

Wpływ pieców łukowych na krótkotrwały (P_{st}) i długotrwały (P_{lt}) współczynnik migotania światła

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów krótkotrwałego (P_{st}) i długotrwałego (P_{lt}) współczynnika migotania światła generowanego przez zakład hutniczy, w którym zainstalowane są odbiorniki nieliniowe w postaci pieców łukowych. Przedstawiono wpływ układu kompensacyjnego wyposażonego w dwa filtry biernie (pierwszy typu „C” i drugi typu „LC”) na wartości P_{st} i P_{lt} . Opisano również wpływ zmiany transformatorów zasilających na wartości współczynników migotania światła generowanych do elektroenergetycznej sieci przesyłowej i rozdzielczej na różnych jego poziomach, tj. 400 kV i 110 kV.

Abstract. Results of measurements of short-term (P_{st}) and long-term (P_{lt}) flicker severity are presented in the paper. Tests were run in metallurgical plant with non-linear loads (arc furnaces). The impact of compensating circuit with two passive filters (C-type and LC-type) is shown. The effect of changing supply transformers on flicker severity in terms of transmission and distribution grids at different voltage levels (i.e. 400 kV and 110 kV) is also described. (**Impact of arc furnaces on short-term (P_{st}) and long-term (P_{lt}) flicker severity**)

Słowa kluczowe: fliker, parametry jakości energii elektrycznej, wyższe harmoniczne napięć i prądów, moc bierna, filtry pasywne.

Keywords: flicker, electric power quality, higher harmonics of voltages and currents, reactive power, passive filter.

Wstęp

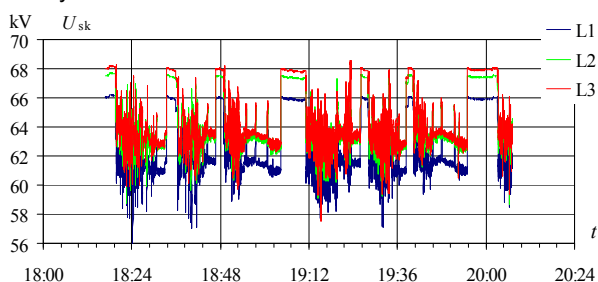
Piece łukowe pracują przy niskiej wartości współczynnika mocy oraz generują do sieci nieparzyste (3, 5, 7, ... itd.) i parzyste (2, 4, 6, ... itd.) wyższe harmoniczne prądu [1, 2]. Bardzo dynamiczny charakter pracy łuku elektrycznego powoduje negatywne oddziaływanie na sieć zasilającą [3, 4] w postaci nie tylko generowania wyższych harmonicznych prądów, ale również dużych wahań wartości napięcia zasilającego (rys. 1), co powoduje pogorszenie wartości współczynnika migotania światła. W wielu pracach opisano negatywny wpływ pieców łukowych na poziom migotania światła. W pracy [5] przedstawiono model i sposób sterowania zasilaniem elektrycznego pieca łukowego z wykorzystaniem dziedziny czasowej, który to zapewnia ograniczenie emisji krótkotrwałego flikera. Wyniki proponowanego modelu i sposobu sterowania porównano z metodami klasycznymi, opartymi na dziedzinie częstotliwościowej. Odmianą metodę sterowania piecem łukowym w celu ograniczania migotania napięcia przedstawiono w pracy [6]. Za podstawę modelowania przyjęto charakterystykę prądowo-napięciową rzeczywistego łuku. Kompensatory statyczne z wykorzystaniem łączników tyrystorowych TRC regulowane są za pomocą inteligentnego sterowania z zamkniętą pętlą, w celu regulacji napięcia w punkcie wspólnego przyłączenia (PCC). Model ten został zainstalowany w zakładzie w Iranie [6]. W artykule [7] przedstawiono model i realizację filtru aktywnego STATCOM opartego na falowniku IGBT, w celu poprawy parametrów charakteryzujących jakość energii elektrycznej, w tym zakres wahań napięcia zasilającego odbiorniki szybkozmienne, takie jak piece łukowe. Podobną metodę przedstawiono w pracy [8], z tym że wykorzystano dodatkowo zwykle filtry LC. Algorytm sterowania uwzględnia ograniczenie zaburzeń migotania, jak również filtrację nie tylko wyższych harmonicznych, ale również interharmonicznych i subharmonicznych. W pracy [4] przedstawiono pomiary i analizę pracy pieca łukowego, który ze względu na swój dynamiczny charakter powoduje pogorszenie parametrów określających jakość energii elektrycznej. Autorzy przedstawili identyfikację zjawisk pojawiających się na różnych etapach wytwarzania stali. W artykule [9] zaproponowano model elektrycznego pieca łukowego (EAF) dla opracowania efektu migotania przed instalacją EAF w systemie. Następnie sprawdzono model na rzeczywistym EAF i dokonano pomiarów w dwóch

punktach sieci zasilającej. Podobną analizę łuku elektrycznego przedstawiono w pracy [10]. W pracy [11] zaproponowano metodę hybrydową z zastosowaniem neuronowych sieci promieniowych (IRBFNN) i modelu Graya do sterowania DC i AC EAF, w celu zmniejszenia migotania P_{st} z ΔV_{10} (i P_{lt}). Przedstawioną metodę porównano z pięcioma powszechnie stosowanymi metodami sieci neuronowych i opartych na modelu Graya. Wykazano, że proponowana metoda hybrydowa zapewnia bardziej dokładną prognozę ciężkości migotania związaną z operacjami EAF niż w przypadku innych sposobów. Obciążenia i eliminację migotania napięcia pochodzących od pieców łukowych można uzyskać stosując kompensatory SVC [12]. Poprzez zmianę i aktualizację sterowania opóźnieniem kąta wyzwalań tyrystorów sterowana jest moc bierna dostarczana do układu [1]. Ze względu na zmianę rezystancji i impedancji pieca łukowego w czasie pracy, susceptancja SVC równoważy impedancję całego układu tak, aby trójfazowa impedancja obciążenia pieca łukowego była stała [12]. W pracy [13] przedstawiono stochastyczną metodę oceny cech flikera na piecu łukowych w różnych fazach wytopu. Analizę i przewidywanie flikera na EAF przedstawiono w pracy [14]. Wykorzystano tutaj modele Lapunowa w przestrzeniach fazowych. Opracowane modele przetestowano i porównano z dwoma innymi metodami analizy czasowej. W przedstawionych pracach [1-14] nie przedstawiono jednak wpływu pieców łukowych na poziom flikera na różnych poziomach napięcia i jego przenoszenie w głąb sieci elektroenergetycznej.

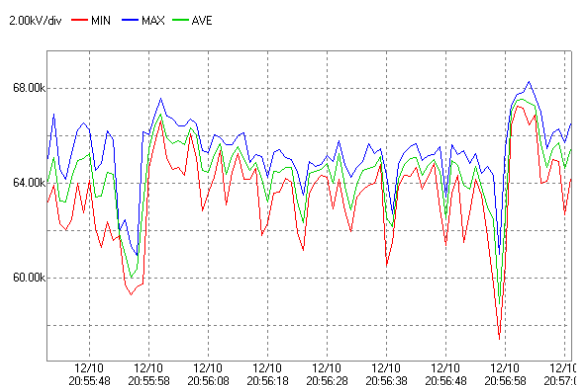
W normie [15] określono wytyczne dla zasad przyłączania instalacji szybkozmiennych do sieci elektroenergetycznych SN, WN i NN. Jednym z wymagań IEC 61000-4-15 jest utrzymanie wymaganego poziomu emisji flikera: krótkotrwałego P_{st} ("st" oznacza "short term") - otrzymywanego dla każdego okresu 10 minut oraz długotrwałego P_{lt} ("lt" oznacza "long term") - otrzymywana dla okresu 2 godzin. Kryteria jakościowe napięcia związane z flikerem są zazwyczaj określane jako P_{st} i/lub P_{lt} . P_{lt} wyznaczane jest zazwyczaj z 12 kolejnych wartości P_{st} na podstawie wzoru podanego w [15]:

$$(1) \quad P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{j=1}^{12} P_{stj}^3}$$

Poziomy emisji flikera są szacowane w punkcie obliczenia emisji (POE) instalacji szybkoprzewodnej na poziomie SN, WN lub NN wg [15] i nie powinny przekroczyć wartości podanych w tabeli 1.



Rys. 1. Wartości skuteczne napięcia fazowego zasilającego piec łukowy podczas jego pracy w poszczególnych fazach na poziomie 110 kV



Rys. 2. Wartości skuteczne napięcia fazowego zasilającego piec łukowy podczas jego pracy w fazie L1 na poziomie 110 kV

Tabela 1. Wymagane poziomy kompatybilności dotyczące migotania światła w systemach elektroenergetycznych zgodnie z [15]

Rodzaj	Poziomy planowane		
	nn	SN	WN, NN
P_{st}	1,0	0,9	0,8
P_{lt}	0,8	0,7	0,6

Charakterystyka układu zasilającego

Pomiary flikera P_{lt} i P_{st} przeprowadzono na obiekcie przemysłowym w GPZ (głównym punkcie zasilania sieci zakładowej) na poziomie 110 kV oraz w polu transformatora piecowego na poziomie 30 kV, którego parametry

przedstawiono w tabeli 2, a schemat przedstawiono na rys. 3. W badanym zakładzie głównym odbiornikiem jest piec łukowy nr 6 oraz piec kadziowy nr 5. Dodatkowo podczas pomiarów dokonano zmiany dwóch transformatorów zasilających pracujących równolegle (T1 i T2) na jeden transformator T10.

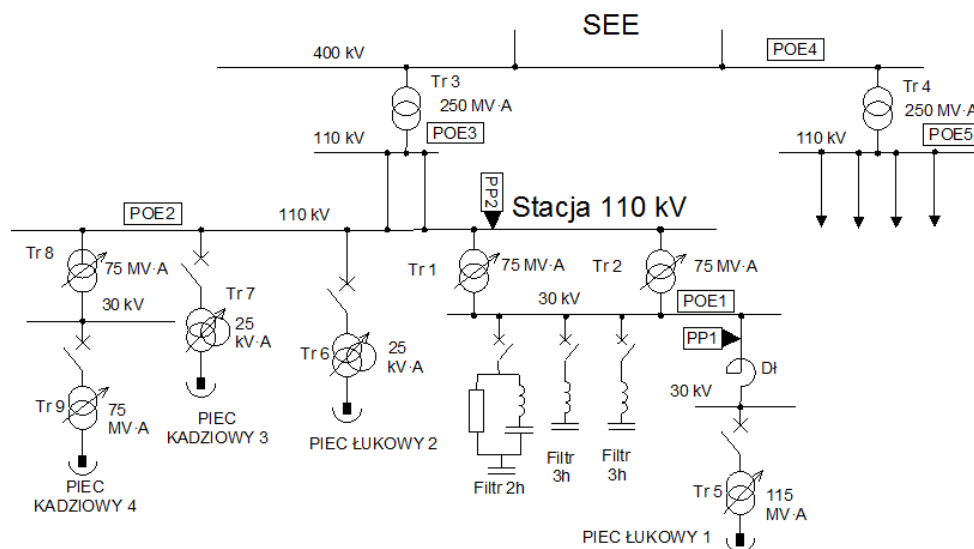
Tabela 2. Podstawowe parametry sieci zasilającej i transformatora zasilającego

Rodzaj	Wielkość elektryczna	Wartość
Sieć zasilająca	Napięcie znamionowe górne U_{GN} [kV]	110
	Moc zwarcziowa S_z [MV·A]	1513
	Napięcie znamionowe dolne U_{DN} [kV]	30
	Reaktancja systemu $X_S(GN)$ [Ω]	8,7971
Transformator T1 i T2	Moc znamionowa S_N [kV·A]	75
	Procentowe napięcie zwarcia $U_{Z\%}$ [%]	7,63
	Napięcie znamionowe górne U_{GN} [kV]	110
	Napięcie znamionowe dolne U_{DN} [kV]	30
Transformator T3	Moc znamionowa S_N [kV·A]	160
	Procentowe napięcie zwarcia $U_{Z\%}$ [%]	16,49
	Napięcie znamionowe górne U_{GN} [kV]	115
	Napięcie znamionowe dolne U_{DN} [kV]	31,5
	Reaktancja transformatora $X_T(DN)$ [Ω]	0,8893

Mając na uwadze kompensację mocy bierniej podstawowej harmonicznej oraz filtrację wyższych harmonicznych poczynawszy od drugiej harmonicznej w zakładzie zastosowano układ dwóch filtrów biernych. Pierwszy, to filtr trzeciego rzędu typu „C” wykorzystywany dla filtracji drugiej harmonicznej o mocy 20 Mvar. Drugi, to układ dwóch filtrów drugiego rzędu LC do filtracji trzeciej harmonicznej o mocy 20 Mvar każdy.

Pomiary na obiekcie rzeczywistym

Pomiarów współczynnika P_{st} i P_{lt} dokonano za pomocą dwóch mierników. Pierwszy miernik HIOKI 3196 zainstalowano na poziomie 110 kV w polu transformatora zasilającego (PP1 na rys. 3) natomiast drugi MAVOWATT 50 w polu transformatora piecowego na poziomie 30 kV (PP2 na rys. 3). Dla weryfikacji wpływu baterii kondensatorów (filtrów wyższych harmonicznych) oraz konfiguracji układu zasilającego pomiaru dokonano przy wyłączonym i włączonym układzie kompensacyjnym dla dwóch różnych układów pracy transformatorów zasilających piec łukowy (T1 i T2 oraz T10). Wyniki pomiarów emisji długotrwałego flikera P_{lt} w dwóch punktach pomiarowych przedstawiono na rys. 4.



Rys. 3. Schemat sieci zasilającej z układem kompensacji i filtracji wyższych harmonicznych

Analiza teoretyczna

Na podstawie wyników pomiarów i wytycznych IEC/TR 61000-3-7 wyznaczono współczynnik uciążliwości pracy pieca łukowego 1 dla długotrwałego współczynnika emisji flikera na poziomie $K_{lt} = 42,8$, oraz dla pieca kadziowego 4 na poziomie $K_{lt} = 6,5$, według wzoru [15]:

$$(2) \quad K_{lt} = P_{lt} \cdot \frac{S_{sc}}{S_{scf}}$$

gdzie:

K_{lt} – wartość współczynnika emisji długotrwałego flikera pieca łukowego,

P_{lt} – długotrwały współczynnik migotania światła (flikier długotrwały),

S_{sc} – moc zwarcia systemu w punkcie obliczenia POE,

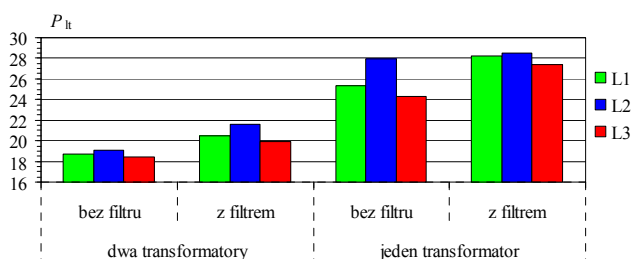
S_{scf} – moc zwarcia pieca (test zwartych elektrod).

Następnie obliczono wartości flikera krótkoterminowego powodowanego przez różne instalacje, tj. piec łukowy 1 oraz piec kadziowy 4 zgodnie z wzorem 3 na podstawie [15]:

$$(3) \quad P_{lt} = \alpha \sqrt{\sum_i P_{lti}^\alpha}$$

gdzie:

P_{lt} – wartość wynikowego flikera długoterminowego dla rozważanego zespołu źródeł flikera,



Rys. 4. Wartości pomiarów emisji długotrwałego flikera P_{lt} w polu transformatora piecowego na poziomie 30 kV

P_{lti} – wartości poziomów emisji przez różne źródła flikera,

α – wartość zależna jest od:

$\alpha = 1$: powinno być wykorzystywane przy bardzo wysokim prawdopodobieństwie jednoczesnego wystąpienia zmian napięć np. jednoczesnego rozruchu wielu silników;

$\alpha = 2$: powinno być wykorzystywane w przypadku, gdy istnieje wysoka możliwość wystąpienia jednoczesnych zamian, np. w przypadku jednoczesnych operacji topienia przez piece łukowe i kadziowe;

$\alpha = 3$: powinno być wykorzystywane w większości przypadków źródeł flikera, gdzie ryzyko nałożenia się zmian napięcia jest małe. W większości rozwiązań gdzie zakłócenia nie są ze sobą powiązane normą [15] zaleca się stosowanie tej wartości.

Natomiast $\alpha = 4$: powinno być wykorzystywane w przypadku, gdy prawdopodobieństwo jednoczesnej pracy urządzeń generujących flikier jest mało prawdopodobne, np. w przypadku zastosowania specjalnych urządzeń sterowniczych pozwalających uniknąć jednoczesnej pracy tych urządzeń.

W przypadku rozpatrywanej instalacji przyjęto $\alpha = 2$, gdyż istnieje wysoka możliwość wystąpienia jednoczesnych operacji topienia przez piece łukowe i kadziowe.

Aby dokonać obliczenia emisji flikera w innych POE (punktach obliczenia emisji flikera) (rys. 3), obliczono moduły impedancji zastępczych w poszczególnych punktach sieci. Wyniki tych obliczeń przedstawiono w tabeli 2.

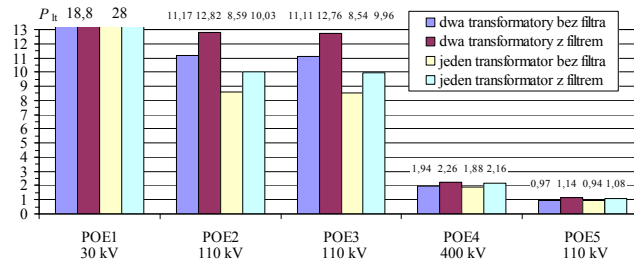
Tabela 2. Obliczone wartości modułu impedancji poszczególnych elementów sieci oraz w poszczególnych punktach sieci elektroenergetycznej przeliczone na wartość 400 kV

Rozpatrywany fragment układu zasilająco-rozdzielczego	Reaktancja elementów składowych	Reaktancja w rozpatrywanych punktach
	Wartość w Ω	Wartość w Ω
POE4	-	19,3897
Tr 3	95,296	-
POE3	-	114,6857
Linia kablowa	0,5748	-
POE2	-	115,26
Tr 1 i Tr 2	78,7453	-
POE1	-	194
Dławik piecowy	0,8	-
Tr 5	115,4744	-
Piec Łukowy 1	-	439,56

Na podstawie wartości parametrów układu elektroenergetycznego i zmierzonych wartości flikera w punktach PP1 i PP2 dokonano obliczeń wartości emisji flikera długotrwałego w punktach POE, a ich wartości przedstawiono na rys. 5 i w tabeli 3.

Tabela 3. Obliczone poziomy wartości wskaźnika P_{lt}

Układ pracy systemu	Punkt obliczenia emisji flikera					
	POE1	POE2	POE3	POE4	POE5	
dwa transformatory T1 i T2	bez filtru	18,8	11,17	11,11	1,94	0,97
	z filtrem	18,8	12,82	12,76	2,26	1,14
jeden transformator T10	bez filtru	28	8,59	8,54	1,88	0,94
	z filtrem	28	10,03	9,96	2,16	1,08



Rys. 5. Obliczone wartości emisji długotrwałego flikera P_{lt} w różnych punktach obliczeniowych POE systemu elektroenergetycznego.

Uwagi i wnioski

Piece łukowe i piecokadzie powodują:

- nie tylko pogorszenie wartości współczynnika mocy i generowanie do sieci wyższych harmonicznych prądów, ale również zwiększenie gwałtownych zmian wartości napięcia zasilającego (rys. 1 i 2),
- zwiększenie wartości współczynnika flikera krótkotrwałego P_{st} oraz długotrwałego P_{lt} na wszystkich poziomach napięcia,
- zmiana dwóch transformatorów pracujących równolegle na jeden transformator powoduje zwiększenie wartości współczynnika długotrwałego flikera P_{lt} w polu transformatora piecowego na poziomie 30 kV o 10%,
- zmiana dwóch transformatorów pracujących równolegle na jeden transformator powoduje zmniejszenie emisji długotrwałego flikera P_{lt} w głównym punkcie zasilania na poziomie 110 kV i w innych punktach przyłączenia do sieci elektroenergetycznych,
- załączenie układów filtrów pasywnych powoduje zwiększenie wartości współczynnika emisji flikera niezależnie od poziomu napięcia, jak również

- niezależnie od reaktancji transformatora (transformatorów) zasilającego układ pieca łukowego,
- obliczone wartości flikera (tabela 3) w punkcie POC (publicznym punkcie przyłączenia) dla sieci WN tj. POE4 i POE5 przekraczają wartości dopuszczalne określone przez normę [15].

Autorzy: dr inż. Andrzej Lange, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Katedra Elektrotechniki, Energetyki, Elektroniki i Automatyki, ul. Oczapowskiego 11, 10-736 Olsztyn, E-mail:

andrzej.lange@uwm.edu.pl

prof. dr hab. inż. Marian Pasko, Politechnika Śląska, Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: marian.pasko@polsl.pl

ITERATURA

- [1] Pasko M., Lange A., Wpływ pracy pieców łukowych i indukcyjnych na jakość energii i możliwości jej poprawy. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2009, nr 6, 67-70
- [2] Lange A., Pasko M., Kompensacja mocy biernej i filtracja wyższych harmonicznych za pomocą filtrów biernych LC. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2010, nr 4, 126-129
- [3] Jagieła K., Gała M., Parametry elektroenergetyczne charakteryzujące pracę pieca łukowego do topienia złomu stalowego, *XII Międzynarodowa Konferencja Naukowo Techniczna „Produkcja i Zarządzanie w Hutnictwie”*, Ustroń Jaszowiec 2004, 109-112
- [4] Jagieła K., Rak J., Gała M., Kepinski, M.: Identification of electric power parameters of AC arc furnace low voltage system. *14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 26-29 Sept. 2010, 1-7
- [5] Horton R.; Haskew T.A.; Burch R.F.: A Time-Domain AC Electric Arc Furnace Model for Flicker Planning Studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24, July 2009, 1450-1457
- [6] Azimi M., Kolagar A.D., Kiyoumars A., Hooshmand R.: Voltage flicker severity improvement in a power distribution system including electric arc furnaces. *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, 10-13 June 2013, 1-4
- [7] Eswara Rao S., Muni B.P., Jain, P., Reddy C.P.V.K., Balasubramanyam P.V.: Development of 2.5 MVAR STATCOM for arc furnace applications. *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 25-28 Oct. 2012, 1280-1285
- [8] El-Nady A., Noureldin A.: Mitigation of Arc Furnace Voltage Flicker Using an Innovative Scheme of Adaptive Notch Filters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 26, July 2011, pp 1326 - 1336
- [9] Rosentino Jr., A. J. P., Gondim, I. N., Macedo Jr., J. R. & Delaiba, A. C.: A Practical Electric Arc Furnace Model For Flicker Assessment. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. Vol. 26, February 2015, 68-79
- [10] Chang G.W., Lu H.J., Chuang C.S.: An accurate hybrid intelligent approach for forecasting flicker severity caused by electric arc furnaces. *Electric Power Systems Research*. Vol. 121, April 2015, 101-108
- [11] Gaber El-Saady: Adaptive static VAR controller for simultaneous elimination of voltage flickers and phase current imbalances due to arc furnaces loads. *Electric Power Systems Research*. Vol. 58, 20 July 2001, 133-140
- [12] Yu-Jen Liu, Gary W. Chang, Rong-Chin Hong: Curve-fitting-based method for modeling voltage-current characteristic of an ac electric arc furnace. *Electric Power Systems Research*. Vol. 80, May 2010, 572-581
- [13] Chen-Wen Lu, Shyh-Jier Huang, Ching-Lien Huang: Flicker characteristic estimation of an AC electric arc furnace. *Electric Power Systems Research*. Vol. 54, 1 May 2000, 121-130
- [14] Yu-Jen Hsu, Kuan-Hung Chen, Po-Yi Huang, Chan-Nan Lu: Electric Arc Furnace Voltage Flicker Analysis and Prediction. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 60, Oct. 2011, 3360 - 3368
- [15] IEC 61000: Kompatybilność elektromagnetyczna