

ANALOGOWE I NUMERYCZNE MODELOWANIE ROZKŁADU POŁA ELEKTRYCZNEGO W UKŁADACH IZOLACYJNYCH URZĄDZEŃ ELEKTRYCZNYCH – LABORATORIUM STUDENCKIE WSPOMAGANE TECHNOLOGIAMI SIECIOWYMI

Bartłomiej SZAFRANIAK, Łukasz FUŚNIK, Paweł ZYDRON

AGH – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
tel.: 12 6172826 e-mail: szafrani@agh.edu.pl, lfusnik@agh.edu.pl, pzydron@agh.edu.pl

Streszczenie: Zmieniające się narzędzia inżynierskie stosowane w projektowaniu układów izolacyjnych urządzeń elektrycznych sprawiają, że w procesie kształcenia specjalistycznego inżynierów konieczne jest nowe podejście w organizowaniu i prowadzeniu zajęć dydaktycznych. Ich efektem powinno być zarówno poznanie współczesnych narzędzi modelowania układów izolacyjnych oraz zjawisk i narażeń towarzyszących ich eksploatacji, ale równocześnie ułatwienie ich zrozumienia w oparciu o przykłady praktyczne, umożliwiające wykonanie samodzielnych pomiarów i porównań na modelach fizycznych. Pozwala to na odniesienie abstrakcyjnych modeli numerycznych do obiektów rzeczywistych.

Artykuł przedstawia przykład realizacji zajęć dydaktycznych łączących wykonanie pomiarów rozkładów pola elektrycznego w laboratoryjnych, analogowych modelach wysokonapięciowych układów izolacyjnych z numerycznym modelowaniem tych układów przy zastosowaniu oprogramowania stosującego metodę elementów skończonych (MES). Modele analogowe są przygotowane na podstawie danych technicznych rzeczywistych urządzeń elektrycznych, publikowanych w katalogach producentów. Wyniki poszczególnych etapów zajęć są przetwarzane i gromadzone na serwerze dostępnym dla poszczególnych grup ćwiczeniowych w laboratoryjnej sieci komputerowej. Jest to dodatkowy element kształcenia pozwalający na rozwój umiejętności sieciowej pracy grupowej.

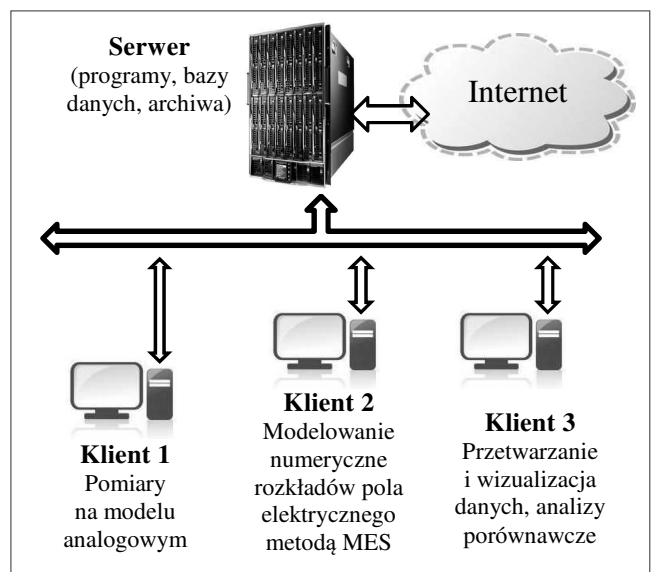
Słowa kluczowe: współczesne laboratorium studenckie, wysokonapięciowe układy izolacyjne, modele analogowe, modelowanie numeryczne.

1. WPROWADZENIE

Rozwój sieciowych technologii informatycznych (również Internetu, wraz z jego powszechnym dostępem do różnorodnych źródeł informacji), zwiększenie wydajności obliczeniowej komputerów, dostępność zaawansowanych programów obliczeniowo/symulacyjnych pozwalają na przeniesienie dużej części procesu dydaktycznego na platformy e-learningowe. Skorzystanie z tych możliwości musi jednak uwzględniać specyfikę procesu kształcenia studentów kierunków inżynierskich, dla których istotne znaczenie ma bezpośredni kontakt z rzeczywistymi obiektami i procesami, charakterystycznymi dla poszczególnych specjalności. Pozwala to poznawać i weryfikować ograniczenia komputerowych metod symulacyjnych oraz odnosić rezultaty ich działania do realnego świata urządzeń technicznych. Ostatecznym efektem pracy inżyniera pozostają bowiem w dalszym ciągu konkretne rozwiązania i konstrukcje techniczne, których stan i działanie – oparte na prawach

fizyki – podlegają wielu ograniczeniom i licznym czynnikom zewnętrznym, nie do końca uwzględnianym podczas modelowania numerycznego.

W artykule przedstawiono koncepcję laboratorium studenckiego, w którym technologie sieciowe służą organizacji pracy grup laboratoryjnych wykonujących ćwiczenia praktyczne i symulacje komputerowe związane z analizą rozkładów pola elektrycznego w układach izolacyjnych urządzeń elektrycznych. Ćwiczenia te mogą być prowadzone w różnych grupach i na różnych przedmiotach/modułach, a czynnikiem je łączącym są te same analizowane obiekty. Dostęp do wspólnych danych oraz wymiana informacji następuje przez serwer sieciowy, do którego dołączeni są różni klienci (rys. 1). W opisanym przypadku wykonywane pomiary i analizy dotyczą układu izolacyjnego kabla średniego napięcia z żyłami sektorowymi. Konstrukcja tego kabla zostaje odwzorowana na modelu analogowym, służącym do wyznaczenia rozkładów pola E w laboratorium pomiarowym (Klient 1). Równolegle, w laboratorium komputerowym, wykonywane są symulacje numeryczne z zastosowaniem metody elementów skończonych MES (Klient 2). Dostęp do tych danych na serwerze umożliwia wykonanie odpowiednich analiz porównawczych i wizualizacji ich wyników (Klient 3).



Rys. 1. Struktura laboratoryjnej sieci komputerowej

2. POLE ELEKTRYCZNE W IZOLACJI URZĄDZEŃ ELEKTRYCZNYCH WN – OKREŚLENIE PROBLEMU

Warunkiem podstawowym właściwego zaprojektowania układu izolacyjnego urządzenia wysokiego napięcia (WN) jest uzyskanie takiego rozkładu natężenia pola elektrycznego E , aby w każdym punkcie tego układu nie przekraczało ono wartości dopuszczalnego roboczego natężenia pola [1-3]. Analiza polowa jest również stosowana dla określenia oddziaływań środowiskowych oraz kompatybilności elektromagnetycznej (EMC).

Rozwój w obszarze technologii materiałów elektrotechnicznych oraz stosowanie numerycznych metod optymalizacyjnych wpływają na zmiany struktur układów izolacyjnych, w tym także ich geometrii. Wyznaczenie rozkładu natężenia pola elektrycznego E w izolacji kabla jednożyłowego o konstrukcji koncentrycznej może być wykonane metodami analitycznymi, jednak w przypadku kabli wielożyłowych o złożonej geometrii, problem ten jest bardziej skomplikowany. Dla jego rozwiązania stosuje się obecnie metody numeryczne. Przykładem takiego zadania jest wyznaczenie rozkładu pola w 3-fazowym kablu sektorowym (rys. 2).



Rys. 2. Kabel elektroenergetyczny YAKY z żyłami aluminiowymi, o izolacji polwinitowej, z żyłą powrotną miedzianą nałożoną na powłokę, o powłoce polwinitowej ($U_n = 3,6/6$ kV)

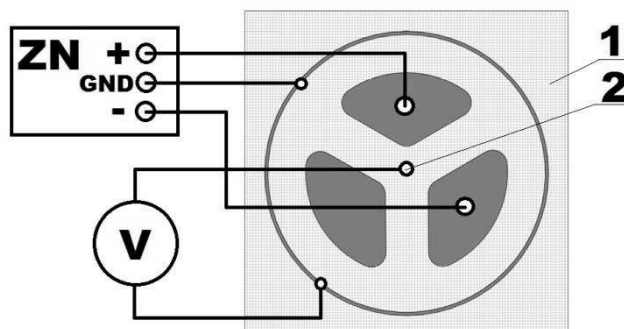
Można przyjąć, że w układzie izolacyjnym współczesnego kabla elektroenergetycznego pracującego przy częstotliwości roboczej 50 Hz rozkład pola elektrycznego odpowiada rozkładowi elektrostatycznemu. W przypadku izolacji o układzie uwarstwionym wpływ na rozkład pola ma również przenikalność elektryczna materiałów wchodzących w jej skład. Podczas ćwiczeń w studenckim laboratorium pomiarowym oraz podczas zajęć w laboratorium komputerowym prezentowane i stosowane są metody określenia rozkładów pola elektrycznego wykorzystujące:

- metody eksperymentalne z modelowaniem analogowym, bazującym na analogii równań opisujących pola statyczne i przepływowe oraz na teorii podobieństwa [4, 5];
- modelowanie numeryczne, np. z zastosowaniem metody elementów skończonych [6].

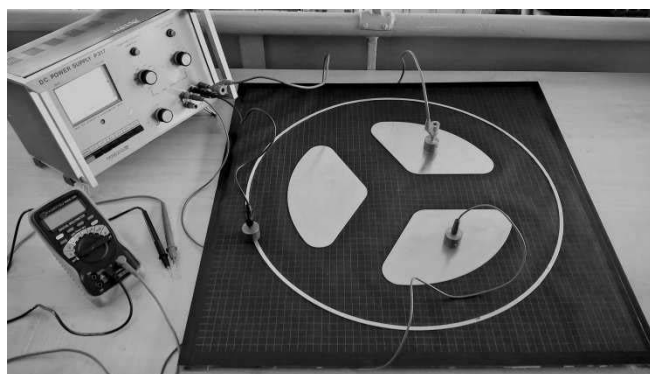
3. MODELOWANIE ROZKŁADU POLA E METODĄ ANALOGOWĄ (KLIENT 1)

Przykładowym obiektem badań podczas wykonywania ćwiczeń studenckich jest układ izolacyjny kabla 3-fazowego z żyłami sektorowymi o przekroju 120 mm^2 , na napięcie znamionowe U_n wynoszące 6 kV. Dla potrzeb wyznaczenia rozkładu pola elektrycznego metodami pomiarowymi stworzono model płaski przekroju tego kabla w skali 10:1 [5]. Modele żył kabla oraz ekranu wykonano z płyty aluminiowej o grubości 1 mm. Elementy te naklejono przy zastosowaniu kleju przewodzącego na papier półprzewodzący o rezystywności powierzchniowej $\rho_p = 5,98 \cdot 10^5$. Schemat ideowy układu pomiarowego stosowanego podczas

ćwiczeń przedstawiono na rysunku 3. W układzie tym do elektrod (reprezentujących poszczególne sektory kabla) przykładano napięcie stałe o odpowiednio dobranej wartości, a następnie badano rozkład potencjału na powierzchni papieru mierząc wartości napięć przy pomocy sondy punktowej i woltomierza (rys. 4). Wyniki pomiarów zapisywane są w plikach archiwizowanych na serwerze.

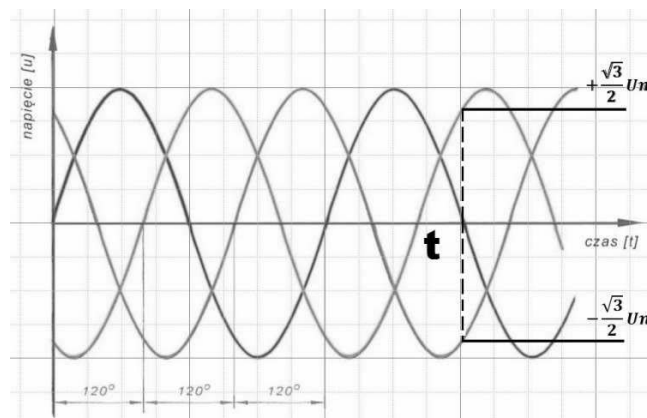


Rys. 3. Schemat ideowy modelu kabla ŚN z żyłami sektorowymi. 1 – model analogowy kabla sektorowego, 2 – sonda punktowa, ZN – źródło napięcia stałego, V – woltomierz.



Rys. 4. Układ do badania rozkładu natężenia pola elektrycznego na modelu analogowym kabla sektorowego.

Ze względu na wybrany do analizy obiekt program ćwiczeń obejmuje wyznaczenie rozkładu pola elektrycznego w modelu układu izolacji kabla sektorowego przy zasilaniu żył kabla napięciami reprezentującymi napięcie przemienne 3-fazowe. Maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego występują w obszarach pomiędzy poszczególnymi sektorami oraz pomiędzy sektorami a zewnętrznym ekranem kabla. Prezentowane wyniki dotyczą pomiaru wykonanego w chwili czasowej t , dla której wartości napięć na poszczególnych żyłach wynoszą $(0, +\frac{\sqrt{3}}{2}U_n, -\frac{\sqrt{3}}{2}U_n)$ (rys. 5).



Rys. 5. Przebiegi napięć oraz ich wartości w chwili t , dla której wyznaczono rozkłady potencjału w modelu izolacji kabla

Na siatce pomiarowej o wymiarach 50 cm x 50 cm, o rozdzielczości 1 cm, rejestrowanych jest kilkaset punktów pomiarowych. Są to dane pierwotne, które po zapisaniu w kolejnych wierszach plików *.txt* lub *.csv* są przesyłane poprzez sieć komputerową na serwer laboratoryjny. Na ich podstawie tworzone są (usługa Klient 3) rozkłady potencjału (rys. 6) oraz natężenia pola elektrycznego (rys. 7), w modelowanym układzie izolacyjnym, z zastosowaniem środowiska obliczeniowego Matlab. Wartości potencjałów i natężeń pola w układzie rzeczywistym są odwzorowywane z uwzględnieniem wartości współczynnika skali m_E [7, 8]:

$$m_E = \frac{E_r}{E_m} = \frac{\frac{U_r}{a_r}}{\frac{U_m}{a_m}} = \frac{m_n}{m_a} \quad (1)$$

gdzie:

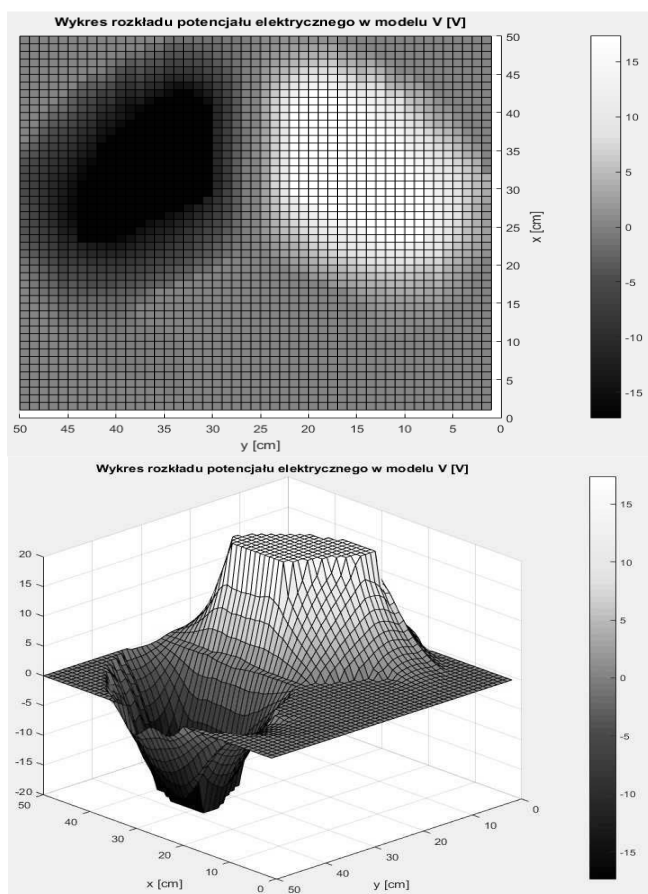
E_r – natężenie pola E w układzie rzeczywistym,

E_m – natężenie pola E w układzie modelowym,

m_a – współczynnik skali dla wielkości geometrycznych,

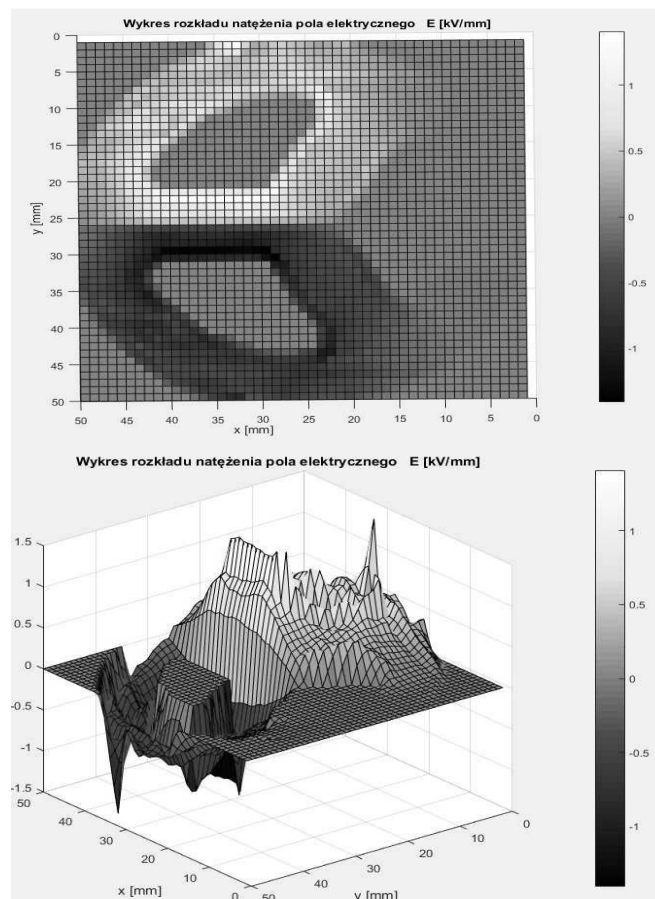
m_n – współczynnik skali dla napięcia.

W opisywanym przykładzie współczynnik skali $m_E = 17,32$.



Rys. 6. Wizualizacja rozkładu potencjału elektrycznego w kablu sektorowym średniego napięcia, wyznaczonego na podstawie danych uzyskanych z pomiarów na modelu analogowym, przedstawiona w widoku 2D (górny) i 3D (dolny)

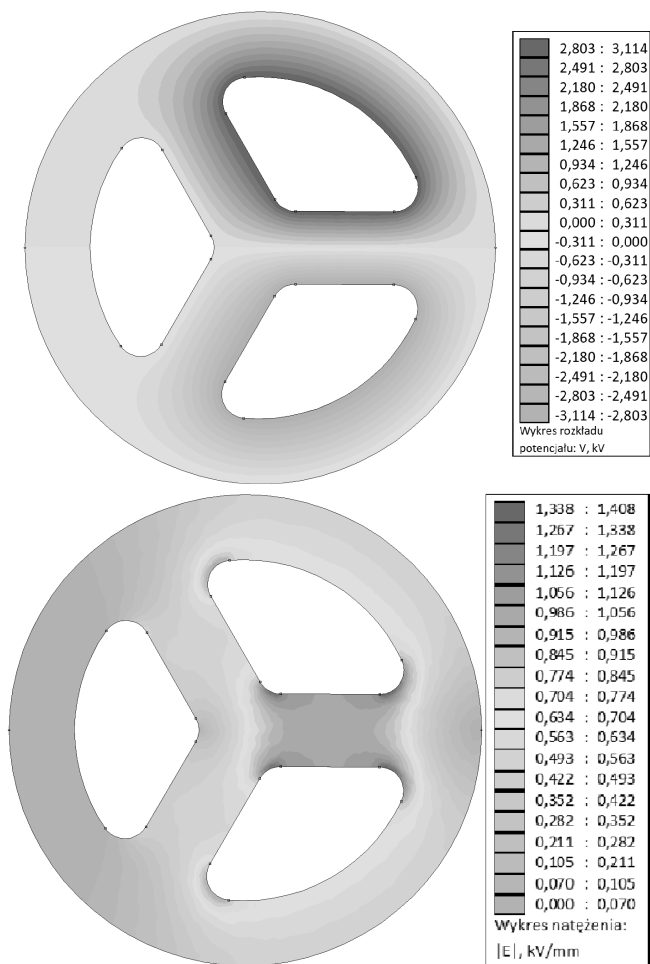
Wykonane pomiary, uzupełnione przetworzeniem i wizualizacją ich wyników dają możliwość określenia charakteru i szczególnych cech rozkładów pola elektrycznego w 3-fazowym kablu sektorowym. Dzięki temu możliwe jest praktyczne pokazanie związku pomiędzy geometrią elektrod i układu izolacyjnego a natężeniem pola elektrycznego. Zagęszczenie linii ekwipotencjalnych w obszarze międzysektorowym odpowiada miejscu o największym natężeniu pola elektrycznego w izolacji badanego kabla.



Rys. 7. Wizualizacja rozkładu natężenia pola elektrycznego w kablu sektorowym średniego napięcia, wyznaczonego na podstawie danych uzyskanych z pomiarów na modelu analogowym, przedstawiona w widoku 2D (górny) i 3D (dolny)

4. MODELOWANIE ROZKŁADU POLA E METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH (KLIENT 2)

W ramach zajęć z przedmiotów/modułów dotyczących modelowania numerycznego pól elektromagnetycznych wykonywane jest modelowanie rozkładów potencjału i natężenia pola elektrycznego dla opisanego wcześniej kabla sektorowego, tzn. dla danych uwzględniających jego geometrię i konstrukcję układu izolacyjnego. Symulacje te mogą być wykonywane przy zastosowaniu środowiska obliczeniowego Matlab lub też w jednym z programów specjalizowanych, dedykowanych dla analiz polowych. Obecnie jest to powszechnie stosowana metoda inżynierska projektowania i optymalizacji konstrukcji urządzeń elektrycznych, w tym również ich układów izolacyjnych. Symulacje, których wyniki przedstawiono, wykonano przy zastosowaniu programu typu open-source FEMM ver. 4.2. [7, 8], który dla modelowania pól E-M używa metody elementów skończonych. Na rysunku 8 przedstawiono wyniki symulacji rozkładów potencjału i natężenia pola E w analizowanym kablu. Wraz ze wzrostem dokładności odwzorowania geometrii modelowanego kabla, poprzez zmniejszenie wielkości elementów dyskretyzujących powierzchnię jego przekroju rośnie równocześnie złożoność obliczeniowa problemu. Podczas rozwiązywania zadań inżynierskich, zwłaszcza w przypadku ograniczonego czasu przeznaczanego na realizację zadania (co ma zawsze miejsce podczas zajęć dydaktycznych) narzucone parametry analizy powinny stanowić pewien kompromis pomiędzy dokładnością obliczeń a czasem ich trwania.



Rys. 8. Rozkłady potencjału (górny) i natężenia pola elektrycznego (dolny) w kablu sektorowym SN 3,6/6 kV otrzymane jako wynik modelowania numerycznego w programie FEMM ver. 4.2.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Proces kształcenia specjalistycznego inżynierów elektryków i elektroenergetyków powinien umożliwiać harmonijne połączenie przekazu wiedzy teoretycznej z praktyką. W artykule przedstawiono koncepcję realizacji zajęć dydaktycznych, wspomaganych sieciowymi technologiami informatycznymi, łączących wyznaczenie rozkładów pola elektrycznego w analogowych modelach wysokonapięciowych układów izolacyjnych z numerycznym modelowaniem tych

rozkładów przy zastosowaniu oprogramowania stosującego metodę elementów skończonych (MES). Porównanie wyników uzyskanych w efekcie przetworzenia danych pomiarowych z wynikami symulacji numerycznych wykazuje ich dużą zbieżność.

Proponowane rozwiązania dotyczące organizacji i zakresu prowadzenia zajęć dydaktycznych pozwalają na rozwój umiejętności inżynierskich, w kilku ważnych aspektach:

- umiejętności przeprowadzania pomiarowych eksperymentów laboratoryjnych połączonych z komputerowym przetwarzaniem, analizą i wizualizacją ich wyników;
- opanowania wiedzy i uzyskania umiejętności dotyczących rozwiązywania problemów inżynierskich metodami modelowania numerycznego;
- praktycznego zastosowania metody elementów skończonych wraz z obserwacją wpływu rozdzielczości dyskretyzacji modelu na czas obliczeń i ich rezultaty;
- rozwoju umiejętności pracy grupowej, wspomaganej technologiami sieciowymi.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Gacek Z, Szadkowski M.: Wysokonapięciowa technika izolacyjna we współczesnej elektroenergetyce. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2016.
2. Florkowska B.: Wytrzymałość elektryczna gazowych układów izolacyjnych wysokiego napięcia, Wyd. AGH, Kraków, 2003.
3. Furgał J.: Układy izolacyjne urządzeń stacji wysokiego napięcia, Wyd. AGH, Kraków, 1995.
4. Marshall S.V., Skitek G.G., Electromagnetic concepts and applications, 3 ed., Prentice-Hall Inc., 1990.
5. Florkowska B., Furgał J., Technika wysokich napięć. Podstawy teoretyczne i laboratorium, Wyd. AGH, Kraków, 2018.
6. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Zhu J.Z., The finite element method: its basis and fundamentals, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005
7. Meeker D., Finite Element Method Magnetics Ver. 4.2 User's Manual, 2015.
8. Baltzis K. B., The FEMM package: A simple, fast, and accurate open source electromagnetic tool in science and engineering, Journal of Engineering Science and Technology Review, vol.1 no.1, p. 83-89, 2008.

ANALOG AND NUMERICAL MODELING OF THE ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION IN THE INSULATION SYSTEMS OF ELECTRICAL DEVICES - STUDENT LABORATORY AIDED WITH NETWORK TECHNOLOGIES

Changing of engineering tools used in the design of electrical insulating systems make the need for a new approach in the organization and conducting of teaching in the process of engineers educating. Their effect should be both to get to know modern tools for modeling of insulating systems, but at the same time to facilitate their understanding based on practical examples, enabling measurements and comparisons on physical models. This allows reference of abstract numerical models to real technical objects.

The article presents an example of the implementation of didactic courses combining measurements of electric field distributions in laboratory analog models of HV insulating systems with numerical modeling of these systems using FEM software. Analog models are prepared on the basis of technical data of real electrical devices. The results of individual stages of courses are processed and collected on a server available for individual exercise groups in the laboratory computer network. It is an additional element of education that allows the development of networking skills.

Keywords: modern student laboratory, HV insulating systems, analog models, numerical modeling.