

Dobór metody do pomiaru rezystancji uziemienia

Streszczenie. Uziemienia w układach elektroenergetycznych należą do podstawowych elementów bezpiecznego przesyłu, rozdziału i użytkowania energii elektrycznej, a także w istotny sposób wpływają na skuteczność działania ochron przeciwporażeniowych, przeciwprzepięciowych i odgromowych. Pełnią też inne szczególnie ważne funkcje w obiektach zagrożonych wybuchem, związane np. z odprowadzaniem ładunków elektrycznych do ziemi. Odpowiedni układ uziemiający pozwala także na stworzenie warunków zapewniających poprawne i bezawaryjne działanie nowoczesnych i coraz bardziej rozbudowanych systemów elektrycznych i elektronicznych oraz pozwala na ochronę systemów przed oddziaływaniem piorunowego impulsu elektromagnetycznego. Kontrola stanu technicznego uziemienia jest zatem niezbędna w ocenie skuteczności ochrony przeciwporażeniowej i odgromowej. W artykule opisano charakterystykę metod używanych do pomiaru rezystancji i rezystywności gruntu, a także zasady wykonywania pomiarów. Autorzy ocenili także wpływ różnych typów gruntu na skuteczność uziemienia.

Abstract. Earthing in electrical power systems is one of the basic elements of safe transmission, distribution and use of electricity. It also significantly affects the effectiveness of anti-shock, surge and lightning protection. It also performs other particularly important functions in potentially explosive facilities, for example connected with the discharge of electric charges to the ground. A suitable earthing system allows to create conditions that ensure correct and failure-free operation of modern and more and more elaborate electrical and electronic systems. It also allows protection of systems against the impact of a lightning electromagnetic pulse. Checking the technical condition of earthing is therefore indispensable in assessing the effectiveness of shock protection and lightning protection. The article describes the characteristics of the methods used to measure the resistance and resistivity of the soil, as well as the rules of the measurements. The authors also assessed the effect of various soil types on the effectiveness of earthing. (Selection of the method for the earthing resistance measurement).

Słowa kluczowe: rezystancja uziemienia, rezystywność gruntu, skuteczność ochrony przeciwporażeniowej

Keywords: earthing resistance, ground resistivity, anti-shock protection.

Wstęp

Uziomy mogą być realizowane w postaci pojedynczych elementów poziomych lub pionowych (uziomy skupione) lub w postaci układu złożonego, składającego się z układu uziomów o zróżnicowanej konfiguracji (uziomy otokowe, kratowe, promieniowe). Uziomy w postaci układu złożonego są wykonywane w celu zapewnienia małej rezystancji uziemienia. Przy wykonywaniu uziomów należy zwrócić uwagę na potencjały elektrochemiczne poszczególnych elementów systemu. Gdy system będzie się składał z połączenia uziomu fundamentowego naturalnego (stal w betonie) z uziomem sztucznym, znajdującym się na zewnątrz fundamentu, wykonanym ze stali ocynkowanej, to różnica potencjałów elektrochemicznych między tymi elementami będzie wynosiła około 1V. W wyniku tej różnicy będzie przepływał prąd powodujący korozję stali w gruncie. Uziomy o takiej konstrukcji nie mogą być stosowane a powinny być one wykonane ze stali pomiedziowanej, z miedzi lub ze stali nierdzewnej.

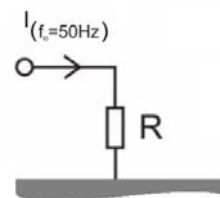
Uziemienia punktu neutralnego i przewodów PE (PEN) wykonane w sieciach typu TN oraz uziemienia punktów neutralnych w sieciach typu TT i spełniają równocześnie obie funkcje. Są to więc uziemienia ochronno – robocze, są one oznaczone symbolem R_B . Uziemienia zacisków ochronnych urządzeń elektrycznych zasilanych z sieci typu TT i IT – oznaczone symbolem R_A , pełnią jedynie rolę uziemień ochronnych. W Polsce tradycyjnie uziemienia w układach TN nazywało się uziemieniami roboczymi, zaś w układach TT i IT – uziemieniami ochronnymi. Uziemienia ochronne (w tym uziemienia ochronno – robocze) spełniają swoje funkcje przez:

- 1) przenoszenie potencjału ziemi na uziemione części urządzeń lub obwodów
- 2) stwarzanie połączenia między częściami uziemianymi a ziemią dla wykorzystania jej jako przewodu powrotnego dla prądu uszkodzeniowego.[1]

Rezystancja uziemienia i rezystywność gruntu

Charakterystycznym parametrem określającym cechy uziemienia jest jego rezystancja, przy czym rozróżnia się rezystancję statyczną, odpowiadającą przewodzeniu prądów przemiennych o częstotliwości 50 Hz oraz rezystancję

udarową, odpowiadającą przepływowi prądów piorunowych o charakterze udarowym między uziomem a ziemią odniesienia, charakteryzujących się dużą wartością prądu i bardzo krótkim czasem trwania. Rezystancja statyczna uziemienia występuje między uziomem badanym a ziemią odniesienia, zmierzona przy przepływie prądu przemiennego o częstotliwości sieciowej (przy pomiarach prądem stałym na wyniki pomiarów miałyby znaczący wpływ elektrolityczny charakter przewodności gruntu). Rezystancja ta jest miarą przydatności uziemień w ochronie przeciwporażeniowej, odgromowej i przeciwprzepięciowej. Rezystancja uziemienia zależy nie tylko od rezystywności gruntu, ale również od rodzaju i kształtu uziomu.



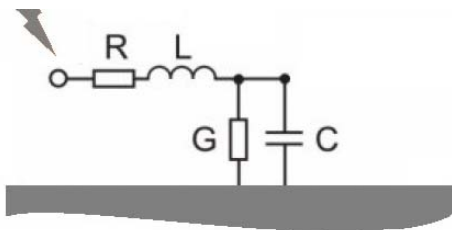
Rys. 1. Model elektryczny uziomu dla częstotliwości sieciowej [1]

Impedancja uziemienia przewodzącego prądy udarowe ma charakter nieliniowy. Jest ona funkcją natężenia oraz stromości narastania prądu, a także długości uziomu [2-6].

$$(1) \quad Z_E = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}$$

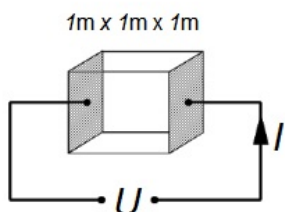
gdzie R i L oznaczają rezystancję oraz indukcyjność uziomu (np. bednarki ułożonej w gruncie), natomiast G i C reprezentują konduktywność i pojemność między uziomem i otaczającym go gruntem (rys.2)

Duża stromość narastania prądów piorunowych powoduje wzrost wartości impedancji (rezystancji) udarowej w stosunku do rezystancji statycznej. Efekt ten występuje na skutek wzrostu znaczenia składowej indukcyjnej impedancji uziemienia (zależnej od długości uziomu), a także pojawienia się (dla uziomów długich) impedancji falowej [7,8].



Rys. 2. Model elektryczny uziemienia dla wyładowania piorunowego

Rezystywność gruntu określana jest jako rezystancja między przeciwległymi ścianami sześcianu gruntu o krawędzi 1 metra rys.3.



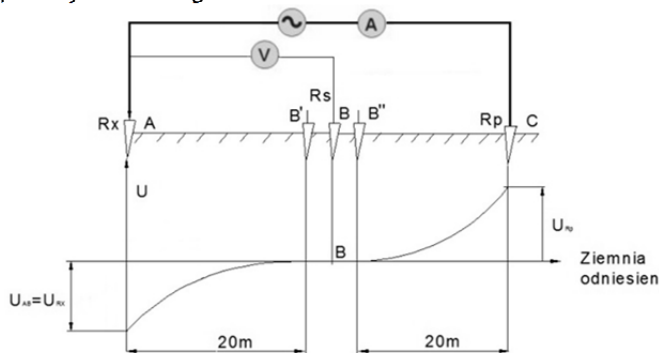
Rys. 3. Objaśnienie pojęcia rezystywności gruntu ($\rho=U/I$ gdy $U=100V$, $I=1A$ to $\rho=100 \Omega/m$) [9]

Zasada pomiaru rezystancji uziemień

Podstawowym parametrem oceny skuteczności uziemienia jest rezystancja uziemienia, mierzona między ziemią odniesienia a uziemionym przedmiotem (rys.2). Pomiar rezystancji uziemienia wykonuje się przy prądzie przemiennym. Metod stałoprądowych pomiaru rezystancji uziemienia nie stosuje się ze względu na elektrolityczny charakter przewodzenia ziemi. Według autorów, wybór stosowanej metody zależy przede wszystkim od rozległości uziemienia. W artykule ocenie podlegały:

- metoda techniczna,
- metoda kompensacyjna,
- metoda udarowa

Elektrody umieszcza się w jednej linii. Elektrode napięciową umieszcza się w połowie odległości między elektrodami. Przy pomiarze uziemień ważnym jest rozmieszczenie elektrod pomocniczych tak, by występowało miejsce potencjału zerowego - wówczas będzie poprawnie mierzony spadek napięcia na uziemieniu. Im większy rozstaw między mierzonym uziemieniem a elektrodą prądową R_p , tym szerszy jest obszar występowania potencjału zerowego.



Rys. 4. Rozkład spadku napięcia między uziemieniem badanym a pomocniczym [10]

Aby sprawdzić, czy miejsce wbicia elektrody napięciowej zostało wybrane poprawnie, należy wykonać dodatkowe dwa pomiary. Jeżeli po przestawieniu elektrody napięciowej w kierunku mierzonego uziemienia i w kierunku elektrody prądowej (najczęściej o kilka metrów) różnica między

wynikami będzie nieznaczna, należy uznać, że właściwie wybrano miejsca rozstawienia elektrod. Średnia arytmetyczna trzech wyników jest zmierzoną wartością rezystancji uziemienia. Rezystancję uziomów określa się jako stosunek ustalonego spadku napięcia na uziomie badanym do wartości prądu płynącego przez uziom [10,11] (rys. 4)

$$(2) \quad R_E = \frac{U_E}{I_E}$$

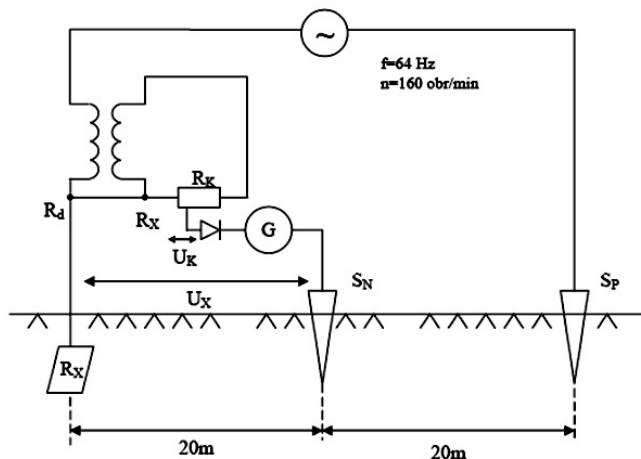
Ocena metod pomiarowych

Metoda techniczna zwana niekiedy metodą woltomierza i amperomierza, pozwala na wyznaczenie rezystancji uziemienia zgodnie ze zależnością 2. Zasada pomiaru rezystancji uziemienia tą metodą została pokazana na rysunku 4.

W celu zmierzenia rezystancji uziemienia R_E tworzy się układ obejmujący dwa obwody:

- obwód prądowy, w skład którego wchodzi uziom badany (R_x), źródło prądu, amperomierz (A) i elektroda prądowa S_p (R_p)
- obwód napięciowy utworzony przez uziom badany (R_x), woltomierz (V) i elektrodę napięciową S_N (R_s).

Poprawne wyniki pomiarów rezystancji statycznej uzyskuje się przy wymuszaniu prądu pomiarowego 50 Hz i amplitudzie około 20-krotnie większej od amplitudy prądu zakłócającego o tej samej częstotliwości. Wymuszanie takich prądów na terenach obiektów elektroenergetycznych lub na terenach dużych zakładów przemysłowych wymaga nieraz stosowania źródła o napięciu 220 V i stosunkowo dużej mocy [10-17]. Wartości napięć wywołanych prądami zakłócającymi można zmierzyć poprzez pomiar napięcia między uziomem a ziemią odniesienia bez wymuszania prądu pomiarowego. Metoda techniczna nadaje się szczególnie do pomiaru małych rezystancji uziomów. Wadą metody technicznej jest konieczność stosowania obcego źródła zasilania o stosunkowo dużej mocy i konieczność montażu układu pomiarowego.



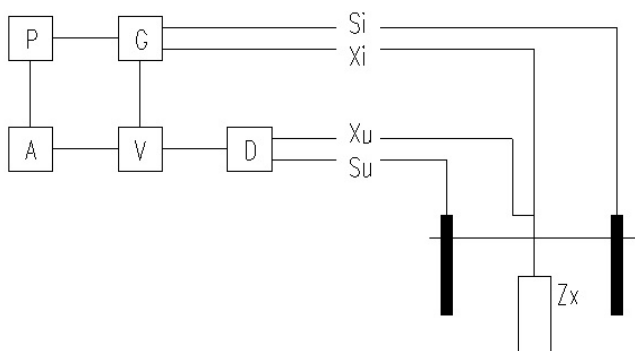
Rys. 5. Zasada pomiaru rezystancji uziomu metodą kompensacyjną

Metoda kompensacyjna, zwana metodą zerową. Metoda ta polega na porównaniu napięcia uziomowego ze spadkiem napięcia na rezystorze o regulowanej rezystancji (potencjometrze) i bezpośrednim odczycie rezystancji uziemienia, gdy ww. napięcia są sobie równe. Uproszczony schemat układu do pomiaru rezystancji uziemienia metodą kompensacyjną przedstawiono na rys. 4.

W układzie pokazanym na rys. 4 prąd pomiarowy wymuszony jest z prądnicy lub innego źródła. Pozwala to wymuszać prąd o częstotliwości różnej od częstotliwości sieciowej, pozwalającej wyeliminować wpływ prądów

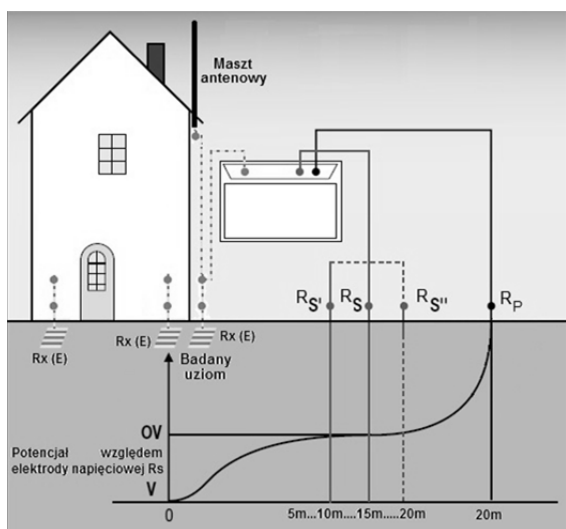
błądzących częstotliwości sieciowej na wynik pomiarów. Napięcie uziomowe względem ziemi odniesienia (względem elektrody napięciowej) kompensuje się spadkiem napięcia na potencjometrze R_x . Kompensacja występuje wtedy, gdy galwanometr G wskazuje zero. Ilość działek odczytana z potencjometru dla której pomnożona przez zakres pomiarowy wyznacza wartość mierzonej rezystancji uziomu.

Metoda udarowa przeznaczona jest do wyznaczania impedancji (rezystancji) udarowej charakteryzującej uziemienia odgromowe i nie należy stosować jej do kontroli uziemień ochronnych i roboczych (czyli uziemień pracujących przy częstotliwości sieciowej). Ponieważ prądy piorunowe cechuje znaczna stromość narastania (do $100\text{kA}/\mu\text{s}$), o skuteczności uziemienia decydują często indukcyjne spadki napięcia na poszczególnych elementach systemu uziemień. Impedancja uziemienia przewodzącego prądy udarowe jest funkcją stromości narastania prądu i jego natężenia, ale także długości uziomu [9].



Rys. 6. Zasada pomiaru rezystancji uziomu metodą udarową miernikiem WG-307W [18]

Do pomiaru wykorzystuje się dwie sondy: prądową S_i i napięciową S_u . Po uruchomieniu przetwornica P zasila generator udarów G napięciem 1 kV . Generator emituje do obwodu pomiarowego paczkę udarów prądowych o czasie czoła ok. 4 ms (WG-307W) lub ok. 1 ms (WG-307S) i amplitudzie 1 A . Woltmierz V porównuje sygnał z sondy pomiarowej, przekształcony w dzielniku D , z sygnałami wzorcowymi z generatora udarów i przez kilkanaście sekund wyświetla uśredniony wynik pomiaru.



Rys. 7. Schemat rozmieszczenia sond pomiarowych do pomiaru rezystancji uziemień w metodzie 3p

Porównanie metod pomiarowych na przykładzie pomiaru rezystancji uziemienia budynku mieszkalnego

Pomiarów rezystancji uziemienia dokonano na przykładzie uziemienia budynku mieszkalnego. Jest to budynek jednopiętrowy. Budynek ten posiada trzy uziemienia punktowe. Badanie obejmowało – uziemienia masztu antenowego. Badania przeprowadzone były metodą 3p. Sondy rozmieszczone były na cztery różne sposoby, w czterech różnych odległościach $x=5\text{ m}$, 10 m , 15 m i 20 m (rys. 6).

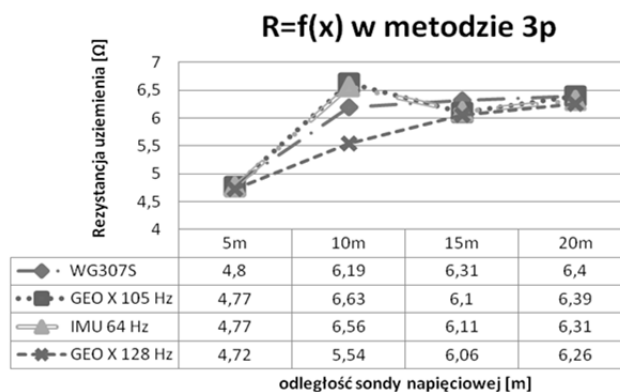
Dodatkowo wykorzystano metodę udarową w układzie z rysunku 5, odsuwając sondę napięciową R_s (S_N) podobnie jak poprzednio. Do badań wykorzystano mierniki:

IMU 64Hz – wykorzystujący metodę kompensacyjną

MRU 101 128 Hz oraz 105 Hz – wykorzystujący metodę techniczną

WG-307 S – wykorzystujący metodę udarową

Badanie rezystancji uziemienia wykonano jednego dnia, w jednakowych warunkach atmosferycznych. Wyniki przedstawiono w formie wykresu. Pomiar dla każdej odległości powtórzono 30 razy w celu wyeliminowania błędów przypadkowych.



Rys. 8. Wykres zależności rezystancji od odległości w metodzie 3p

Przedstawione wyniki udowadniają, że najważniejszym aspektem dla dokładnego pomiaru rezystancji uziemienia jest odpowiednie ustawienie elektrody napięciowej w strefie potencjału zerowego. Nasuwa się też wniosek, że przy występujących uziemieniach rozległych odpowiednia lokalizacja elektrody napięciowej bez względu na metodę pomiarową może okazać się bardzo pracochłonna i stanowić główny problem uniemożliwiający dokładny pomiar rezystancji.

Błędy popełniane przy pomiarze rezystancji uziemień

Pomiary rezystancji uziomów należy wykonać w okresie najmniej sprzyjających warunków dla eksploatacji uziomów czyli w naszych warunkach klimatycznych w okresie miesięcy letnich, od czerwca do września. Zwraca się przy tym szczególną uwagę na wpływ rezystywności gruntu na możliwość wystąpienia maksymalnych wartości rezystancji uziemienia. W celu oceny realnej wartości rezystancji uziemienia, wartość pomierzoną R_E mnoży się, przez tzw. współczynnik poprawkowy k_p wynikający z właściwości rezystywności gruntu [18, 19]:

$$(3) \quad R_{E\max} = R_E \cdot k_p$$

Największy wpływ na ewentualne błędy pomiarowe ma jednak niewłaściwe rozstawienie elektrod pomiarowych. Przy błędnym ustawieniu elektrody prądowej, tzn. zbyt bliskim jej usytuowaniu względem uziomu badanego, prowadzi do ograniczenia strefy potencjału zerowego i

niemożności jej zlokalizowania. Niewłaściwe umieszczenie elektrody napięciowej, czyli poza strefą potencjału zerowego, powoduje że wartość napięcia wykorzystywanego w metodzie technicznej, do oszacowania wartości R_E , jest większa lub mniejsza od poprawnego napięcia uziomowego.

Wnioski

Charakterystycznym parametrem określającym cechy uziemienia według autorów, jest jego rezystancja, przy czym należy rozróżnić rezystancję statyczną, odpowiadającą przewodzeniu prądów przemiennych o częstotliwości 50 Hz oraz rezystancję udarową, odpowiadającą przepływowi prądów piorunowych, o charakterze udarowym między uziomem, a ziemią odniesienia. Do badania nieraz bardzo skomplikowanych systemów uziemiających powinny być zapewnione odpowiednie do potrzeb narzędzia i metody pomiarowe, umożliwiające wykonanie pomiarów rezystancji uziemienia nie tylko metodą techniczną (niskoczęstotliwościową), ale również metodą udarową, w celu sprawdzenia, czy spełnione są warunki ochrony przed porażeniem elektrycznym, ochrony przeciwprzepięciowej i odgromowej oraz poprawnej pracy urządzeń, instalacji i sieci elektroenergetycznych w obiektach wyposażonych w uziemienia robocze i uziemienia ochronne.

Wyniki pomiarów pokazują ponadto, że nie istnieje jedna uniwersalna metoda nadająca się do pomiaru każdego rodzaju uziemień. Zdaniem autorów, uniknąć typowych błędów pomiarowych należy uwzględnić następujące kwestie:

- metody pomiarowe stosowane do kontroli stanu uziemień powinny być dobrane odpowiednio do warunków w jakich uziemienia mają spełniać swoje zadanie,
- skuteczność działania uziemień ochronnych i roboczych w pełni charakteryzuje ich rezystancja statyczna lecz uziemienia odgromowe najlepiej charakteryzuje impedancja udarowa uwzględniająca składowe indukcje uziemienia.

LITERATURA

- [1] Jabłoński W., Protective earthing and equalizing connections as indispensable elements of protection against indirect contact. *Wroclaw University of Technology*
- [2] Rozga P., Tabaka P.: Comparative Analysis of Breakdown Spectra Registered using Optical Spectrometry Technique in Biodegradable Ester Liquids and Mineral Oil, *IET Science, Measurement and Technology*, (2018) Vol. 12, No. 5, pp. 684-690, doi: 10.1049/iet-smt.2017.0229
- [3] T. Rymarczyk; J. Szumowski, P. Adamkiewicz, P. Tchórzewski, J. Sikora, „Moisture Wall Inspection Using Electrical Tomography Measurements”, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 94, no. 1, 2018, pp. 97-100.
- [4] T. Rymarczyk; J. Sikora, K. Polakowski, P. Adamkiewicz „Efficient algorithm of ultrasound and radio tomography imaging for two dimensional problems”, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 94, no. 6, 2018, pp. 62-69.
- [5] T. Rymarczyk, G. Kłosowski, “Application of neural reconstruction of tomographic images in the problem of reliability of flood protection facilities”, *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* vol. 20, no. 3, 2018, pp. 425–434
- [6] Szafrowski, D., Gumieła, J. „Analiza technicznych możliwości ograniczania zjawiska ulotu elektrycznego zrealizowana na podstawie cyfrowej identyfikacji natężenia pola elektrycznego w otoczeniu przewodów roboczych elektroenergetycznych linii WN” *Przegląd Elektrotechniczny* (2018) 94(1), pp. 113-116
- [7] PN-IEC 61024-1:2001 - Polish version
- [8] PN-EN 62305-1:2008 - Polish version
- [9] PN-EN 62305-3:2011 - English version
- [10] J. Strzałka, T. Wojsznis; Principles of measurements of earthing and evaluation of measurement results, *AGH*
- [11] Bednarek K., Nawrowski R., Tomczewski A., Three phase heavy-current busways composed of pipe-conductors in individual shields, *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 84, No 1, 2008, p. 62-64
- [12] Bednarek K., Kasprzyk L., Suppression of higher harmonic components introduction to the networks and improvement of the conditions of electric supply of electrical equipment, *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 88, No 12b, 2012, p. 236-239
- [13] Pawlak R.; Tomczyk M.; Walczak M. Durability and. Reliability Enhancement of Selected Electronic Components Achieved by Laser Technologies Conference: *24th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems MIXDES 2017*
- [14] Pawlak R.; Tomczyk M.; Walczak M. "Ablation of selected conducting layers by fiber laser" Conference: 13th International Scientific Conference on Optical Sensors and Electronic Sensors (2014) *Book Series: Proceedings of SPIE* Volume: 9291 Article Number: 92910P
- [15] Cieśla A., Skowron M., Syrek P. "Electrification of coal grains by the triboelectric method" *Przegląd Elektrotechniczny* (2017) 93 (1): 129–132.
- [16] Drzymala P., Welfle H. "Field methods for calculating the magnetic screen of large power transformers" *Przegląd Elektrotechniczny* (2012) 88 (4A) pp. 77-81
- [17] Drzymala P., Welfle H. "Analysis of electromagnetic phenomena and losses in the power transformer clamping-rods" *Przegląd Elektrotechniczny* (2012) 88 (4A) pp. 82-85
- [18] Sowa A., Comprehensive lightning and surge protection, *COSiW SEP*, Warszawa 2005
- [19] Groszek S., Kuśmierk Z., Research and evaluation of anti-shock measurement, *Lodz University of Technology*, 2000.