

Wpływ źródeł światła LED na pogorszenie jakości energii elektrycznej

Streszczenie. W ostatnim czasie na rynku pojawiły się różne technologicznie źródła światła. W związku z tym niezwykle istotna jest ocena charakterystyki dostępnych lamp i wpływu, jaki mogą one mieć na sieć energetyczną. W niniejszym artykule przedstawiono przepisy i normy dotyczące jakości energii elektrycznej z uwzględnieniem wyższych harmonicznych prądu i napięcia oraz przeanalizowano wybrane lampy z diodami elektroluminescencyjnymi. Celem badań była analiza wpływu systemów oświetlenia LED na jakość energii (PQ) sieci elektrycznej. Zaprezentowano wyniki pomiarów parametrów określających jakość energii elektrycznej pobieranej przez nowoczesne LED-owe źródła światła stosowane do oświetlania pomieszczeń. Do badań wykorzystano lampy dostępne na rynku polskim. Przedstawiono przebiegi prądów wybranych lamp podczas załączania ich do sieci elektroenergetycznej, wyniki badań emisji harmonicznych. Wykazano znaczący negatywny wpływ układów zasilających w kompaktowych lampach LED na parametry jakościowe energii elektrycznej w obwodach oświetleniowych. Badane lampy znacznie przekraczają dopuszczalne limity harmonicznych oraz THD.

Abstract Recently, various technological light sources have appeared on the market. Therefore, it is extremely important to assess the characteristics of the available lamps and the impact they can have on the power grid. This article presents regulations and standards regarding the quality of electricity, taking into account higher harmonics of current and voltage, and analyzes selected lamps with light-emitting diodes. The aim of the research was to analyze the impact of LED lighting systems on the power quality (PQ) of the electrical network. The results of measurements of parameters determining the quality of electricity consumed by modern LED light sources used to illuminate rooms are presented. Lamps available on the Polish market were used for the tests. Current waveforms of selected lamps during connection to the power grid, results of harmonic emission tests are presented. A significant negative impact of power supply systems in compact LED lamps on the quality parameters of electricity in lighting circuits has been demonstrated. The tested lamps significantly exceed the permissible limits of harmonics and THD. **(The influence of LED light sources on the deterioration of the quality of electricity)**

Słowa kluczowe: LED, jakość energii elektrycznej, harmoniczne napięcia i prądu.

Keywords: LED, power quality, voltage and current harmonics.

Wstęp

W ostatnim czasie lampy LED zastępują tradycyjne żarówki, czy wysokoprężne lampy wyładowcze [1-3] w gospodarstwach domowych, zakładach przemysłowych, oświetleniu drogowym [4] itp. Ze względu na niski pobór mocy i możliwość uzyskania kolorowego światła wykorzystywane są również jako światło dekoracyjne. Oświetlenie odpowiada za ok. 19% całkowitego zużycia energii elektrycznej na świecie, dlatego efektywność energetyczna oświetlenia ma zasadnicze znaczenie. Przejście na oświetlenie LED może wygenerować oszczędności w zużyciu energii na poziomie nawet do 80% [5]. Dodatkowo w 2012 roku wszedł także w życie przepis UE zakazujący sprzedaży lamp żarowych o mocy powyżej 7 W [6].

Pomimo, iż pierwsze lampy LED, które mogły zastąpić tradycyjne żarówki, pojawiły się w sprzedaży już pod koniec lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku, to zadowalające efekty komfortu wzrokowego otrzymano dopiero na początku obecnego stulecia. Aktualnie większość produkowanych lamp uzyskuje skuteczność świetlną od 70 nawet do 205 lm/W [7].

Lampy LED charakteryzują się wysoką sprawnością i długą trwałością, jednak nie są pozbawione wad. Powodują wzrost poboru energii biernej pojemnościowej, pobierają prąd odkształcony, co wiąże się z występowaniem zaburzeń w postaci wyższych harmonicznych prądu, a co za tym idzie, pogorszenie jakości energii elektrycznej [8,9], czego wynikiem może być niewłaściwa praca urządzeń służących do dystrybucji energii elektrycznej, jak również zakłócenia w pracy urządzeń podłączonych do sieci energetycznej i wzrost zużycia energii. Dlatego, niezbędne jest ograniczenie negatywnego wpływu diod LED na sieć elektroenergetyczną.

By jakość energii była odpowiednia wymagane jest spełnienie określonych minimalnych wymagań, zapisanych w Normach i Dyrektywach.

W artykule przedstawiono wyniki badań trzech wybranych, dostępnych na rynku, lamp LED (GU10 8W, E14 6W, E27 7W). Na wykresach zilustrowano wyższe harmoniczne prądu oraz przebiegi prądu i napięcia.

Prawo stanowiące o jakości energii elektrycznej

Zadaniem dostawcy energii jest utrzymanie częstotliwości i wartości napięcia na odpowiednim poziomie. Na jakość energii wpływ mają zarówno dostawcy, jak i odbiorcy. Pewne wielkości opisujące jakość energii elektrycznej podlegają procesom normalizacji [10]: częstotliwość sieci zasilającej, odchylenia napięcia, wahania napięcia, wskaźnik migotania światła, asymetria napięcia, harmoniczne napięcia.

Podstawowym aktem prawnym w Unii Europejskiej jest dyrektywa EMC 2014/30/UE [11], natomiast w Polsce jakość energii elektrycznej określa Rozporządzenie Ministra Gospodarki z 4.05.2007 w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego [12], w którym podano szczegółowo parametry jakościowe energii elektrycznej jakie muszą spełniać sieci zasilające odbiorców.

Inne wybrane przepisy znajdują się m.in. w [13-15]. W normie [14] urządzenia odbiorcze podzielono na cztery klasy, gdzie urządzenia oświetleniowe zaliczono do klasy C (punkt 5 – Klasyfikacja urządzeń), jednak nie wyszczególniono lamp LED.

Wartości współczynnika mocy (PF), zdefiniowano w [12]:

$$(1) PF = \frac{P}{S} = \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 + \sum_{n \neq 1} U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n}{\sqrt{(U_1 \cdot I_1)^2 + \sum_{n \neq 1} (U_n \cdot I_n)^2}}$$

gdzie: U_1 – wartość skuteczna podstawowej harmonicznej napięcia, I_1 – wartość skuteczna podstawowej harmonicznej prądu, φ_n – kąty przesunięcia fazowego przebiegów prądów i napięć poszczególnych harmonicznych, n - numer harmonicznej.

Dla opraw oświetleniowych współczynnik ten określono w przepisach unijnych [16]. Wybrane parametry jakościowe energii elektrycznej na podstawie [11], dotyczące jakości energii dostarczanej przez producentów energii.

Wyższe harmoniczne

Przy idealnym sygnale o podanych parametrach (napięciem sinusoidalnym o częstotliwości 50 Hz i wartości skutecznej 230 V) urządzenia osiągnęłyby większą sprawność i niezawodność. Jednak utrzymanie takiego sygnału w odpowiednio długim czasie jest bardzo trudne, a często wręcz niemożliwe. Pojawia się więc sygnał harmoniczny, czyli już niesinusoidalny, ale wciąż okresowy [10]. Powodem powstawania wyższych harmonicznych napięcia, których częstotliwość jest wielokrotnością podstawowego sygnału, czyli 50 Hz, jest oddziaływanie odbiorników o nieliniowej charakterystyce prądowo-napięciowej na sieć elektroenergetyczną.

Jedną ze znormalizowanych wartości jest maksymalny współczynnik odkształcenia wyższymi harmonicznymi napięcia zasilającego THD_U , określony wzorem (2):

$$(2) \quad THD_U = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} (U_n)^2}$$

gdzie: U_n – wartość skuteczna n -tej harmonicznej napięcia, n – numer harmonicznej.

Współczynnik odkształcenia harmonicznych prądu można określić ze wzoru (3):

$$(3) \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} (I_n)^2}}{I_1}$$

gdzie: I_n – wartość skuteczna n -tej harmonicznej prądu, I_1 – wartość skuteczna podstawowej harmonicznej prądu n – numer harmonicznej.

Dopuszczalne wartości wyższych harmonicznych generowanych do sieci zasilającej przez urządzenia elektryczne i elektroniczne z fazowym prądem zasilającym do 16 A określono w normie [14]. Dopuszczalny poziom odkształcenia przebiegu prądu i napięcia jest zależny od czułości zasilanych odbiorników.

Oświetlenie LED

Stosowanie oświetlenia LED wiąże się z generowaniem przez te lampy wyższych harmonicznych prądu, pobieraniem z sieci energii biernej pojemnościowej, pogorszeniem współczynnika mocy i in. [17, 18].

Typową budowę lampy LED przedstawiono w [19]. Diody LED wymagają tzw. driverów, czyli układów sterująco-zasilających, dlatego do zasilania lamp LED produkowane są dedykowane układy scalone. Wykorzystywane są dwie metody zasilania: napięciowa i prądowa. W zasilaniu napięciowym stabilizowane jest napięcie, natomiast prąd zależy od rezystancji obciążenia. Przy zasilaniu prądowym poprzez odpowiednie zmiany napięcia stabilizowany jest prąd. Bardzo ważny jest odpowiedni dobór zasilacza, od którego w znacznej mierze zależy może właściwe działanie systemu oświetlenia oraz jego trwałość.

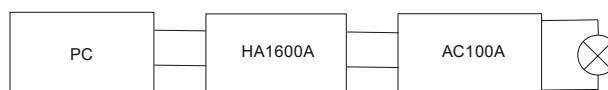
Aparatura pomiarowa i metoda badania

Elektroluminescencyjne źródła światła mogą generować wyższe harmoniczne prądu nawet wielokrotnie przekraczające poziomy dopuszczalne normatywnie. By sprawdzić jakość wybranych lamp LED znajdujących się na

rynku, wykonano odpowiednie pomiary. Badania parametrów elektrycznych określających jakość energii elektrycznej przeprowadzono na odbiorniku kompletnym, tzn. moduł LED z zasilaczem.

Stanowisko badawcze (rys. 1) umożliwia prowadzenie badań parametrów jakości energii elektrycznej przy zasilaniu wybranych źródeł światła. Stanowisko oraz badania wykonano zgodnie z normą PN-EN IEC 61000-3-2:2019-04. Badania przeprowadzono w znormalizowanych warunkach atmosferycznych, tj. temperatura powietrza 20 - 27 °C. Pomiary wykonywano na nowych źródłach. Lampy świeciły się do momentu ustabilizowania, który przyjęto jako brak zmiany pobieranej mocy o więcej niż 1% w ciągu 5 min. W skład stanowiska pomiarowego wchodziły:

1. Komputer z dedykowanym oprogramowaniem
2. Power and Harmonics Analyzer with Flickmaster HA1600A [20] wraz z dedykowanym oprogramowaniem
3. AC1000A LOW DISTORTION POWER SOURCE [18]
4. Badany element



Rys.1. Schemat stanowiska pomiarowego

Zgodnie z normą [21] są trzy kryteria odnoszące się do opraw oświetleniowych, których moc zawiera się w przedziale od 5 do 25 W. Badane oprawy oświetleniowe przyporządkowano do klasy C. By lampa została dopuszczona do użytku, musi spełnić jedno z trzech badanych kryteriów.

W celu ograniczenia błędów mogących wynikać z chwilowej niestabilności jednego z elementów układu badawczego, pomiary dla każdej lampy LED powtórzone kilkakrotnie. Zmniejszyło to przypadkowość wyników badań co mogło nastąpić w przypadku tylko jednej serii pomiarowej.

Badanie wybranych źródeł światła

Przedmiotem badań są układy sterująco-zasilające kompaktowych lamp LED, będących zamiennikami żarowych źródeł światła, o zbliżonej mocy, wykonywanych na trzonkach GU10, E27 i E14. Każda lampa jest wyprodukowana przez innego producenta. W tego typu lampach układy driverów są zintegrowane z modułem LED w jednej oprawie. Wpływ na stopień odkształcenia przebiegu prądu kompaktowej lampy z diodami świecącymi ma przede wszystkim układ drivera, wpływ samych modułów LED jest pomijalny.

Do badań wybrano dostępne komercyjnie lampy. Lampy firm xx i xxx mają zbliżone parametry świetlne oraz cenę, lampa firmy x ma znacznie większą wartość strumienia świetlnego oraz niemal 2-krotnie wyższą cenę.

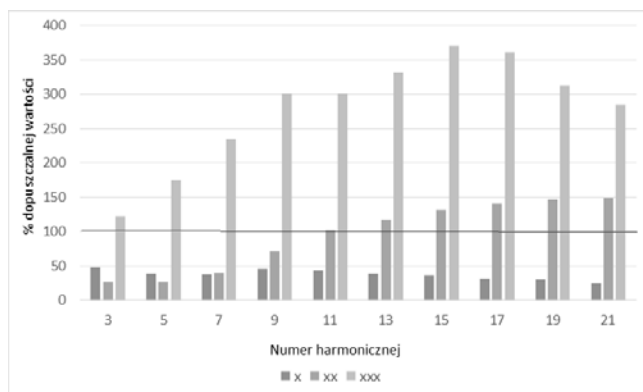
W tabeli 1 podano podstawowe dane techniczne deklarowane przez producentów na opakowaniach lub obudowach testowanych źródeł oświetlenia.

Tabela 1. Deklarowane parametry źródeł światła

Producent	Moc [W]	Strumień świetlny [lm]	Napięcie pracy [V]	Współcz. PF	Gwint
x	8	575	220 – 240	-	GU10
xx	6	470	220 – 240	0,5	E14
xxx	7	495	220 – 240	> 0,5	E27

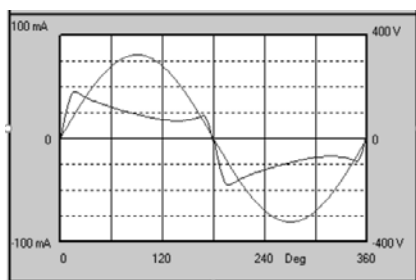
Wszystkie pomiary prowadzono przy poziomie składowej podstawowej (50 Hz) wynoszącym 230 V.

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki pomiarów trzech lamp LED dla harmoniczných od 3 do 21. Na wykresie pokazano procentową zależność wielkości zmierzonej w stosunku do wartości dopuszczalnej.



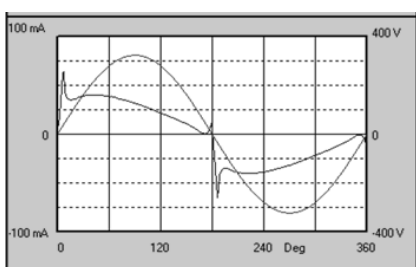
Rys.2. Badanie emisji harmoniczných

Dla lampy firmy x o mocy 8W największą wartość osiąga 3. harmoniczných (11,3 mA). Dla żadnej harmoniczných limit nie został przekroczony. Wartość współczynnika zawartości harmoniczných THD_1 jest na poziomie 37,7%. Przebieg napięcia i prądu badanej lampy przedstawiono na rysunku 3 (napięcie ma przebieg sinusoidalny).



Rys.3. Przebieg napięcia i prądu dla lampy x [22].

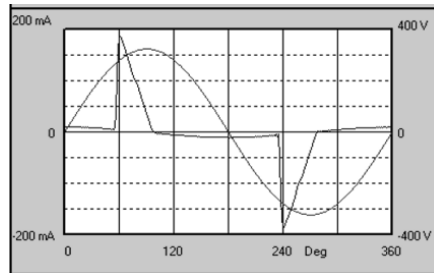
Dla lampy xx o mocy 6 W przekroczone zostały limity dla harmoniczných 11 do 21. Współczynnik THD_1 wynosi 30,3%. Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi napięcia (sinusoidalny) i prądu badanej lampy.



Rys.4. Przebieg napięcia i prądu dla lampy xx [22].

Przebieg prądu pobieranego przez źródło światła jest daleki od przebiegu sinusoidalnego, jednak oprawa oświetleniowa przechodzi wszystkie badania z wynikiem pozytywnym. W badaniu na emisję harmoniczných wszystkie przekroczone limity są mniejsze od 5 mA.

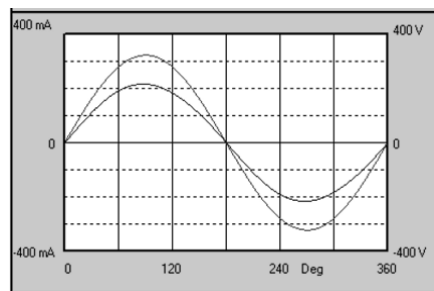
Dla lampy xxx o mocy 7 W przekroczone zostały wszystkie limity harmoniczných. Współczynnik THD_1 wynosi 77,9%. Na rysunku 5 przedstawiono wykres napięcia (sinusoidalny) i prądu dla badanej lampy.



Rys.5. Przebieg napięcia i prądu dla lampy xxx [22].

Harmoniczných z przedziału 9 do 19 zostały przekroczone ponad 3-krotnie. Analogiczna sytuacja zachodzi podczas badania THD . Jednak test na kształt przebiegu ma wynik pozytywny. Obserwując przebieg można zauważyć, że: przebieg prądu osiąga wartość 5% maksimum przed 60° , szczyt osiąga przed 65° oraz wartość prądu obniża się do 5% przed 90° . Zatem oprawa oświetleniowa została dopuszczona do sprzedaży.

Dla porównania przebadano dodatkowo lampę halogenową o mocy 35 W. Jak widać, nie wprowadza ona żadnych zniekształceń do sieci (rys. 6), jednak oprawa ta pobiera znacznie większy prąd od badanych lamp LED. Wadą halogenów jest to, iż bardzo się nagrzewają, dlatego nie wszędzie można je stosować.



Rys.6. Przebieg napięcia i prądu dla lampy halogenowej [22].

Przeprowadzone badania lamp LED pokazują, że większość źródeł światła jest zgodna z normami, pomimo że niektóre z nich znacznie przekraczają dopuszczalne limity harmoniczných oraz THD .

Podsumowanie

W opracowaniu zwrócono uwagę na lampy LED, które są nieliniowymi odbiornikami o małych mocach. Wykazano, że układy zasilające tych kompaktowych źródeł światła generują wyższe harmoniczne natężenia prądu, których poziom znacznie przekracza wartości dopuszczalne, co z kolei może negatywnie oddziaływać na inne odbiorniki energii elektrycznej.

W lampach LED z układami zasilającymi zintegrowanymi w wielu przypadkach występowały duże zniekształcenia prądu, ponieważ jeszcze kilkanaście lat temu układy te nie zawierały filtrów, co powodowało, że współczynnik zawartości wyższych harmoniczných prądu $THDI$ dla wielu tego typu lamp mógł przekraczać nawet 100%. Ale i obecnie można spotkać lampy LED, dla których THD osiąga nawet 140% [16], a kąt przesunięcia fazowego między prądem i napięciem dla podstawowej harmoniczných jest ujemny i wynosi ok. -50° - -60° [23]. Zwłaszcza tanie zasilacze zintegrowane w lampach LED, nieposiadające zaawansowanych rozwiązań poprawiających współczynnik mocy oraz tłumiących propagację wyższych harmoniczných prądu, powodują, że współczynnik mocy PF przyjmuje nawet wartości poniżej 0,5, a współczynnik szczytu CF_1 rośnie nawet powyżej wartości 4,5, gdzie dla sinusoidy powinien on wynosić 1,41. Układ taki generuje wyższe

harmoniczne prądu, których wartości znacznie przekraczają dopuszczalne poziomy, które określa norma [14]. W przypadku równoczesnego wykorzystania wielu lamp o powyższych parametrach może nastąpić znaczne pogorszenie jakości energii elektrycznej.

W lampach LED wysokiej jakości współczynnik CF_1 osiąga wartość rzędu 1,7 (czyli zbliżony do współczynnika szczytu przebiegu sinusoidalnego), współczynnik mocy PF i $\cos\varphi$ osiągają wartości powyżej 0,9.

Powyższe badania pokazują, że coraz większe wykorzystywanie do oświetlania lamp LED staje się wyzwaniem dla służb energetycznych, ponieważ do tej pory w elektroenergetyce występowała przede wszystkim konieczność kompensacji mocy biernej indukcyjnej.

Autor: dr inż. Agnieszka Wantuch, AGH w Krakowie, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: awantuch@agh.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Ptak P., Górecki K., Heleniak J., Wpływ trybu pracy lampy LED typu HUE na jej parametry elektryczne i optyczne, *Przegląd Elektrotechniczny*, 96 (2020), nr 12, 102-105
- [2] Schwarz R., Bezuidenhout D., LED Testing - Efficiency and Power Quality Analysis, (2020), <https://dewesoft.com/application-notes/led-testing-efficiency-power-quality-analysis>
- [3] Gabryjelski Z., Pabjańczyk W., Sikora R., Markiewicz P., Wpływ opraw LED na sieć zasilającą, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 86 (2010), nr 10, 229.
- [4] Sikora R., Markiewicz P., Analysis of Electric Power Quantities of Road LED Luminaires under Sinusoidal and Non-Sinusoidal Conditions, *Energies* 12(6), (2019), 1109
- [5] Ślęk B., LED-y pozwalają obniżyć zużycie energii, biznes.newseria.pl/news/ledy-pozwalaja-obnizyc-zuzycie-energii, 23.06.2021, dostęp: 25.06.2023
- [6] EU regulation (EC) No 244 (2009)
- [7] <https://news.samsung.com/pl/najwyzsza-skutecznoscswietlna-dzieki-diodom-samsung-led-csp>, (2018), dostęp: 14.07.2023
- [8] Kurkowski M., Mirowski J., Popławski T., Pasko M., Białoń T., Pomiar energii biernej w instalacjach niskiego napięcia, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr 4, 144-147.
- [9] Putz Ł., Bednarek K., Kasprzyk L., Analiza wyższych harmonicznych generowanych przez lampy LED, *Przegląd Elektrotechniczny*, R.96 (2020), nr 4, 90-93.
- [10] Hanzelka Z., Jakość energii elektrycznej cz. 4 – Wyższe harmoniczne napięć i prądów, <http://twelvee.com.pl>, dostęp: 14.06.2023
- [11] EMC 2014/30/UE - Dyrektywa 2014/30/UE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do kompatybilności elektromagnetycznej.
- [12] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Dz.U. Nr 93 poz. 623.
- [13] Ustawa Prawo energetyczne, 19 kwietnia 2021 Dz.U. poz. 716
- [14] PN-EN 61000-3-2:2014-10, Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 3-2: Poziomy dopuszczalne - Poziomy dopuszczalne emisji harmonicznych prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika < lub = 16A).
- [15] Rozporządzenie Komisji (UE) Nr 1194/2012 z dnia 12 grudnia 2012 r. w sprawie wykonania dyrektywy 2009/125/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla lamp kierunkowych, lamp z diodami elektroluminescencyjnymi i powiązanego wyposażenia.
- [16] Rozporządzenie Komisji (WE) Nr 244/2009 z dnia 18 marca 2009 r. w sprawie wykonania dyrektywy 2005/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla bezkierunkowych lamp do użytku domowego.
- [17] Lange A., Pasko M., Wpływ pracy LED-owych źródeł światła na parametry określające jakość energii elektrycznej, cz.1, *Academic Journals, Electrical Engineering*, Poznań University of Technology, (2006), no. 93, 38–52
- [18] Ptak P., Górecki K., Heleniak J., Orlikowski M., Investigations of Electrical and Optical Parameters of Some LED Luminaires - A Study Case, *Energies* 14, (2021), 1612
- [19] Ptak P., Górecki K., Zarębski J., Układy zasilające stosowane w lampach LED, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 93, (2017), nr 3, 167-170.
- [20] resources.aimtti.com/datasheets/AIM-HA1600A+AC1000A EMC_analyzer_data_sheet-Iss1.pdf (accessed on 20. 10.2022).
- [21] PN-EN IEC 61000-3-2:2019-04
- [22] Olesiak M., Wpływ oświetlenia LED na wybrane parametry określające jakość energii elektrycznej, *Praca dyplomowa pod kier. Wantuch A., AGH Kraków* (2021)
- [23] PN-E-06000:1972