



Barbara FLORKOWSKA¹, Wiesław NOWAK¹, Rafał TARKO¹, Fryderyk ŻUREK²

Akademia Górniczo Hutnicza w Krakowie, Katedra Elektroenergetyki (1)
ENION S.A. Oddział w Krakowie, Zakład Energetyczny Kraków, Rejon Wysokich Napięć (2)

Badania pól elektrycznych i magnetycznych o częstotliwości sieciowej w aspekcie oceny warunków eksploatacji rozdzielni 110 kV

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów pola elektrycznego i magnetycznego o częstotliwości 50 Hz w wybranych rozdzielniach 110 kV. Określono strefy ochronne ze względu na występujące wartości natężenia pola elektrycznego.

Abstract. (Investigations of the electric and magnetic fields with 50 Hz frequency to estimate the exploitation conditions of 110 kV substations). The paper presents the measurements results of electric and magnetic fields with 50 Hz frequency in some 110 kV substation. Protection zones have been determined by means of the measured results of electric and magnetic stress.

Słowa kluczowe: wysokie napięcie, rozdzielnie elektroenergetyczne, pole elektromagnetyczne, pomiary.

Keywords: high voltage, substations, electromagnetic field, measurements.

Wstęp

Pola elektromagnetyczne towarzyszące pracy urządzeń elektroenergetycznych w normalnych warunkach działania oraz w warunkach zakłóceń, stanowią w otaczającej przestrzeni narażenia dla ludzi i sąsiadujących obiektów. Wśród zagadnień związanych z tą tematyką wyróżnić można między innymi grupy problemów, które dotyczą identyfikacji pól elektromagnetycznych dla celów ochrony ludzi przed polem elektromagnetycznym.

Napowietrzne rozdzielnie elektroenergetyczne stanowią źródła pola elektromagnetycznego, które w myśl aktualnych uregulowań prawnych podlegają ocenie z punktu widzenia ochrony środowiska naturalnego [1, 2] (dla napięć znamionowych 110 kV i wyższych), a także jako czynnik szkodliwy dla zdrowia w środowisku pracy [3]. Dla bezpiecznej eksploatacji rozdzielni, na jej terenie wymagane jest więc wyznaczenie i oznakowanie stref ochronnych związanych z oddziaływaniem pól elektromagnetycznych o częstotliwości sieciowej na obsługę rozdzielni.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki pomiarów pól elektromagnetycznych o częstotliwości sieciowej, które przeprowadzono w wybranych rozdzielniach elektroenergetycznych o napięciu znamionowym 110 kV, dla oceny warunków ich eksploatacji i wyznaczenia stref ochronnych.

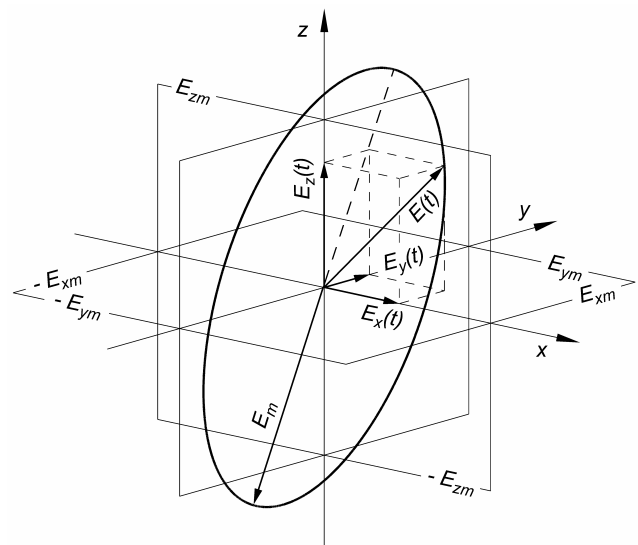
Pola elektryczne i magnetyczne o częstotliwości sieciowej

Cechą charakterystyczną pola elektromagnetycznego o częstotliwości sieciowej jest możliwość oddzielnego rozpatrywania składowej elektrycznej i składowej magnetycznej, a w dalszej konsekwencji wykorzystanie do opisu pola elektrycznego i magnetycznego praw elektrostatyki oraz magnetostatyki.

Przy powyższym założeniu, w przyjętym układzie współrzędnych prostokątnych $Oxyz$ w otoczeniu obiektu elektroenergetycznego, wektor natężenia pola elektrycznego posiada trzy składowe, które jako funkcje czasu można wyrazić zależnościami [4]:

$$(1) \quad \begin{cases} E_x(t) = E_{xm} \sin(\omega t + \varphi_x) \\ E_y(t) = E_{ym} \sin(\omega t + \varphi_y) \\ E_z(t) = E_{zm} \sin(\omega t + \varphi_z) \end{cases}$$

gdzie E_{xm} , E_{ym} , E_{zm} są amplitudami wektorów składowych, natomiast φ_x , φ_y , φ_z ich fazami. Wektor wypadkowy w danym punkcie przestrzeni opisuje więc elipsę, a tym samym pole elektryczne ma polaryzację eliptyczną – rysunek 1.



Rys. 1. Polaryzacja eliptyczna pola elektrycznego

Wartość chwilową wektora wypadkowego określa zależność:

$$(2) \quad E(t) = \sqrt{E_x^2(t) + E_y^2(t) + E_z^2(t)}$$

Największa wartość E_m wektora wypadkowego (rys.1) stanowi połowę długości osi wielkiej elipsy. Należy zaznaczyć, że eliptyczna polaryzacja pola elektrycznego nie pozwala posługiwać się amplitudą i fazą wektora wypadkowego, pojęcia te dotyczą bowiem tylko jego składowych.

Również w przypadku pola magnetycznego składowe wektora są funkcjami harmonicznymi [4]:

$$(3) \quad \begin{cases} H_x(t) = H_{xm} \sin(\omega t + \psi_x) \\ H_y(t) = H_{ym} \sin(\omega t + \psi_y) \\ H_z(t) = H_{zm} \sin(\omega t + \psi_z) \end{cases}$$

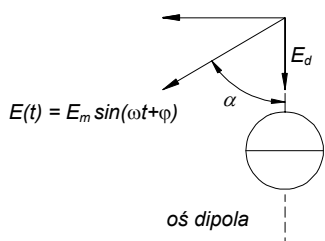
a więc pole magnetyczne również charakteryzuje się polaryzacją eliptyczną, z której wynikają takie same wnioski, jak wymienione uprzednio dla pola elektrycznego. Wartość chwilową wektora wypadkowego określa zależność:

$$(4) \quad H(t) = \sqrt{H_x^2(t) + H_y^2(t) + H_z^2(t)}$$

Zastosowana aparatura badawcza

Do pomiarów natężenia pola elektrycznego zastosowano miernik dipolowy sferyczny typu MNPE-1, który został opracowany i skonstruowany w Katedrze Elektroenergetyki AGH. Zasada pomiaru [4, 5] oparta jest na zależności między prądem wywołanym przepływem ładunku indukowanego w obydwu elektrodach, a natężeniem zewnętrznego – pierwotnie niezakłóconego obecnością przyrządu – promiennego pola elektrycznego.

W polu elektrycznym o polaryzacji eliptycznej funkcja przetwarzania określa związek między prądem a wartością E_d rzutu wektora pola elektrycznego na oś dipola (rys.2). W celu pomiaru największej wartości natężenia pola należy tak orientować położenia miernika w przestrzeni, aby oś dipola i kierunek osi wielkiej elipsy pokryły się.



Rys.2. Dipol sferyczny w zewnętrznym, pierwotnie niezakłóconym jednostajnym polu elektrycznym o natężeniu $E(t)$

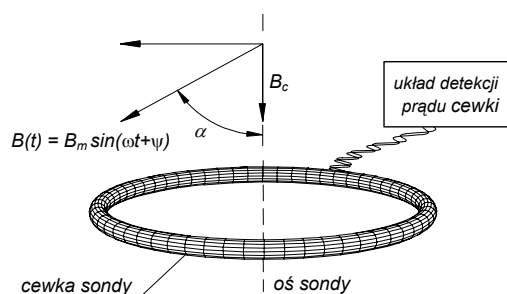
Do skalowania mierników natężenia pola elektrycznego w Katedrze Elektroenergetyki AGH skonstruowany został [6] zgodnie z wymaganiami normy PN-IEC 833:1997 [7], wzorzec pola elektrycznego w postaci układu dwóch płyt równoległych (kondensator płaski) – rysunek 3. Wzorzec oddany został do dyspozycji Głównego Urzędu Miar i w 1998 roku uczestniczył w europejskich badaniach komparacyjnych [8].

Do badań pola magnetycznego użyto miernik indukcji magnetycznej typu ELF-50D firmy Walker Scientific Inc.



Rys. 3. Wzorzec pola elektrycznego w Katedrze Elektroenergetyki AGH według wymagań normy PN-IEC 833:1997

Przyrząd ten wyposażony jest w sondę zwojową, a zasada jego działania oparta jest na zależności między prądem płynącym w obwodzie złożonym z cewki sondy i układu detekcji prądu, a indukcją mierzonego pola magnetycznego – rysunek 4.



Rys. 4. Sonda zwojowa w polu magnetycznym o indukcji $B(t)$

Podobnie jak w przypadku mierników natężenia pola elektrycznego, również mierniki indukcji wymagają takiej orientacji w polu o polaryzacji eliptycznej, aby oś sondy i kierunek osi wielkiej elipsy pokrywały się.

Tabela 1. Charakterystyka badanych rozdzielni

| Lp. | Kod | Napięcia stacji kV | System szyn zbiorczych | Liczba pól | | | | | | | |
|-----|-----|--------------------|--|------------|----|---|---|---|---|---|----|
| | | | | Σ | L | T | G | S | R | U | So |
| 1 | A | 220/110/30/15 | podwójny z szyną obejściową, system I sekcjonowany | 23 | 14 | 3 | – | 2 | 3 | – | 1 |
| 2 | B | 220/110 | potrójny niesekcjonowany | 24 | 10 | 1 | – | 4 | 7 | 2 | – |
| 3 | C | 110 | potrójny niesekcjonowany | 25 | 10 | 3 | 4 | 4 | 2 | 2 | – |
| 4 | D | 110/15 | podwójny niesekcjonowany | 16 | 8 | 2 | – | 1 | 4 | 1 | – |
| 5 | E | 110/10 | podwójny, system I sekcjonowany | 15 | 7 | 1 | – | 2 | 5 | – | – |
| 6 | F | 110/30/15 | podwójny, system I sekcjonowany | 9 | 4 | 2 | – | 1 | 2 | – | – |
| 7 | G | 110 | podwójny niesekcjonowany | 9 | 8 | – | – | 1 | – | – | – |
| 8 | H | 110/15 | podwójny, system I sekcjonowany | 16 | 7 | 2 | – | 2 | 5 | – | – |

L – pole liniowe, T – pole transformatorowe, G – pole generatorowe, S – pole sprzęgłowe, R – pole rezerwowe, U – pole uziemników, So – pole łącznika szyny obejściowej

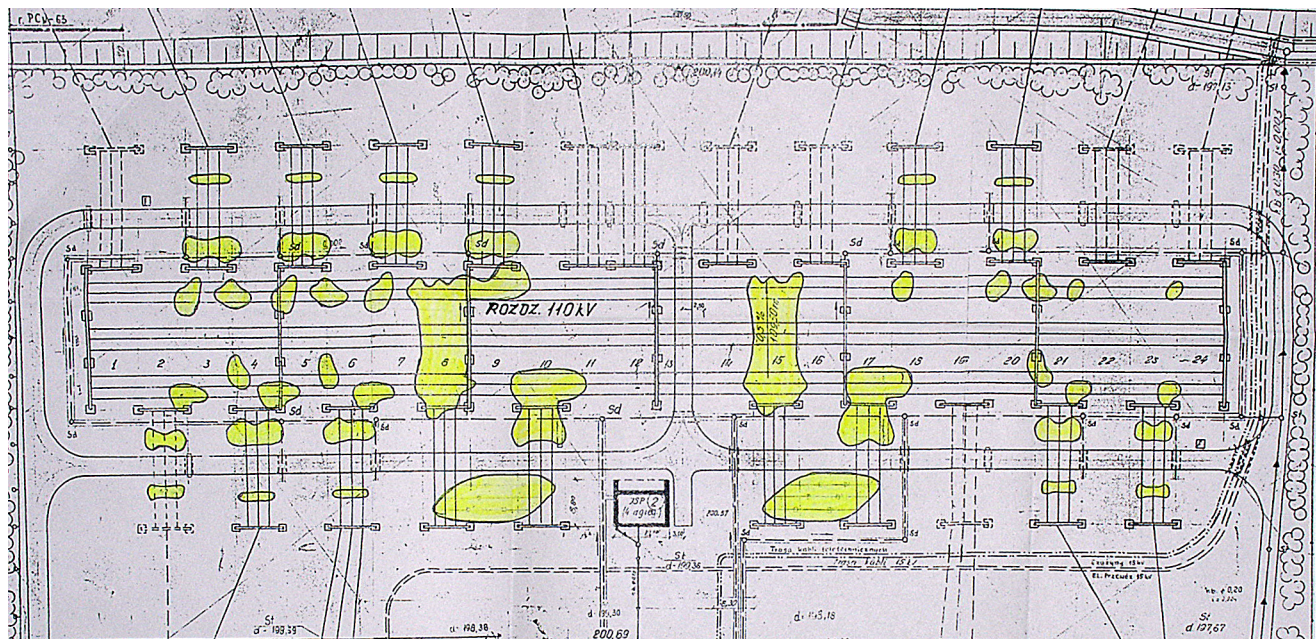
Wyniki badań

Wyniki badań pól elektrycznych i magnetycznych pochodzą z pomiarów przeprowadzonych w ośmiu rozdzielniach o napięciu 110 kV. Różniły się one pod względem rozwiązań konstrukcyjnych (tab.1), a w szczególności systemów szyn zbiorczych, liczby pól, zastosowanego wyposażenia i sposobu umieszczenia aparatów (usytuowanie wysokie albo niskie).

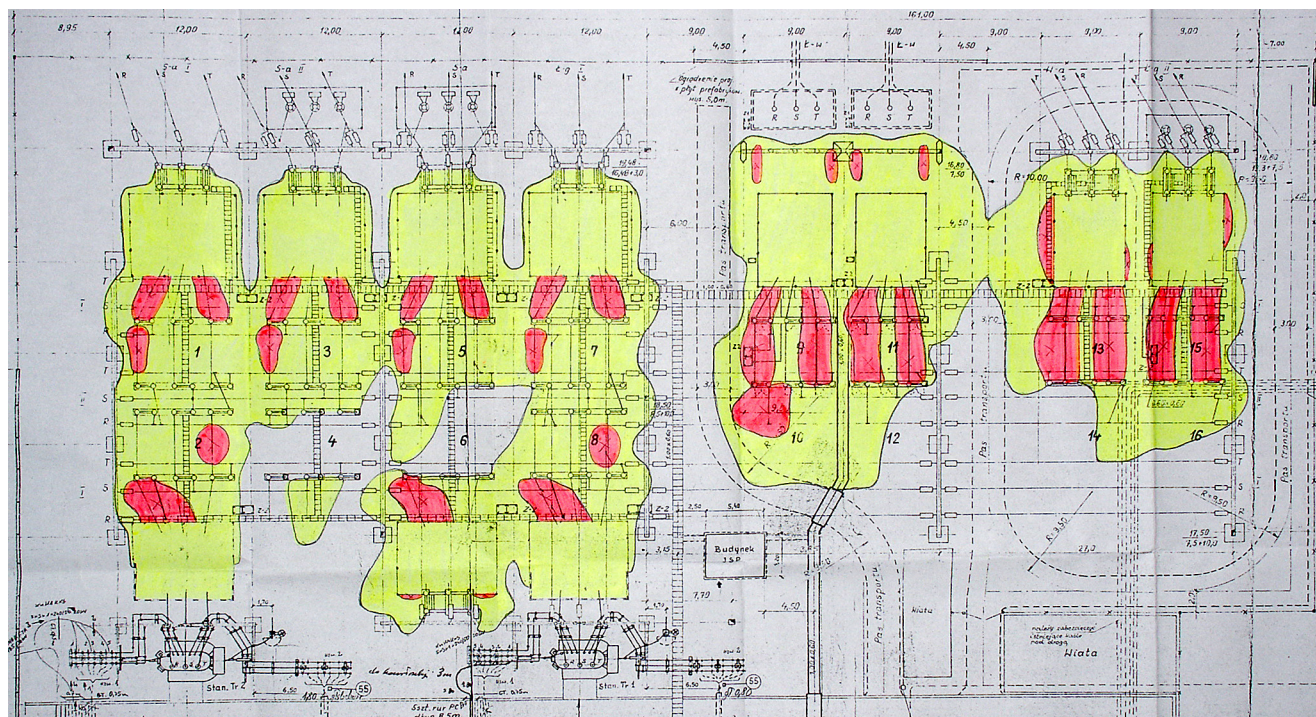
Natężenie pola elektrycznego mierzono na wysokości 1,8 m nad powierzchnią ziemi, poszukując na terenie roz-

dzielni wartości granicznych 5 kV/m, 10 kV/m oraz 20 kV/m. Indukcję magnetyczną mierzono również na wysokości 1,8 m, poszukując w danym polu wartości największej. W trakcie wykonywania pomiarów notowano wartości napięcia i obciążenie prądowe, a następnie wyniki pomiarów przeliczono na wartości odpowiadające najwyższemu dopuszczalnemu napięciu i największemu spodziewanemu obciążeniu prądowemu.

a)



b)



strefa ochronna pośrednia (5 – 10 kV/m)
 strefa ochronna zagrożenia (10 – 20 kV/m)

Rys.5. Obszary występowania stref ochronnych na terenie rozdzielni 110 kV stacji B (a) oraz D (b)

Zgodnie z Rozporządzeniem [3], w otoczeniu źródeł pól elektromagnetycznych powinny być wyznaczone i oznakowane obszary występowania pól elektromagnetycznych, jako zasięgi trzech stref ochronnych dla źródeł o częstotliwości 50 Hz – tabela 2.

Tabela 2. Strefy ochronne dla pól elektromagnetycznych o częstotliwości 50 Hz [3]

| STREFA OCHRONNA | POLE ELEKTRYCZNE | POLE MAGNETYCZNE |
|-----------------|------------------|---|
| niebezpieczna | > 20 kV/m | > 2000 A/m (> 2500 μ T) |
| zagrożenia | od 10 do 20 kV/m | od 200 A/m (250 μ T) do 2000 A/m (2500 μ T) |
| pośrednia | od 5 do 10 kV/m | od 67 A/m (83 μ T) do 200 A/m (250 μ T) |
| bezpieczna | < 5 kV/m | < 67 A/m (< 83 μ T) |

Na obszarze strefy niebezpiecznej przebywanie pracowników jest zasadniczo zabronione; dopuszcza się jednak ich przebywanie pod warunkiem zastosowania odpowiednich środków ochrony indywidualnej. Na obszarze strefy zagrożenia dopuszcza się przebywanie pracowników zatrudnionych przy źródłach przez czas ograniczony. Na obszarze strefy pośredniej dopuszcza się przebywanie pracowników zatrudnionych przy źródłach w ciągu całej zmiany roboczej.

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe obrazy występowania stref ochronnych dla pola elektrycznego w rozdzielniach 110 kV stacji B oraz stacji D. Natomiast w tabeli 3 zawarto wyznaczone na podstawie przeprowadzonych pomiarów dopuszczalne czasy przebywania obsługi w analizowanych rozdzielniach. Ponadto w tabeli 4 przedstawiono największe wartości indukcji i odpowiadające im wartości natężenia pola magnetycznego.

Tabela 3. Występowanie stref ochronnych i dopuszczalne w nich czasy przebywania dla pola elektrycznego 50 Hz

| Lp. | Kod | czas przebywania [h] w strefie | | |
|-----|-----|--------------------------------|-----------------|----------------|
| | | pośredniej | zagrożenia | niebezpiecznej |
| 1 | A | 8 | n/w | n/w |
| 2 | B | 8 | n/w | n/w |
| 3 | C | 8 | 4,1 (14,0 kV/m) | n/w |
| 4 | D | 8 | 2,7 (17,0 kV/m) | n/w |
| 5 | E | 8 | n/w | n/w |
| 6 | F | 8 | 3,8 (14,5 kV/m) | n/w |
| 7 | G | 8 | 3,4 (15,2 kV/m) | n/w |
| 8 | H | 8 | n/w | n/w |

n/w – strefa nie występuje

Tabela 4. Największe wartości indukcji i odpowiadające im wartości natężenia pola magnetycznego 50 Hz

| Lp. | Kod stacji | Indukcja μ T | Natężenie pola A/m |
|-----|------------|------------------|--------------------|
| 1 | A | 27,3 | 21,8 |
| 2 | B | 29,3 | 23,4 |
| 3 | C | 42,0 | 33,6 |
| 4 | D | 73,2 | 58,6 |
| 5 | E | 35,0 | 28,0 |
| 6 | F | 63,0 | 50,4 |
| 7 | G | 68,7 | 54,6 |
| 8 | H | 49,0 | 39,0 |

Wnioski i podsumowanie

Na obszarze wszystkich analizowanych rozdzielni w miejscach dostępnych dla obsługi, występują strefy ochronne pośrednie związane z oddziaływaniem pola elektrycznego, w których czas przebywania obsługi ograniczony jest do jednej zmiany roboczej.

W czterech z ośmiu analizowanych rozdzielni występują strefy ochronne zagrożenia związane z oddziaływaniem pola elektrycznego i w związku z tym wymagane jest ograniczenie czasu przebywania obsługi w ciągu całej zmiany roboczej.

W żadnej z analizowanych rozdzielni nie stwierdzono natomiast występowania strefy ochronnej niebezpiecznej.

Stwierdzono również, że we wszystkich badanych rozdzielniach indukcja magnetyczna nie przekracza wartości dopuszczalnej 83 μ T. Zatem ich obszary kwalifikują się do strefy bezpiecznej, a przebywanie w nich ze względu na oddziaływanie pola magnetycznego jest dozwolone bez ograniczeń czasowych.

Przeprowadzone badania wykazały, że na terenie rozdzielni 110 kV mogą istnieć strefy zagrożenia dla pola elektrycznego. Największe wartości natężeń pól elektrycznych i związane z nimi ograniczenia czasu przebywania, zależne są od wielu, niejednokrotnie subtelnych czynników natury konstrukcyjnej. Zatem, w ocenie rozdzielni w aspekcie oddziaływania pól elektromagnetycznych o częstotliwości sieciowej, wymagane jest indywidualne podejście, a wnioski wynikające z badań jednej z rozdzielni nie mogą być przenoszone na inne rozdzielnie.

LITERATURA

- [1] Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. *Prawo ochrony środowiska*. (Dz. U. Nr 62, poz. 627)
- [2] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów (Dz. U. Nr 192, poz. 1883)
- [3] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz. U. Nr 217, poz. 1833)
- [4] Nowak W., Włodek R., *Pole elektromagnetyczne w otoczeniu linii – modelowanie i pomiary w „Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce”*, tom I, praca zbiorowa pod red. H. Mościckiej-Grzesiak. Wyd. Politechniki Poznańskiej 1996, 86-104
- [5] Nowak W., *Identyfikacja pól elektromagnetycznych o częstotliwości sieciowej w otoczeniu obiektów elektroenergetycznych*. Symposium „Jakość i efektywne użytkowanie energii elektrycznej”, Kraków 17-18 listopada 2004, Wyd. Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH, 67-81
- [6] Florkowska B., Nowak W., *Wzorzec do skalowania mierników natężenia pola elektrycznego 50 Hz*. IV Konferencja Naukowo-Techniczna „Pola elektromagnetyczne 50 Hz a energetyka i środowisko”, Szczyrk, 1998. Materiały konferencyjne, 75-82
- [7] PN-IEC 833:1997 Pomiar pól elektrycznych częstotliwości przemysłowej
- [8] Eckardt H., Lippoldt R and co-authors, EUROMET Comparison of AC Electric Field Strength EUROMET.EM-S6 - Final report, Metrologia vol. 40, (Technical Supplement 2003) 01002, Institut of Physics Publishing, 2003

Autorzy: prof. dr hab. inż. Barbara Florkowska, AGH, Katedra Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: beflor@agh.edu.pl; dr inż. Wiesław Nowak, AGH, Katedra Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: wiesio@agh.edu.pl; mgr inż. Rafał Tarko, AGH, Katedra Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: rtarko@agh.edu.pl; mgr inż. Fryderyk Żurek, ENION S.A. Oddział w Krakowie, Zakład Energetyczny Kraków, Rejon Wysokich Napięć, ul. Prądnicka 74c, 31-202 Kraków, fryderyk.zurek@krakow.enion.pl