



<https://doi.org/10.32056/KOMAG/KOMEKO2021.9>

## **Metoda pomiarowa weryfikacji wyników symulacji rozkładu pola elektrycznego z wykorzystaniem woltomierza elektrostatycznego**

**Marcin Talarek** – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

**Andrzej Niedworok** – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

**Łukasz Orzech** – Instytut Techniki Górniczej KOMAG

**Streszczenie:** W rozdziale zaprezentowano stanowisko badawcze, w skład którego wchodzi woltomierz elektrostatyczny, umożliwiające weryfikację wyników obliczeń numerycznych pola elektrycznego wokół układów izolacyjnych. Zaprezentowano model izolatora i przedstawiono porównanie wyników symulacji z pomiarami potencjału pola elektrycznego.

Słowa kluczowe: potencjał elektryczny, modelowanie pola elektrycznego, izolator

## **Measurement method for verification of electric field simulation results with using of the electrostatic voltmeter**

**Abstract:** In chapter described test stand including electrostatic voltmeter, which enables verification of the numerical results of the electric field distribution around insulation systems, is presented in this paper. An insulator model is presented and simulation results are compared with electric field potential measurements.

Keywords: electric potential, electric field modelling, insulator

### **1. Wprowadzenie**

Modelowanie komputerowe zjawisk fizycznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych stało się w ostatnich latach powszechnie stosowanym narzędziem, wspomagającym proces projektowania [1, 2]. Modele komputerowe mogą być przydatne w całym, szerokim spektrum analiz inżynierskich, na przykład w ocenie zagrożeń związanych ze zjawiskiem elektryczności statycznej w przestrzeniach zagrożonych wybuchem [3, 4]. Niezwykle istotną kwestią, biorąc pod uwagę zastosowanie wyników symulacji komputerowych, staje się zagadnienie weryfikacji opracowanych wirtualnie modeli. Każdy model stanowi pewne uproszczenie rzeczywistości, w związku z czym wyniki obliczeń numerycznych są obciążone błędem. Świadomość tych błędów, jak również umiejętność ich prawidłowego oszacowania, będzie decydujące dla użyteczności opracowanych modeli oraz zgodne z przeznaczeniem i efektywnym wykorzystaniem wyników symulacji. W niniejszym rozdziale zaprezentowano prostą metodę weryfikacji obliczeń komputerowych rozkładu pola elektrycznego z wykorzystaniem miernika pola, na przykładzie izolatora. W celu weryfikacji wyników obliczeń numerycznych zaprojektowano i wykonano stanowisko badawcze, w skład którego wchodzi miernik pola elektrycznego Trek, model 341B.

### **2. Stanowisko badawcze**

Stanowisko badawcze zostało zaprezentowane na rysunku 1. Składa się ono z zasilacza wysokiego napięcia prądu stałego, woltomierza elektrostatycznego Trek, model 341B oraz skanera potencjału. Skaner potencjału umożliwia przemieszczanie sondy kompensacyjnej, współpracującej z woltomierzem elektrostatycznym, określonym krokiem w osiach poziomych x, y płaszczyzny pomiarowej, tworząc w ten sposób siatkę punktów pomiarowych [5]. W niniejszym eksperymencie pomiary potencjału

elektrycznego były wykonywane w jednej osi wzdłuż linii na określonym odcinku pomiarowym (rys. 1). Zasada działania sondy kompensacyjnej (rys. 2) oparta jest na podawaniu na obudowę sondy napięcia równego napięciu mierzonemu, w wyniku czego układ pomiarowy nie narusza stanu energetycznego rozpatrywanego obiektu mierzonego. Poniżej zestawiono podstawowe dane techniczne woltomierza elektrostatycznego Trek, model 341B:

- zakres pomiarowy: 0 do  $\pm 20$  kV (DC lub peak AC),
- dokładność:  $\pm 0,1\%$  zakresu pomiarowego,
- szybkość odpowiedzi (10% do 90%): poniżej 5 ms dla 20 kV,
- stabilność temperaturowa: poniżej 200 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ .



Rys. 9. Widok stanowiska badawczego



Rys. 10. Zastosowana sonda kompensacyjna do pomiaru potencjału pola elektrycznego

### 3. Analizowany model izolatora

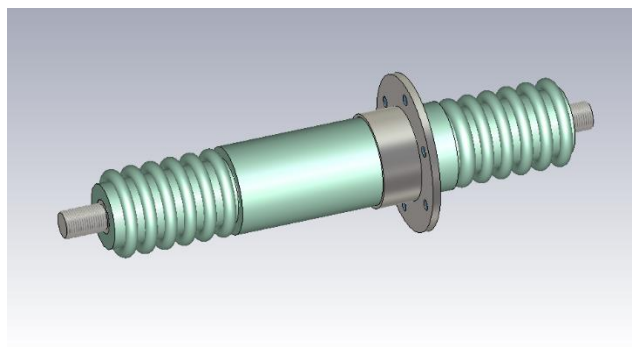
W ramach eksperymentu porównano wyniki symulacji komputerowych pola elektrycznego z wynikami pomiarów potencjału, wykorzystując stanowisko badawcze z miernikiem pola elektrycznego. Na rysunku 3 zaprezentowano rzeczywisty obiekt badań (izolator) oraz poglądowy widok jego modelu wirtualnego. Rysunek 4 prezentuje siatkę elementów skończonych zastosowaną w obliczeniach numerycznych. Rozkład pola elektrycznego wokół izolatora stanowi istotne zagadnienie inżynierskie z punktu widzenia projektowego. Podstawowym warunkiem odpowiedniego zaprojektowania układu izolacyjnego wysokiego napięcia jest taki rozkład pola natężenia pola elektrycznego wokół izolatora, aby w każdym punkcie układu nie zostało przekroczone dopuszczalne natężenie pola i nie doszło do przebicia wytrzymałości dielektrycznej izolacji [6, 7, 8]. Kategorycznym warunkiem komputerowego wspomaganie działań projektowo-konstrukcyjnych jest posługiwanie się modelami, a więc właściwie określonymi systemami o różnym stopniu uszczegółowienia.

W poszukiwaniu rozwiązań optymalnych znaczenie praktyczne mają te modele, które pozwalają symulować działanie projektowanych układów [9].

Zaprojektowane w eksperymencie stanowisko badawcze umożliwia pomiar potencjału elektrycznego, zaś korzystając z podstawowych zależności można w prosty sposób obliczyć rozkład natężenia pola elektrycznego. W ramach przeprowadzonego eksperymentu zastosowano napięcie robocze wynoszące 7200 V.

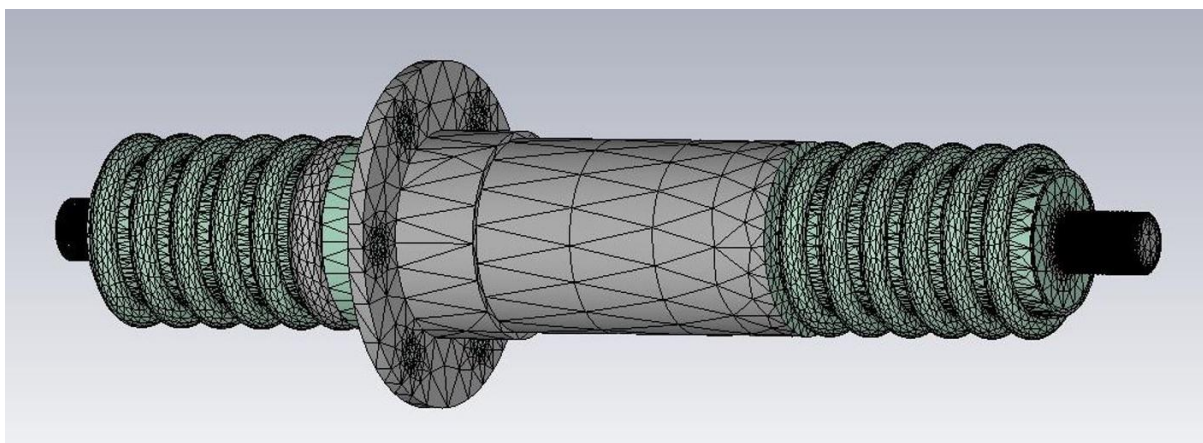


obiekt rzeczywisty



model wirtualny

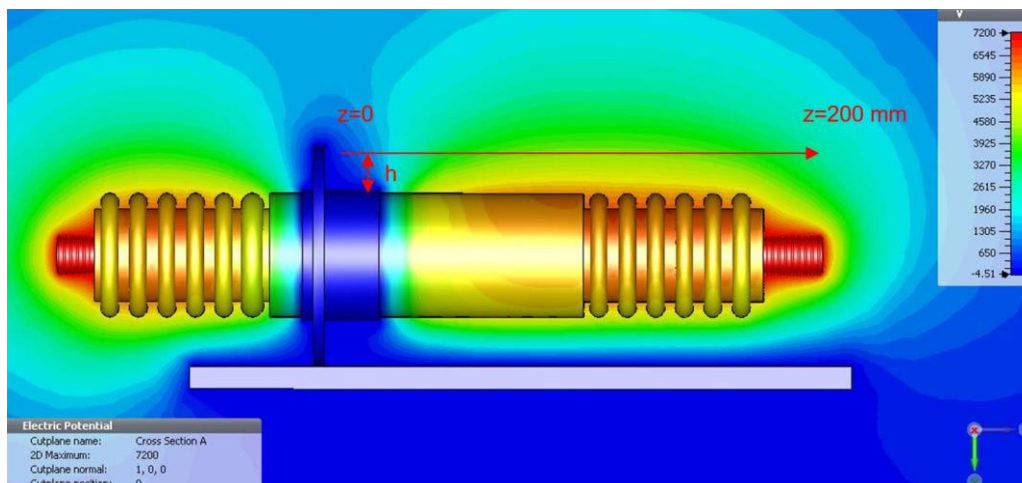
Rys. 11. Widok obiektu badanego



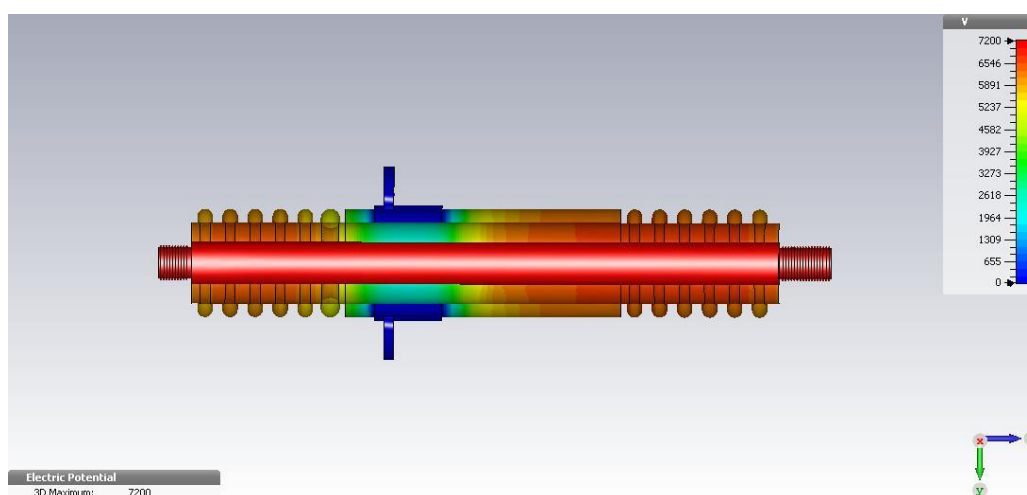
Rys. 12. Siatka elementów skończonych modelu izolatora

#### 4. Wyniki badań

Rezultaty przeprowadzonych obliczeń numerycznych z wykorzystaniem zbudowanego modelu siatki elementów skończonych analizowanego izolatora zostały porównane z wynikami pomiarów potencjału w dwóch odległościach od izolatora wzdłuż linii równoległej do obiektu badań, jak zaprezentowano na rysunku 5. Rysunek prezentuje jednocześnie rezultaty obliczeń numerycznych w zakresie wyznaczenia rozkładu potencjału pola elektrycznego wokół izolatora. Rezultaty obliczeń numerycznych w przekroju izolatora zaprezentowano dodatkowo na rysunku 6.

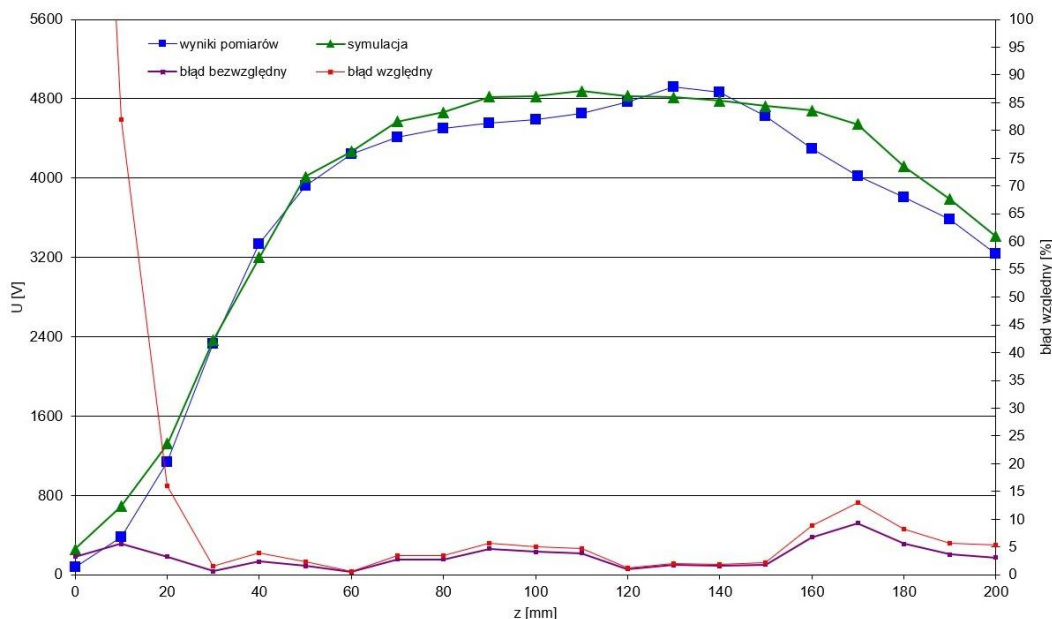


Rys. 13. Zakres walidacji wyników symulacji komputerowych

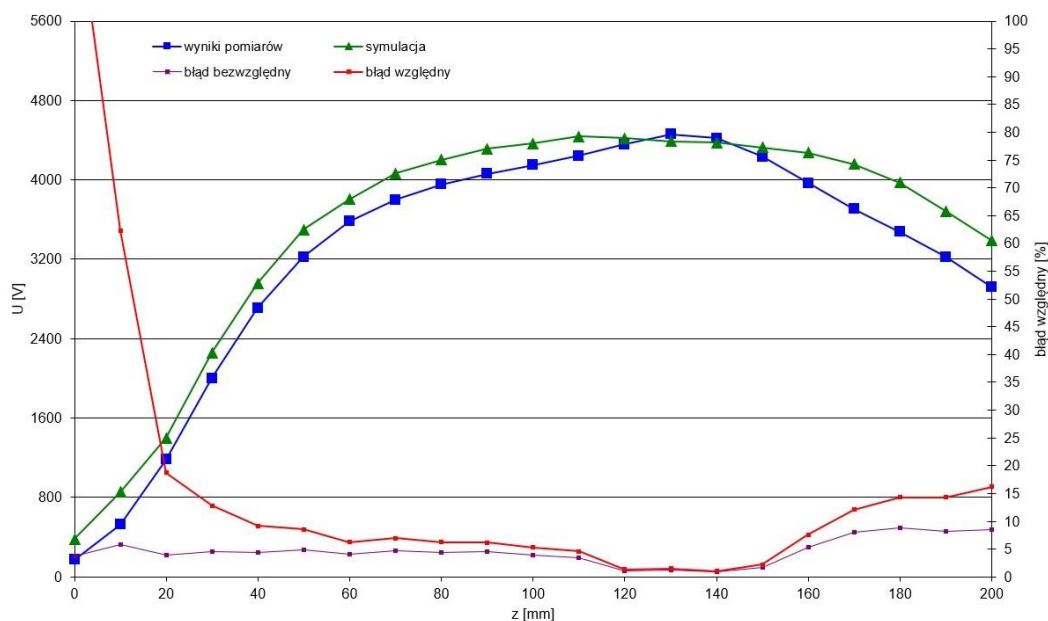


Rys. 14. Rozkład potencjału wewnątrz izolatora w przekroju osi x

Zmierzono potencjał pola elektrycznego, z wykorzystaniem miernika pola Trek model 341B, wzdłuż linii zaprezentowanej na rysunku 5, od  $z = 0$  do  $z = 200$  mm. Pomiary przeprowadzono w dwóch odległościach od izolatora:  $h = 10$  mm i  $h = 15$  mm. Wyniki pomiarów porównano z wynikami symulacji komputerowych. Wynik porównania zaprezentowano na rysunkach 7 i 8.



Rys. 15. Wyniki walidacji symulacji komputerowych w odległości 10 mm od izolatora



Rys. 16. Wyniki walidacji symulacji komputerowych w odległości 15 mm od izolatora

## 5. Podsumowanie

W rozdziale zaprezentowano prostą metodę weryfikacji wyników obliczeń numerycznych rozkładu potencjału pola elektrycznego. Do tego celu zaprojektowano i wykonano stanowisko badawcze, w skład którego wchodzi miernik pola elektrycznego Trek, model 341B wraz z sondą kompensacyjną, umożliwiającą pomiar w sposób nie naruszający stanu energetycznego obiektu badanego.



Uzyskany w wyniku przeprowadzonej walidacji błąd – zdefiniowany jako różnica między wynikiem symulacji a wynikiem pomiaru – w najgorszym przypadku wynosi 522 V dla  $h = 10$  mm i 497 V dla  $h = 15$  mm, co daje błąd względny na poziomie około 15%. Założono, że dalsze badania modelowe prowadzone są z nie gorszą dokładnością. Ponadto kształt krzywej potencjału uzyskany w wyniku badań symulacyjnych pokrywa się z wynikami badań laboratoryjnych, co jest również istotne. Niezadowalające wyniki z punktu widzenia błędu względnego uzyskano w pobliżu elementu metalowego izolatora od  $z = 0$  mm do  $z = 20$  mm, stąd wniosek, iż należy z pewną ostrożnością analizować wyniki uzyskane w pobliżu elementów metalowych. W obszarach tych występują największe zmiany potencjału elektrycznego.

Zaprojektowane stanowisko badawcze pozwala na precyzyjny pomiar potencjału pola elektrycznego w osiach poziomych  $x$ ,  $y$  płaszczyzny pomiarowej, tworząc w ten sposób siatkę punktów pomiarowych, jednak z punktu widzenia potrzeby użytkowników i projektantów urządzeń wysokiego napięcia może wystąpić możliwość realizacji pomiarów w terenie. Laboratorium Badań Stosowanych dysponuje możliwościami przeprowadzenia mobilnych pomiarów rozkładu pola elektrycznego z wykorzystaniem miernika pola elektrycznego Trek, model 341B [10], tj. w zakresie mierzonego napięcia  $\pm 20$  kV.

Symulacje komputerowe mogą być użyteczne w procesie projektowania, jak również w innych obszarach analiz inżynierskich, wyłącznie pod warunkiem weryfikacji modelu obliczeniowego oraz oszacowania niepewności uzyskanych wyników obliczeń numerycznych.

Wyniki symulacji, zaprezentowane w rozdziale, uzyskano za pomocą oprogramowania CST EM STUDIO wersja edukacyjna, dostarczonego przez CST – Computer Simulation Technology AG.

## Literatura

1. Darie E., Pesci R.: The modelling of the electric field generated by the electrical transport lines, *Energy Procedia* 85 (2016), 170-177
2. Adamczyk B., Florkowska B.: Analiza warunków sterowania pola elektrycznego w wysokonapięciowych izolatorach przepustowych, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* Nr 30/2011
3. Glor M.: Modelling of Electrostatic Ignition Hazards in Industry: too Complicated, not Meaningful or only of Academic Interest?, *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 31, 2013
4. Talarek M.: Zastosowanie modelowania komputerowego pola elektrycznego do oceny zagrożeń związanych ze zjawiskiem elektryczności statycznej, *Maszyny Górnicze* Nr 4/2014, s. 11-14
5. Talarek M.: Analiza rozwiązań technicznych układów izolatorów z propozycją usprawnień w zakresie zapobiegania przebiegom układów elektroizolacyjnych, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, praca statutowa (materiały niepublikowane)
6. Gacek Z., Szadkowski M.: Wysokonapięciowa technika izolacyjna we współczesnej elektroenergetyce, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2016
7. Florkowska B.: Wytrzymałość elektryczna gazowych układów izolacyjnych wysokiego napięcia, Wydawnictwo AGH, Kraków 2003
8. Furgał J.: Układy izolacyjne urządzeń stacji wysokiego napięcia, Wydawnictwo AGH, Kraków 1995
9. Gacek Z.: Technika Wysokich napięć. Izolacja wysokonapięciowa w elektroenergetyce. Przepięcia i ochrona przed przepięciami, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999
10. <http://www.trekinc.com> (dostęp: 02.03.2021)