



Andrzej JACKOWICZ-KORCZYŃSKI

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki

## Pole elektryczne w ceramicznym izolatorze kołpakowym, wpływ zanieczyszczeń powierzchniowych

**Streszczenie.** Numeryczne metody wyznaczania pola elektrycznego pozwalają na określenie elektrycznych narażeń układów izolacyjnych o skomplikowanej geometrii. Ciągły rozwój technik obliczeniowych pozwala na analizę modeli coraz bliższych rzeczywistości. Artykuł przedstawia wyniki analiz numerycznych pola elektrycznego w ceramicznym izolatorze kołpakowym, przeprowadzonych metodą klasyczną z uwzględnieniem sprzężeń pojemnościowych, oraz obliczenia z uwzględnieniem prądu upływu związanego z przewodzącymi zanieczyszczeniami powierzchniowymi.

**Abstract.** (Electric field in cap and pin ceramic insulator, influence of surface contamination). Numerical methods for determining electric field distribution allow calculating electrical stress in insulation systems with complicate geometry. Improvement of calculation techniques leads to model of these systems closer to real one. Results of analysis of electric field in cap and pin ceramic insulator performed by classic, capacitive-coupled model, and extended one, based on capacitive-resistive coupling, with respect to surface conductive contamination.

**Słowa kluczowe:** pole elektryczne, dielektryki stratne, ceramiczny izolator kołpakowy, zanieczyszczenia powierzchniowe.

**Keywords:** electric field, lossy dielectrics, ceramic cap-and-pin insulator, surface contaminations.

### Wstęp

Artykuł prezentuje wyniki analiz numerycznych przemiennego pola elektrycznego prowadzonych przy wykorzystaniu metody elementów skończonych w odniesieniu do obiektu, jakim jest porcelanowy izolator kołpakowy. Wyniki uzyskane na podstawie analizy pola quasi-statycznego umożliwiły wyznaczenie pojemności geometrycznej i rzeczywistej badanego obiektu. Analizy przeprowadzone przy uwzględnieniu konduktywności materiałów, pozwoliły na dokładniejszą identyfikację rozkładu pola elektrycznego i określenie rozbieżności między rozkładem wyznaczonym w ten sposób a rozkładem pola quasi-statycznego. Określono także wpływ uwzględnienia prądu upływu na wyznaczone napięcia elektryczne analizowanego układu izolacyjnego. Ponadto przedstawiono rozkłady pola elektrycznego z uwzględnieniem obecności przewodzących zanieczyszczeń na powierzchni izolatora. Wyniki analiz stanowią przykład aplikacji numerycznych metod wyznaczania pola elektrycznego do badania naprężeń w układach izolacyjnych z uwzględnieniem zjawiska upływu.

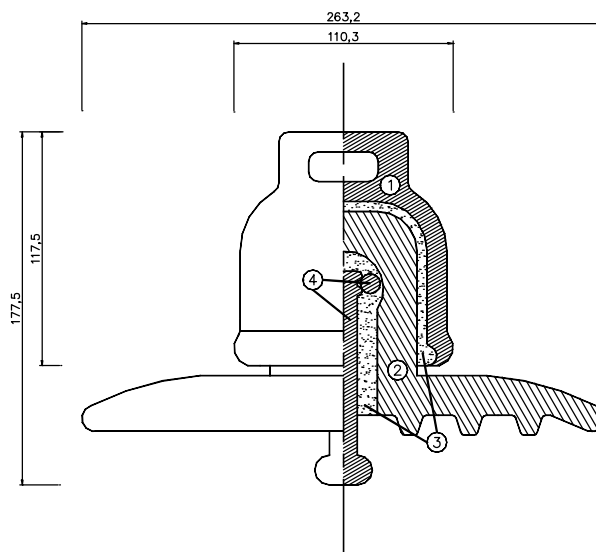
Identyfikacja pola elektrycznego w układach izolacyjnych wysokiego napięcia jest zadaniem zarówno na etapie projektowania tych układów, jak również dla celów diagnostyki oraz oceny przyczyn ich uszkodzeń w eksploatacji. Stanowi część badań zmierzających do określenia narażeń eksploatacyjnych i ich wpływu na pracę urządzeń elektrycznych.

W artykule przedstawiono wyniki analiz zmierzających do identyfikacji rozkładu przemiennego pola elektrycznego w układzie izolacyjnym izolatorów kołpakowych dla linii napowietrznych. Układy te poddawane są oddziaływaniu czynników środowiskowych i antropogenicznych, takich jak opady atmosferyczne, nasłonecznienie, czy zanieczyszczenia [1,2].

W obliczeniach zastosowano równania opisujące pole quasi-statyczne związane z występowaniem sprzężeń pojemnościowych, oraz uwzględniono wpływ ładunków przestrzennych i powierzchniowych pochodzących od zanieczyszczeń jonowych oraz warstwy zanieczyszczeń powierzchniowych.

### Opis analizowanego układu

Izolator kołpakowy typu LK (rys. 1) posiada ceramiczny, szklawiony kloz, do którego przymocowany jest za pomocą spoiwa cementowego żeliwny kołpak. Dolny sworzeń jest mocowany wraz z pierścieniem poprawiającym mechaniczną wytrzymałość połączenia [1]. Przyjęto warstwę przewodzących zanieczyszczeń powierzchniowych o grubości  $d=1$  mm [2].



Rys. 1. Izolator kołpakowy (1–żeliwny kołpak, 2–izolacja porcelanowa, 3–spoiwo, 4– sworzeń i pierścień mocujący).

Własności elektryczne materiałów w konstrukcji izolatora opisuje przenikalność elektryczna  $\epsilon_r$  oraz konduktywność  $\sigma$  (tab. 1).

Tabela 1. Własności elektryczne materiałów [3,4]

Materiał	przenikalność względna	konduktywność [S/m]
	$\epsilon_r$	$\sigma$
porcelana	5	$2 \cdot 10^{-10}$
spoiwo	7	$2 \cdot 10^{-8}$
zanieczyszczenia	1	$2 \cdot 10^{-4}$

Analizę pola elektrycznego w układzie przeprowadzono przy napięciu 1 V między kołpakiem i galwanicznie połączonymi – sworzniem i pierścieniem.

### Metoda analizy

Do obliczeń rozkładu pola elektrycznego zastosowano metodę elementów skończonych (MES) [5,6]. Istnienie symetrii osiowej pozwoliło na prowadzenie analizy w przestrzeni 2D opisanej współzrędnymi cylindrycznymi oraz ograniczenie analizowanego obszaru do połowy współosiowego przekroju izolatora (rys. 1).

Zastosowano warunki brzegowe pierwszego rodzaju (Dirichleta) dla obwiedni kołpaka, sworznia i pierścienia. Warunek drugiego rodzaju (Neumanna) zastosowano na osi izolatora ze względu na jego osiową symetrię oraz na pozostałym brzegu obszaru. Pozwala to na wykluczenie nieskompensowanego ładunku przestrzennego w analizowanym obszarze.

Do dyskretyzacji obszaru zastosowano elementy trójkątne drugiego rzędu o sześciu punktach swobody. Obliczenia przeprowadzono przy zastosowaniu pakietu do analizy pola elektrycznego metodą elementów skończonych ANSYS/Emag3D® [6].

Rozkład przemiennego pola elektrycznego był analizowany przy wykorzystaniu dwóch alternatywnych sposobów. Pierwszy z nich polegał na rozwiązaniu równania Laplace'a, to jest na określeniu rozkładu pola quasi-statycznego według wzoru:

$$(1) \quad \text{div}[\varepsilon_r \cdot \text{grad}(L)] = 0$$

Drugi sposób, opracowany przez autora, polega na wyznaczeniu rozkładu pola elektrycznego z uwzględnieniem konduktywności materiału w układzie izolacyjnym. Metoda ta umożliwia określenie rozkładu pola elektrycznego przy wykorzystaniu pakietów pozwalających na obliczenia pól statycznych lub przepływowych metodą elementów skończonych. Opiera się ona na równaniu Laplace'a (lub Poisson'a) dla przenikalności elektrycznej w postaci zespolonej.

$$(3) \quad \varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 - j \frac{\sigma}{\omega}$$

W praktyce wygodniej jest stosować zespoloną konduktywność  $\underline{\sigma}$ :

$$(4) \quad \underline{\sigma} = \sigma + j\omega\varepsilon_r\varepsilon_0$$

gdź umożliwia to prowadzenie analizy w całym zakresie częstotliwości. Zastosowanie zespolonej konduktywności prowadzi to do równania Kirchoffa w postaci polowej. Rozwiązanie zespolonego równania,:

$$(5) \quad \text{div}[\underline{\sigma} \cdot \text{grad}(L)] = \vec{l}(x, y, z)$$

umożliwia wyznaczenie rozkładu pola wynikającego ze schematu Maxwella-Wagnera w układach o skomplikowanej geometrii. W większości przypadków wektor zespolonego wymuszenia w postaci rozkładu gęstości prądu  $\vec{l}(x, y, z)$  jest równy zero z uwagi na bezźródłowy charakter analizy. W tym przypadku analiza nie obejmowała zagadnień związanych z ładunkiem przestrzennym. Założono również brak wymuszeń prądowych dla składowej upływu co pozwoliło zapis równania (5) w postaci:

$$(6) \quad \text{div}[\underline{\sigma} \cdot \text{grad}(L)] = 0$$

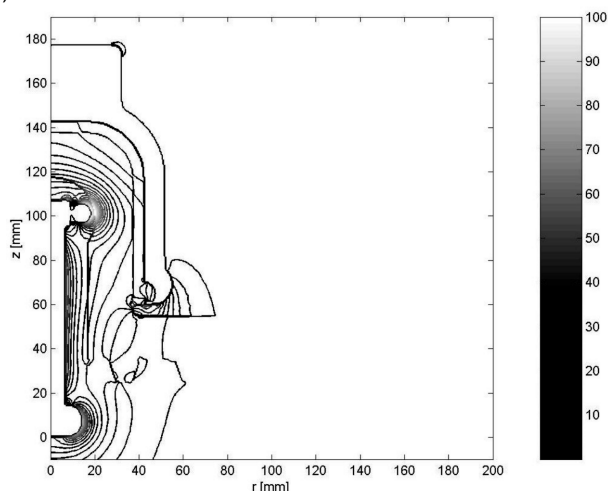
Rozpisanie tego równania na składowe, rzeczywistą i urojoną, umożliwia wyznaczenie rozkładu zespolonego potencjału pozwalającego na określenie rozkładu pola elektrycznego w badanym obszarze.

### Analiza pola quasi-statycznego

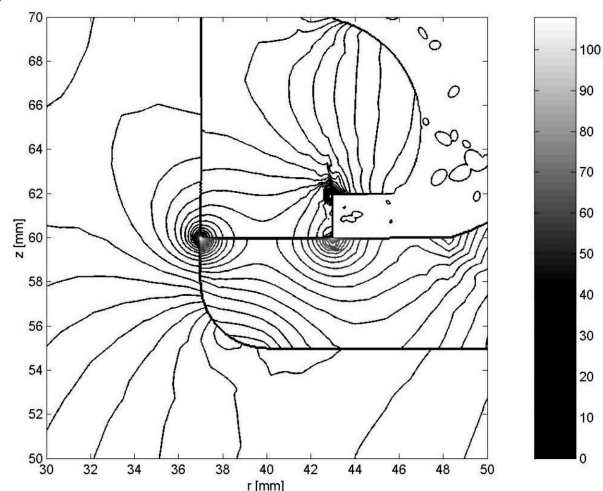
W wyniku obliczeń modelu pola quasi-statycznego uzyskano rozkłady przedstawione na rysunku 2.

Maksymalne natężenie pola elektrycznego o wartości 110 V/m występuje w tzw. punkcie potrójnym tzn. miejscu styku powietrza, porcelany i spoiwa. Drugi obszar o dużych wartościach naprężeń elektrycznych występuje w otoczeniu pierścienia mocującego. Natężenie pola elektrycznego osiąga w tej strefie 100 V/m.

a) izolinie co 5 V/m



b) izolinie co 2 V/m



Rys. 2. Rozkład quasi-statycznego pola elektrycznego.

Kontrolę dokładności analizy umożliwia wyznaczenie pojemności układu. Wymaga to określenia wartości ładunku zgromadzonego na żeliwnym kołpaku. Ładunek ten zgodnie z prawem Gaussa można określić jako:

$$(7) \quad \oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = Q$$

gdzie:  $Q$  – ładunek zgromadzony na elektrodzie;  $D$  – wektor indukcji elektrycznej;  $S$  – zamknięty brzeg obszaru;  $\vec{s}$  – wektor powierzchni w kierunku prostopadłym do brzegu  $S$  o znaku dodatnim dla kierunku „na zewnątrz”.

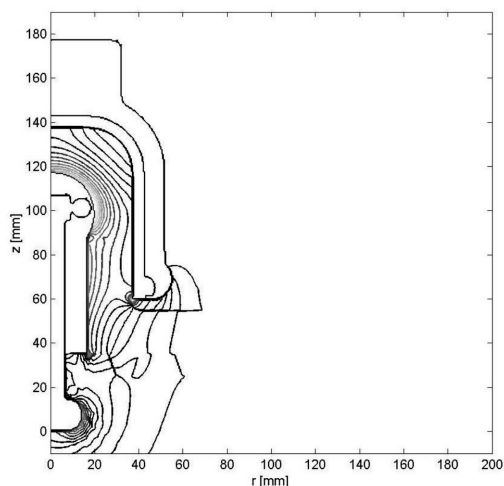
Wyznaczenie ładunku na kołpaku izolatora wymaga zatem przeprowadzenia całkowania składowej normalnej wektora indukcji elektrycznej na brzegu obszaru zawierającego kołpak. W ten sposób określono także ładunek znajdujący się na sworzniu izolatora i pierścieniu mocującym. Porównanie wartości wyznaczonych ładunków wskazuje, że zastosowany model oraz gęstość siatki dyskretyzującej są wystarczająco dokładne (tab. 2).

Tabela 2. Wyniki modelowania pola quasi-statycznego

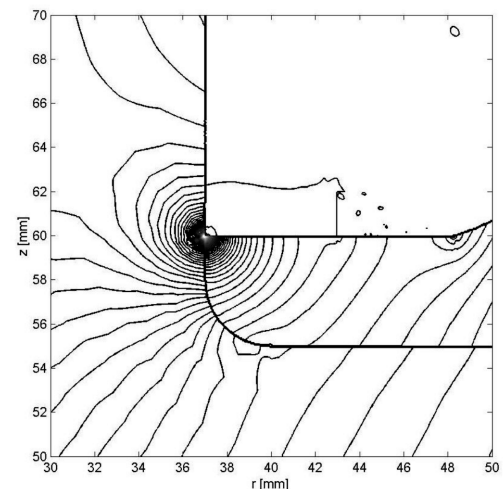
Pojemność	Ładunek na kołpaku	Ładunek na sworzniu i pierścieniu	Pojemność
	[pC]	[pC]	
rzeczywista	21,02278	-21,02679	21
geometryczna	4,893465	-4,895305	4,89

Różnice w wartościach ładunków w obydwu przypadkach są niewielkie (ok. 0,04 %). Porównanie całkowitych ładunków zgromadzonych na elektrodach pozwala stwierdzić, że pojemność geometryczna jest ok. 4,3 razy mniejsza od pojemności rzeczywistej określonej dla badanego układu na podstawie obliczeń. Jest to związane z wartościami przenikalności elektrycznych względnych materiałów konstrukcyjnych izolatora.

a) izolinie co 5 V/m



b) izolinie co 2 V/m



Rys. 3. Rozkład pola elektrycznego z uwzględnieniem strat

Zastosowanie metody pozwalającej na analizę pola elektrycznego w układach izolacyjnych z uwzględnieniem

konduktywności pozwala na bardziej szczegółowe określenie jego rozkładu i wpływu przewodnictwa jonowego. Do obliczeń przyjęto model układu, którego własności elektryczne charakteryzowały parametry zestawione w tabeli 1. Analiza tych parametrów w przypadku pola przemiennego 50 Hz wskazuje, że analiza obejmuje materiały z dominującą składową gęstości prądu przesunięcia charakteryzujące się małą wartością tangensa kąta strat dielektrycznych  $\tan \delta$  (porcelana); materiały, charakteryzowane porównywalnym udziałem gęstości prądu przesunięcia i przewodzenia (spoiwo); oraz materiały z dominującą składową przewodzenia (zanieczyszczenia powierzchniowe).

Tabela 3. Konduktywność zespolona wybranych materiałów przy częstotliwości 50 Hz

materiał	Re ( $\sigma$ )= $\sigma$	Im ( $\sigma$ )= $\epsilon_0\epsilon_r\omega$	$\tan \delta = \sigma/(\epsilon_0\epsilon_r\omega)$
	[S/m]		
porcelana	$2 \cdot 10^{-10}$	$13,9 \cdot 10^{-9}$	0,014
spoiwo	$2 \cdot 10^{-8}$	$19,5 \cdot 10^{-9}$	1,027
zanieczyszczenia	$2 \cdot 10^{-4}$	$2,78 \cdot 10^{-9}$	71,9

Przyczyną zmiany wyznaczonego rozkładu pola elektrycznego w porównaniu do analizy pola quasi-statycznego jest uwzględnienie zjawiska przewodzenia. Stosunkowo duża przewodność spoiwa ( $\tan \delta = 1,027$ ) sprawia, że przy częstotliwości 50 Hz gradienty potencjału elektrycznego w tym materiale są znacznie mniejsze od wartości określonych dla analizy uwzględniającej jedynie przenikalność elektryczną. W wyniku uwzględnienia zjawisk przewodzenia następuje zatem zagęszczenie linii ekwipotencjalnych w porcelanowym koszu. Efektem jest brak linii pola elektrycznego w spoiwie izolatora widoczny na rysunku 3. Jednocześnie analiza wskazuje na zwiększenie wartości pola elektrycznego w punkcie potrójnym. Wyznaczona wartość natężenia pola elektrycznego w punkcie potrójnym wynosi 190 V/m. Znaczne zwiększenie natężenia pola elektrycznego do wartości ok. 170 V/m wystąpiło w strefie otaczającej pierścień mocujący (rys. 3).

Uwzględnienie zjawisk przewodzenia w analizie pola elektrycznego umożliwiło także określenie wpływu przewodzącej warstwy zanieczyszczeń powierzchniowych na rozkład pola elektrycznego w analizowanym układzie.

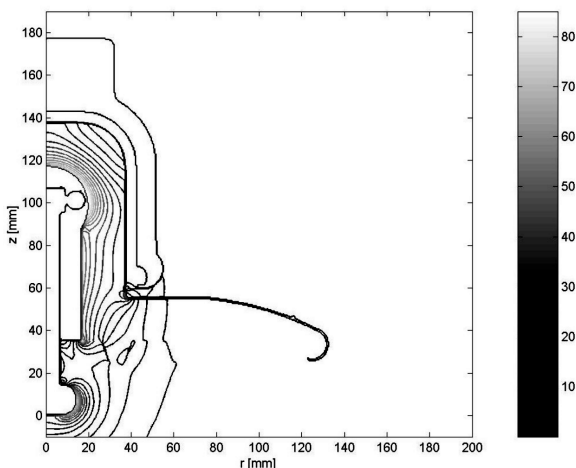
W tym celu model uzupełniono o przewodzącą warstwę zanieczyszczeń na górnej powierzchni ceramicznego kosza o konduktywności znacznie większej od konduktywności materiałów izolacyjnych (tab. 1 i 3). Uzyskane obrazy pola elektrycznego przedstawiono na wykresach na rysunku 4.

Znaczna konduktywność przyjętej warstwy zanieczyszczeń powierzchniowych jest przyczyną niewielkich gradientów potencjałów w tej warstwie. Potencjał w warstwie zabrudzeń podlegał niewielkim zmianom w zakresie 0,07–0,071 V. W tej strefie, stanowiącej praktycznie elektrodę o stałym potencjale, wartości natężenia pola elektrycznego były niewielkie i nie przekraczały 2,7 V/m.

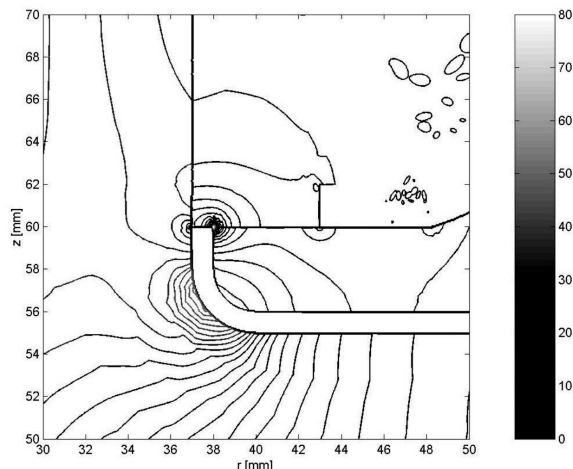
Strefa naprężeń w okolicy obszaru potrójnego, obejmującego zanieczyszczenia powierzchniowe występuje na granicy warstwy zanieczyszczeń i spoiwa izolatora kołpakowego. Natężenie pola elektrycznego w punkcie potrójnym wynosi 80 V/m.

Największa wartość natężenia pola elektrycznego równa 90 V/m występuje w otoczeniu pierścienia mocującego sworzni. W porównaniu do poprzednich analiz prowadzonych dla modeli, quasistatycznego oraz uwzględniającego straty przewodnościowe nastąpiło zmniejszenie wartości naprężeń elektrycznych układu.

a) izolinie co 5 V/m



b) izolinie co 2 V/m



Rys. 4. Rozkład pola elektrycznego w obecności zanieczyszczeń powierzchniowych.

Jednocześnie obecność przewodzących zanieczyszczeń jest przyczyną zmiany lokalizacji strefy największych napięć elektrycznych układu. Analizy quasistatyczne oraz uwzględniające konduktywność materiałów wskazały na największe narażenia występujące w okolicy punktu potrójnego, podczas gdy przewodzące zanieczyszczenia powierzchniowe redukują narażenia elektryczne w tej strefie, wskazując na większe wartości pola elektrycznego w okolicy sworznia i pierścienia mocującego. Przyczyną jest ekranowanie praktycznie ekwipotencjalną powierzchnią zanieczyszczeń.

## Podsumowanie

Uwzględnienie w analizie rozkładu pola elektrycznego konduktywności materiałów konstrukcyjnych prowadzi do zmiany wyznaczonych analitycznie napięć elektrycznych układu. Porównanie obrazów pola na rysunkach 2 i 3 pozwala na stwierdzenie, że uwzględnienie konduktywności materiałów powoduje zwiększenie napięć elektrycznych oraz zmianę rozkładu pola włącznie ze zmianą lokalizacji strefy największych napięć. Jest to efektem znacznych różnic wartości konduktywności materiałów. Obecność zanieczyszczeń przewodzących na powierzchni kłosa powoduje ograniczenie napięć wewnętrznych w izolacji, których największe wartości występują w otoczeniu pierścienia.

Przeprowadzona analiza wskazuje na możliwość uwzględnienia wpływu czynników zewnętrznych na własności elektryczne materiałów konstrukcyjnych stosowanych w układach izolacyjnych, np. temperatury. Możliwe jest także zastosowanie tej metody do określenia własności układów w dziedzinie częstotliwości, co pozwala np. na dobór odpowiednich sposobów kompensacji transmitancji częstotliwościowej układów.

Praca była dofinansowana przez Komitet Badań Naukowych w ramach umów o badania własne nr 10.10.120.432

## LITERATURA

- [1] Pohl Z., Izolatory elektroenergetyczne, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław, 1995
- [2] Chrzan K. L., Skoncentrowane wyładowania elektryczne i strefy suche na zabrudzeniowych izolatorach powietrznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. LXXVIII, Nr 10s/2002, 53-56
- [3] Bretuj W., Fleszyński J., Beroual A., Zachowanie się kropli wody i wyładowania na hydrofobowej powierzchni izolacyjnej w polu elektrycznym, *IV Ogólnopolskie Sympozjum „Inżynieria Wysokich Napięć IW-98”*, 25-27 czerwca 1995, Poznań, 1995, 91-95
- [4] Słowikowski J., Sobierajska E., Życki Z., Nowogórski P., Poradnik inżyniera elektryka, *Materiałoznawstwo elektrotechniczne, WNT Warszawa*, wydanie drugie
- [5] Zhou P., Numerical analysis of electromagnetic field, *EESSES*, 1993, 75-123
- [6] ANSYS Inc., ANSYS 5.6 On-line HTML Documentation, electronic version, 1994

**Autor:** mgr inż. Andrzej Jackowicz-Korczyński, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: [ajk@agh.edu.pl](mailto:ajk@agh.edu.pl)