

Wojciech KRAJEWSKI  
Henryk SIBILSKI  
Robert WOJCIECHOWSKI

## ANALIZA POLA ELEKTRYCZNEGO W ROZDZIELNICY ŚREDNIEGO NAPIĘCIA

**STRESZCZENIE**     *W artykule przedstawiono wyniki obliczeń pola elektrycznego w wybranym przedziale rozdzielnic średniego napięcia, w kontekście analizy możliwości zastosowania w niej suchego powietrza w miejsce SF<sub>6</sub>. Do obliczeń zastosowano oprogramowanie bazujące na metodzie elementów skończonych (MES). Przedstawione obliczenia mogą być przydatne w procesie dostosowania rozważanej rozdzielnic do bardziej ekologicznej izolacji gazowej, charakteryzującej się jednak mniejszą wytrzymałością elektryczną. Podobna analiza pola powinna być także stosowana w procesie projektowania nowych urządzeń elektroenergetycznych. Numeryczne modelowanie pola elektrycznego w nowoprojektowanych urządzeniach wysokiego i średniego napięcia może przyczynić się do obniżenia kosztów budowy prototypów oraz ograniczenia niezbędnych badań laboratoryjnych. Może także prowadzić do powstawania bardziej materiałoezczędnych, a co za tym idzie, tańszych i bardziej ekologicznych urządzeń elektroenergetycznych.*

**Słowa kluczowe:** rozdzielnice elektroenergetyczne, pole elektryczne, metoda elementów skończonych

---

**dr hab. inż. Wojciech KRAJEWSKI, prof. IEL**

e-mail: w.krajewski@iel.waw.pl

**prof. dr hab. Henryk SIBILSKI**

e-mail: h.sibilski@iel.waw.pl

Instytut Elektrotechniki

ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa

**mgr inż. Robert WOJCIECHOWSKI**

e-mail: robert.wojciechowski@zpue.pl

ZPUE S.A.

ul. Jędrzejowska 79c, 29-100 Włoszczowa

## 1. WSTĘP

---

Urządzenia elektroenergetyczne średniego i wysokiego napięcia, poza właściwym działaniem w zakresie funkcji, do których są przeznaczone, muszą także, zgodnie z obowiązującymi normami [1], spełniać odpowiednie wymagania w zakresie odporności na przepięcia sinusoidalnie zmienne [2] oraz udarowe przepięcia piorunowe [2]. Projektowanie wspomnianych urządzeń wiąże się zwykle z koniecznością wykonywania kosztownych prototypów, które poddawane są odpowiednim badaniom laboratoryjnym, między innymi pod kątem wytrzymałości na wyżej wspomniane przepięcia. Konstruktorzy, projektując te urządzenia, posługują się zwykle specjalnymi wytycznymi do ich projektowania, czy też metodykami obliczeniowymi, gwarantującymi (przy zachowaniu zalecanych odstępów izolacyjnych) wymaganą wytrzymałość na przepięcia, zarówno udarowe, jak i sinusoidalnie zmienne. Jednak zachowanie wspomnianych odstępów wiąże się zwykle z przewymiarowaniem urządzenia, co czyni je nadmiernie materiałochłonnym, a zatem nieekologicznym i często cenowo niekonkurencyjnym.

Dążenie do miniaturyzacji wyrobu, nieoparte gruntowną analizą zagadnienia, powoduje, że podczas prób wytrzymałości na przepięcia może nastąpić przeskok w izolacji gazowej prototypu. Miejsce i przyczyna tego przeskoku są zwykle trudne do określenia, nawet w przypadku filmowania przebiegu próby z użyciem szybkiej kamery.

Innym zagadnieniem, związanym z wytrzymałością współczesnych urządzeń elektroenergetycznych na przepięcia, jest obserwowana w świecie tendencja odchodzenia od stosowania w nich SF<sub>6</sub> jako izolacji gazowej. Wiąże się to ze stwierdzonymi nieekologicznymi własnościami tego gazu. Proponuje się w tym przypadku zastosowanie, w miejsce SF<sub>6</sub>, obojętnego dla środowiska suchego powietrza, które jednak nie ma własności gaszących łuk elektryczny oraz charakteryzuje się znacznie mniejszą (2,5 do 3 razy) wytrzymałością elektryczną [3]. Producenci urządzeń elektroenergetycznych podejmują jednak tam, gdzie to jest oczywiście możliwe, próby przeprojektowania produkowanych wcześniej urządzeń pod kątem zastąpienia izolacji SF<sub>6</sub> suchym powietrzem.

Dla uzyskania pożądanego efektu w projektowaniu nowych, bardziej ekologicznych i jednocześnie tańszych urządzeń elektroenergetycznych SN i WN, bardzo pomocna może stać się numeryczna analiza pola elektrycznego w ich przestrzeniach izolacyjnych. Sprzyja temu systematyczny wzrost mocy obliczeniowej współczesnych komputerów oraz rozwój numerycznych metod analizy pól.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki obliczeń natężenia pola elektrycznego we fragmencie rozdzielnic SN (24 kV) z izolacją SF<sub>6</sub> pod kątem możliwości zastosowania w niej suchego powietrza jako izolacji gazowej.

## 2. CHARAKTERYSTYKA ROZDZIELNICY

---

Zgodnie z wcześniejszymi uwagami, w niniejszym artykule przeprowadzono analizę pola elektrycznego w rozdzielnic SN (produkcji ZPUE S.A.) typu TPM, wariant TLL, z dwoma polami liniowymi i jednym polem transformatorowym. Widok powyższej rozdzielnic pokazano na rysunku 1, a jej wybrane parametry podano w tabeli 1. Rozdzielnic ta spełnia funkcje związane z przyłączeniem do sieci, zasila-

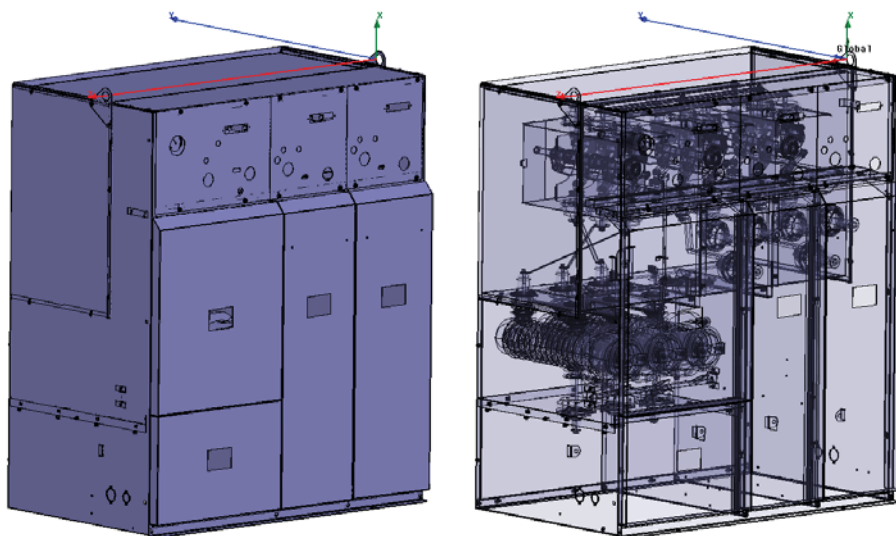
niem oraz zabezpieczeniem transformatorów pracujących w obwodach pierścieniowych bądź promieniowych sieci miejskich.

**TABELA 1**

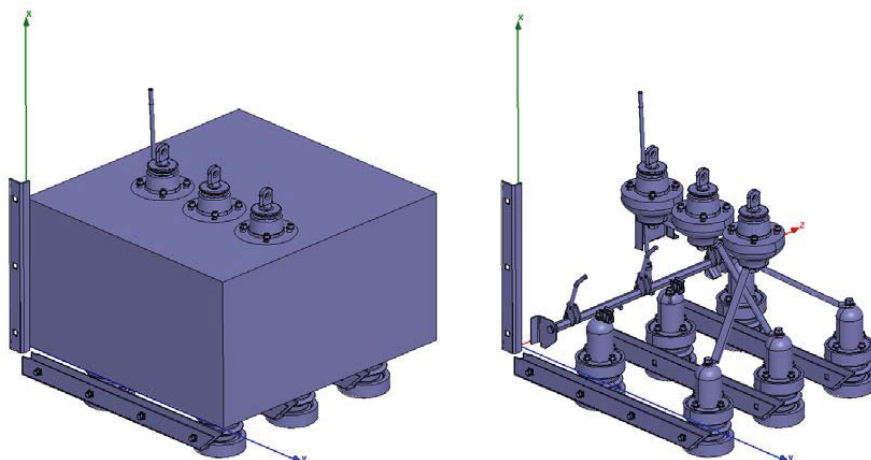
Wybrane parametry analizowanej rozdzielnicy SN

Napięcie nominalne sieci	20 kV
Najwyższe napięcie urządzeń	24 kV
Częstotliwość znamionowa	50 Hz
Znamionowe wytrzymałalne napięcie krótkotrwałe częstotliwości sieciowej	50 kV/60 kV
Znamionowe wytrzymałalne udarowe napięcie piorunowe 1,2/50 $\mu$ s	125 kV/145 kV

W rozważanej rozdzielnicy (rys. 1) oba odejścia liniowe połączone są poprzez rozłączniki ze znajdującymi się w jej górnej części szynami zbiorczymi. W polu transformatorowym znajdują się bezpieczniki, połączone również poprzez rozłącznik z szynami zbiorczymi.

**Rys. 1. Rozdzielnica TPM wariant TLL (obudowa i aparatura)**

W dalszej części artykułu przedstawiono wyniki obliczeń natężenia pola elektrycznego w przedziale uziemnika, pokazanym na rysunku 2. W powyższym przedziale (poza samym uziemnikiem) znajdują się jeszcze przepusty (umieszczone w izolatorach z żywicy epoksydowej) oraz wykonane z gołych płaskowników oszynowanie pośrednie. Dolne przepusty prowadzą do przedziału bezpieczników, natomiast górne przechodzą do przedziału rozłącznika. Całość zamknięta jest w stalowej obudowie, tak jak to pokazano na rysunku 2. Ta część rozdzielnicy jest szczególnie narażona na przeskok (ze względu na gołe elementy pod napięciem, otoczone wyłącznie izolacją gazową) i dlatego jest ona przedmiotem przedstawionej w artykule analizy.



Rys. 2. Przedział uziemiającego z oszowaniem pośrednim (z obudową i bez obudowy)

### 3. WYTRZYMAŁOŚĆ ELEKTRYCZNA UKŁADÓW IZOLACYJNYCH Z DIELEKTRYKIEM GAZOWYM

Przez wytrzymałość elektryczną gazowego układu izolacyjnego rozumiana jest jego odporność na przeskok, polegający na wyładowaniu iskrowym lub łukowym, pomiędzy elementami pozostającymi pod napięciem a uziemioną metalową obudową. Miarą wytrzymałości elektrycznej jest napięcie przeskoku, które zależy między innymi od rodzaju gazu, jego stanu (ciśnienie, temperatura, wilgotność, zanieczyszczenia), drogi przeskoku (odległość między elektrodami) oraz rozkładu pola elektrycznego [2].

Zjawiska fizyczne zachodzące w układach izolacyjnych z izolacją gazową są stosunkowo dobrze rozpoznane, zarówno od strony teoretycznej, jak i eksperymentalnej. Istnieją odpowiednie modele matematyczne, często bazujące na danych empirycznych, opisujące jakościowo zachowanie powyższych układów izolacyjnych w kontekście różnorodnych warunków ich pracy. Modele te uwzględniają wpływ stanu gazu, rodzaje przyłożonego napięcia (statyczne, sinusoidalne, udarowe), a także przestrzenno-czasowe rozkłady pierwotnego i wtórnego pola elektrycznego. Niestety, precyzyjny, ilościowy opis zjawisk zachodzących w izolacjach gazowych dotyczy jedynie bardzo prostych konfiguracji geometrycznych elektrod, takich jak układ płyta-płyta, ostrze-płyta, kula-płyta itp. W przypadku układów wieloelektrodowych o skomplikowanej geometrii, a co za tym idzie, o złożonym, niejednorodnym rozkładzie pola elektrycznego, sama znajomość jego rozkładów nie gwarantuje dokładnego określenia wytrzymawalnego napięcia. Przed przeskokiem dochodzi do wyładowań niezupełnych samoistnych, rozpoczynających się przy pewnym napięciu początkowym. Temu napięciu odpowiada pewna progowa wartość natężenia pola elektrycznego. Przyjmuje się, że dla powietrza, w tzw. normalnych warunkach atmosferycznych, wartość ta wynosi ok. 21 kV/cm [2]. Można zatem powiedzieć, że jeżeli w powietrznym układzie

izolacyjnym (w normalnych warunkach atmosferycznych) nie zostanie przekroczona ta wartość referencyjna, to nie nastąpi przeskok, ale z drugiej strony, jej przekroczenie nie musi skutkować przeskokiem.

Z tego typu układem izolacyjnym (o znacznej niejednorodności pola elektrycznego) mamy do czynienia w przypadku rozważanego przedziału analizowanej rozdzielniczy.

#### 4. ZASTOSOWANA METODA OBLICZENIOWA

Obliczeniowa identyfikacja rozkładów pola elektrycznego w rozważanym przedziale rozdzielniczy jest zagadnieniem skomplikowanym ze względu na złożoną, trójwymiarową konfigurację geometryczną tego obiektu. Powyższe obliczenia mogą być wykonane jedynie z zastosowaniem numerycznych metod analizy pól, takich jak np. metoda elementów skończonych (MES) [4], czy też metoda elementów brzegowych (MEB) [5, 6]. Są to techniki przybliżone, co oznacza, że wyniki uzyskane z ich zastosowaniem obciążone są pewnym błędem.

Obliczenia, których wyniki przedstawiono w dalszej części artykułu, wykonano profesjonalnym oprogramowaniem bazującym na MES [4]. MES jest obecnie, obok wspomnianej już MEB, jedną z najefektywniejszych metod numerycznych do obliczania pól elektromagnetycznych. Jest ona wykorzystywana do rozwiązywania większości zagadnień brzegowych bądź brzegowo-początkowych z zakresu elektrodynamiki klasycznej, opisanych równaniami różniczkowymi cząstkowymi drugiego rzędu. MES jest z powodzeniem stosowana do zagadnień stacjonarnych, quasistacjonarnych i niestacjonarnych, zarówno w zakresie pól dwuwymiarowych (2D), jak i w przypadku problemów trójwymiarowych (3D).

Analizowany tutaj problem 3D opisany jest równaniem Laplace'a (dla skalarowego potencjału elektrycznego):

$$\Delta \varphi = 0 \quad (1)$$

z warunkiem brzegowym Dirichleta na powierzchniach przewodzących o znanym potencjale  $\bar{\varphi}$ :

$$\varphi|_r = \bar{\varphi} \quad (2)$$

oraz warunkami zgodności pola na granicach  $\Gamma_i$ , między dielektrykami o różnych przenikalnościach elektrycznych (np. żywica epoksydowa-gaz):

$$\varepsilon^+ \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{\Gamma_i^+} - \varepsilon^- \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{\Gamma_i^-} = 0 \quad (3)$$

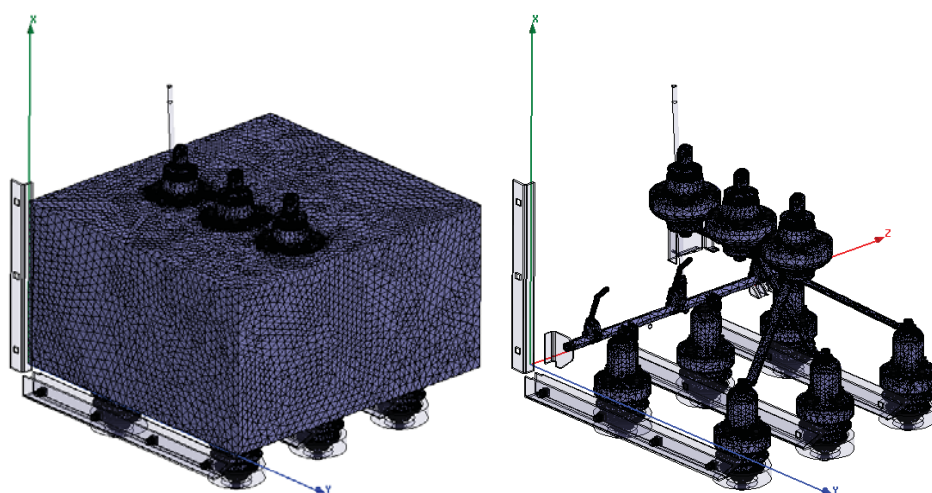
MES bazuje na teorii, której odpowiednie twierdzenia gwarantują asymptotyczną zbieżność uzyskanego rozwiązania do rozwiązania dokładnego, gdy siatka

elementów skończonych ulega zagęszczeniu. Powyższa siatka zbudowana jest z elementów trójkątnych dla dwuwymiarowych zagadnień granicznych, natomiast w przypadku zagadnień trójwymiarowych, siatka tworzona jest na ogół z czworościanów. W obszarze każdego elementu poszukiwana funkcja (w naszym przypadku skalarny potencjał elektryczny) podlega aproksymacji, której rząd również wpływa istotnie na dokładność rozwiązania. Dlatego też bardzo ważnym zagadnieniem podczas wykonywania obliczeń z zastosowaniem MES jest wygenerowanie dostatecznie dokładnej siatki elementów skończonych, adekwatnej do geometrii rozwiązywanego zagadnienia, a także zastosowanie odpowiedniej aproksymacji poszukiwanej funkcji. Z drugiej zaś strony należy pamiętać, że gęstość siatki oraz rząd aproksymacji istotnie wpływają na wielkość potrzebnej pamięci operacyjnej komputera oraz na czas wykonywania obliczeń.

## 5. DYSKRETYZACJA PRZEDZIAŁU UZIEMNIKA SIATKĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

W niniejszym rozdziale przedstawiono siatkę elementów skończonych zastosowaną w obliczeniach rozkładów pola elektrycznego w przedziale uziennika, w którym znajduje się także oszynowanie pośrednie. Przy tworzeniu numerycznego modelu zagadnienia wykorzystano ekranujący charakter stalowych, uziemionych przegród, oddzielających rozważany przedział od przylegających doń innych fragmentów rozdzielni.

Dyskretyzację rozważanego przedziału rozdzielni pokazano na rysunku 3. Analizowany obiekt pokryty został ogólną liczbą 1 698 150 czworościennych elementów skończonych.



Rys. 3. Dyskretyzacja przedziału uziennika (obudowa i aparatura)

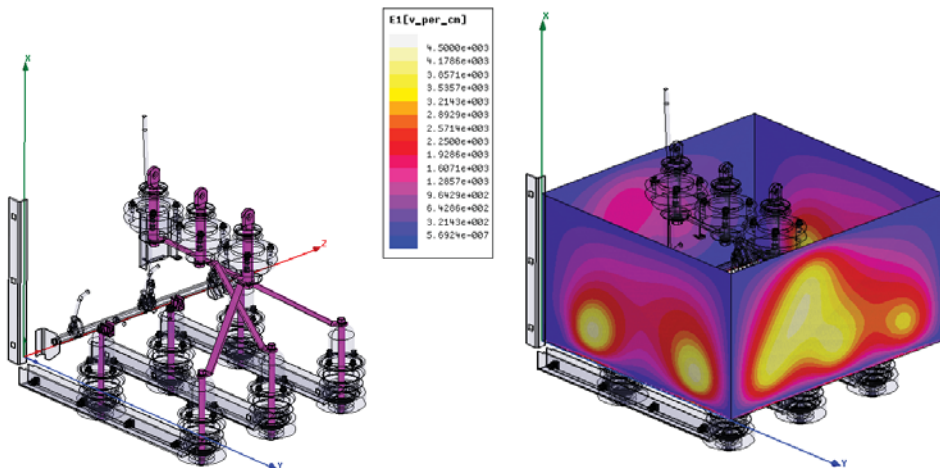


## 6. OBLICZENIA POLA ELEKTRYCZNEGO W PRZEDZIALE UZIEMNIKA

W niniejszym rozdziale zaprezentowano wyniki obliczeń natężenia pola elektrycznego w wyżej wspomnianym przedziale rozdzielnic 24 kV. W obliczeniach przyjęto napięcie 125 kV, tj. wartość napięcia udarowego, jakie zgodnie z obowiązującymi normami powinna wytrzymać rozdzielnica podczas próby odporności na przepięcie piorunowe. Przeanalizowano przypadek, gdy wszystkie trzy szynoprzewody fazowe, przepusty oraz styki nieruchome uziemnika są pod napięciem (rys. 4).

Obliczenia wykonano na komputerze PC z procesorem Intel Core i7-2600K 3,4 GHz oraz z zainstalowaną pamięcią RAM 8 GB. Rozwiązywane zagadnienie zajęło 8,04 GB pamięci komputera, w tym 0,442 GB pamięci dysku twardego. Całkowity czas obliczeń (łącznie z czasem generowania siatki MES) wyniósł nieco ponad 2,5 godziny. Jak z powyższego wynika, przy rozwiązywaniu problemu wykorzystano praktycznie całkowicie możliwości posiadanego sprzętu komputerowego. Dlatego też koniecznym było ograniczenie się do siatki MES, która miejscami nie była dostatecznie zagęszczona, np. w obszarze izolatorów i przepustów. Skutkowało to pewnymi lokalnymi niedokładnościami rozwiązania.

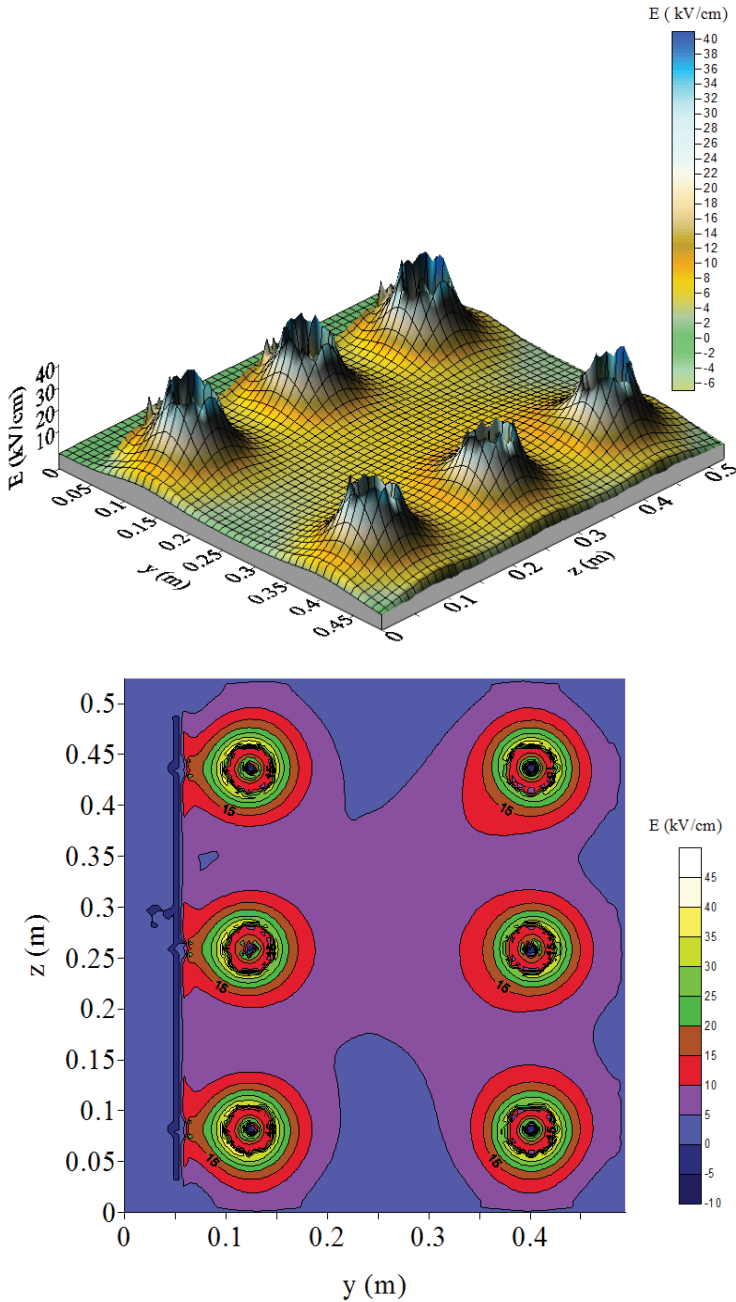
Przechodząc do wyników obliczeń, na rysunku 4 (prawa strona) pokazano rozkłady natężenia pola elektrycznego na stalowych ściankach przedziału uziemnika. Uzyskane wyniki są zgodne z fizyczną interpretacją zjawisk. Potwierdza to jakościową poprawność rozwiązania.



**Rys. 4.** Elementy pozostające pod napięciem (lewa strona) oraz rozkłady pola elektrycznego na obudowie przedziału uziemnika (prawa strona)

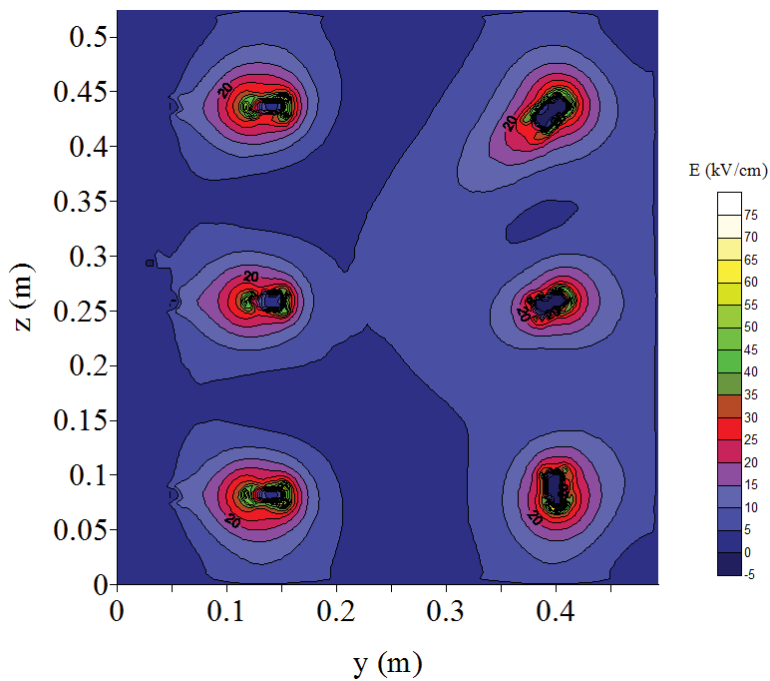
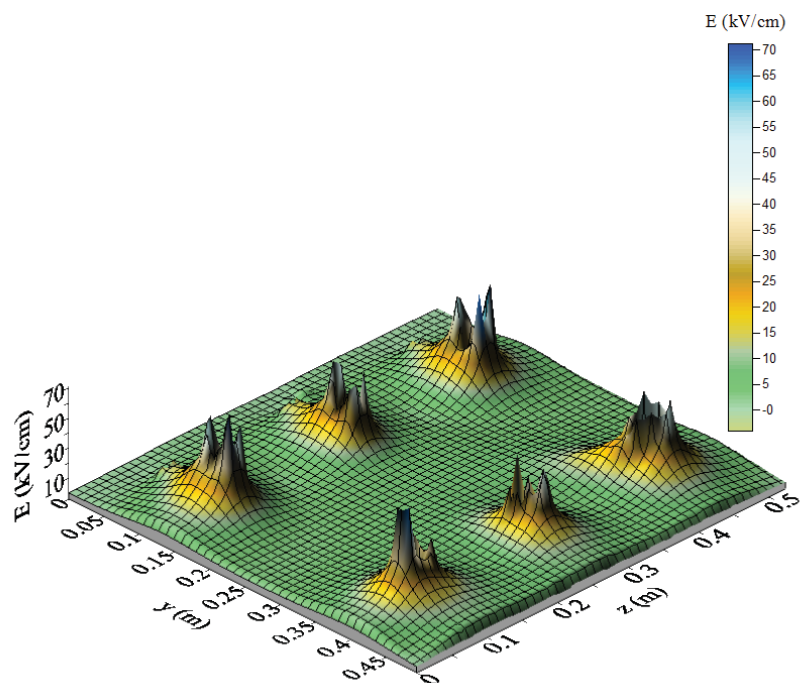
W dalszej kolejności (rys. 5-10) przedstawiono rozkłady pola na powierzchniach poziomych o współrzędnych:  $x = 35 \text{ mm}$ ,  $70 \text{ mm}$ ,  $100 \text{ mm}$ ,  $140 \text{ mm}$ ,  $200 \text{ mm}$  i  $240 \text{ mm}$ . Pierwsza i ostatnia z tych powierzchni przecinają odpowiednio górne i dolne izolatory, w połowie ich wysokości. Pozostałe powierzchnie przecinają gołe szynoprzewody. Jak

łatwo zauważyć, natężenie pola elektrycznego w obszarze izolatorów osiąga zaledwie 40 kV/cm (rys. 5 i 10). Znacznie większe wartości natężenia pola występują wokół gołych przewodów, osiągając w tych miejscach 75 kV/cm (rys. 7 i 8).

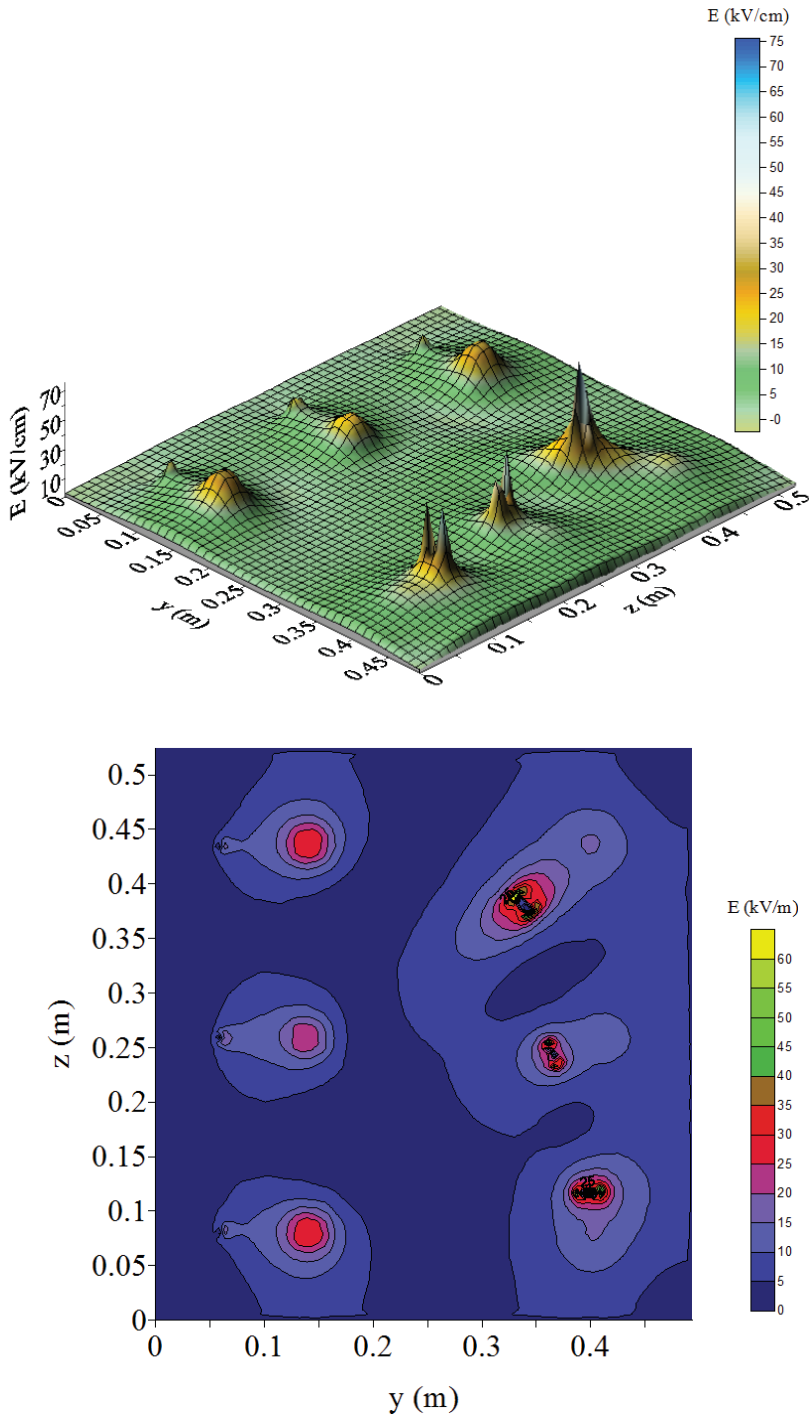


Rys. 5. Rozkład pola elektrycznego w przedziale uziennika na wysokości  $x = 35$  mm

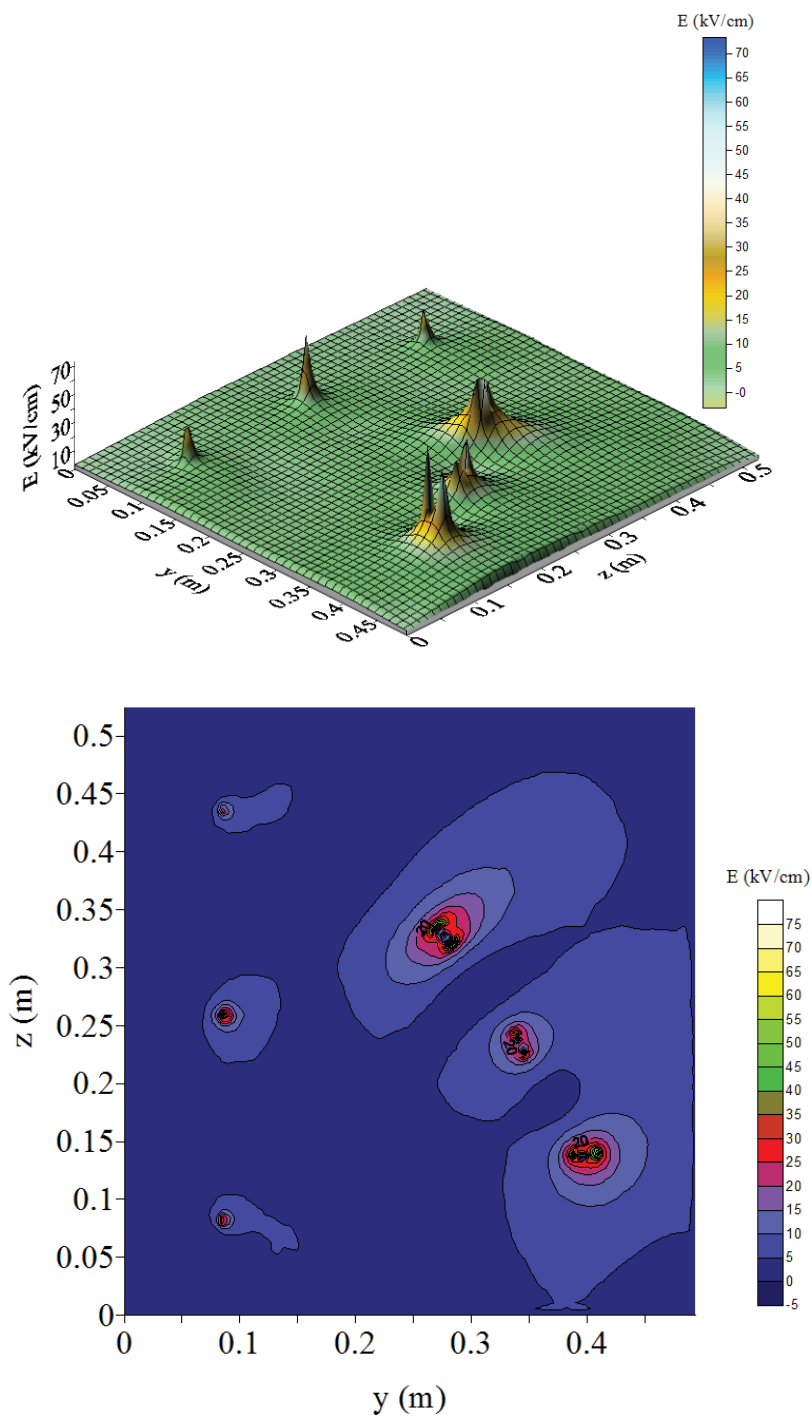




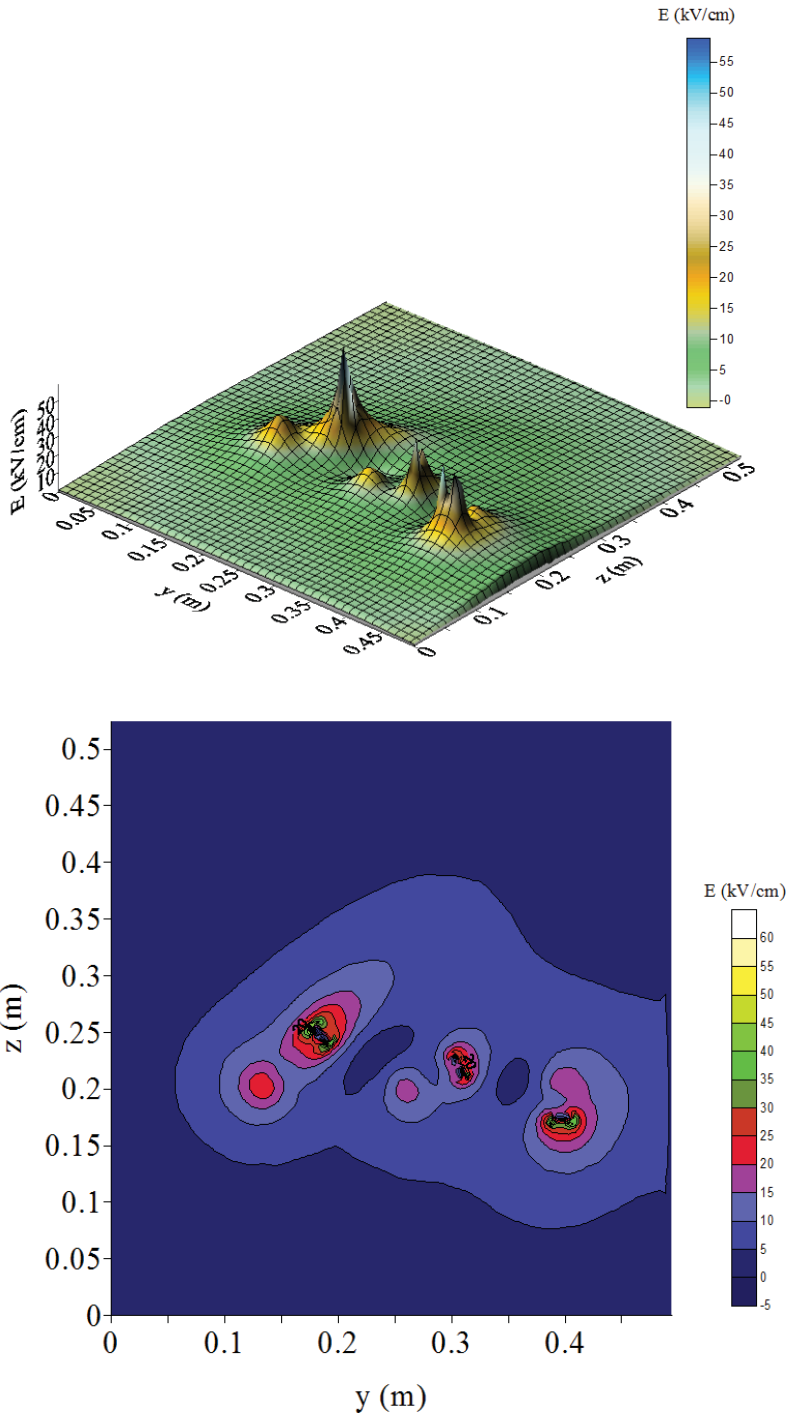
Rys. 6. Rozkład pola elektrycznego w przedziale uziennika na wysokości  $x = 70$  mm



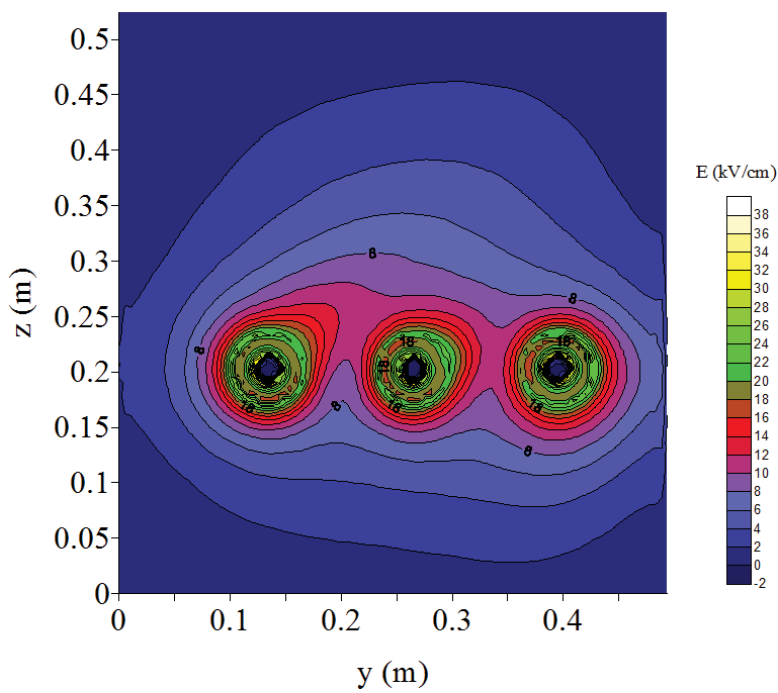
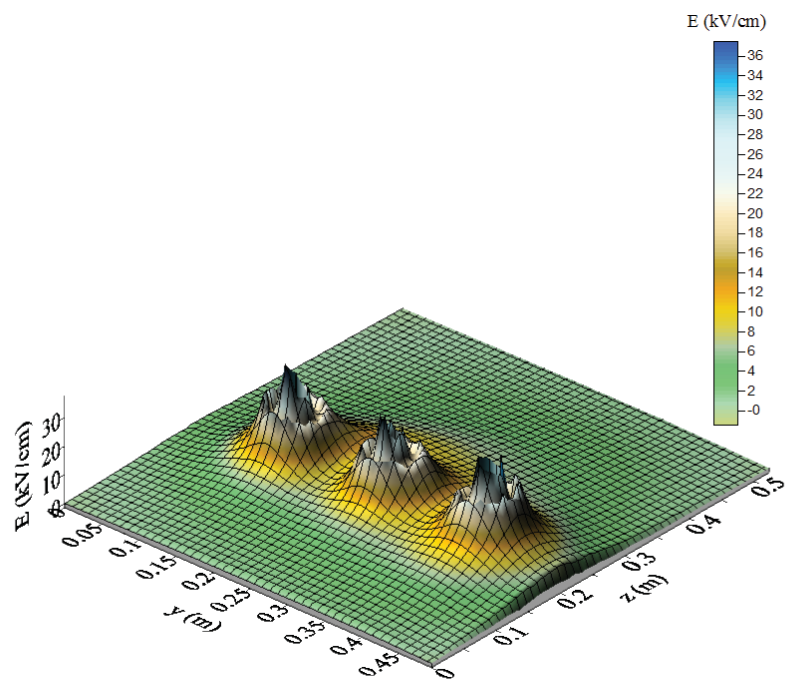
Rys. 7. Rozkład pola elektrycznego w przedziale uziemnika na wysokości  $x = 100$  mm



Rys. 8. Rozkład pola elektrycznego w przedziale uziennika na wysokości  $x = 140$  mm



Rys. 9. Rozkład pola elektrycznego w przedziale uziennika na wysokości  $x = 200$  mm



Rys. 10. Rozkład pola elektrycznego w przedziale uziemiającego na wysokości  $x = 240$  mm

## 7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W artykule przeprowadzono analizę pola elektrycznego w wybranym obszarze rozdzielniczy średniego napięcia, pod kątem możliwości zastąpienia w niej izolacji gazowej SF<sub>6</sub> przez suche powietrze, charakteryzujące się gorszymi własnościami elektroizolacyjnymi. Przykładowo rozważono przedział rozdzielniczy, w którym występują gołe przewody pod napięciem, gdyż tam właśnie może być zainicjowane wyładowanie zupełne (przeskok), w przypadku zastosowania izolacji o mniejszej wytrzymałości elektrycznej. Przy powierzchni gołych przewodów natężenie pola elektrycznego osiąga wartość 75 kV/cm, przy napięciu 125 kV, odpowiadającym próbie wytrzymałości na udarowe napięcie piorunowe. Dla izolacji z SF<sub>6</sub> jest to wartość, która nie grozi przeskokiem.

Poniżej przeanalizowane będzie zagadnienie wytrzymałości na przepięcie sinusoidalnie zmienne, w przypadku, gdy izolacją stanowi suche powietrze. Zgodnie z obowiązującymi normami, znamionowe wytrzymywane napięcie krótkotrwałe o częstotliwości sieciowej dla rozważanej rozdzielniczy wynosi 50 kV. Jak już wspomniano, w literaturze przyjmuje się, że wartość skuteczna progowego natężenie pola elektrycznego, przy którym inicjowane są wyładowania niezupełne (początek jonizacji zderzeniowej) wynosi dla powietrza (w normalnych warunkach atmosferycznych) ok. 21 kV/cm. Jest to jednocześnie wytrzymałość elektryczna (natężenie krytyczne) powietrza w jednorodnym polu elektrycznym (układ elektrod płaskich). W analizowanym obiekcie, o czym już była mowa, mamy do czynienia z układem wieloelektrodowym o polu silnie niejednorodnym. Precyzyjna analityczna ocena wytrzymałości elektrycznej takiego obiektu jest zadaniem skomplikowanym.

Zaprezentowane obliczenia pola elektrycznego wykonano dla napięcia 125 kV, tj. 2,5 razy wyższego niż wymagane wytrzymywane krótkotrwałe napięcie sieciowe. Zatem, aby ocenić analitycznie odporność układu na to przepięcie, wyniki obliczeń należy podzielić przez 2,5. A więc, natężenie pola elektrycznego w badanym obszarze (przy napięciu 50 kV) osiąga wartość 30 kV/cm, przekraczając o ponad 40% wartość progowego natężenia ulotu (21 kV/cm). Badania laboratoryjne rozdzielniczy wykazały jednak, że nawet po zastosowaniu suchego powietrza, rozdzielnicza spełnia omawiane w tym miejscu wymaganie. Należy to uzasadnić faktem, że wysokie natężenie pola elektrycznego występuje jedynie na niewielkim obszarze, w sąsiedztwie gołych przewodów. Powyższa sytuacja świadczy o tym, że rozważany przedział rozdzielniczy dla izolacji z SF<sub>6</sub> zaprojektowany był z pewnym zapasem, co jest oczywiste w przypadku stosowania tradycyjnych (bez numerycznej analizy pola elektrycznego) metod projektowania układów elektroizolacyjnych.

Teoretyczne oszacowanie odporności układu izolacyjnego rozdzielniczy na przepięcia udarowe jest zagadnieniem jeszcze trudniejszym, ze względu na znaczną przypadkowość zjawisk zachodzących podczas udaru. Odnosi się to szczególnie do układów wieloelektrodowych o dużej niejednorodności pola elektrycznego, co ma miejsce w rozważanym przypadku. Jak wcześniej wspomniano, zgodnie z obowiązującymi normami znamionowe wytrzymywane piorunowe napięcie udarowe (1,2/50 μs) dla rozważanej rozdzielniczy wynosi 125 kV. W tym przypadku określając wartość referencyjną (przy której na pewno nie nastąpi przeskok), zamiast wartości skutecznej krytycznego pola elektrycznego należy przyjąć jego maksymalną wartość, tj. ok. 30 kV/cm. Jak widać z przeprowadzonej analizy pola elektrycznego, w niektórych miejscach rozdzielniczy



(w otoczeniu gołych elementów pod napięciem) obliczone natężenie pola elektrycznego 2,5 razy przekracza powyższą wartość referencyjną. Sytuacja ta jednak nie przesądza o niedostatecznej wytrzymałości rozdzielniczy na napięcie udarowe piorunowe. Bowiern tak jak poprzednio, należy uwzględnić, że natężenie pola elektrycznego, przy którym nastąpi przeskok, ze względu na znaczną niejednorodność pola jest większe od wartości referencyjnej 30 kV/cm. Ponadto, również ze względu na znaczną niejednorodność pola elektrycznego, współczynnik udarowy przyjmuje wartość większą od jedności [2].

Gdyby jednak odporność przedmiotowej rozdzielniczy na napięcie udarowe piorunowe okazała się niedostateczna, to można w stosunkowo prosty sposób skorygować jej konstrukcję, znając miejsca, gdzie natężenie pola elektrycznego przyjmuje największe wartości. Korzystny efekt (bez zmiany gabarytów rozdzielniczy) można uzyskać poprzez zmianę kształtu przekroju gołych przewodów, zastępując płaskowniki przewodami rurowymi, prętami okrągłymi bądź też płaskownikami o przekroju zbliżonym do kwadratu. Innym rozwiązaniem może być skorygowanie sposobu prowadzenia gołych przewodów tak, aby spowodować obniżenie natężenia pola elektrycznego przy ich powierzchni.

Jak wyżej pokazano, analiza numeryczna pola elektrycznego wewnątrz urządzeń elektroenergetycznych może być pomocna w doskonaleniu metod ich projektowania, przyczyniając się do obniżenia kosztów budowy prototypów oraz powodując ograniczenie niezbędnych badań laboratoryjnych. Może także prowadzić do powstawania bardziej materiałoozczędnych, a co za tym idzie tańszych i bardziej przyjaznych środowisku urządzeń elektroenergetycznych.

Powiązanie obliczeń pola elektrycznego z ciągle doskonalonymi modelami oraz metodami obliczeniowymi w zakresie zjawisk fizycznych zachodzących w układach elektroizolacyjnych z dielektrykami gazowymi [7-10] może dać w tej dziedzinie jeszcze lepsze rezultaty.

## LITERATURA

1. PN-EN 60694: Postanowienia wspólne dotyczące norm na wysokonapięciową aparaturę rozdzielczą i sterowniczą. PKN, 6 września, 2004.
2. Flisowski Z.: Technika wysokich napięć. WNT, Warszawa, 1992.
3. Fotyma M., Życzyńska B.: Wytrzymałość elektryczna sześćofluorku siarki w różnych układach elektrod. Prace Instytutu Elektrotechniki, Zeszyt 49, 1966, s. 91-109.
4. Zienkiewicz O.C.: The Finite Element in Engineering Science. McGraw-Hill, New York, 1971.
5. Brebbia C.A., Telles J.C.F., Wrobel L.C.: Boundary Element Techniques. Springer, Berlin Heidelberg New York, 1984.
6. Krajewski W.: Analiza wybranych zagadnień EMC niskiej częstotliwości. Prace Instytutu Elektrotechniki, Monografia, zeszyt 224, 2005.
7. Ficker T.: Streamer spots on dielectric barriers. IEEE Transactions on Plasma Science, VOL. 36, No. 4, 2008, s. 1310-1311.
8. Ficker T.: Electron avalanches I – Statistics of partial microdischarges in their pre-streamer stage. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 10, No. 4, 2003, s. 689-699.

9. Ficker T.: Electron Avalanches II – Fractal morphology of partial microdischarge spots on dielectric barriers. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 10, No. 4, 2003, s. 700-707.
10. Ficker T.: Electron avalanche statistics. Acta Physica Polonica A, No. 6, Vol. 116, 2009, s. 1018-1020.

*Rękopis dostarczono dnia 09.07.2013 r.*

## ELECTRIC FIELD ANALYSIS IN A SWITCHGEAR OF MIDDLE VOLTAGE

Wojciech KRAJEWSKI, Henryk SIBILSKI  
Robert WOJCIECHOWSKI

**ABSTRACT** *In the paper, the electric field analysis in a selected compartment of a middle voltage switchgear is presented. The analysis has been performed using a professional software package that employs the finite element method (FEM). In the considered switchgear, an insulation of SF<sub>6</sub> will be substituted by a dry air insulation that is more ecological, however, it is of the lower dielectric withstand. The electric field analysis (presented in the paper) can be a useful tool in the designing process of new electric power devices. Such a numerical analysis can help to reduce the costs of designed device prototypes and can limit their indispensable laboratory investigations. Such an approach can also enable to design smaller and more material-saving devices which are cheaper and more environmental friendly.*

**Keywords:** *power switchgears, electric field, finite element method*

**Dr hab. inż. Wojciech KRAJEWSKI** w 1977 r. ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej (specjalność 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 w 2007 r. na podstawie rozprawy pt. „Elementy brzegowe i liniowe w analizie wybranych zagadnień EMC niskiej częstotliwości” w Instytucie Elektrotechniki, gdzie pracuje od 1981 r., obecnie na stanowisku profesora nadzwyczajnego. Zajmuje się zagadnieniami numerycznego modelowania pól elektromagnetycznych w maszynach i urządzeniach elektrycznych, a także problematyką



pól w środowisku człowieka i na stanowiskach pracy. Jest autorem i współautorem programów komputerowych wdrożonych w przemyśle i ochronie środowiska, a także ponad pięćdziesięciu publikacji w krajowych i zagranicznych czasopismach naukowych. Jest stałym recenzentem w kilku czasopismach naukowych z tzw. listy Thomsona. Wymieniany jest w amerykańskich i brytyjskich wydawnictwach „Who is Who”. Należy do Stowarzyszenia Elektryków Polskich oraz do brytyjskiego The Institution of Engineering and Technology.



**Prof. dr hab. inż. Henryk Zenon SIBILSKI** studia inżynierskie ukończył na Wydziale Elektrycznym Politechniki Gdańskiej, magisterskie na Politechnice Warszawskiej. Po studiach. W 1954 r. rozpoczął pracę w Fabryce Aparatury Rozdzielczej Wysokiego Napięcia, a następnie od lutego 1961 r. w Instytucie Elektrotechniki, zdobywając wszystkie stopnie i tytuły naukowe, gdzie pracuje do chwili obecnej, kierując Zakładem Wielkich Mocy. W roku 1966 uzyskał stypendium ONZ i pracował w firmie AEG Company Kassel (UNO Fellowship). W 1977 r. napisał rozprawę habilitacyjną pt.

„Układ do syntetycznych badań wyłączników wysokiego napięcia”. W 1983 r. otrzymał tytuł profesora nadzwyczajnego nauk technicznych. Do 1996 r. pracował jako ekspert UNIDO (United Nations Industrial Development Organization) w:

- MEXICO Instituto de Investigaciones Electricas Mexico DP,
- North KOREA (Pyongyang): Ministry of Machine Industry,
- Syrii – Damascus.

Uzyskał zaproszenie do pracy na uczelniach:

- Technical University SYDNEY. Fellowship: Australia,
- Instytut für Allgemeine Elektrotechnik und Hochspannung,
- Technik. Rhein.-Westf. Technische Hochschule Aachen – Visiting Professor.

Jego zainteresowania naukowe skupiają się wokół metod projektowania i badań aparatury rozdzielczej wysokiego napięcia. Jest autorem książki pt. „Równoważność badań syntetycznych i bezpośrednich wyłączników wysokiego napięcia” wydanej przez PAN oraz wielu artykułów i referatów na konferencje. Organizował lub był współorganizatorem licznych konferencji naukowych.

**Mgr inż. Robert WOJCIECHOWSKI** w 1997 r. ukończył studia na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, w specjalności Systemy, Maszyny i Urządzenia Energetyczne. Od 1998 r. pracuje w ZPUE S.A.; najpierw na stanowisku specjalisty w Dziale Techniki i Rozwoju, od 2006 r. jako kierownik Sekcji Aparatów i Prototypów a od 2011 r. jako kierownik Działu Badawczo-Rozwojowego ZPUE S.A. Zajmuje się badaniami, projektowaniem oraz wdrażaniem do produkcji nowych wyrobów, głównie z zakresu ŚN (rozdzielnice RMU, wyłączniki próżniowe, rozłączniki z SF<sub>6</sub> itp.).



