



Jan CZYŻEWSKI¹, Przemysław BURZYŃSKI¹, Maciej WNEK¹,
Marek FLORKOWSKI¹, Mariusz LUTO², Konrad PIWOWARCZYK³

ABB Sp. z o.o., Centrum Badawcze w Krakowie (1), ABB Sp. z o.o., Oddział w Przasnyszu (2),
Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej (3)

PVI - nowa technologia wskaźników obecności napięcia

Streszczenie. Opracowano nową technologię optoelektronicznego wskaźnika obecności napięcia do zastosowań w systemach średnich i wysokich napięć. Technologia wykorzystuje bezpośrednią czułość materiałów ciekłokrystalicznych na pole elektryczne wokół przewodnika pod napięciem przemiennym. Przedstawione są zasady działania wskaźnika oraz pilotażowy wskaźnik PVI opracowany przez Centrum Badawcze ABB w Krakowie i ABB Oddział w Przasnyszu. PVI znajduje zastosowanie we wnątrzowych i napowietrznych instalacjach rozdzielczych średniego napięcia.

Abstract. (PVI – new technology of indicators of voltage presence). Novel technology of optoelectronic indicator of voltage presence for application in medium- and high-voltage systems has been developed. The technology exploits the direct sensitivity of liquid-crystal materials to electric fields occurring around conductor under AC voltage. The principles of operation of the indicator and a prototype PVI product developed by ABB Corporate Research Center in Krakow and ABB sp. z o.o. Branch in Przasnysz are presented. PVI can be applied in indoor and outdoor medium voltage distribution systems.

Słowa kluczowe: wskaźnik obecności napięcia, pole elektryczne, ciekłe kryształy, wyświetlacze elektroforetyczne
Keywords: voltage indicators, electric field, liquid crystals, electrophoretic displays

Wstęp

Wskaźniki obecności napięcia pełnią bardzo istotną rolę dla personelu pracującego przy instalacjach rozdzielczych średniego i wysokiego napięcia. Wskaźniki takie pomagają lokalizować uszkodzenia jak również wskazują, kiedy można bezpiecznie uziemić system. Nawet wówczas, gdy system wskaźnikowy lub pomiarowy jest dostępny, dodatkowe, niezależne urządzenia podnoszą dodatkowo bezpieczeństwo pracy.

Typowo, układ wskazujący obecność napięcia składa się z dzielnika napięcia (pojemnościowego lub rezystywnego) redukującego napięcie do poziomu bezpośrednio mierzalnego mieszczącego się, w zależności od typu wskaźnika, w zakresie od kilku do około 100V. Proste urządzenie wskaźnikowe połączone jest wówczas z niskonapięciową stroną dzielnika [1]. W większości układów pierwotna impedancja dzielnika jest wbudowana w jeden z elementów izolacyjnych instalacji, np. przepust, przekładnik prądowy lub izolator wsporczy. Impedancja pierwotna połączona jest kablem z panelem wskaźnikowym zawierającym wtórną impedancję dzielnika oraz urządzenie wskaźnikowe. Takie układy wskazujące obecność napięcia stosuje się typowo wyłącznie w zamkniętych kompaktowych rozdzielnicach średniego napięcia.

Jednakże istnieje wiele miejsc, gdzie wskazania obecności napięcia byłyby przydatne dla personelu, ale wskaźniki nie są instalowane, aby uniknąć dodatkowej złożoności lub kosztu systemu (np. konieczności użycia kosztownych wskaźników obecności napięcia dostosowanych do pracy w warunkach napowietrznych). Przykładem takich miejsc mogą być przepusty transformatorów rozdzielczych, napowietrzne końcówki kablowe zasilające linie napowietrzne lub napowietrzne odłączniki i rozłączniki.

W idealnej sytuacji, jeżeli cena systemu wskazującego mogłaby być dostatecznie niska wskazania obecności napięcia byłyby przydatne w każdym punkcie systemu rozdzielczego. Wizją takiego rozwiązania byłby system, w którym każda szyna zbiorcza czy przewodnik przybierałaby określony kolor, będąc pod napięciem. Tym sposobem przewody pod napięciem mogłyby być łatwo rozróżnione od czasowo odłączonych lub uziemionych.

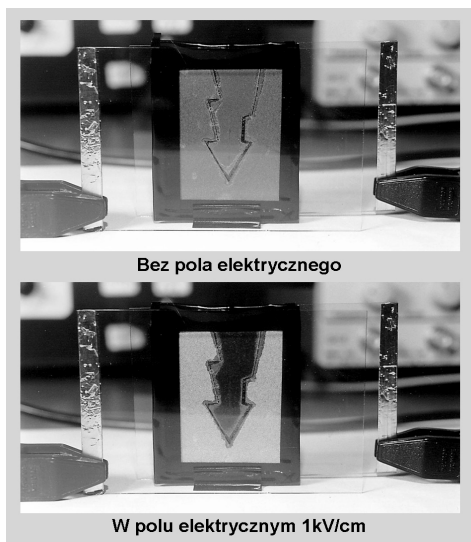
Niniejszy artykuł przedstawia technologię wskazywania obecności napięcia [2] opracowaną na bazie tej wizji w Centrum Badawczym ABB w Krakowie.

Wskaźniki czułe na pole elektryczne

Każdy przewód pod napięciem otoczony jest przez pole elektryczne generowane przez jego napięcie, więc jednym ze sposobów wskazywania obecności napięcia może być użycie materiału lub urządzenia zmieniającego swoją barwę lub inną cechę wyglądu w obecności pola elektrycznego o określonej wartości.

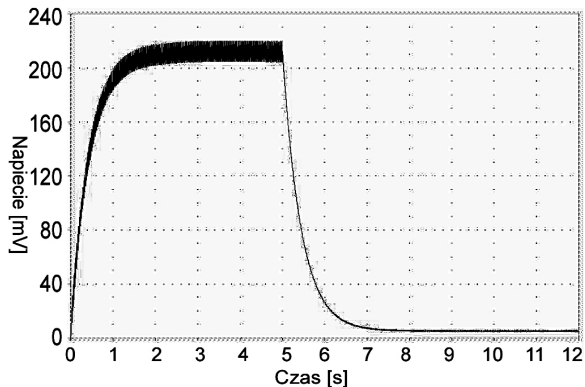
Taka zasada działania sugeruje zastosowanie technologii wyświetlaczy. Każda technologia wyświetlacza, w którym obecność pola elektrycznego prowadzi do zmian własności optycznych aktywnego materiału lub struktury może być zastosowana, pod warunkiem, że wyraźna, widoczna gołym okiem zmiana nastąpi w polu elektrycznym o określonym natężeniu. W systemach dystrybucyjnych średniego napięcia izolowanych powietrzem pola elektryczne na powierzchni przewodników wynoszą od około 0,5 kV/cm do około 5 kV/cm. Tak więc za wymagany próg czułości należy przyjąć przemienne pole elektryczne o natężeniu około 0,5 kV/cm i częstotliwości 50-60Hz. Jest to bardzo niska wartość natężenia pola w odniesieniu do charakterystyk materiałów elektrooptycznych i w żadnym wyświetlaczu o znanej technologii aktywacja obrazu nie następuje w tak niskim polu elektrycznym.

Mimo tych ograniczeń udało się wytworzyć prototypy wskaźników opartych na tych zasadach. Rysunek 1 przedstawia demonstracyjny model wskaźnika napięcia wykonanego w technologii elastycznego elektroforetycznego wyświetlacza nazywanego „elektronicznym papierem”. Wyświetlacze takie jako elektrody wykorzystują folie poliestrowe pokryte warstwą przewodzącą, a materiałem aktywnym formującym obraz są mikrokapsułki polimerowe o średnicy około 100 μm wypełnione zawiesiną płynu izolacyjnego i białych i czarnych cząsteczek pigmentowych przeciwnie naładowanych elektrycznie. Przegrupowanie cząsteczek pigmentowych w stałym polu elektrycznym o określonym zwrocie powoduje powstanie widocznych na powierzchni wyświetlacza jasnych lub ciemnych części obrazu. Do wykonania modelu wskaźnika użyto materiału wyświetlacza produkowanego przez firmę E-Ink z USA.



Rys. 1. Model demonstracyjny wskaźnika napięcia zbudowanego w oparciu o wyświetlacz elektroforetyczny

Wyświetlacze takie reagują na stałe pole elektryczne i zastosowanie w przemiennym polu wymaga dołączenia diody połączonej równolegle z wyświetlaczem [3]. Ze względu na odpowiedni rozkład części rzeczywistej i urojonej impedancji poszczególnych warstw wyświetlacza rozwiązanie takie powoduje wzmocnienie stałego pola elektrycznego w warstwie aktywnej do wartości znacznie przekraczających wartość amplitudy zewnętrznego, przemiennego pola elektrycznego. Efekt wzmocnienia pokazany jest na przykładzie wyników symulacji na rysunku 2.



Rys. 2. Przebieg napięcia odłożonego na warstwie aktywnej wyświetlacza umieszczonego w przemiennym polu elektrycznym o częstotliwości 50Hz obliczony w symulacji; włączenie pola elektrycznego nastąpiło w chwili $t = 0s$, wyłączenie w chwili $t = 5s$

Technologia elektroforetycznych wyświetlaczy tego typu nie jest jednak dostatecznie zaawansowana, aby nadawała się do zastosowań we wskaźnikach obecności napięcia w systemach energetycznych. Zbyt wąski zakres temperatury pracy oraz zbyt krótka żywotność nie pozwalają obecnie na zastosowanie komercyjne, szczególnie do zastosowań napowietrznych.

Najbardziej rozwiniętą technologią płaskich wyświetlaczy, tak pod względem dopracowania technologii i parametrów technicznych jak i technik i możliwości produkcji są wyświetlacze ciekłokrystaliczne. W szczególności, dostępne są wyświetlacze segmentowe o zakresie

temperatury pracy od $-40^{\circ}C$ do $+85^{\circ}C$, lub nawet szerszym i żywotności liczonej w dziesiątkach lat.

Prąd aktywacji na jednostkę powierzchni takich wyświetlaczy i_A wynosi około $1\mu A/cm^2$, co odpowiada polu elektrycznemu bezpośredniej aktywacji wyświetlacza (w powietrzu) wynoszącemu

$$(1) \quad E_A = \frac{i_A}{2\pi\epsilon_0 f}$$

gdzie f jest częstotliwością. Dla $i_A = 1\mu A/cm^2$ i $f = 50$ Hz pole aktywacji wynosi około 36 kV/cm, co jest wartością prawie stukrotnie wyższą niż próg czułości wymagany dla wskaźników napięcia. Mimo tego ograniczenia możliwe jest zaprojektowanie struktury wewnętrznej wyświetlacza pozwalającej na lokalne skumulowanie w obszarze wyświetlanego znaku pola elektrycznego (i prądu pojemnościowego) zebrane z całej powierzchni wyświetlacza, pozwalające na uzyskanie zadowalającej czułości wyświetlacza na pole elektryczne [4].

W oparciu o tą technologię wykonano prototypy wskaźnika napięcia nazwane *PVI* (*passive voltage indicator*) pokazane na rysunku 3. Szczególny nacisk położono na uzyskanie możliwości pracy wskaźnika w instalacjach napowietrznych. Przeprowadzono również szereg symulacji pracy wskaźnika jak również różnorakie testy prototypów.

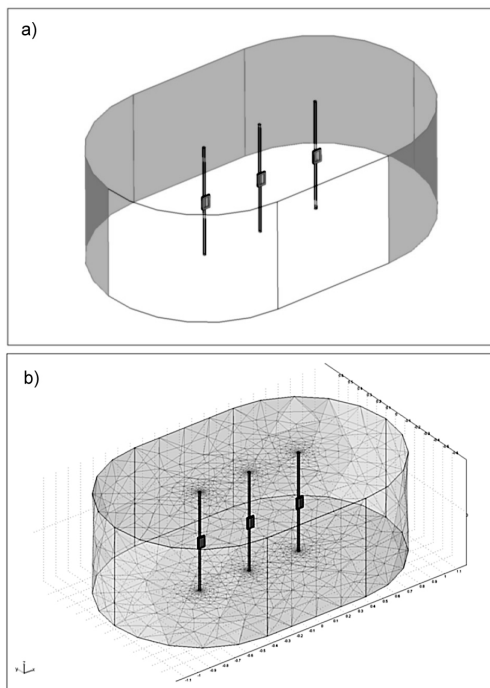


Rys. 3. Prototypy wskaźnika napięcia wykonane w oparciu o technologię wyświetlaczy ciekłokrystalicznych

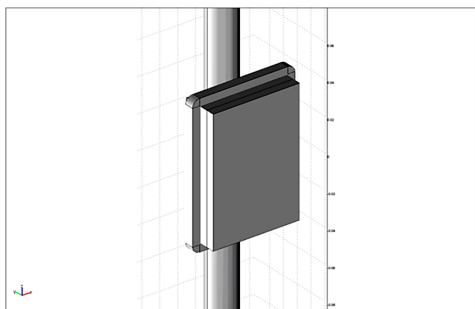
Symulacje pola elektrycznego

Pole elektryczne wokół przewodu i w pobliżu powierzchni zainstalowanego na nim wskaźnika zależy nie tylko od napięcia na przewodzie, ale również od odległości od sąsiednich przewodów i uziemionych elementów systemu. Z tej przyczyny koniecznym jest sprawdzenie specyfikacji wskaźnika w zależności od tych parametrów. Do oceny tych zależności przeprowadzono symulacje komputerowe.

W tym celu zbudowano 3-wymiarowy model wskaźników zainstalowanych na linii trójfazowej. Model, przedstawiony na rysunku 4 zawiera trzy przewody fazowe i zainstalowane na nich wskaźniki oraz uziemione otoczenie linii trójfazowej w postaci otaczającej powierzchni o owalnym przekroju. Powiększony model wskaźnika przedstawiony jest na rysunku 5.



Rys. 4. a) Model geometryczny trzech wskaźników napięcia zainstalowanych na przewodach linii trójfazowej; b) siatka elementów skończonych wygenerowana w celu symulacji rozkładu pola elektrycznego



Rys. 5. Powiększony model wskaźnika napięcia użyty do celów symulacyjnych

Potencjał elektryczny przewodów odpowiadał w symulacjach linii trójfazowej o napięciu międzyfazowym 6 kV i częstotliwości 50 Hz. Owalna otaczająca powierzchnia znajdowała się na potencjale ziemi, a na górnej i dolnej powierzchni zamykającej model przyjęto warunek brzegowy pola elektrycznego równoległego do powierzchni, co odpowiada pełnej symetrii translacyjnej w obszarze poza granicami modelu.

Wynikiem symulacji było średnie pole elektryczne w pobliżu frontowej powierzchni każdego ze wskaźników. Badano zależność pola elektrycznego od podziałki międzyfazowej, tj. odległości między przewodami fazowymi, oraz od odległości uziemionej powierzchni otaczającej model od przewodów fazowych.

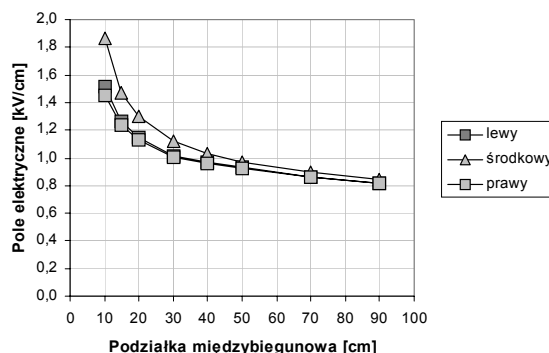
Wszystkie symulacje były przeprowadzone przy użyciu programu Femlab 3.0 [5] obliczającego rozkład potencjału i pola elektrycznego w oparciu o metodę elementów skończonych. Ilość elementów skończonych siatki (mocno zagęszczonej w pobliżu przewodów i wskaźników) sięgała 350 000.

Przykładowe wyniki symulacji przedstawione są na rysunkach 6 i 7. Symulacje były przeprowadzone dla napięcia znamionowego 6 kV. Normy [1] wymagają, aby

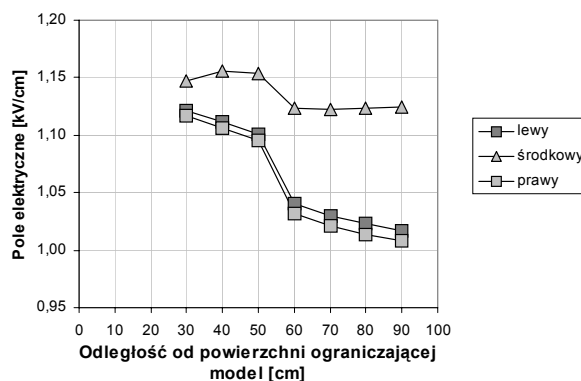
wskaźnik wskazywał obecność napięcia już na poziomie 45% napięcia znamionowego międzyfazowego.

Jak widać z wyników symulacji, dla wskaźnika o progu czułości na poziomie około 0,4 kV/cm warunek ten będzie spełniony dla napięcia znamionowego 6 kV lub wyższego i dla pełnego zakresu podziałek międzybiegunowych od 10 cm do 90 cm. Dla napięć niższych niż 6 kV wymagany byłby niższy próg czułości lub też ograniczenie zakresu zastosowania wskaźników do małych podziałek międzybiegunowych w granicach 10÷15cm.

Wyniki przedstawionych symulacji zostały również potwierdzone w badaniach doświadczalnych prototypowych wskaźników napięcia na modelowych liniach trójfazowych.



Rys. 6. Zależność pola elektrycznego przy powierzchni frontowej wskaźnika od podziałki międzyfazowej (odległości między przewodami fazowymi); odległość skrajnych przewodów od powierzchni ograniczającej model wynosi 90 cm



Rys. 7. Zależność pola elektrycznego przy powierzchni frontowej wskaźnika od odległości skrajnych przewodów od powierzchni ograniczającej model; podziałka międzyfazowa wynosi 30 cm

Testy żywotności wskaźników

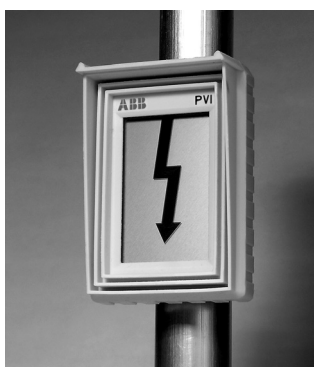
Prototypy wskaźników napięcia zostały również przebadane pod kątem żywotności. W szczególności przeprowadzono badania przyspieszonego starzenia w komorze klimatycznej w podwyższonych temperaturach i podwyższonej wilgotności oraz testy naświetlania lampą ksenonową imitującą światło słoneczne.

Testy klimatyczne wykazały, że głównym czynnikiem wpływającym na żywotność wskaźników jest bezwzględna wilgotność powietrza (ciśnienie parcjalne pary wodnej) a temperatura gra drugorzędną rolę. Ekstrapolowane wyniki testów (5 serii testów o różnych parametrach i łącznym czasie ponad 4600 godzin) wykazały czas życia powyżej 50 lat w warunkach normalnych (temperatura 25 °C, wilgotność względna 50%) oraz 20÷50 lat w warunkach tropikalnych (*damp equable climate* wg. normy IEC 60721-2-1 średnia temperatura 25 °C; średnia wilgotność względna 85% [6]). W warunkach testu najbardziej wrażliwym

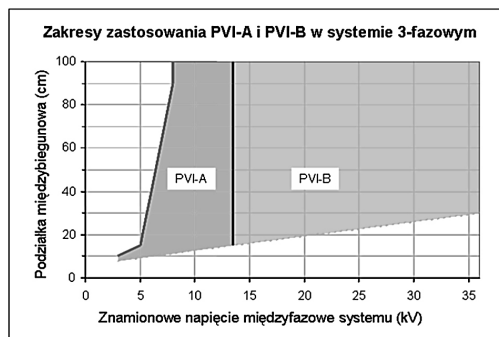
elementem okazały się polaryzatory zastosowanego wyświetlacza. Zniszczenia innych elementów wskaźnika nie zanotowano w testach.

Testy naświetlania lampą ksenonową (lampa o mocy 4500 W, energia naświetlania próbki w środkowym punkcie widma wynoszące $0,95 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$, łączny czas naświetlania 750 godzin) nie spowodowały mierzalnych zmian w wyglądzie wskaźnika i kontraście wyświetlanego znaku. Testowane były zarówno typowe wskaźniki jak również pozbawione frontowej szybki (znacznie zwiększona dawka promieniowania UV padająca na aktywny element wskaźnika).

Przeprowadzono również testy funkcjonalności wskaźnika w komorze mgły solnej, które wykazały, że na funkcjonalność wskaźnika w takich warunkach bardzo duży wpływ ma hydrofobowa charakterystyka powierzchni obudowy izolacyjnej wskaźnika. Testowano prototypy w obudowach wykonanych z różnych typów polimerów, również pokrytych cienkimi powłokami hydrofobowymi, oraz w obudowach wykonanych z elastomeru silikonowego.



Rys. 8. Prototypowy wskaźnik PVI z serii pilotowej



Rys. 9. Zakresy napięć i podziałek międzyfazowych dla wskaźników napięcia PVI-A i PVI-B pracujących w układach trójfazowych

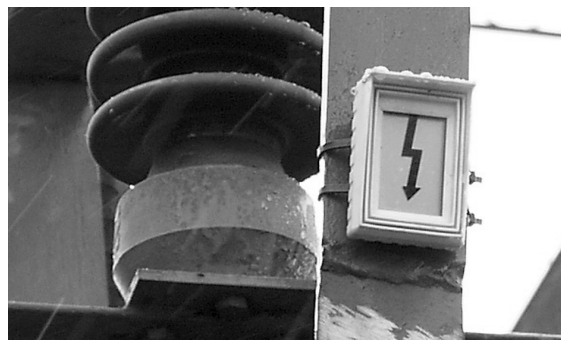
Pilotowa seria wskaźników PVI

W oparciu o wyniki testów zaprojektowano i wyprodukowano pilotową partię wskaźników PVI – wyposażonych w obudowę z elastomeru silikonowego o trwale hydrofobowej powierzchni – dającej zdolność do pracy w warunkach napowietrznych, szczególnie przy zwiększonej wilgotności lub deszczu. Pilotowy prototyp (pod napięciem) przedstawiony jest na rysunku 8.

Prototypy serii pilotowej wykonano w dwu odmianach o zróżnicowanej czułości – PVI-A do napięć znamionowych od 3,0 kV do 13,5 kV oraz PVI-B od 13,5 kV do 36 kV. Zakresy napięć i podziałek międzyfazowych, do których dostosowano pilotową partię wskaźników przedstawione są na rysunku 9.



Rys. 10. Instalacja pilotażowa wskaźników PVI na obiekcie ENION S.A. Oddział w Krakowie



Rys. 11. Jeden ze wskaźników instalacji testowej w trakcie intensywnych opadów deszczu

Wiele wskaźników z pilotowej serii zostało zainstalowanych na pracujących systemach rozdzielczych w różnych strefach klimatycznych w celach testowych. Wskaźniki zastosowane w instalacji napowietrznej na jednej z rozdzielni ENION S.A. przedstawione są na rysunku 10. Rysunek 11 przedstawia wskaźnik na instalacji pracujący podczas intensywnych opadów deszczu.

LITERATURA

- [1] High-voltage prefabricated switchgear and controlgear assemblies – Voltage presence indicating systems, *Norma IEC-61958 First edition* (2000), 11-45; Live working – Voltage detectors – Part 5: Voltage detecting systems (VDS), *Norma IEC-61243-5 First edition* (1997), 11-111
- [2] Czyżewski J., Wnęk M., Florkowski, M., Liljensberg, T., Kaltenecker, K., Don't touch; Passive Voltage Indicator – telling when the line is live, *ABB Review*, 1/05 (2005), 52-53
- [3] Czyżewski J., Piasecki W., Strümpfer R., Glatz-Reichenbach J., *Passive indicator of voltage presence, zgłoszenie patentowe PCT WO 2004/023151* (2004), *zgłoszenie patentowe UPRP P.355796* (2002)
- [4] Czyżewski J., *Liquid crystal indicator of voltage presence, zgłoszenie patentowe PCT WO 2004/074850, zgłoszenia patentowe UPRP P.358856* (2003), *UPRP P.362262* (2003)
- [5] FEMLAB version 3.0a, Electromagnetics Module, COMSOL AB, Stockholm (2004)
- [6] Classification of environmental conditions – Part 2-1: Environmental conditions appearing in nature, *Norma IEC 60721-2-1 Edition 1.1* (2002), 39

Autorzy: dr Jan Czyżewski, dr Przemysław Burzyński, dr Maciej Wnęk, dr inż. Marek Florkowski, ABB sp. z o.o., Centrum Badań w Krakowie, ul. Starowiślna 13A, 31-038 Kraków, E-mail: jan.czyzewski@pl.abb.com; dr inż. Mariusz Luto, ABB sp. z o.o., Oddział w Przasnyszu, ul. Leszno 59, 06-300 Przasnysz, E-mail: mariusz.luto@pl.abb.com; mgr inż. Konrad Piwowarczyk, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków