



Grzegorz MASŁOWSKI, Robert ZIEMBA

Politechnika Rzeszowska, Zakład Podstaw Elektrotechniki i Informatyki

Badanie oddziaływania prądu piorunowego na przewody podziemne

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki analizy w dziedzinie częstotliwości oddziaływania prądu piorunowego na przewody podziemne w przypadku bezpośredniego wyładowania piorunowego w pobliżu słup linii elektroenergetycznej. Wyznaczono rozkład potencjału elektrycznego na powierzchni przewodu oraz wzdłuż profilu leżącego w pobliżu tego przewodu jak również na powierzchni ziemi. Zbadano wpływ rezystywności ziemi na otrzymanywane wyniki.

Abstract. (Investigation of the influence of lightning current on the underground conductors). The paper presents the influence of the lightning current on underground conductors. The frequency domain analysis was made in the case of direct lightning strike at a nearby overhead transmission line support. The electric potential was calculated on the wire surface and along the profile situated close to this wire as well as on the ground surface. The influence of ground resistivity was examined on received results.

Słowa kluczowe: wyładowania atmosferyczne, przewód podziemny, analiza układów w dziedzinie częstotliwości, metoda momentów.

Keywords: lightning discharges, underground conductor, system analysis in frequency domain, momentum method.

Wstęp

W ostatnich latach coraz więcej uwagi poświęca się ochronie urządzeń technicznych przed bezpośrednim oddziaływaniem prądu piorunowego, jak również przed tzw. piorunowym impulsem elektromagnetycznym LEMP (Lightning Electromagnetic Impulse) [1, 2, 3, 4]. W trakcie analizy konkretnych układów fizycznych wykorzystywane są modele, które można umownie sklasyfikować wg następujących kategorii:

- modele inżynierskie
- modele obwodowe z wykorzystaniem elementów skupionych i rozłożonych
- modele hybrydowe
- modele polowe wykorzystujące bezpośrednio rozwiązania równań Maxwella

Zakres ważności ww. modeli odnośnie konkretnych układów fizycznych oraz możliwości ich stosowania jest obecnie szeroko dyskutowany między innymi w związku z coraz większymi mocami obliczeniowymi współczesnych komputerów [5, 6].

Artykuł prezentuje efektywność wykorzystania metody polowej w trakcie modelowania układów podziemnych narażanych na wyładowania atmosferyczne. Rozważane są układy o różnym stopniu złożoności, które pomimo tego modeluje się w ten sam sposób, a jedyne różnice w trakcie symulacji komputerowych związane są z mniej lub bardziej złożonym zbiorem danych wejściowych oraz krótszym lub dłuższym czasem obliczeń numerycznych. Zalety tej nie posiada metoda obwodowa, która jako szczególnie przypadkowy przypadek metody polowej, znacznie komplikuje się przy rozpatrywaniu bardziej złożonych układów. Główne trudności z jakimi można się spotkać podczas jej stosowania to brak możliwości dokładnego uwzględnienia wszystkich istniejących w układzie sprzężeń pojemnościowych i indukcyjnych, reprezentowanych poprzez parametry skupione lub rozłożone, jak również konieczność stosowania bardzo uproszczonych modeli stratnej ziemi. Zaawansowane modele matematyczne oraz złożone metody numeryczne nie stanowią przeszkody w używaniu oprogramowania wyposażonego w przyjazny, najczęściej już graficzny, interfejs użytkownika. Pomimo tych nie kwestionowanych zalet, należy jednak pamiętać, iż podejście polowe nie jest również pozbawione pewnych

założeń upraszczających, z których należy zdawać sobie sprawę podczas interpretacji wyników badań komputerowych [7].

Założenia metody obliczeniowej

Ogólne rozwiązanie analityczne równań Maxwella, w przypadku złożonych układów liniowych, otrzymuje się w dziedzinie częstotliwości, czyli dla pojedynczego wymuszającego sygnału harmonicznego. Analiza czasowa zjawisk jest również możliwa, dzięki wykorzystaniu prostego i odwrotnego przekształcenia Fouriera. Proste przekształcenia Fouriera pozwala określić, dla zadanego zmiennego w czasie sygnału wejściowego $x(t)$, reprezentatywny zbiór częstotliwości, dla których należy wyznaczyć odpowiedzi rozpatrywanego układu. Odpowiedzi te definiują transmitancję układu $H(j\omega)$, a właściwy dobór częstotliwości, dla których przeprowadza się analizę w dużym stopniu determinuje dokładność wyjściowego przebiegu czasowego $y(t)$. Można zatem zapisać:

$$(1) \quad y(t) = F^{-1}\{H(j\omega)F[x(t)]\}$$

gdzie operatory F i F^{-1} oznaczają odpowiednio proste i odwrotne przekształcenie Fouriera.

Podczas analizy rozpatrywanych w artykule układów przyjęte zostały następujące podstawowe założenia upraszczające [8]:

- ziemia i powietrze stanowią dwa jednorodne ośrodki w kształcie półprzestrzeni rozdzielonych pomiędzy sobą poziomą płaszczyzną,
- ziemia i przewody zdefiniowane są jako ośrodki stratne, liniowe i izotropowe,
- przewody są cylindryczne i może być do nich zastosowana aproksymacja „cienkodrutowa”, tzn. zakłada się, że długość tych przewodów jest znacznie większa od ich średnicy
- funkcja wymuszająca rozptył prądów w przewodach i rozkład pola elektromagnetycznego w przestrzeni, zrealizowana jest za pomocą arbitralnie zdefiniowanego idealnego źródła prądu, przy czym przyjmuje się, że obwód zawierający to źródło zamyka się w nieskończoności poprzez tzw. ziemię odniesienia oraz

że nie uwzględnia się oddziaływania przewodów tego źródła na układ.

W konkretnych przypadkach rozpatrywanych w dalszej części artykułu idealne źródło prądu reprezentuje prąd piorunowy wyładowania powrotnego, dopływający do układu na skutek bezpośredniego wyładowania atmosferycznego.

Podstawy matematyczne metody obliczeniowej

Głównym założeniem metody obliczeniowej jest konieczność spełnienia przez pole elektryczne warunku brzegowego na powierzchni przewodów

$$(2) \quad \mathbf{t} \cdot (\mathbf{E}^P + \mathbf{E}^T) = I Z_w$$

gdzie \mathbf{t} jest jednostkowym wektorem stycznym do powierzchni przewodu, \mathbf{E}^P to zewnętrzne pole istniejące niezależnie od rozpatrywanego układu, natomiast \mathbf{E}^T oznacza tzw. pole elektryczne rozproszone, wytwarzane przez prąd płynący w rozpatrywanym przewodzie.

Prąd ten z kolei można traktować jako reakcją przewodów na zewnętrzne pole \mathbf{E}^P . Ponadto w równaniu (2) I oznacza amplitudę zespoloną prądu płynącego wzdłuż osi przewodu, a Z_w jest impedancją wewnętrzną tego przewodu. Znając zatem pole zewnętrzne \mathbf{E}^P można na podstawie warunku brzegowego (2) oraz równań Maxwella zapisać równanie całkowe, z którego wyznacza się rozkład prądów w przewodach [9]

$$(3) \quad \mathbf{t} \cdot \mathbf{E}^i = I Z_w - \frac{j\omega\mu_1}{4\pi} \int_l I(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dl$$

gdzie: μ_1 jest przenikalnością magnetyczną ośrodka, przyjmowaną zwykle dla ziemi i powietrza jako równą μ_0 , ω oznacza pulsację dla której rozpatrywany jest układ, natomiast $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ jest funkcją Greena uwzględniającą ogólne rozwiązanie problemu promieniowania dipola prądowego w obecności stratnej ziemi [7].

Równanie całkowe (3) rozwiązuje się wykorzystując metodę momentów (MoM), która pozwala zredukować problem wyznaczenia rozpręgu prądu w przewodach do rozwiązania układu równań liniowych. Układ ten zawiera współczynniki, które reprezentują impedancję własną i wzajemną poszczególnych segmentów, na które został podzielony układ przewodów. Podejście takie umożliwia uwzględnienie oddziaływania każdego segmentu z wszystkimi pozostałymi.

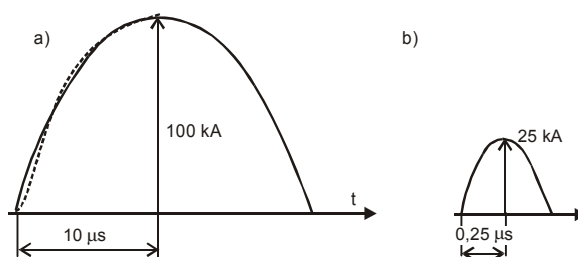
Oprócz prądu płynącego wzdłuż osi przewodu, stosowana w artykule metoda uwzględnia również prąd, związany ze składową pola elektrycznego prostopadłą do powierzchni przewodów. Występowanie tego prądu umożliwia m. in. spełnienie warunku, zgodnie z którym na końcu ostatniego segmentu, znajdującego się w powietrzu, prąd powinien być równy zero. Porzeczny prąd występujący wzdłuż całego przewodu wynika z równań Maxwella i składa się z prądu przewodzenia i prądu przesunięcia zgodnie z zależnością

$$(4) \quad I_{\perp} = \mathbf{n} \cdot (\boldsymbol{\sigma} + j\omega\boldsymbol{\epsilon}) \mathbf{E}$$

gdzie: \mathbf{n} jest jednostkowym wektorem prostopadłym do powierzchni segmentu, natomiast $\boldsymbol{\sigma}$ i $\boldsymbol{\epsilon}$ to odpowiednio przewodność i przenikalność dielektryczna ośrodka znajdującego się wokół przewodu.

Analiza układów w dziedzinie częstotliwości

Opisana we wstępie metoda analizy układów w dziedzinie częstotliwości zaimplementowana jest w programie HIFREQ, który wchodzi w skład pakietu CDEGS [10]. Przedstawione w dalszej części artykułu wyniki pokazują rozkład potencjału elektrycznego w ziemi i wzdłuż przewodu podziemnego dla różnych modeli słupa, przez który przepływa prąd piorunowy wyładowania powrotnego. Założone zostało wymuszenie prądowe w kanale wyładowania w postaci przebiegów harmonicznych, o częstotliwościach 25 kHz i amplitudzie 100 kA oraz 1 MHz i amplitudzie 25 kA. Przebiegi takie mogą być wykorzystane do reprezentacji pierwszej i kolejnych składowych wyładowania powrotnego. Dla tak dobranych częstotliwości, przedstawionych na rys. 1, czas narastania prądu do wartości maksymalnej wynosi odpowiednio 10 μ s i 0,25 μ s, czyli tyle samo jak dla standardowych udarów piorunowych odpowiednio 10/350 μ s i 0,25/100 μ s.

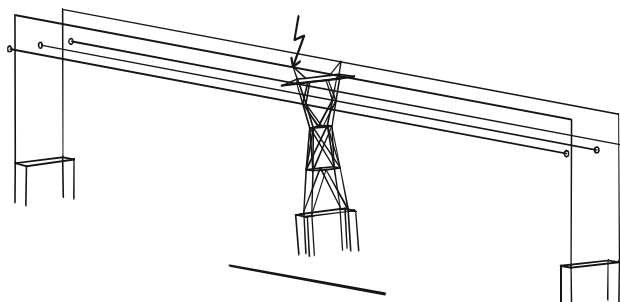


Rys. 1. Przebiegi harmoniczne wybrane do reprezentowania pierwszej i kolejnych składowych wyładowania powrotnego: a) fragment przebiegu o częstotliwości 25 kHz i amplitudzie 100 kA wraz z zaznaczonym czołem znormalizowanego udaru głównego wyładowania powrotnego, b) fragment przebiegu o częstotliwości 1MHz i amplitudzie 25 kA

Wykorzystanie takich przebiegów harmonicznych, uzasadnione może być faktem, iż najczęściej badane są tylko skutki oddziaływania stromego czoła fali udarowej. Z drugiej strony metoda polowa wymaga czasochłonnych obliczeń, nawet dla pojedynczej częstotliwości, ze względu na konieczność wyznaczania dla stratnej ziemi całek Sommerfelda. W przypadku pełnej analizy czasowej układ powinien być analizowany dla wielu częstotliwości, które reprezentują widmo sygnału wymuszającego. Porównanie wyników analizy czasowej z wynikami uzyskanymi dla pojedynczych częstotliwości, zawarte w pracy [11], pokazuje iż właściwie dobrane wymuszenia sinusoidalne mogą być wykorzystywane podczas wstępnej analizy układu.

Geometria badanego układu

Do analizy oddziaływania prądu piorunowego na przewody podziemne przyjęto układ pokazany na rys. 2.

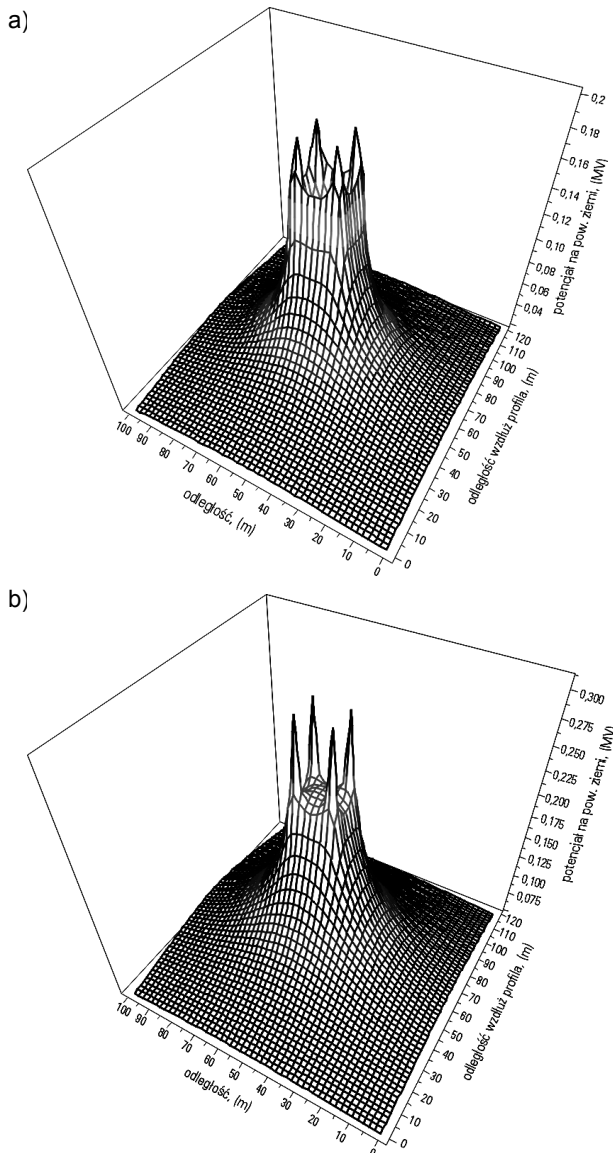


Rys. 2. Badany układ przewodu podziemnego w sąsiedztwie linii elektroenergetycznej

Reprezentuje on fragment napowietrznej linii elektroenergetycznej (dwa przęsła o rozpiętościach równych 400 m) gdzie środkowy słup jest reprezentowany przez konstrukcję zbliżoną do rzeczywistej budowy słupa, natomiast słupy skrajne są reprezentowane jako prostoliniowe połączenia przewodów odgromowych z uziemieniem. Za punkt uderzenia pioruna przyjęto miejsce zawieszenia jednego z przewodów odgromowych na środkowym słupie. Przewód podziemny, w którym badano oddziaływanie prądu piorunowego umieszczony został na głębokości 0,7 m wzdłuż linii elektroenergetycznej w odległości 50 m od osi linii. Uwzględniono dwa rodzaje przewodów: przewód izolowany i przewód bez izolacji. Zbadano wpływ parametrów ziemi poprzez wykonanie obliczeń dla przewodności gruntu $\sigma_g = 0,01$ S/m oraz $\sigma_g = 0,002$ S/m.

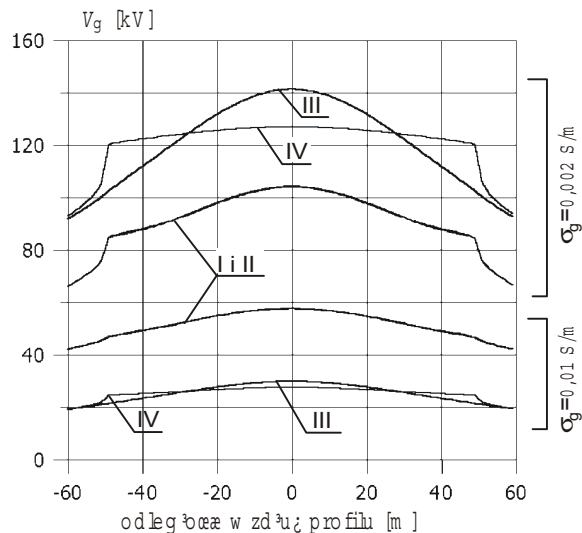
Wyniki obliczeń potencjału ziemi i przewodu

Dla zobrazowania oddziaływania prądu piorunowego na otoczenie, na rys. 3 przedstawione zostały rozkłady potencjału elektrycznego na powierzchni ziemi wokół środkowego słupa badanego układu.

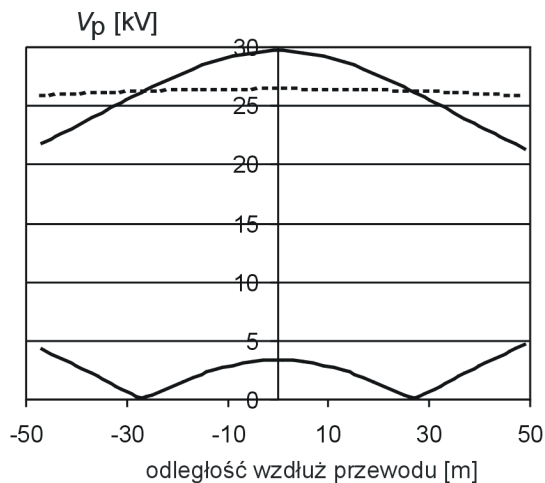


Rys. 3. Rozkład potencjału na powierzchni ziemi wokół słupa przy wymuszeniu: a) 100 kA, 25 kHz; b) 25 kA, 1 MHz

Celem zbadania oddziaływania prądu na przewód podziemny wyznaczono najpierw potencjał ziemi na profilu w pobliżu przewodu podziemnego (umieszczonego 5 cm nad przewodem), a następnie potencjał tego przewodu oraz potencjał izolacji (dla przewodu izolowanego). Wpływ przewodności ziemi na rozkłady potencjału w pobliżu przewodu, dla przewodności gruntu $\sigma_g = 0,01$ S/m oraz $\sigma_g = 0,002$ S/m, pokazano na rys. 4.

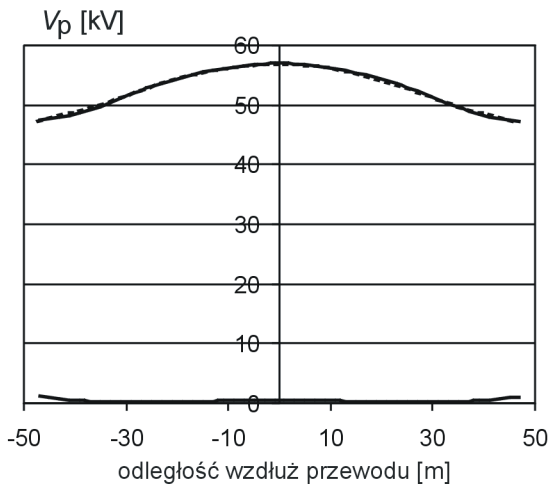


Rys. 4. Potencjał wzdłuż profilu dla różnych konduktywności gruntu: I – 1 MHz, 25 kA – przewód bez izolacji; II – 1 MHz, 25 kA – przewód izolowany; III – 25 kHz, 100 kA – przewód bez izolacji; IV – 25 kHz, 100 kA – przewód izolowany



Rys. 5. Potencjał przewodu (linia przerywana) i jego izolacji (linia ciągła) oraz wartość bezwzględna różnicy tych potencjałów dla wymuszenia 25 kHz, 100 kA

Na przedstawionych wykresach (rys. 5 i 6) pokazane zostały między innymi rozkłady potencjału elektrycznego na powierzchni przewodu i izolacji oraz wartości bezwzględne różnicy potencjałów przewodu i izolacji dla opisanych wcześniej wymuszeń, reprezentujących składowe prądu wyładowania atmosferycznego. Jeśli przewód znajduje się w stratnej ziemi to można przyjąć nawet dla częstotliwości rzędu kilku MHz, że spełniony jest warunek $\sigma_g \gg \omega \epsilon$ i oddziaływanie prądu piorunowego ma charakter konduktancyjny.



Rys. 6. Potencjał przewodu (linia przerywana) i jego izolacji (linia ciągła) oraz wartość bezwzględna różnicy tych potencjałów dla wymuszenia 1 MHz, 25 kA

Rozpływający się w ziemi prąd piorunowy oddziałując na przewód podziemny indukuje wzdłuż niego potencjał, przy czym dla częstotliwości 25 kHz i amplitudy 100 kA można zauważyć dużą różnicę potencjałów na izolacji, dochodzącą do 5 kV a dla częstotliwości 1 MHz i amplitudy 25 kA różnica ta wynosi maksymalnie 1,2 kV.

Wyniki te obrazuje zagrożenie dla izolacji przewodów powstające w pobliżu miejsca spływu prądu piorunowego do ziemi.

Podsumowanie

Przedstawione wyniki symulacji komputerowych pokazują możliwości metody polowej, która umożliwia analizę złożonych układów liniowych. Pominięcie zjawisk nieliniowych występujących w trakcie przepływu prądu piorunowego w ziemi było możliwe dzięki przyjęciu złożonej konfiguracji słupa linii elektroenergetycznej, która narażona jest na bezpośrednie wyładowania atmosferyczne. Należy pamiętać, iż założenie to może czasami nie być spełnione, szczególnie na terenach górzystych, gdzie konduktywność gruntu jest bardzo mała. Przedstawione w artykule rozkłady potencjału elektrycznego obrazują zróżnicowany charakter oddziaływania prądu piorunowego na przewody podziemne w zależności od częstotliwości przyjętego wymuszenia.

Duży wpływ ma również wartość konduktancji ziemi i dlatego należy przypuszczać, iż dokładny model polowy efektywniej opisuje zachodzące zjawiska. Dalsze prace zmierzają będą w kierunku pełnej analizy czasowej rozpatrywanych układów dla standardowych uderów piorunowych.

LITERATURA

- [1] IEC 61312-1, 1995, Protection against lightning electromagnetic impulse. Part 1: General principles
- [2] IEC 61312-2, 1999, Protection against lightning electromagnetic impulse (LEMP). Part 2: Shielding of structures, bonding inside structures and earthing
- [3] IEC 61312-3, 1999, Protection against lightning electromagnetic impulse (LEMP). Part 3: Requirements of surge protective devices (SPDs)
- [4] IEC 61312-4, 1998, Protection against lightning electromagnetic impulse. Part 4: Protection of equipment in existing structures
- [5] Masłowski G., Ziemia R., Shielding of structures in the case of direct lightning strike. *26th International Conference on Lightning Protection*, Cracow, Poland, 2002, 562-567
- [6] Masłowski G., Ziemia R., Magnetic field attenuation inside a structure with an unscreened window for case of direct and nearby lightning strikes. *EMC Zurich'03*, Zurich, Switzerland, 2003, 575-580
- [7] Sommerfeld A.: Uber die Ausbreitung der Wellen in der drahtlosen Telegraphie. *Ann. Phys.*, vol. 28, , 1909, 665-720.
- [8] Dawalibi F., Grcev L., An Electromagnetic model for transients in grounding systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol: 5, No. 4, Oct. 1990, 1773-81
- [9] Miller E. K. Poggio A. J., Burke G. J., Selden E. S., Analysis of a Wire Antenna in the Presence of a conductive Half-space. Part I: The Vertical Antenna in a Free Space. Part II: The Horizontal Antenna in a Free Space. *Canadian Journal of Physics*, vol. 50, and 2614-2627, 1970, 879-888
- [10] HIFREQ User's Manual: Low and High Frequency Electromagnetic Field Analysis Buried and Overhead Conductor Networks, SES & Tech. Ltd., Montreal, Canada 1997
- [11] Masłowski G., Gamracki M., Protection of Structures against LEMP. *IEEE Bologna POWER TECH 2003*, (w druku)

Autorzy: dr inż. Grzegorz Masłowski, Politechnika Rzeszowska, Zakład Podstaw Elektrotechniki i Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, E-mail: masloprz@prz.rzeszow.pl; dr inż. Robert Ziemia, Zakład Podstaw Elektrotechniki i Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, E-mail: ziemia@prz.rzeszow.pl