

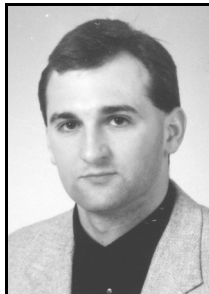
Mariusz TROJNAR

POLITECHNIKA RZESZOWSKA, KATEDRA ELEKTROTECHNIKI I PODSTAW INFORMATYKI,
ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów

Wybrane zagadnienia komputerowego wspomagania obliczeń izolatorów. Cz. 1. Metody badania zjawisk fizycznych

Dr inż. Mariusz TROJNAR

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Rzeszowskiej (1993). Stopień doktora nauk technicznych w zakresie elektrotechniki nadany decyzją Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej (2004). Jego praca naukowa i dydaktyczna skupia się wokół zagadnień teorii obwodów i sygnałów, modelowania matematycznego układów elektroizolacyjnych oraz zastosowania programów komputerowych do obliczeń inżynierskich i symulacji układów elektrycznych i elektronicznych.



e-mail: trojnar@prz.edu.pl

Streszczenie

Komputerowe wspomaganie obliczeń polega na zastosowaniu oprogramowania do symulacji modeli określonych obiektów i urządzeń, i późniejszej analizie ich zachowania w zadanych warunkach, odpowiadających warunkom pracy rzeczywistego urządzenia w konkretnym środowisku. Obliczenia te przeprowadza się nie tylko w celu oceny działania urządzeń w normalnych (ale także i w zmieniających się) warunkach pracy, lecz również w celach optymalizacyjnych (np. w celu poprawy konstrukcji ze względu na określone aspekty wytrzymałościowe). W artykule opisano zalety i wady symulacji komputerowych, przedstawiono metody badania zjawisk fizycznych (np. rozkładu pola w rozważanym obszarze), przedstawiono założenia przyjmowane podczas symulacji komputerowych, stosowanych w obliczeniach izolatorów. Od poprawności przyjęcia tych założeń zależy w dużym stopniu jakość, wiarygodność otrzymanych wyników.

Słowa kluczowe: izolatory, projektowanie izolatorów, symulacja komputerowa, MES, MEB, MRS.

Chosen issues of computer assisted calculations of insulators. Part 1. Methods of examining physical phenomena

Abstract

Computer assisted calculations consists in applying software for the simulation of models of certain devices and later analysing their behavior under given conditions corresponding to real working conditions in a specific environment. These calculations are carried out not only to assess the functioning of devices under normal (and also in changing) working conditions, but also to optimize (e.g. for the purpose of improving in terms of certain strength aspects). The advantages and disadvantages of computer simulations are described in the paper. Examination methods of physical phenomena (e.g. electric field distribution in considered area) and assumptions adopted during computer simulations applied to calculations of insulators are also presented. The fundamental assumptions taken in calculations made with the help of computers comprise, among others, the following: assuming certain accuracy of the analysis of the tested model, determining the grade of "condensation" of the network applied to the analysed area (example of fig. 2), setting the right size of area which surrounds the examined model (examples of Fig. 3) and establishing appropriate boarder conditions (e.g. Neumann, Dirichleta). Apart from that one should try to consider possibly all the details resulting from the very model itself, that is e.g. precisely copied shape of the model of the tested object and materials from which it is made. It depends on the correctness of making the above mentioned assumptions whether we receive, as a result of computer simulations, results reliable enough to predict with great certainty the appearance of specific phenomena on the actual objects.

Keywords: insulators, designing insulators, computer simulations, FEM, BEM, FDM.

1. Wprowadzenie

Modelowanie i symulacja to dwa etapy w badaniu obiektów przy zastosowaniu komputerów. Pierwszy etap (modelowanie) jest procesem tworzenia modelu obiektu i jego otoczenia, który ma służyć eksperymentom naukowym. Uwzględnia się w nim rzeczywiste parametry obiektu zastosowane w odpowiedniej skali. Drugi etap (symulacja) jest wspomnianym eksperymentem naukowym, podczas którego możliwe staje się obserwowanie zachowania modelu w określonych, założonych warunkach pracy, w rzeczywistości wirtualnej, stworzonej za pomocą programu komputerowego [1].

2. Symulacja komputerowa

Symulacje komputerowe przeprowadzane są przede wszystkim z dwóch względów; gdy badamy zachowanie nieistniejących jeszcze obiektów (czyli gdy projektowane jest określone urządzenie) oraz gdy badamy zachowanie się, w określonych warunkach pracy, obiektu już istniejącego (dzieje się to często w przypadku, gdy przeprowadzanie eksperymentów na rzeczywistych obiektach albo jest zbyt kosztowne, albo trudne bądź niemożliwe do zrealizowania w normalnych warunkach pracy) [2].

Celem modelowania i symulacji [3] jest zbadanie wzajemnych oddziaływań badanego obiektu i jego otoczenia. Rezultatem tego może być np. późniejsza weryfikacja rzeczywistego obiektu i jego optymalizacja (a więc np. zmiana rozmiaru obiektu, jego kształtu, materiałów z których jest wykonany itp.), wynikająca np. z oceny wrażliwości charakterystyk układu na zmiany parametrów symulacji lub materiałowych, czy też w wyniku oddziaływań zewnętrznych na model obiektu, a także z poznania, w wyniku symulacji, właściwości statycznych i dynamicznych modelu.

Zalety symulacji komputerowej to m.in. [3, 4, 5]: możliwość wielu eksperymentów dla tego samego modelu badanego obiektu, możliwość łatwego wprowadzania zmian i uzupełniania modelu o nowe parametry, łatwość zadawania różnego rodzaju wymuszeń, mały koszt (w stosunku do badań na rzeczywistych obiektach) i czas przygotowania symulacji, duża wiarygodność wyników symulacji (gdy można porównać i odnieść wyniki symulacji do danych otrzymanych z pomiarów na rzeczywistym obiekcie; staje się to wówczas pewnego rodzaju punktem odniesienia do dalszych symulacji), jak również możliwość poznania ograniczeń, których nie da się przewidzieć na etapie projektowania danego urządzenia.

Do wad symulacji komputerowych można zaliczyć koszt (symulacja komputerowa również na początku potrzebuje określonych środków finansowych związanych z zakupem odpowiedniego sprzętu, potrzebnego do obliczeń oprogramowania, opłatą jego licencji itp.) i czas potrzebny na dokładne przygotowanie modelu i związane z jego badaniem testy.

Przy bardzo małych projektach (np. krótkotrwałych, jednorazowych) zalety komputerowego symulowania zjawisk są zbyt małe, by angażować się w skomplikowane symulacje, natomiast w przypadku większych, długofalowych projektów zalety symulacji komputerowych przewyższają wady. Istotne jest więc rozważenie, czy złożoność problemu jest na tyle duża, żeby przeprowadzić symulację komputerową [4].

3. Zastosowanie obliczeń komputerowych w projektowaniu izolatorów

Izolatory, w czasie eksploatacji, narażone są na działanie wielu różnych czynników, wśród których wyróżnić można czynniki: elektryczne, mechaniczne, cieplne, jak również i środowiskowe.

Wynika z tego konieczność stawiania izolatorom określonych wymagań technicznych (zawartych w normach przedmiotowych), które, spełnione, powinny gwarantować niezawodną ich pracę.

To, czy dane wymagania techniczne są spełnione przez określony izolator ocenia się na podstawie badań (ich sposób przeprowadzania także opisano w normach). Dla przykładu, w celu stwierdzenia, czy są spełnione wymagania elektryczne przeprowadza się badania pełne lub niepełne. Badania pełne przeprowadzane są na egzemplarzach z pierwszej serii produkcyjnej nowego typu izolatora, albo później, w celu okresowej kontroli produkcji. Badania niepełne wykonywane są na wszystkich wyprodukowanych egzemplarzach (w tych badaniach sprawdza się tylko podstawowe parametry techniczne).

Czynnością wstępną w projektowaniu izolatorów jest wyznaczenie ich wymiarów, a więc długości oraz średnic pnia i kloszy [6]. Długość izolatora zależy od niezbędnego odstępu izolacyjnego, który wyznacza się dla takiego rodzaju napięcia, które determinuje (czyli w decydujący sposób wpływa na) wytrzymałość elektryczną izolatora. O przyjęciu odpowiedniej średnicy pnia decydują wymagania mechaniczne. Średnice kloszy dobiera się pod kątem uzyskania niezbędnej wytrzymałości elektrycznej izolatora w najmniej korzystnych warunkach otoczenia, czyli w deszczu i pod wpływem zabrudzeń [7].

Projektowanie izolatorów wiszących i wsporczych opiera się na wynikach badań konstrukcyjnych prototypów oraz na doświadczeniach nabytych w wyniku (odpowiednio długiej) eksploatacji urządzenia w normalnych warunkach jego pracy.

Przy zastosowaniu odpowiednich programów komputerowych przygotowane projekty urządzeń poddaje się weryfikacji obliczeniowej [7]. Jak już wspomniano, obliczenia komputerowe (w odniesieniu do badań na gotowych urządzeniach) są stosunkowo tanie, i mogą być wielokrotnie przeprowadzane dla tego samego modelu (przy założeniu różnych parametrów analizy, czy też materiałowych), jak również i dla modelu o zmieniających się wymiarach i kształcie (są to tzw. analizy parametryczne możliwe do zrealizowania w niektórych programach komputerowych).

Głównym celem prowadzonych obliczeń jest wyznaczenie maksymalnych gradientów pola elektrycznego w danym układzie oraz analiza możliwości zmniejszenia tych gradientów przez modyfikację kształtu i wymiarów elektrod. Innym zakresem zastosowań komputerowych obliczeń w projektowaniu izolatorów są obliczenia optymalizacyjne; jest to ważne ze względów praktycznych [6]. Znając obraz pola elektrycznego wokół obiektu i charakterystyki wytrzymałości elektrycznej użytych materiałów izolacyjnych, można zaproponować wstępny kształt i gabaryty izolatora liniowego [8].

4. Metody i obliczenia komputerowe

Badanie zjawisk fizycznych odbywa się często za pomocą metod zwanych metodami komputerowymi. Są one szczególnie przydatne tam, gdzie metody analityczne nie znajdują już zastosowania, ze względu na ich ograniczenia. Metody analityczne umożliwiają bowiem badanie rozkładu pola elektromagnetycznego tylko w układach wykazujących określony charakter symetrii i przy założeniu liniowości, jednorodności i anizotropii środowiska, w którym rozciąga się pole elektromagnetyczne [9]. Wśród komputerowych metod badania i analizy zjawisk fizycznych (np. rozkładu pola) najszerze zastosowanie znalazły następujące metody: metoda różnic skończonych (w skrócie MRS), metoda elementów skończonych (MES) oraz metoda elementów brzegowych (MEB) [7].

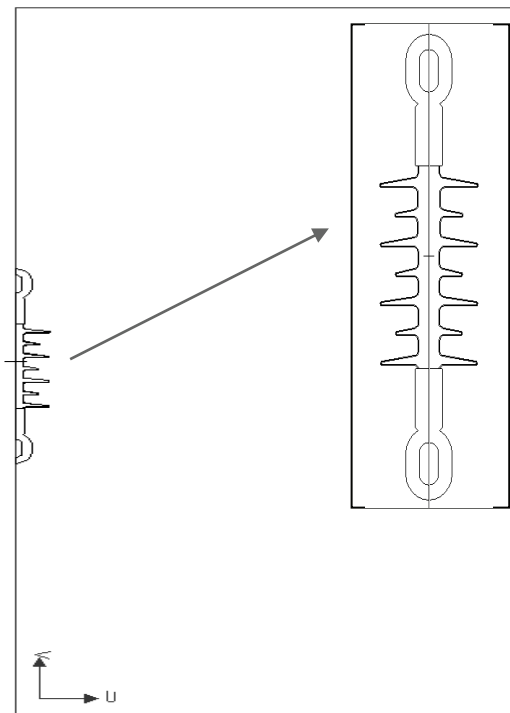
Metoda różnic skończonych (ang. *Finite Difference Method*, w skrócie *FDM*) to jedna z najprostszych metod numerycznego rozwiązywania zagadnień opisanych przez układy równań różniczkowych. MRS jest wariantem wyjściowym metod siatkowych, które oparte są na podziale badanego obszaru na siatki (mogą to być siatki kwadratowe, prostokątne, trójkątne lub o innych kształtach). Idea MRS polega na zastąpieniu równań różniczkowych (które opisują pole) równaniami różnicowymi. Pewne trudności

w zastosowaniu metody różnic skończonych wiążą się z warunkami brzegowymi i z zastosowaniem jej w obszarze o nieregularnym (np. krzywoliniowym) kształcie brzegu [10].

Metoda elementów skończonych (ang. *Finite Element Method*, w skrócie *FEM*) jest powszechnie stosowanym narzędziem przybliżonej analizy zagadnień pola elektromagnetycznego. W porównaniu z innymi metodami numerycznymi jest ona tym bardziej skuteczna, gdy obszar analizy ma złożony kształt lub gdy składa się z materiałów o różnych własnościach. Podstawową ideą MES jest podział obszaru na skończoną liczbę podobszarów (tzw. dyskretyzacja) o prostym kształcie (np. trójkątnym lub czworokątnym dla przestrzeni dwuwymiarowej, lub jako czworościany w przestrzeni trójwymiarowej) zwanych elementami skończonymi. Każdy element ma węzły, z którymi są związane szukane wielkości polowe [11].

Metoda elementów brzegowych (ang. *Boundary Element Method*, w skrócie *BEM*) jest jedną z najnowszych metod analizy pola elektromagnetycznego. Metoda ta polega na sprowadzeniu układu równań różniczkowych z zadanymi warunkami brzegowymi (czyli tzw. problemu brzegowego) do układu równań całkowych, określonych na brzegu rozpatrywanego obszaru [9, 7]. W MEB, w przeciwieństwie do MES, dyskretyzacji podlega jedynie brzeg obszaru co pozwala na zmniejszenie liczby elementów (możliwe wówczas staje się skrócenie czasu obliczeń w porównaniu z czasem obliczeń według algorytmu MES).

Każda z wymienionych metod, opisanych szeroko w literaturze, ma oczywiście swoje wady i zalety, i wynikające z nich określone obszary zastosowań. Wybór odpowiedniej metody do określonych badań (obliczeń) jest jednym z najważniejszych zadań, które stoją przed osobą, która te badania ma realizować.



Rys. 1. Model izolatora w programie Maxwell SV [10]

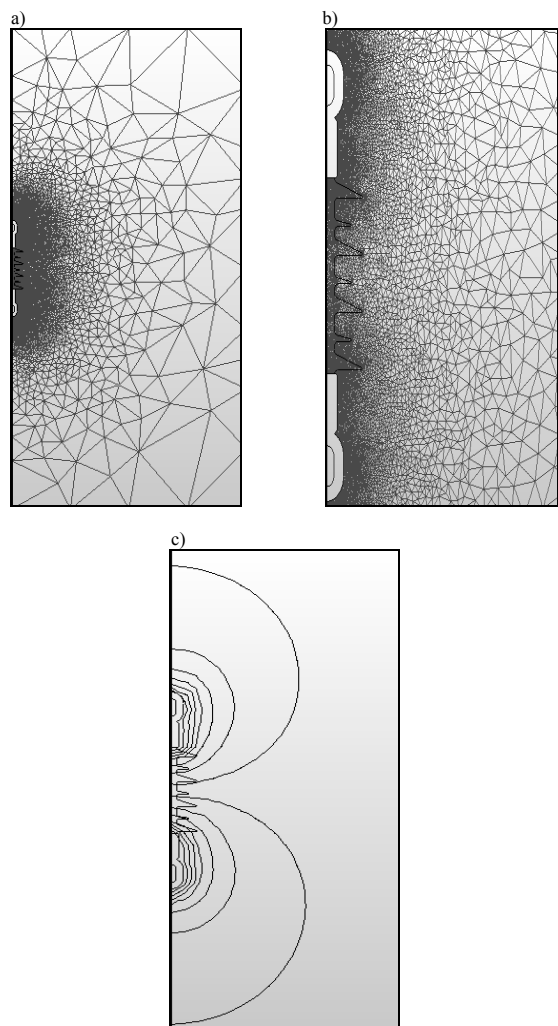
Fig. 1. Model of the insulator in Maxwell SV program [10]

Obliczenia komputerowe przeprowadza się przy wielu różnych założeniach. Od poprawności ich przyjęcia zależy, czy w wyniku symulacji komputerowych otrzymamy na tyle wiarygodne wyniki, że na ich podstawie będzie można z dużą pewnością prognozować występowanie określonych zjawisk na obiektach rzeczywistych.

Przyjęcie określonych założeń (wynikających z uwzględnienia różnych czynników mogących mieć wpływ na obiekt podczas jego normalnych warunków pracy), i uwzględnienie ich w przygotowanym do symulacji modelu (przykład modelu na rys. 1), może niekiedy wydłużać w czasie obliczenia, ale wobec możliwości

technologicznych, jakie dzisiaj są dostępne (moce obliczeniowe komputerów) nie wydaje się to być dużym problemem.

Wśród podstawowych założeń, które przyjmuje się w obliczeniach przeprowadzanych za pomocą komputerów, wymienić można m.in.: założenie określonej dokładności analizy badanego modelu, ustalenie stopnia „zagęszczenia” siatki naniesionej na analizowany obszar (rys. 2), przyjęcie odpowiedniego rozmiaru obszaru, który otacza badany model (przykłady na rys. 3) i założenie odpowiednich warunków brzegowych (np. Neumanna, Dirichleta). Oprócz tego należy starać się uwzględnić możliwie wszystkie szczegóły wynikające z samego modelu, a więc np. dokładnie odwzorowany kształt modelu badanego obiektu i materiały, z których jest on wykonany.

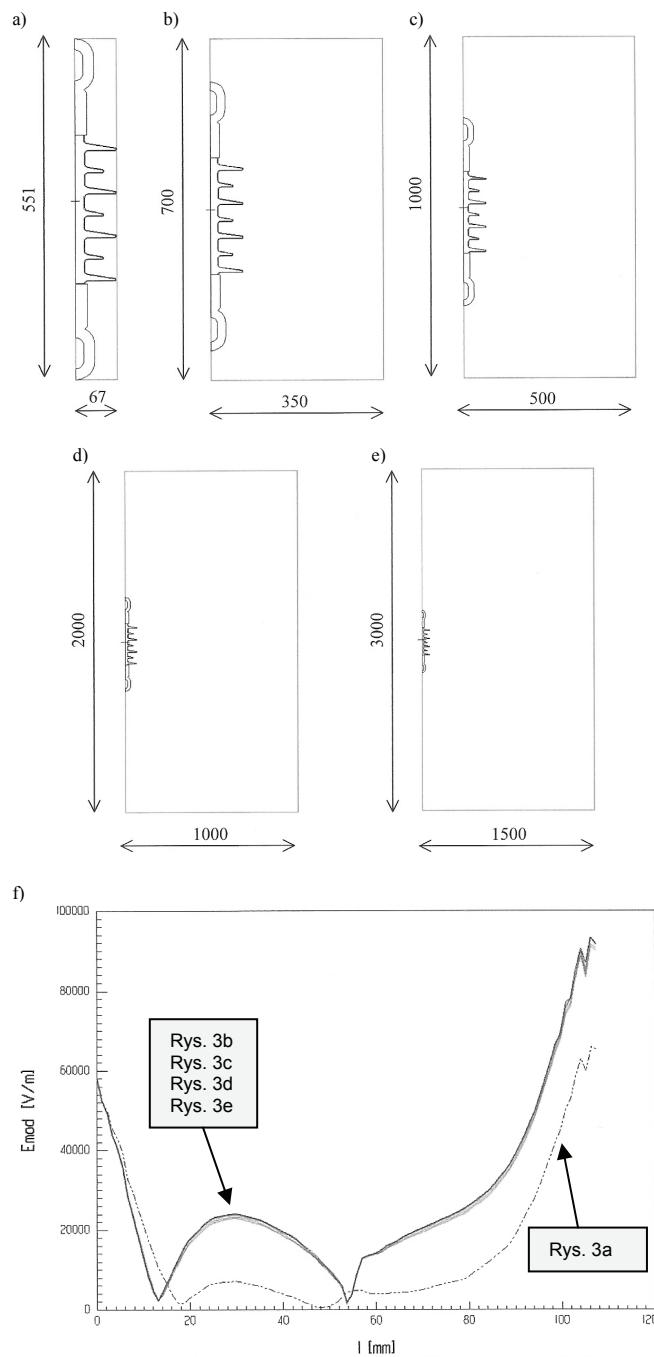


Rys. 2. Dyskretyzacja rozważanego obszaru (a), podział na elementy w obszarze izolatora (b) i izolinie potencjału (c), uzyskane w programie Electro 2D w oparciu o MES [13]

Fig. 2. Discretization of the considered area (a), division into elements in the area of the insulator (b) and isolines of potential (c) obtained in the Electro 2D program on the basis of FEM [13]

Przyjęcie odpowiedniej wielkości rozważanego obszaru (rys. 3), a więc modelu i jego otoczenia, może następować w wyniku nabywanego z czasem doświadczenia w symulacji komputerowej. W przedstawionych na rys. 3f rozkładach natężenia pola elektrycznego w pobliżu pierwszego klosza (licząc od elektrody z zadaniem, niezerowym potencjałem) zauważyć można zbieżność otrzymanych wyników z tym wyjątkiem, że rozkład natężenia pola w obszarze jak na rys. 3a wyraźnie odbiega od pozostałych rozważanych obszarów (rys. 3b, 3c, 3d oraz 3e). Prowadzi to do wniosku, że po uzyskaniu poprawnych wyników, po osiągnięciu zbieżności w otrzymanych wynikach symulacji (dla różnych obszarów), dalsze zwiększanie obszaru „w nieskończoność” nie jest konieczne, by uzyskać poprawne wyniki. Nie-

kiedy też może nie być możliwe, że względu na ograniczenia programu. Oczywiście, obszar nie może też być zbyt mały (tak jak na rys. 3a), gdyż otrzymamy wówczas niepoprawne wyniki.



Rys. 3. Różne warianty rozmiaru obszaru w otoczeniu izolatora (a-e) i wpływ wielkości przyjętego obszaru na otrzymane wyniki (f) (wymiar w mm)
Fig. 3. Different variants of the size of the area surrounded by the insulator (a-e) and influence of the size of a given area on the obtained results (f) (dimensions in mm)

5. Podsumowanie

Symulacje komputerowe, jak już wspomniano, mogą być stosowane m.in. jako element prac konstrukcyjnych przy tworzeniu określonego urządzenia, lub podczas prac prowadzonych w aspekcie optymalizacyjnym dla urządzenia już istniejącego, albo też jako sposób badania, obserwacji i analizy własności urządzeń w określonych warunkach pracy, z założenia odpowiadającym warunkom rzeczywistym.

Intensywny rozwój informatyki, i związany z nim rozwój (poszerzanie możliwości istniejącego i tworzenie nowego) oprogramowania i możliwości obliczeniowych komputerów, czyni już

dziś symulacje komputerowe jednymi z podstawowych narzędzi służących do badania i analizy urządzeń i zjawisk fizycznych.

Podstawowe trudności, które mogą pojawiać się (i pojawiają się) na poszczególnych etapach symulacji komputerowej to poprawne, właściwe odwzorowanie rzeczywistości (a więc uwzględnienie wszystkich istotnych dla rozważanego problemu parametrów) i właściwa interpretacja otrzymanych w wyniku symulacji wyników.

Podczas badań symulacyjnych stosuje się programy komputerowe, za pomocą których przeprowadza się obliczenia w oparciu o algorytmy wymienionych w pracy tzw. metod komputerowych (MRS, MES oraz MEB). Podczas obliczeń przyjmuje się określone założenia, które opisano w pracy, ilustrując graficznymi przykładami.

Wybrane programy komputerowe, oparte na MES oraz na MEB, opisano w artykule: „Wybrane zagadnienia komputerowego wspomaganie obliczeń izolatorów. Cz. 2. Przykłady obliczeń” (Pomiary, Automatyka, Kontrola 10/2013), będącym kontynuacją niniejszej pracy. Opublikowano tam m.in. przykłady modeli poddawanych symulacjom (2D, 3D) i wyniki wybranych obliczeń.

6. Literatura

- [1] Symulacje komputerowe, <http://edupomoc.w.interia.pl/poradnik/symulacja.htm>, dostęp 02.09.2013.
- [2] Modelowanie i symulacja komputerowa, <http://wdowski.tanatos.pl/Download/UniwersytetJagiellonski/Modelowanie%20i%20symulacja%20komputerowa/misk-1.pdf>, dostęp 02.09.2013.
- [3] Symulacja i przetwarzanie danych, <http://kpt.wm.am.gdynia.pl/pliki/28/WYKLADY%20Z%20SYMULACJI.pdf>, dostęp 02.09.2013.
- [4] Symulacja, <http://zasoby.open.agh.edu.pl/~08stepien/index.php?page=simulation&ln=pl>, dostęp 02.09.2013.
- [5] Zalety i wady symulacji, <http://pluton.cs.pollub.pl/~marekm/gpss/sld013.htm>, dostęp 02.09.2013.
- [6] Pohl Z.: Izolatory elektroenergetyczne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 199.
- [7] Pohl Z. i inni: Napowietrzna izolacja wysokonapięciowa w elektroenergetyce. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2003.
- [8] Gielniak J., Nadolny Z.: Ocena poprawności założeń w procedurze komputerowej symulacji pola elektrycznego wokół izolatora liniowego na napięciu 110 kV. VI Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna „Napowietrzna izolacja wysokonapięciowa w elektroenergetyce NIWE 2000”, s. 87-100, 2000.
- [9] Bolkowski S., Stabrowski M., Skoczylas J., Sroka J., Sikora J., Wincenciak S.: Komputerowe metody analizy pola elektromagnetycznego. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1993.
- [10] Metoda różnic skończonych, <http://akropolis.pol.lublin.pl/users/jpkmb/MRS.pdf>, dostęp 02.09.2013.
- [11] Metoda elementów skończonych, http://www.ikb.poznan.pl/alma mater/wyklady/metody_komputerowe_03-04/08.pdf, dostęp 02.09.2013.
- [12] Trojnar M.: Calculations of electric field and potential distribution at the surface of insulator with contamination layer by using Maxwell SV program. Monograph „Computer Applications in Electrical Engineering” Part I. Published by Institute of Industrial Electrical Engineering Poznan University of Technology, p.163-171, 2004.
- [13] Szczepański A., Trojnar M.: Symulacja komputerowa izolatorów za pomocą programów opartych na MES i MEB. XXXV International Conference on Fundamentals of Electrotechnics and Circuit Theory IC-SPETO 2012, Ustroń, str. 27-28, 2012.
- [14] Trojnar M.: Komputerowa symulacja izolatora wysokiego napięcia. Wpływ zabrudzenia izolatora na rozkład natężenia pola elektrycznego. Monografia „Metody i Systemy Komputerowe w Automatyce i Elektroenergetyce”, Wydawnictwa Politechniki Częstochowskiej, str. 16-21, 2005.

otrzymano / received: 12.07.2013

przyjęto do druku / accepted: 02.09.2013

artykuł recenzowany / revised paper

INFORMACJE

Informacje dla Autorów

Redakcja przyjmuje do publikacji tylko prace oryginalne, nie publikowane wcześniej w innych czasopismach. Redakcja nie zwraca materiałów nie zamówionych oraz zastrzega sobie prawo redagowania i skracania tekstów oraz streszczeń.

Artykuły naukowe publikowane w czasopiśmie PAK są formatowane jednolicie zgodnie z ustaloną formatką zamieszczoną na stronie redakcyjnej www.pak.info.pl. Dlatego artykuły przekazywane redakcji należy przygotowywać w edytorze Microsoft Word 2003 (w formacie DOC) z zachowaniem:

- wielkości czcionek,
- odstępów między wierszami tekstu,
- odstępów przed i po rysunkach, wzorach i tabelach,
- oznaczeń we wzorach, tabelach i na rysunkach zgodnych z oznaczeniami w tekście,
- układu poszczególnych elementów na stronie.

Osobno należy przygotować w pliku w formacie DOC notki biograficzne autorów o objętości nie przekraczającej 450 znaków, zawierające podstawowe dane charakteryzujące działalność naukową, tytuły naukowe i zawodowe, miejsce pracy i zajmowane stanowiska, informacje o uprawianej dziedzinie, adres e-mail oraz aktualne zdjęcie autora o rozmiarze 3,8 x 2,7 cm zapisane w skali odcieni szarości lub dołączone w osobnym pliku (w formacie TIF).

Wszystkie materiały:

- artykuł (w formacie DOC),
- notki biograficzne autorów (w formacie DOC),
- zdjęcia i rysunki (w formacie TIF lub CDR),

prosimy przesyłać w formie plików oraz dodatkowo jako wydruki na białym papierze (lub w formacie PDF) na adres e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl lub pocztą zwykłą, na adres: Redakcja Czasopisma Pomiary Automatyka Kontrola, Asystent Redaktora Naczelnego mgr Agnieszka Skórkowska, ul. Akademicka 10, p.21A, 44-100 Gliwice.

Wszystkie artykuły naukowe są dopuszczane do publikacji w czasopiśmie PAK po otrzymaniu pozytywnej recenzji. Autorzy materiałów nadesłanych do publikacji są odpowiedzialni za przestrzeganie prawa autorskiego. Zarówno treść pracy, jak i wykorzystane w niej ilustracje oraz tabele powinny stanowić dorobek własny Autora lub muszą być opisane zgodnie z zasadami cytowania, z powołaniem się na źródło cytatu.

Przedrukowywanie materiałów lub ich fragmentów wymaga pisemnej zgody redakcji. Redakcja ma prawo do korzystania z utworu, rozporządzania nim i udostępniania dowolną techniką, w tym też elektroniczną oraz ma prawo do rozpowszechniania go dowolnymi kanałami dystrybucyjnymi.