

Analiza wpływu doboru parametrów symulacji metodą elementów skończonych na dokładność uzyskanych wyników

Streszczenie. Na przykładzie wybranej napowietrznej linii elektroenergetycznej o napięciu 220 kV przeprowadzono serię cyfrowych symulacji rozkładu natężenia pola elektrycznego generowanego przez tą linię dla różnych parametrów symulacji przeprowadzonych metodami elementów skończonych. W niniejszym artykule autorzy dokonali analizy wpływu określonych parametrów symulacji na dokładność uzyskanych wyników oraz czas trwania obliczeń.

Abstract. Based on the selected overhead power line 220 kV were performed numerical identification of intensity of the generated electrical fields for many different parameters of digital simulations. By use the finite elements method. In this papers authors made analysis of the influence of selection of digital simulation parameters to precision of the obtained results and time of numerical calculation. **The analysis of the influence of selection of digital simulation parameters to precision of the obtained results and time of numerical calculation**

Słowa kluczowe: pole elektryczne, symulacje cyfrowe, linie elektroenergetyczne, bezpieczeństwo środowiska.

Keywords: electrical fields, digital simulations, power lines, environmental safe.

Wstęp

Do oceny narażenia środowiska polami elektromagnetycznymi wytwarzanymi podczas wielu różnych procesów technologicznych niezbędna jest identyfikacja natężenia składowej elektrycznej oraz magnetycznej takich pól. W wielu państwach dopuszczalne wartości graniczne są jasno określone przez odpowiednie akty prawne. W Polsce takim dokumentem jest Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów [1].

Znajomość rozkładu natężenia pola elektrycznego oraz pola magnetycznego jest niezbędna w celu dokonania oceny uciążliwości dla otoczenia oraz wpływu na środowisko obiektów elektroenergetycznych takich jak np. linie przesyłowe lub stacje rozdzielcze [2,3].

Badania naukowe dotyczące oddziaływania pól elektromagnetycznych na organizmy żywe nie dają jednoznacznej odpowiedzi na pytanie w jakim stopniu mogą one szkodliwie wpływać na funkcje życiowe. Niewątpliwie występowanie pola elektromagnetycznego w środowisku powoduje określone skutki w żywych organizmach ponieważ wiele procesów życiowych związanych jest z przekazywaniem sygnałów elektrycznych czy też z procesami transportu jonów [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

W przypadku narażenia człowieka na oddziaływanie składowej magnetycznej pola elektromagnetycznego o stosunkowo wysokim natężeniu mogą pojawić się przemijające efekty zwane magnetofosfenami czyli doświadcza się odbierania narządem wzroku swoistych „rozbłysków”, które w rzeczywistości nie mają miejsca [11].

Skutki pozostawiania organizmów żywych w zasięgu oddziaływania pola elektromagnetycznego są uwarunkowane indywidualnymi osobniczymi cechami oraz dawką na jakie są one narażone. Dawka jest ściśle uzależniona od czasu trwania narażenia oraz od natężenia pola elektromagnetycznego w zakresie składowej elektrycznej jak również składowej magnetycznej.

Przy wykorzystaniu pól elektromagnetycznych możliwe jest również oddziaływanie i wywieranie kontrolowanego wpływu na stan struktur biologicznych oraz ich późniejsza diagnostyka wraz z oceną skutków oddziaływania [12, 13].

W tabeli 1 przedstawiono typowe wartości natężenia pola elektrycznego oraz wartości indukcji magnetycznej dla przesyłowych i rozdzielczych układów

elektroenergetycznych oraz dla porównania te generowane przez urządzenia powszechnego użytku [14].

Jak widać precyzyjne określenie dawek generowanych przez poszczególne źródła pola elektromagnetycznego występujące w środowisku jest niezwykle skomplikowanym zadaniem. W związku z powyższym sugeruje się ostrożnościowe podejście do obowiązujących limitów oraz ograniczanie dawek w miarę uzasadnionych możliwości technicznych oraz ekonomicznych [2, 14, 15, 16].

Tabela 1. Wartości natężenia pola elektrycznego i indukcji magnetycznej pod liniami elektroenergetycznymi oraz w pobliżu innych urządzeń elektrycznych [14]

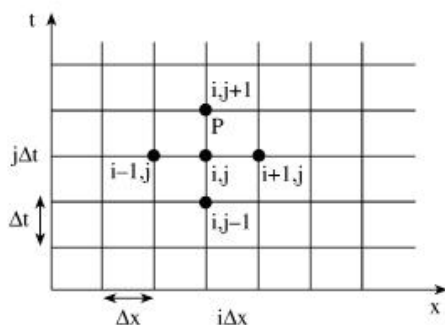
Wyszczególnienie	Natężenie pola elektrycznego kV/m	Indukcja pola magnetycznego μT
Pod liniami najwyższych napięć 220 – 400 kV prądu przemiennego (do 10 m od osi linii)	5 – 10	30 – 50
W odległości 50 m od osi linii 400 kV	< 0,5	< 5
Pod liniami 110 kV	0,5 – 4	< 20
Pod liniami średniego napięcia	< 0,3	1 – 20
Za ogrodzeniem stacji elektroenergetycznych wysokiego napięcia	0,1 – 0,3	< 0,2
W bezpośrednim sąsiedztwie urządzeń powszechnego użytku w domu	< 0,5	10 – 400
Natężenia pola elektrycznego i indukcja pola magnetycznego pod liniami napowietrznymi dotyczą środka przęsła i wysokości 1,8 m nad ziemią		

Identyfikacja natężenia pola elektromagnetycznego zasadniczo może odbywać się na dwa sposoby: w drodze pomiarów natężenia badanej wielkości przeprowadzonych w otoczeniu pracującego obiektu lub w drodze identyfikacji obliczeniowej stosując przy tym najczęściej z metody elementów skończonych [17].

Opis matematyczno-fizyczny zjawiska emisji pola elektromagnetycznego przez układy elektroenergetyczne o skomplikowanej strukturze wykorzystuje bardzo złożony aparat matematyczny. Za pośrednictwem równań różniczkowych można określić rozkład potencjału elektrycznego lub natężenia pola elektrycznego w dowolnym wybranym punkcie przestrzeni [18].

Niestety analiza skomplikowanych zagadnień, a w większości takie właśnie przypadki występują w

elektroenergetyce, okazuje się w praktyce niemożliwa. Zarówno pomiarowe jak i obliczeniowe sposoby identyfikacji rozkładu natężenia pola elektromagnetycznego nie są pozbawione wad, z których najpoważniejszą jest stosunkowo duży błąd, którym z wielu różnych powodów obarczony jest ostateczny wynik.



Rys.1. Siatka elementów skończonych wraz z zaznaczonymi węzłami [17].

Najprostszym sposobem obliczeniowej identyfikacji potencjału elektrycznego a następnie natężenia składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego w środowisku gdzie znajdują się tory prądowe urządzeń lub linii elektroenergetycznych różnych napięć oraz w dowolnej konfiguracji geometrycznej jest zastosowanie metody różnicowej. Metoda ta pozwala na zamianę opisu różniczkowego przy pomocy równań różnicowych. Dzięki odpowiedniemu zagęszczeniu węzłów siatki wyniki uzyskane w ten sposób obarczone są stosunkowo niewielkimi błędami rozwiązania przybliżonego.

Przed przystąpieniem do wykonania obliczeń należy określić warunki początkowe badanego zagadnienia. Węzłom, w których znane są wartości potencjału elektrycznego należy przypisać te wartości. Pozostałym węzłom należy przypisać dowolne wartości potencjału, przy czym najczęściej przyjmuje się w nich wartości zerowe.

Wykonując kolejne iteracje dla całej tablicy węzłów określa się wartość funkcji potencjału elektrycznego dla każdego punktu siatki na podstawie wartości funkcji w czterech sąsiednich punktach (Rys. 1) [17].

$$(1) \Phi(i, j) = \frac{1}{4} [\Phi(i+1, j) + \Phi(i-1, j) + \Phi(i, j+1) + \Phi(i, j-1)]$$

Po wykonaniu serii iteracji błąd rozwiązania można określić za pomocą zależności:

$$(2) \max |V_h^{(j+1)} - V_h^j| \leq \varepsilon$$

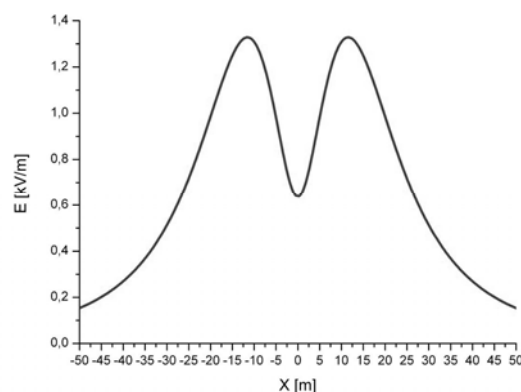
gdzie: $j=1,2,3,\dots$ oznacza kolejny numer iteracji [17].

Analiza rozkładu natężenia pola elektrycznego pod linią napowietrzną 220 kV

Parametry podlegające zmianie podczas przeprowadzonej analizy to gęstość siatki elementów różnicowych, liczba węzłów siatki w regionie rozwiązania, liczba iteracji wymagana do osiągnięcia zadanej dokładności obliczeń oraz czas wykonania obliczeń.

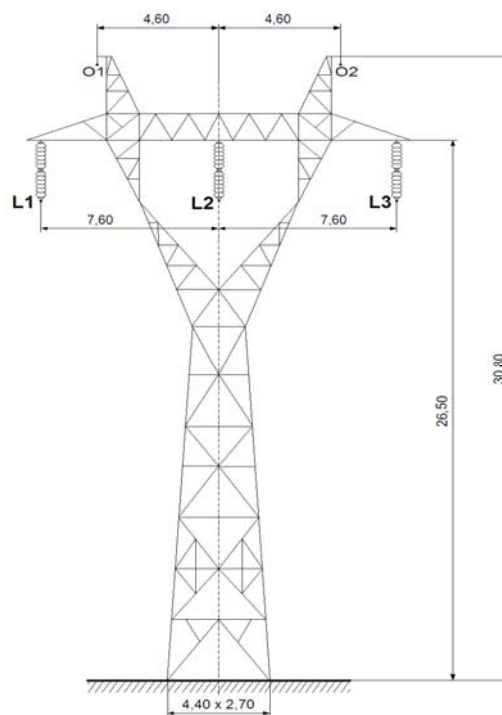
Na rysunku 2 przedstawiono rozkład składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego w wybranym przekroju poprzecznym przesyła elektroenergetycznej linii napowietrznej 220 kV. Po przeprowadzeniu serii symulacji przy zastosowaniu metody elementów skończonych uzyskano wyniki rozkładu natężenia pola elektrycznego w otoczeniu badanego przypadku napowietrznej linii elektroenergetycznej.

W analizowanym przekroju poprzecznym po uwzględnieniu zwisu oraz długości zastosowanych izolatorów wszystkie trzy przewody robocze zlokalizowane są na wysokości 17,2 m oraz oba przewody odgromowe zlokalizowane są na wysokości 25,0 m nad poziomem gruntu.



Rys.2. Rozkład natężenia pola elektromagnetycznego pod linią 220 kV wyznaczony obliczeniowo na wysokości $h=2$ m ponad poziomem ziemi

Pozostałe wymiary geometryczne są zgodne z tymi zamieszczonymi na rysunku (Rys. 3).



Rys.3. Sylwetka słupa przelotowego typu H52 linii napowietrznej 220 kV

Wyniki przeprowadzonych symulacji różnią się między sobą w zależności od zagęszczenia węzłów siatki jak również od liczby iteracji niezbędnej do uzyskania rozwiązania. Z liczbą iteracji nieodłącznie związana jest dokładność rozwiązania przybliżonego rosnąca wraz ze zwiększaniem liczby iteracji.

Przedstawiony w tabeli 2 oraz tabeli 3 czas wykonania obliczeń podzielono na dwa etapy osobny dla rozwiązania składowej rzeczywistej (Etap I) oraz składowej urojonej (Etap II). Następnie na podstawie tak uzyskanych wyników wyznaczono wartości natężenia pola elektrycznego dla

każdego węzła siatki. Całkowity czas wykonania cyfrowej symulacji analizowanego problemu stanowi sumę czasów trwania każdego z etapów.

Wyniki serii symulacji przeprowadzonych dla liczby iteracji od 2 tys. do 2 mln zestawiono w tabeli 2.

W kolejnym kroku zbadano zależność pomiędzy zagęszczeniem węzłów siatki elementów różnicowych a dokładnością uzyskanych wyników oraz czasem wykonania obliczeń przy stałej liczbie węzłów wynoszącej 200 000. Zakres zmiany odległości międzywęzłowych zawierał się w zakresie od 5 cm do 20 cm. Wyniki zestawiono w tabeli 3.

Tabela 2. Zestawienie czasu wykonania obliczeń oraz błędów przybliżenia w zależności od liczby iteracji dla badanego zagadnienia numerycznego

Badany parametr	Liczba iteracji				
	2 000	20 000	100 000	200 000	2 000 000
Max błąd bezwzgl. [kV]	7,289	6,254	6,168	6,105	6,104
Max błąd wzgl. [%]	3,31	2,84	2,80	2,78	2,77
Czas wykonania obl. Etap I	00 h 01 m 28 s	00 h 02 m 30 s	00 h 12 m 11 s	00 h 24 m 07 s	03 h 58 m 37 s
Czas wykonania obl. Etap II	00 h 00 m 56 s	00 h 02 m 46 s	00 h 12 m 07 s	00 h 24 m 08 s	03 h 59 m 27 s
Czas wykonania obl. Razem	00 h 02 m 24 s	00 h 05 m 16 s	00 h 24 m 18 s	00 h 48 m 15 s	07 h 58 m 07 s

W każdym analizowanym przypadku obliczenia wykonano na komputerze PC z procesorem i5 oraz pamięcią operacyjną RAM wielkości 8 GB pracującego pod kontrolą systemu operacyjnego Windows 8. Cyfrowa symulacja rozkładu natężenia pola elektrycznego została wykonana przy użyciu aplikacji napisanej w środowisku Java.

Współcześnie stosowane komputery pozwalają na wspomaganie procesu obliczeniowej identyfikacji natężenia pola elektrycznego generowanego przez przesyłowe linie napowietrzne lub stacje elektroenergetyczne.

Tabela 3. Zestawienie czasu wykonania obliczeń oraz błędów przybliżenia w zależności od odległości międzywęzłowych siatki MES dla badanego zagadnienia numerycznego

Badany parametr	Odległości międzywęzłowe siatki MES		
	20 cm	10 cm	5 cm
Max błąd bezwzględny [kV]	7,633	6,717	5,105
Max błąd względny [%]	3,47	3,05	2,78
Czas wykonania obl. Etap I	00 h 24 m 22 s	00 h 24 m 17 s	00 h 24 h 07 s
Czas wykonania obl. Etap II	00 h 24 m 31 s	00 h 23 m 49 s	00 h 24 m 08 s
Czas wykonania obl. Razem	00 h 48 m 53 s	00 h 48 m 06 s	00 h 48 m 15 s

Tym samym możliwe jest szybkie przygotowanie przestrzennych rozkładów badanych wielkości fizycznych już na etapie projektowania lub modernizacji obiektu lub co jest równie istotne określenie szerokości pasa technologicznego, w którym występuje przekroczenie dopuszczalnych wartości pola elektromagnetycznego.

Raporty stworzone na podstawie symulacji cyfrowych bazujących na metodzie elementów skończonych stanowią podstawę do oceny możliwości zagospodarowania terenów sąsiadujących z projektowanymi lub istniejącymi obiektami elektroenergetycznymi i prowadzenia tam zabudowy.

Podsumowanie

Metody analityczne w większości przypadków zawodzą przy próbach analizy obszarów o złożonej pozbawionej symetrii budowie geometrycznej, natomiast metody numeryczne pozwalają na elastyczną analizę przypadków o dowolnej geometrii przy zachowaniu wymaganej dokładności uzyskanych wyników rozkładu potencjału lub natężenia pola elektrycznego.

Metody obliczeniowe pozwalają na weryfikację wyników uzyskanych metodą pomiarową i umożliwiają wskazanie punktów pomiarowych, w których występują lokalne maksima czy minima natężenia pola elektrycznego w wybranym przekroju poprzecznym.

Kolejne zwiększanie liczby iteracji w metodzie różnicowej nawet o rząd wielkości nie prowadzi w konsekwencji do liniowej poprawy dokładności uzyskanych wyników symulacji. Poprawa ta wraz ze wzrostem liczby iteracji jest coraz mniejsza za to czas wykonania obliczeń rośnie wykładniczo.

Zmniejszenie odstępów międzywęzłowych siatki elementów różnicowych przy zachowaniu tej samej liczby przeprowadzonych iteracji oraz liczby węzłów siatki skutkuje poprawą precyzji uzyskanych wyników nie wpływając tym samym znacząco na czas wykonania obliczeń.

Wszystkie krzywe rozkładu natężenia pola elektrycznego uzyskane w wyniku przeprowadzenia serii symulacji cyfrowych opisanych w powyższym artykule były zbliżone co do kształtu tzn. charakteryzowały się symetrią względem geometrycznej osi linii napowietrznej, posiadały dwa maksima w odległościach 7-8 m licząc od osi linii oraz lokalne minimum zlokalizowane dokładnie pod środkowym przewodem. Różnice natomiast występowały w wartościach rozkładu natężenia pola elektrycznego wyznaczonego dla kolejnych zadanych parametrów wejściowych.

Autorzy: dr Dariusz Szafrowski, Politechnika Wrocławska, Katedra Energoelektryki, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: dariusz.szafrowski@pwr.edu.pl; mgr inż. Jacek Gumieła, Katedra Energoelektryki, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: jacek.gumieła@pwr.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów, z dnia 30.10.2003, Dziennik Ustaw nr 192, poz. 1883, 2003.
- [2] Zeńczak M., Analiza technicznych problemów związanych z dozymetrią pól elektromagnetycznych o częstotliwości przemysłowej. Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1998.
- [3] Zeńczak M., Estimation of electric and magnetic field intensities under power transmission lines in real country conditions, Przegląd Elektrotechniczny Nr 7/2008.
- [4] Zmysłony M., Kubacki R., Angolczyk H., Kieliszek J., Trzaska H., Bienkowski P., Krawczyk A., Szmigielski S., Verification of Polish regulations of maximum permissible intensities in electromagnetic fields by the Commission for

- Bioelectromagnetics Issues of the Polish Radiation Society. Med Pr 56, 2005.
- [5] Haigamuge, Malka N. Critical time delay of the pineal melatonin rhythm in humans due to weak electromagnetic exposure. Indian j. Biochem. Biophys., VOL. 50, 2013.
- [6] Jakubaszko J., Sztafrowski D., Wróblewski Z. Wpływ składowej magnetycznej pola elektromagnetycznego 50 Hz na zmiany hemodynamiki organizmu człowieka, Przegląd Elektrotechniczny Nr 2/2014.
- [7] Sztafrowski D., Jakubaszko J. Wpływ zmiennego pola magnetycznego na funkcje narządu wzroku, Przegląd Elektrotechniczny, 4/2005.
- [8] Libal U., Sztafrowski D. ECG Signal Recognition Methods to Determine an Exposure to Magnetic Field, Interdisciplinary Journal of Engineering Sciences Vol. 1, No 1, 2013.
- [9] Sztafrowski D., Wróblewski Z., Łukaszewicz M. Survey Identification of 50 Hz magnetic field impact on selected biological process in the model organism *Saccharomyces cerevisiae*. Przegląd Elektrotechniczny Nr 1a/2013.
- [10] Sztafrowski D., Wróblewski Z., Łukaszewicz M., Sikorski A., Majkowski M. Magnetic Field 50 Hz: its Influence of Living Cells HL-60, 10th International Conference of Environment and Electrical Engineering, 2011.
- [11] Krawczyk A., Korzeniewska E., Łada-Tondyra E., Magnetophosphenes – History and contemporary implications, Przegląd Elektrotechniczny Nr 1/2018.
- [12] Gocławski J., Sekulska-Nalewajko J., Korzeniewska E., Piekarska A., The use of optical coherence tomography for the evaluation of textural changes of grapes exposed to pulsed electric field, Computers and Electronics in Agriculture vol. 142 Part A, 2017.
- [13] Korzeniewska E., Gałazka-Czarnecka I., Czarnecki A., Piekarska A., Krawczyk A., Influence of PEF on antocyanins in wine, Przegląd Elektrotechniczny Nr 1/2018.
- [14] Szuba M. i inni: Linie i stacje elektroenergetyczne w środowisku człowieka. Informator – wydanie 4. Biuro Konsultingowo-Inżynierskie „EKO-MARK”, Wrocław 2008.
- [15] Vulević, B., Osmokrović P. Survey of ELF magnetic field levels in households near overhead power lines in Serbia, Radiation Protection Dosimetry, No 145, 2011.
- [16] Vulević, B., Predrag O. "Evaluation of uncertainty in the measurement of environmental electromagnetic fields." Radiation Protection Dosimetry No 141, 2010.
- [17] Sadiku M. N. O., Numerical techniques in electromagnetics, Second Edition, CRC Press LLC, Washington 2001.
- [18] Sikora J., Numeryczne metody rozwiązywania zagadnień brzegowych, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2011.