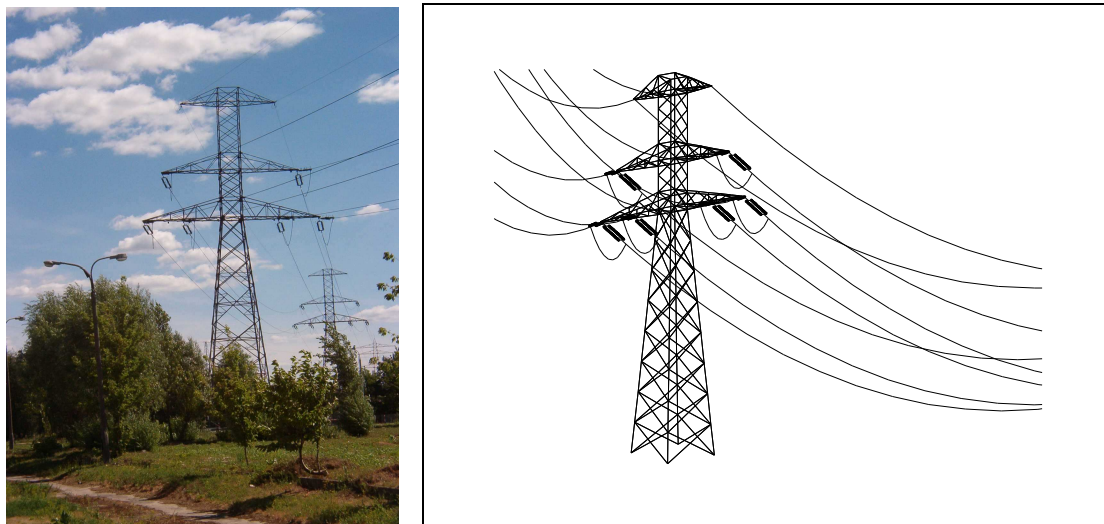
Rys. 7. Słup przelotowy serii OY, typ P, 110 kV



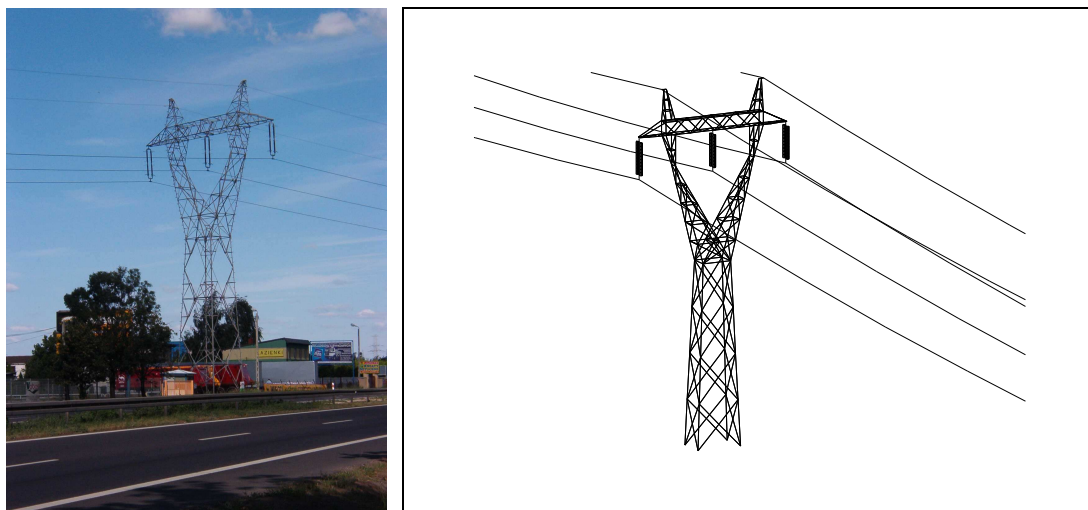
Rys. 8. Słup odporowo-naróżny serii OY, typ ONI, 110 kV



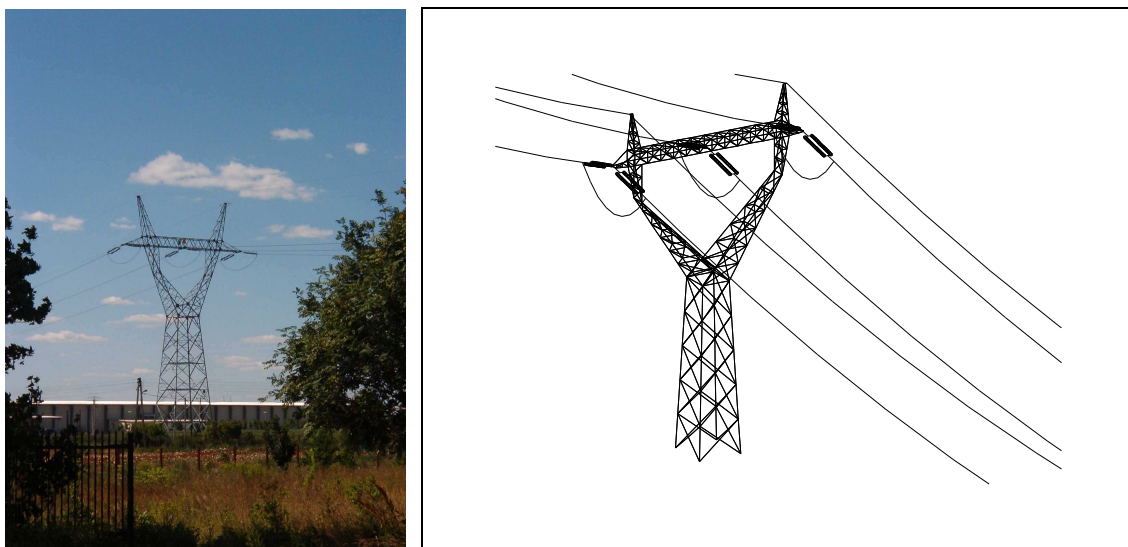
Rys. 9. Słup przelotowy serii M52, typ P, 220 kV



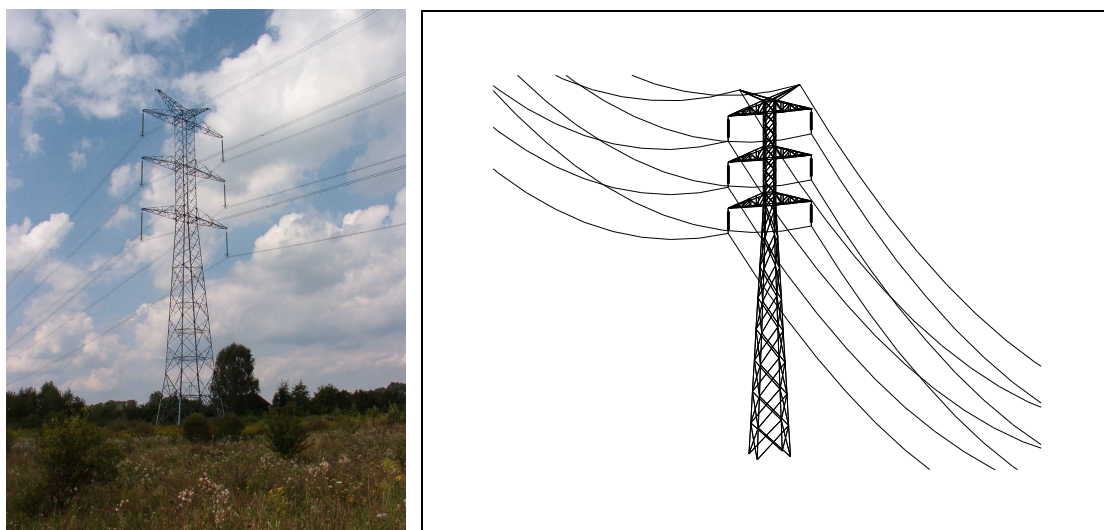
Rys. 10. Słup odporowo-narożny serii M52, typ ON100, 220 kV



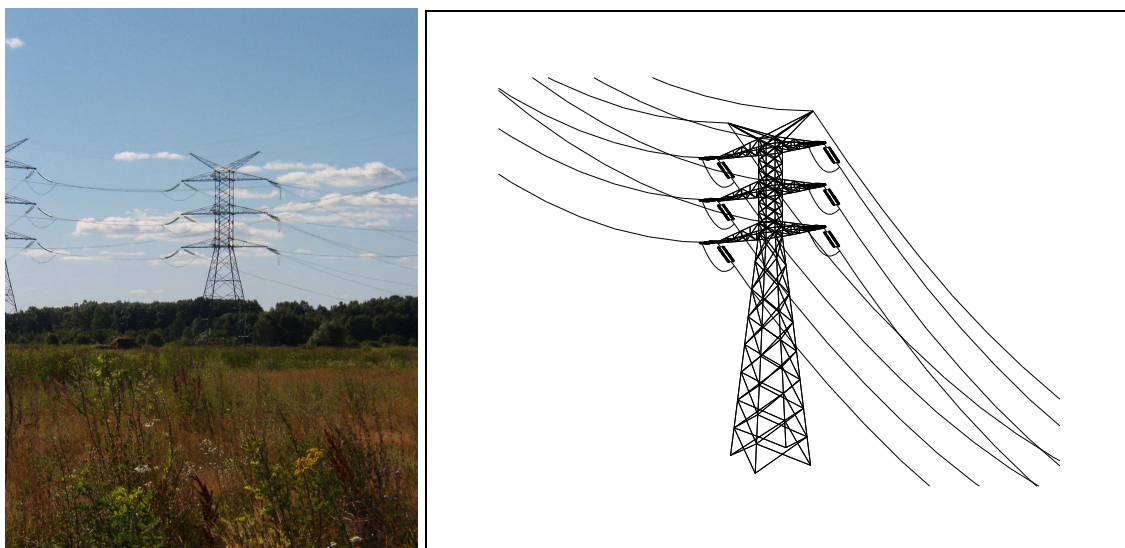
Rys. 11. Słup przelotowy serii H52, typ P, 220 kV



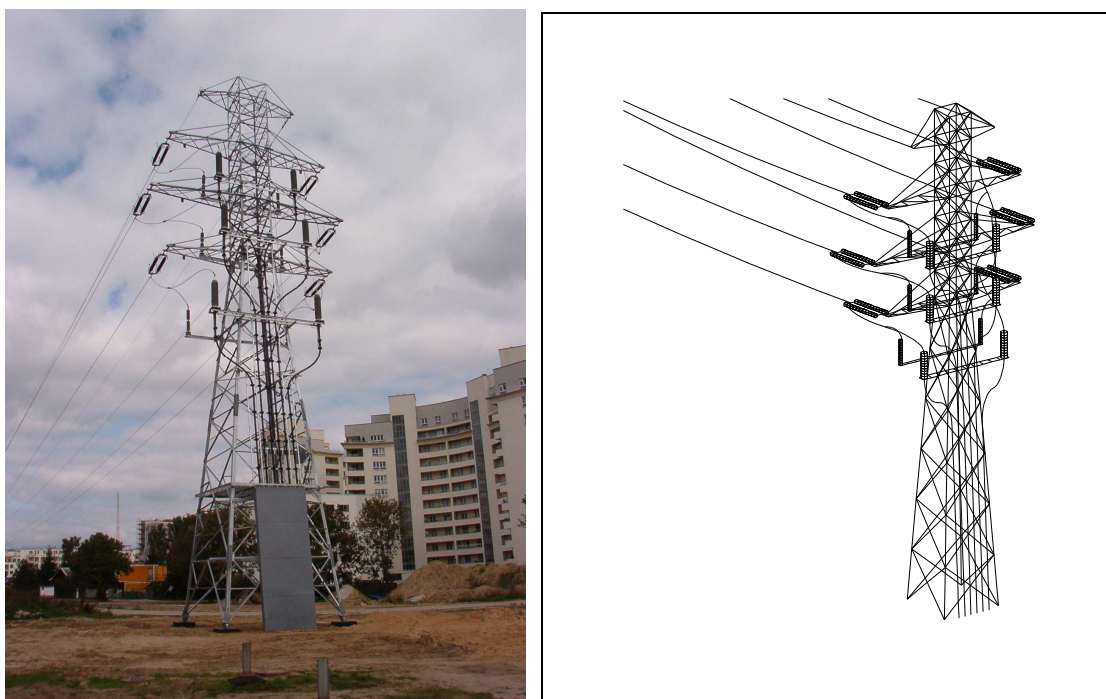
Rys. 12. Słup odporowo-naróżny serii Y52, typ ON120, 400 kV



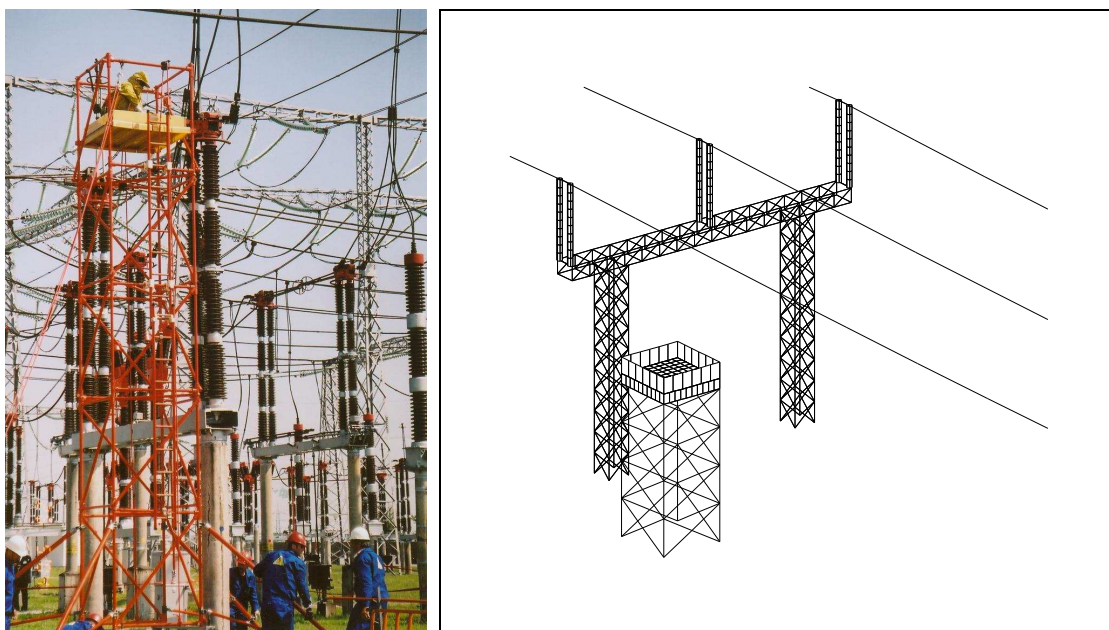
Rys. 13. Słup przelotowy serii Z52, typ P, 400 kV



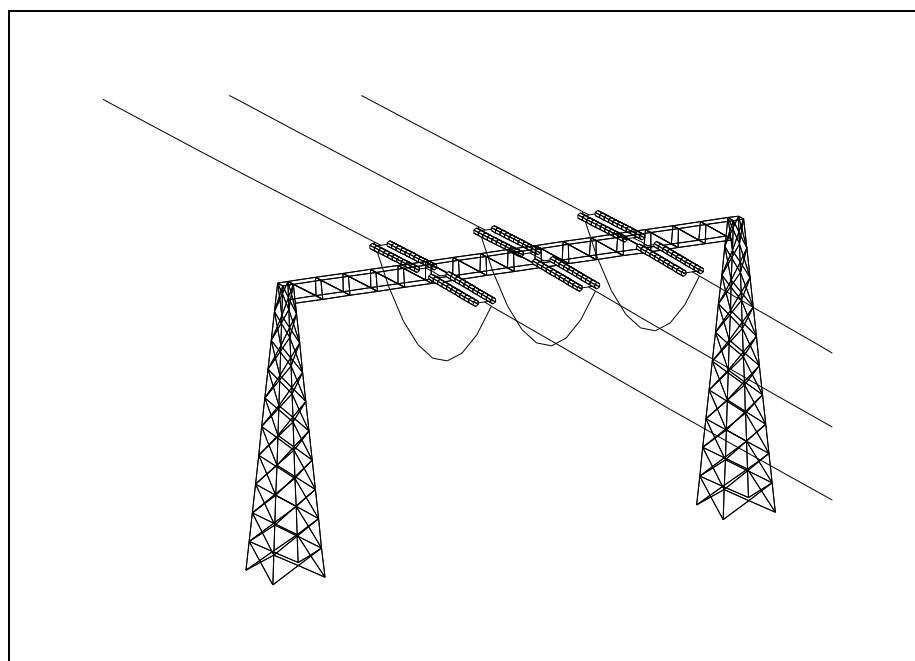
Rys. 14. Słup odporowo-narożny serii Z52, typ ON120, 400 kV



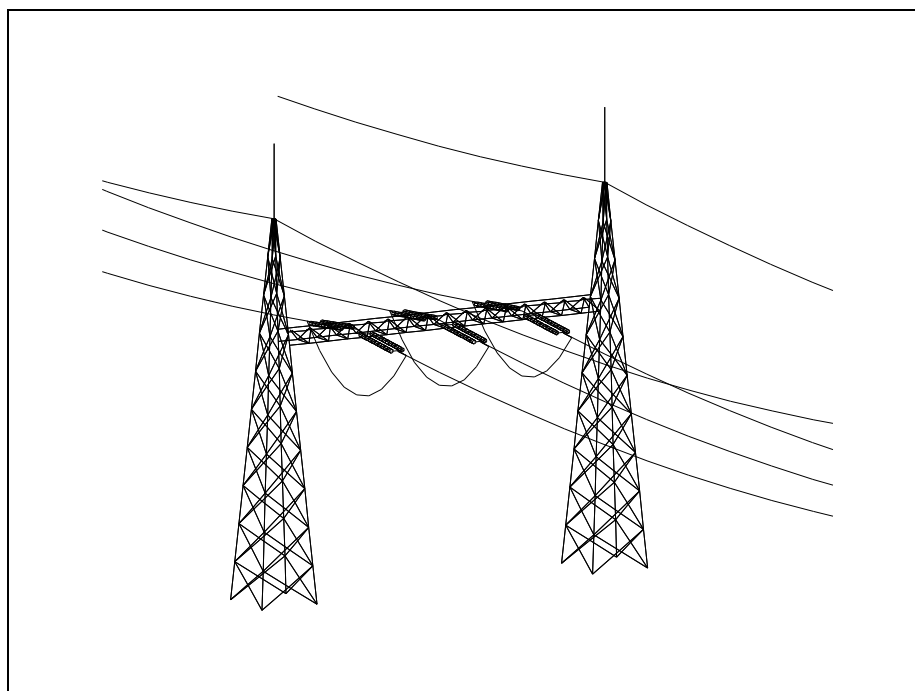
Rys. 15. Słup krańcowy z przejściem na linię kablową 110 kV



Rys. 16. Wieża izolacyjna oraz model wieży izolacyjnej na tle bramki stacyjnej typu Pi



Rys. 17. Model bramki szynowej

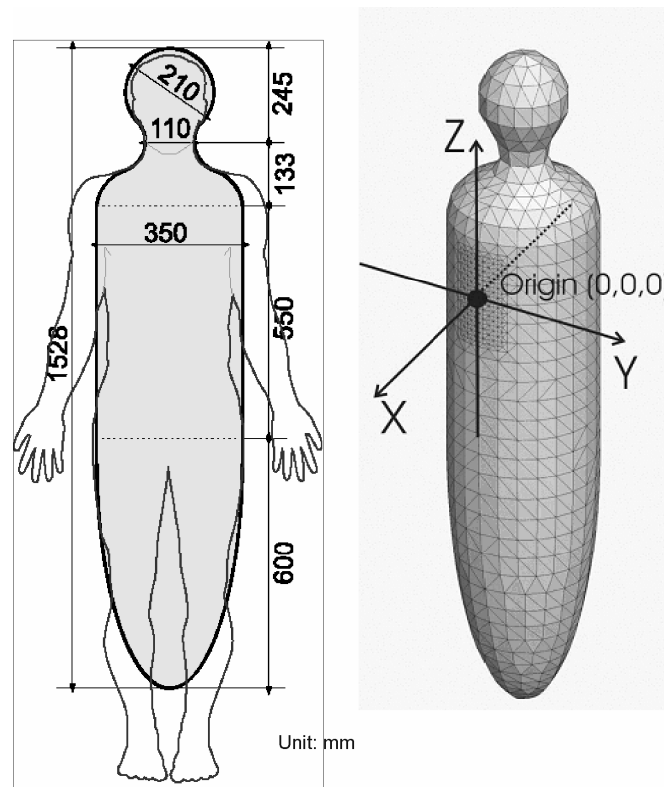


Rys. 18. Model bramki liniowej

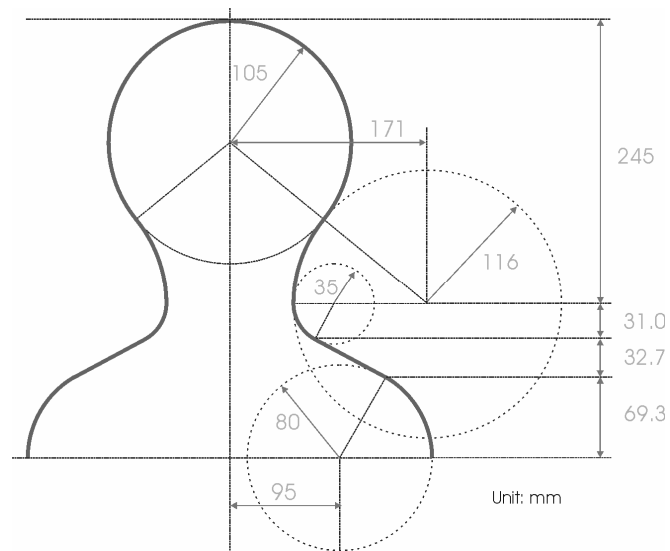
5. NUMERYCZNY MODEL SYLWETKI CZŁOWIEKA

Numeryczna analiza pól elektrycznych i magnetycznych w przestrzeni roboczej elektromonterów wykonujących prace pod napięciem wymaga przyjęcie odpowiedniego numerycznego modelu sylwetki człowieka. Pozwoli to na zobrazowania wpływu obecności elektromontera na rozkłady pola elektrycznego, a także umożliwi wyznaczenia rozkładów pola elektrycznego na jego powierzchni. Model taki jest także konieczny przy analizie prądów wirowych indukowanych w jego organizmie przez zewnętrzne pole magnetyczne.

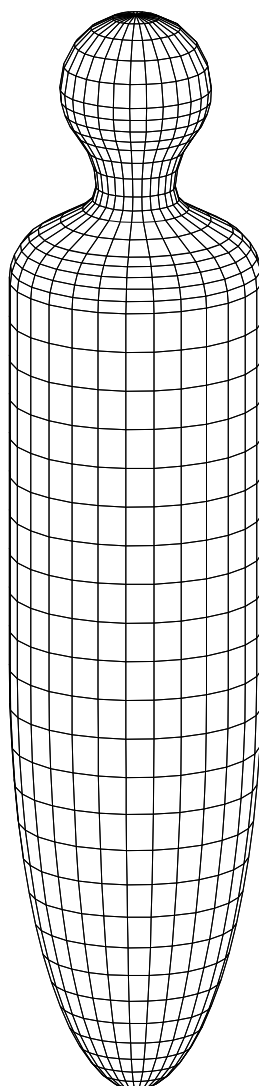
W niniejszej pracy przyjęto jednorodny model organizmu człowieka, który zalecany jest przez normę europejską IEC/EN 62233 [17]. Model ten stosowany był także w pracach dotyczących dozymetrii pola magnetycznego, np. [18]. Na rysunku 19 pokazano główne wymiary powyższego modelu oraz jego dyskretyzację przy zastosowaniu elementów skończonych. Dolną część modelu stanowi elipsoida obrotowa o dłuższej osi: 1,2 m oraz osi krótszej: 0,35 m. Środkową część modelu stanowi cylinder o wysokości 0,55 m i średnicy 0,35 m. Szczegóły dotyczące głowy, szyi i ramion pokazano na rysunku 20. Na rysunku 21 pokazano dyskretyzację rozważanego modelu przy zastosowaniu czworokątnych płaskich elementów brzegowych.



Rys. 19. Wymiary modelu sylwetki człowieka wg normy IEC/EN 62233 oraz jego dyskretyzacja przy zastosowaniu elementów skończonych



Rys. 20. Podstawowe krzywizny w modelu sylwetki człowieka wg normy IEC/EN 62233



Rys. 21. Dyskretyzacja modelu sylwetki człowieka przy zastosowaniu płaskich trójkątnych i czworokątnych elementów brzegowych

6. PRZYKŁADY OBLICZENIOWE

W niniejszym punkcie przedstawiono wyniki obliczeń pola elektrycznego i magnetycznego niskiej częstotliwości w przestrzeni roboczej elektromontera wykonujących prace pod napięciem metodą „z odległości” na słupie serii OS24, typu ON150,110 kV (rys. 22). Obliczenia natężenia pola elektrycznego prze-

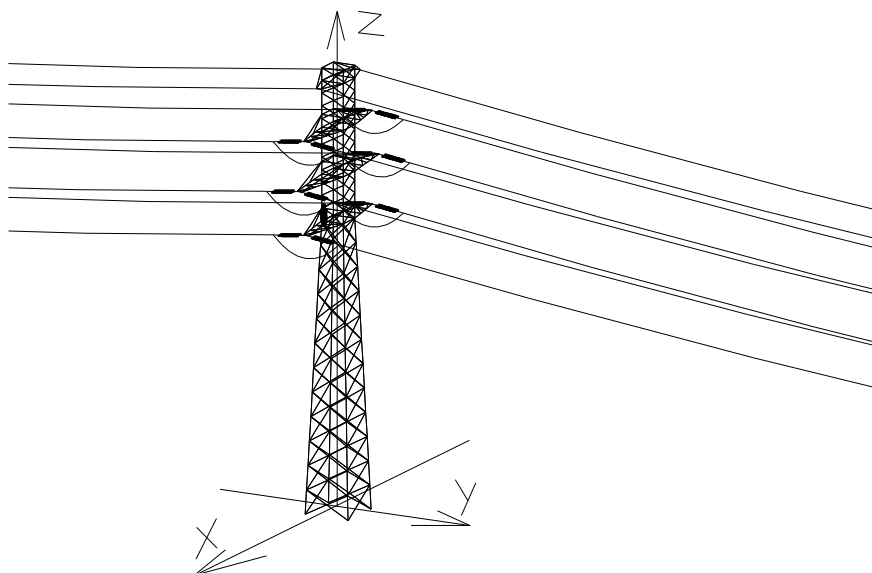
prowadzono zarówno bez uwzględnienia, jak i z uwzględnieniem wpływu człowieka oraz kratownicy słupa na jego rozkłady.

Natężenie pola magnetycznego, zgodnie z poprzednimi uwagami, wyznaczono bezpośrednio z prawa Biota–Savarta, tzn. bez uwzględnienia wpływu obiektów deformujących jego rozkłady.

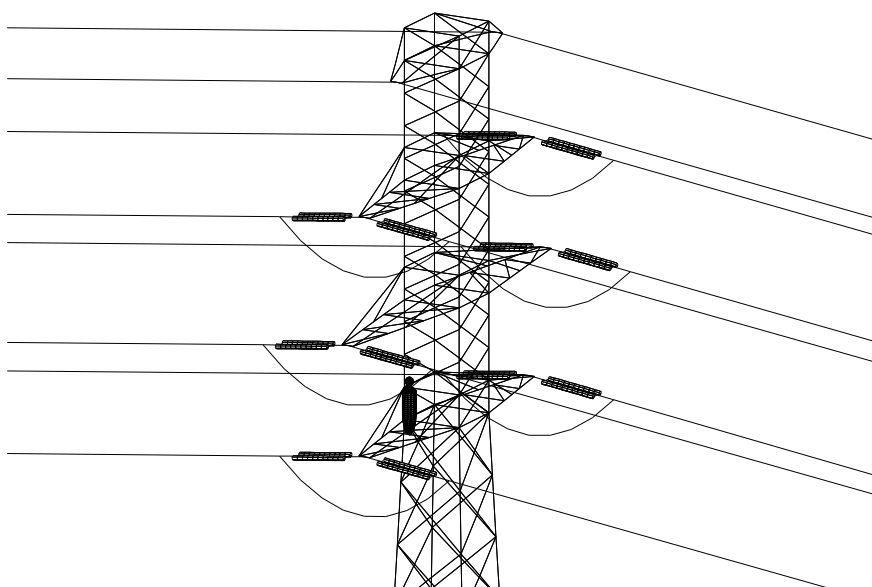
Do obliczeń pola elektrycznego wykorzystano studialną wersję programu BEMsolver 3D z opisanymi wcześniej numerycznymi modelami kratownic słupów WN oraz sylwetki człowieka. Obliczono rozkłady pól w przestrzeni roboczej elektromontera, bezpośrednio nad pierwszym (dolnym) poprzecznikiem omawianego słupa. Na rysunku 23 pokazano niezakłócony rozkład natężenia pola elektrycznego, tj. nie uwzględniający oddziaływania kratownicy słupa i elektromontera. Na rysunku 24 uwzględniono wpływ kratownicy, natomiast na rysunku 25 pokazano wyniki obliczeń uwzględniające zarówno wpływ kratownicy, jak i człowieka. Porównując wyniki obliczeń pomijających i uwzględniających oddziaływanie człowieka widać jego silny wpływ na rozkład natężenia pola elektrycznego. Wpływ ten polega na koncentracji pola w jego sąsiedztwie, co jest zgodne z fizyczną interpretacją zjawiska. Znajomość rozkładów pola elektrycznego zniekształconego obecnością człowieka może być wykorzystana w analizie prądów pojemnościowych płynących w jego organizmie, co z kolei ma istotne znaczenie w procesie uściślania zasad dozymetrii pola elektrycznego.

Z kolei na rysunku 26 przedstawiono rozkład natężenia pola magnetycznego w rozważanym obszarze. W obliczeniach założono prąd w przewodach równy 1 kA.

Do wyznaczenia dopuszczalnego czasu pracy w rozważanym obszarze istotny jest rozkład natężenia pola elektrycznego niezakłócony obecnością człowieka, ale uwzględniający wpływ kratownicy słupa. W rozważanym przypadku w przestrzeni roboczej elektromontera nad pierwszym poprzecznikiem natężenie to osiąga wartość 11,4 kV/m i przekracza dopuszczalną wartość dla ekspozycji środowiskowej (10 kV/m). Natężenie pola magnetycznego osiąga wartość 180 A/m i również przekracza dopuszczalną wartość dla ekspozycji środowiskowej (60 A/m). Nie przekracza jednak dolnej granicy strefy zagrożenia, pozostając w tzw. strefie pośredniej, w której to strefie przebywanie pracowników dozwolone jest w czasie jednej zmiany roboczej. Uwzględniając pojęcie dopuszczalnej dozy promieniowania dla pola elektrycznego, stwierdzono, że czas pracy elektromontera w rozważanym obszarze nie powinien przekraczać 6,2 h.



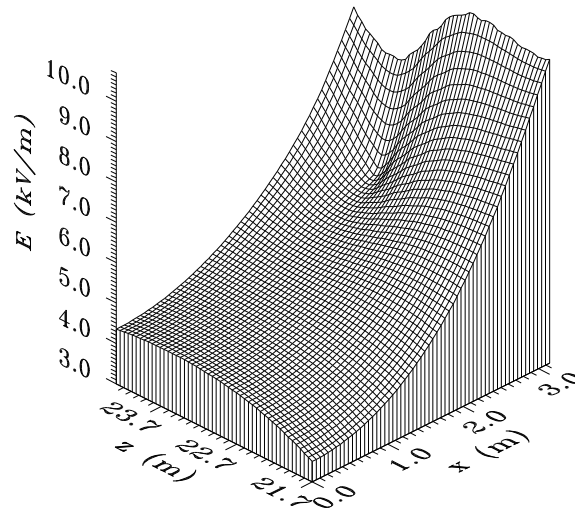
a.



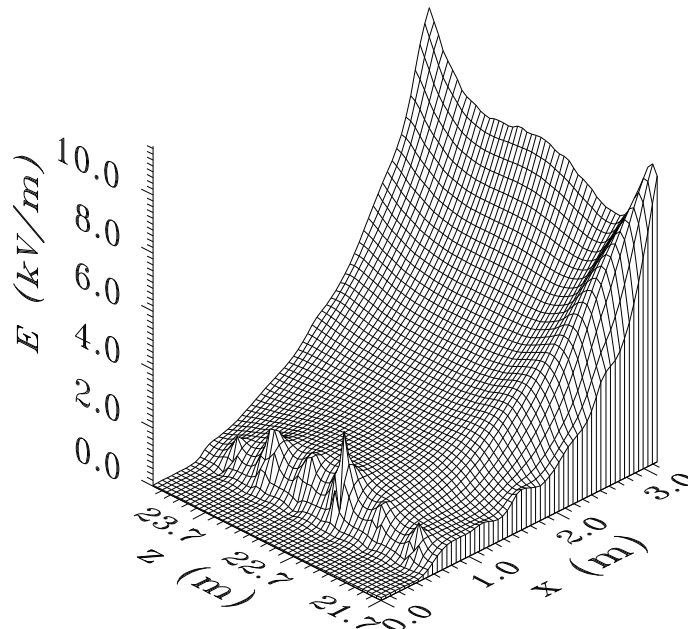
b.

Rys. 22. Numeryczny model słupa odporowo–narożnego serii OS24, typu ON150, 110 kV z modelem sylwetki człowieka, reprezentującym elektromontera

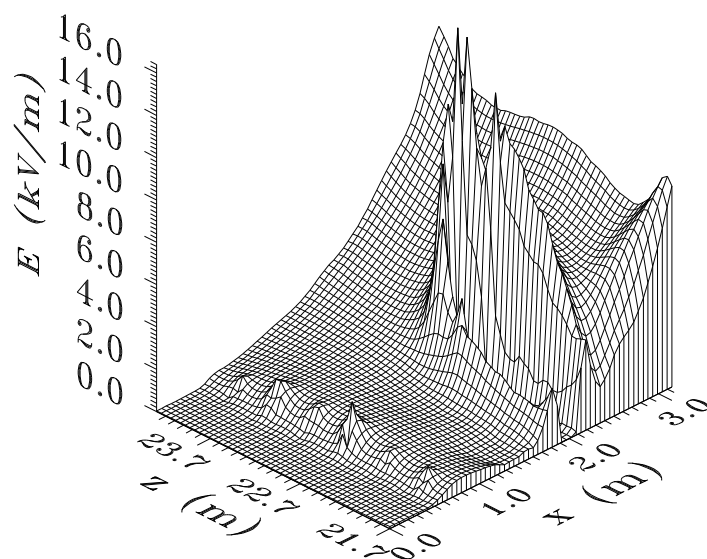
a. – widok ogólny, b – zbliżenie



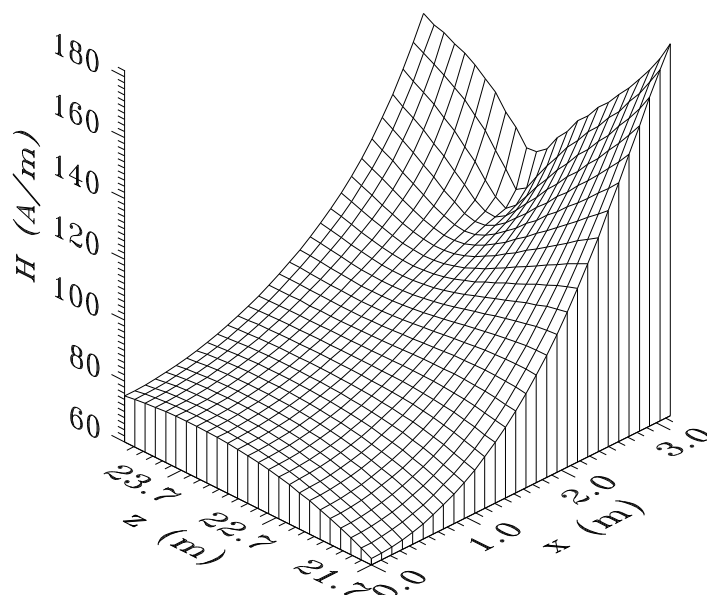
Rys. 23. Rozkład natężenia pola elektrycznego w przestrzeni roboczej nad pierwszym poprzecznikiem słupa serii OS24, typu ON150, 110 kV (bez uwzględnienia wpływu kratownicy słupa oraz człowieka)



Rys. 24. Rozkład natężenia pola elektrycznego w przestrzeni roboczej nad pierwszym poprzecznikiem słupa serii OS24, typu ON150, 110 kV (z uwzględnieniem wpływu kratownicy)



Rys. 25. Rozkład natężenia pola elektrycznego w przestrzeni roboczej nad pierwszym poprzecznikiem słupa serii OS24, typu ON150, 110 kV (z uwzględnieniem wpływu kratownicy słupa oraz człowieka)



Rys. 26. Rozkład natężenia pola magnetycznego w przestrzeni roboczej nad pierwszym poprzecznikiem słupa serii OS24, typu ON150, 110 kV

7. PODSUMOWANIE

W artykule zaprezentowano numeryczne modele obiektów elektroenergetycznych, które generowane są automatycznie przez program DanGen 3D, współpracujący z opracowanym w Instytucie Elektrotechniki pakietem oprogramowania BEMsolver 3D. Powyższe modele przeznaczone są do numerycznej identyfikacji pól elektrycznych i magnetycznych w otoczeniu elektromonterów wykonujących prace pod napięciem w energetyce. Są one znacznie bardziej rozbudowane niż te, które stosowane były do analizy pól w środowisku człowieka.

Wykorzystując powyższe modele numeryczne, przeprowadzono przykładowe obliczenia pola elektrycznego i magnetycznego w przestrzeni roboczej elektromontera wykonującego prace pod napięciem na słupie odporowo-naroznym linii 110 kV. Obliczenia te pozwalają na wyznaczenie dopuszczalnego czasu pracy przy wykonywaniu konkretnych operacji, tak aby nie zostały przekroczone dopuszczalne dozy promieniowania. Zaproponowana technika numeryczna oraz wykorzystujące ją programy komputerowe mogą być przydatne przy opracowywaniu nowych technologii prac pod napięciem.

LITERATURA

1. Michniewski R.: Aspekty techniczne i ekonomiczne prowadzenia prac pod napięciem w ZE. Toruń S.A., Energetyka, Nr 10/11 2002, str. 752-760.
2. Michniewski R.: Prace pod napięciem na słupach odporowych i odporowo-naroznych linii 110 kV w ZE. Toruń S.A., Energetyka, Nr 9, 2006, str. 603-608.
3. Smoktunowicz S., Michniewski R.: Prace pod napięciem na liniach 220 i 400 kV. Biuletyn Miesięczny PSE S.A., Nr 12 (162), 2004.
4. Płuciennik S.: Rozwój prac pod napięciem w Polsce. VIII Konferencja Naukowo-Techniczna „Prace pod napięciem w sieciach nn, SN i WN w Polsce i na świecie”, Kraków 2-4 września 2004, str. 7 –13.
5. Dudek B.: Środki chroniące przed wpływem pól elektrycznych 50 Hz. Energetyka, Nr 6, 1990, str. 211-213.
6. Dudek B.: Identyfikacja zagrożeń i analiza ryzyka przy wykonywaniu prac pod napięciem. Biuletyn Miesięczny PSE S.A., Nr 8 (86), 1998, str. 1–8.
7. Nadolny Z., Nowacki T., Rakowska A.: Analiza pola elektrycznego i magnetycznego w czasie wykonywania prac pod napięciem na linii 220 kV. Wiadomości Elektrotechniczne, Nr 1, 2005, str. 26-31.
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. 2003, Nr 192, poz. 1883.

9. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Dz. U. 2002, Nr 217, poz. 1833.
10. Krajewski W.: Trójwymiarowa analiza pola elektrycznego w sąsiedztwie linii wysokiego napięcia. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 1, 1997, str. 1 – 6.
11. Krajewski W.: Numerical modelling of the electric field in HV substations. IEE Proceedings – Science, Measurement & Technology, Vol. 151, No 4, 2004, str. 267 –272.
12. Krajewski W.: Elementy brzegowe i liniowe w analizie wybranych zagadnień EMC niskiej częstotliwości. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 224, 2005 (monografia).
13. Krajewski W., Weselucha Z.: Program EMFA_2003 do analizy pól elektrycznych i magnetycznych w sąsiedztwie obiektów elektroenergetycznych. Elektro-Info, Nr 6, 2004, str. 75 – 76.
14. Brebbia C. A.: The Boundary Element Method for Engineers. Pentech Press, London, 1978.
15. Singer H., Steinbigler H., Weiss P.: A charge simulation method for the calculation of high voltage fields. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 93, 1973, str. 1660 – 1668.
16. Krajewski W.: Analiza dokładności wybranych technik całkowo-brzegowych w kontekście modelowania zagadnień EMC niskiej częstotliwości. Prace Instytutu Elektrotechniki z.233, 2007, str. 43 – 80.
17. IEC/EN 62233: Measurement methods for electromagnetic fields of household appliances and similar apparatus with regard to human exposure. 2005.
18. Nishizawa S., Landstorfer F., Hashimoto O.: Dosimetric study of induction heater using the coil source model prescribed by EN50366. Proceedings of 3rd International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields, Volumes 2, October 2004, str. 894 – 903.
19. Dawson D., Caputa K. Stuchly M.: Magnetic field exposure for UK live-line workers. Physics in Medicine Biology, No. 47, 2002, str. 995-1012.

Rękopis dostarczono dnia 3.10.2008 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Jan SIKORA

BEM AND LEM MESH GENERATOR FOR THE ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC EXPOSURE DURING LIVE-LINE WORKING ON POWER OBJECTS

Wojciech KRAJEWSKI

ABSTRACT *Realistic boundary-integral models of power objects as well as a simplified numerical model of human body in the context of live-line working has been proposed. A pre-processor DanGen 3D for the automatic grid generation of these models has*

been elaborated. Employing this program as well as own software package BEMsolver 3D selected numerical examples have been computed. A hybrid numerical technique combining the boundary with line element methods is applied (in this software) to the electric field analysis. Distribution of the electric field strength inside the live-line-working zone has been computed. Influence of the live-line-worker body on the electric field distribution has been neglected as well as it has been taken into account. The magnetic field strength has been computed using the Biot-Savart law. Analysing the computational results, the maximum time for considered live-line works has been determined.



Dr hab. inż. Wojciech KRAJEWSKI w 1977 r. ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej w specjalności budowa maszyn i urządzeń. W roku 1984 na tym samym wydziale obronił z wyróżnieniem pracę doktorską pt.: „Analiza pola elektromagnetycznego i naprężeń w elementach metalowych kształtowanych impulsem magnetycznym”. Stopień doktora habilitowanego uzyskał na podstawie rozprawy pt.: „Elementy brzegowe i liniowe w analizie wybranych zagadnień EMC niskiej częstotliwości” w 2007 r. w Instytucie Elektrotechniki, gdzie pracuje od 1981 r. Zajmuje się zagadnieniami numerycznego modelowania pól elektromagnetycznych w maszynach i urządzeniach elektrycznych, a także problematyką pól w środowisku człowieka i na stanowiskach pracy. W 1991 r. odbył dwumiesięczny staż naukowy w charakterze visiting scholar w Rensselaer Polytechnic Institute w Troy (USA). W tym samym roku po-

wierzono mu organizację i przewodnictwo sesji na temat obliczania pól w elektrotechnice na Światowym Kongresie IMACS'91 (International Association for Mathematics and Computers in Simulation), który odbył się w Dublinie. Bierze udział w pracach International Electrotechnical Commission w charakterze eksperta z zakresu pól elektromagnetycznych (komitet TC 106). W 2005 r. został powołany na stałego recenzenta w brytyjskim czasopiśmie naukowym IET-Proceedings, Science, Measurement & Technology. Jest autorem i współautorem programów komputerowych wdrożonych w przemyśle i ochronie środowiska. Jest również autorem i współautorem blisko czterdziestu publikacji w krajowych i zagranicznych czasopismach naukowych. Wymieniany jest w amerykańskich i brytyjskich wydawnictwach „Who is Who”. Należy do Stowarzyszenia Elektryków Polskich oraz do brytyjskiego The Institution of Engineering and Technology (dawniej IEE).