

## Wpływ trybu pracy lampy LED typu HUE na jej parametry elektryczne i optyczne

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono i przedyskutowano wyniki pomiarów parametrów elektrycznych i optycznych lampy LED typu HUE emitującej światło białe. Przedstawiona lampa LED typu HUE może być sterowana bezprzewodowo. Parametry elektryczne i optyczne wybranej klasy lamp LED zostały zmierzone za pomocą autorskiego układu pomiarowego. Szczególną uwagę poświęcono wpływowi badanej lampy LED na parametry sieci elektroenergetycznej. Zbadano wpływ wartości napięcia zasilającego oraz wartości temperatury barwowej światła emitowanego przez badaną lampę LED na wartość współczynnika zawartości harmonicznych THD prądu zasilającego.

**Abstract.** In the paper electrical and optical properties of LED lamp of the HUE type emitting white light are analysed. This lamp makes it possible to remote control the mode of its operation. Properties of this class of lamps given by the producer was characterised and the authors' set-up to measure electrical and optical parameters of the considered lamps is proposed. Attention was paid on parameters characterising influence of the LED lamp on the electroenergy network. Additionally, influence of feeding voltage, the fixed value of illuminance and correlated color temperature (CCT) of the emitted light on THD (Total Harmonic Distortion) is analysed and discussed. (Influence of operation mode of the LED lamp of the HUE type on its electrical and optical parameters).

**Słowa kluczowe:** lampy LED, oświetlenie sterowane bezprzewodowo, współczynnik zawartości harmonicznych, pomiary

**Keywords:** LED lamps, wireless lighting control, total harmonic distortion, measurements

### Wprowadzenie

Półprzewodnikowe źródła światła są coraz częściej wykorzystywane w technice oświetleniowej [1-5]. Lampy LED (Light Emitting Diode) emitujące światło białe są używane do oświetlania powierzchni użytkowej, natomiast kolorowe lampy LED są używane do podświetlania fasad obiektów architektonicznych [2, 3, 6]. Lampy LED zawierają trzy podstawowe komponenty: moduł LED składający się z kilku lub kilkunastu diod LED mocy, układu zasilania oraz obudowy zawierającej pasywny układ chłodzenia [7].

Ważnym aspektem w systemach oświetleniowych jest uzyskanie odpowiedniej temperatury barwowej emitowanego promieniowania optycznego oraz odpowiedniej wartości strumienia świetlnego. Wartości tych parametrów w klasycznych lampach LED są ustalane na etapie produkcji tych lamp i nie ma możliwości ich regulacji. W pracach [2, 3, 5, 8] przedstawiono metody i układy za pomocą których można w łatwy sposób regulować wartość strumienia świetlnego poprzez zmianę wartości średniej prądu przepływającego przez diodę LED. Różne wartości temperatury barwowej można uzyskiwać za pomocą diod RGB (Red Green Blue) w połączeniu z luminoforem. Do sterowania diodami RGB używa się trzech osobnych sygnałów PWM (Pulse Width Modulation) w celu kontroli wartości średniej prądu przepływającego przez każdą diodę LED.

Szybki rozwój półprzewodnikowych źródeł światła oraz inteligentnych systemów automatyki budynkowej spowodował rozwój lamp LED sterowanych bezprzewodowo przy użyciu urządzeń mobilnych [9-11]. Sterowanie jest realizowane za pomocą fal radiowych z wykorzystaniem standardów Bluetooth, Wi-Fi oraz ZigBee [10]. Sygnał radiowy przekazywany między mostkiem komunikacyjnym Philips HUE a lampą LED zawiera unikatowy adres lampy LED, określa poziom jasności oraz kolor wybranej lampy LED [9, 10].

Jedną z głównych zalet lamp LED jest ich wysoka sprawność optyczna [5, 12, 13], co powoduje, że lampy te charakteryzują się niskim zużyciem energii elektrycznej. Niestety jakość zasilaczy stosowanych w lampach LED jest bardzo niska [7, 12, 14-20], co powoduje istotne odkształcenia prądu pobieranego z sieci elektroenergetycznej. Zjawisko to prowadzi do pogorszenia się parametrów charakteryzujących jakość energii

elektrycznej [15, 16, 18, 19]. Do parametrów tych należy współczynnik zawartości harmonicznych THD (Total Harmonic Distortion) prądu zasilającego [11, 12, 17, 20, 21].

Firma Philips jest jednym z głównych producentów bezprzewodowo sterowanych lamp LED [22]. Pierwsze lampy LED typu Philips HUE zostały wprowadzone do użytku komercyjnego w 2012 roku. Obecnie na rynku dostępne są trzy generacje lamp LED typu Philips HUE [22].

W literaturze istnieje wiele prac dotyczących badania właściwości elektrycznych i optycznych wybranych typów lamp LED [7, 12, 14, 15, 23, 24]. Jednak brakuje wyników badań opisujących właściwości bezprzewodowo sterowanych lamp LED.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki pomiarów parametrów lampy LED typu Philips HUE emitującej światło białe o trzech podstawowych temperaturach barwowych: ciepłej, zimnej i neutralnej. W rozdziale drugim przedstawiono parametry oraz opis bezprzewodowego systemu sterowania lampą LED typu Philips HUE. Trzeci rozdział zawiera opis skonstruowanego przez autorów stanowiska pomiarowego. W rozdziale czwartym przedstawiono i omówiono wyniki pomiarów wybranych charakterystyk badanej lampy LED.

### Badana lampa LED

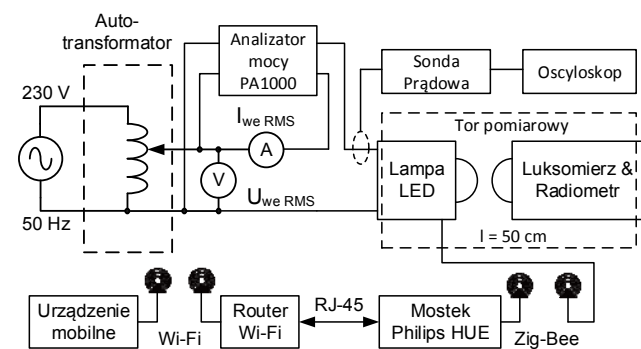
Do badań eksperymentalnych wybrano lampę LED, która emituje promieniowanie elektromagnetyczne w kolorze białym w trzech podstawowych temperaturach barwowych: ciepłej, neutralnej i zimnej. Temperatura barwowa emitowanego promieniowania optycznego została ustalona za pomocą aplikacji Philips HUE 3.0.1 dedykowanej dla urządzeń mobilnych z systemami operacyjnymi Windows, iOS oraz Android. Aplikacja ta umożliwiła zaadresowanie i skonfigurowanie do 50 lamp LED typu Philips HUE, a także regulację natężenia oświetlenia od 1 do 100% z krokiem co 1%. Badana lampa LED White Ambiance typu 9CK charakteryzuje się maksymalną wartością emitowanego strumienia świetlnego równą 806 lm. Moc elektryczna pobierana z sieci elektroenergetycznej przez taką lampę LED jest równa 9,5 W [22].

Określona temperatura barwowa emitowanego promieniowania świetlnego jest uzyskiwana za pomocą diod RGB i luminoforu. Diody te są sterowane za pomocą trzech oddzielnych sygnałów PWM. Zmiana temperatury barwowej następuje poprzez regulację szerokości impulsu każdego sygnału PWM. Jest to jedna z metod uzyskiwania światła białego szeroko opisywana w literaturze [7, 15]. Komunikacja pomiędzy wybraną lampą LED a urządzeniem mobilnym odbywa się za pomocą protokołu ZigBee, opisanego w standardzie IEEE 802.15.4 [10, 22].

Podstawowym elementem zdalnego sterowania jest mostek komunikacyjny Philips HUE. Jest on wykorzystywany do zdalnej komunikacji z urządzeniami końcowymi systemu Philips HUE, w tym przypadku z lampami LED. Mostek komunikacyjny Philips HUE pracuje w zakresie częstotliwości od 2,4 GHz do 2,484 GHz i wykorzystuje ten zakres do komunikacji z poszczególnymi lampami LED. Router Wi-Fi oraz mostek komunikacyjny Philips HUE są połączone za pomocą sieci LAN (Local Area Network), z wykorzystaniem medium transmisyjnego RJ45. Urządzenia te są zasilane z sieci elektroenergetycznej za pomocą zasilacza o stabilizowanym napięciu wyjściowym równym 5V.

### Układ pomiarowy

W celu zbadania charakterystyk badanej lampy LED typu Philips HUE zaprojektowano i wykonano stanowisko pomiarowe. Układ ten pozwala na pomiar parametrów elektrycznych i optycznych badanej lampy LED. W celu wykonania pomiaru parametrów optycznych badanej lampy LED skonstruowano światłoszczelny tor pomiarowy zbudowany z kawałka rury PCV o długości 50 cm. Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy układu pomiarowego.



Rys. 1. Schemat blokowy układu pomiarowego

Układ pomiarowy zawiera autotransformator ATS-REG1.2 [25], dwa multimetry UNIT UT 804 [26] pełniące funkcję woltomierza i amperomierza wartości skutecznych odpowiednio napięcia i prądu, sondę prądową Tektronix TCPA300 [27], jednofazowy analizator mocy Tektronix PA1000 [28] oraz oscyloskop GW Instek typu GDS 2104a [29]. Napięcie zasilające badaną lampę LED jest regulowane za pomocą autotransformatora podłączonego do sieci elektroenergetycznej. Napięcie to jest regulowane w zakresie od 100 do 230 V, co pozwala na uzyskanie różnych wartości natężenia oświetlenia i gęstości mocy emitowanego światła dla badanych lamp LED typu Philips HUE.

Natężenie oświetlenia badanej lampy LED jest rejestrowane za pomocą luksonierza typu L200 [30], natomiast gęstość mocy emitowanego promieniowania jest rejestrowana z wykorzystaniem radiometru HD2302 [31]. Głowice pomiarowe tych mierników zostały umieszczone po jednej stronie toru pomiarowego. Do badania charakterystyk widmowych badanej lampy LED wykorzystano spektrometr typu USB 650 firmy Ocean

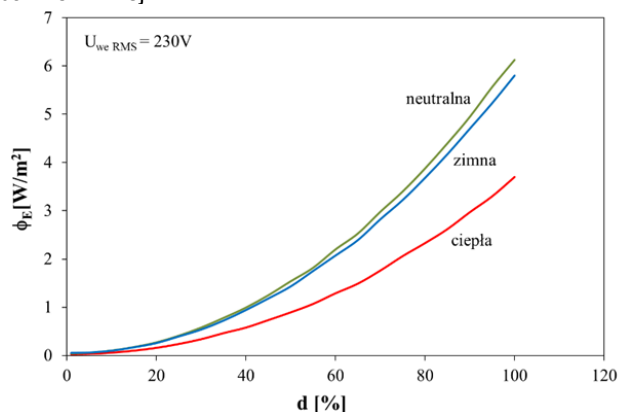
Optics [32]. Przebieg pomiaru parametrów optycznych jest kontrolowany przez komputer klasy PC (Personal Computer).

Do badania parametrów opisujących jakość energii elektrycznej pobieranej z sieci elektroenergetycznej wykorzystano oscyloskop oraz sondę prądową, co umożliwiło zarejestrowanie kształtu oraz widma prądu zasilania. Dodatkowo, widmo tego prądu zostało zmierzone za pomocą jednofazowego analizatora mocy PA1000 firmy Tektronix [33].

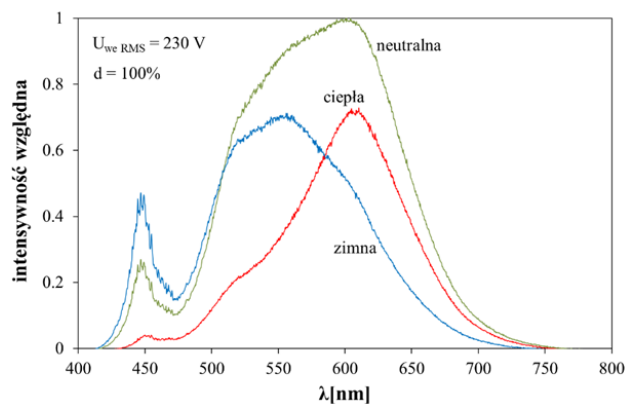
### Wyniki pomiarów

W celu zbadania właściwości wybranej lampy LED wykonano pomiary wybranych parametrów dla różnych wartości skutecznych sinusoidalnego napięcia zasilającego o częstotliwości równej 50 Hz. Za pomocą układu pomiarowego opisanego w rozdziale trzecim zmierzono gęstość mocy optycznej, wartość natężenia oświetlenia oraz wartość skuteczną prądu wejściowego w stanie termicznie ustalonym. Dodatkowo zmierzono przebiegi natężenia oświetlenia oraz charakterystykę widmową badanej lampy LED. Pomiary współczynnika zawartości harmonicznych THD wykonano dla kilku arbitralnie wybranych wartości skutecznych napięcia zasilającego w zakresie od 100 do 230 V.

Na rysunku 2 pokazano zmierzone zależności gęstości mocy promieniowania emitowanego przez badaną lampę LED w funkcji współczynnika natężenia oświetlenia  $d$ . Należy zwrócić uwagę, że największe zużycie prądu zasilającego odpowiada barwie neutralnej, a najmniejsze - barwie zimnej.



Rys. 2. Zmierzone zależności gęstości mocy promieniowania w funkcji współczynnika natężenia oświetlenia



Rys. 3. Zmierzone charakterystyki widmowe badanej lampy LED emitującej promieniowanie o trzech różnych barwach światła

Rozpatrywana zależność jest funkcją monotonicznie rosnącą. Należy zauważyć, że przy maksymalnej wartości współczynnika natężenia oświetlenia gęstość mocy

emitowanego promieniowania jest największa dla barwy neutralnej, a najmniejsza dla barwy ciepłej. Wartości gęstości mocy promieniowania optycznego dla dwóch skrajnych temperatur barwowych różnią się około dwukrotnie.

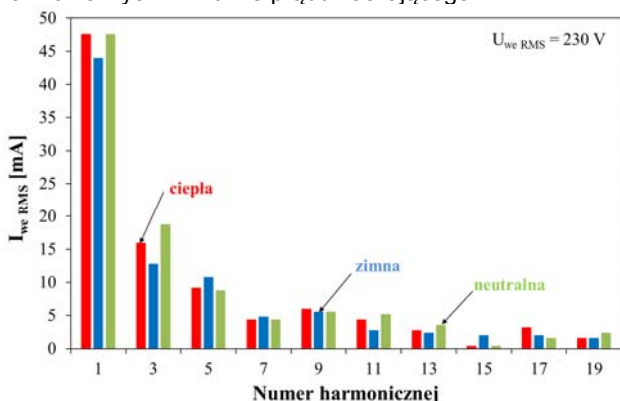
Wykonano również pomiary natężenia oświetlenia emitowanego przez badaną lampę LED w funkcji czasu. Pomiary te wykazały stałość natężenia oświetlenia w czasie, co świadczy o skutecznym odprowadzaniu ciepła generowanego w badanej lampie LED [8, 13] lub odpowiedniej kompensacji zmian temperatury panującej wewnątrz źródła światła poprzez zmianę wartości prądu przepływającego przez moduł LED.

Na rysunku 3 przedstawiono charakterystykę widmową badanej lampy LED emitującej promieniowanie widzialne o trzech różnych temperaturach barwowych.

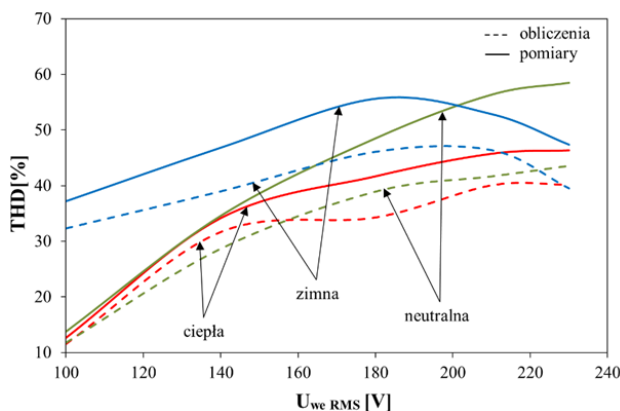
Można zauważyć, że najszersze widmo promieniowania badanej lampy LED uzyskuje się dla barwy neutralnej, a najwęższe dla barwy ciepłej.

Na rysunku 4 przedstawiono widmo prądu zasilającego badaną lampę LED, która emitowała światło o trzech różnych barwach.

Analizując rysunek 4 stwierdzono, że w widmie prądu zasilającego badaną lampę LED widoczne są tylko nieparzyste harmoniczne. Dominującą rolę odgrywa podstawowa harmoniczna o częstotliwości 50 Hz, natomiast w mierzonych widmach widoczne są harmoniczne do 19 o częstotliwości równej 950 Hz. Należy zauważyć, że temperatura barwowa emitowanego promieniowania wpływa na relacje między wartościami każdej z harmonicznych w widmie prądu zasilającego.



Rys. 4. Zmierzone widmo prądu wejściowego badanej lampy LED uzyskane dla trzech różnych barw światła



Rys. 5. Zmierzone i obliczone wartości współczynnika THD badanej lampy LED w funkcji napięcia zasilającego dla trzech różnych barw światła

Odkształcenia przebiegu prądu zasilającego przedstawiono za pomocą współczynnika zawartości harmonicznych THD. Wartość tego współczynnika jest

opisana za pomocą formuły [33]:

$$(1) \quad THD = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^n I_k^2}{\sum_{k=1}^n I_k^2}} \cdot 100\%$$

gdzie  $I_k$  oznacza  $k$ -tą harmoniczną prądu wejściowego, natomiast  $n$  oznacza liczbę zmierzonych harmonicznych.

Biorąc pod uwagę wartości skuteczne każdej harmonicznej prądu wejściowego mierzonej za pomocą sondy prądowej i oscyloskopu, oblicza się wartości współczynnika zniekształceń harmonicznych THD badanej lampy LED emitującej światło białe o trzech różnych temperaturach barwowych.

Na rysunku 5 przedstawiono zmierzone i obliczone wartości współczynnika zawartości harmonicznych THD badanej lampy LED dla trzech różnych temperatur barwowych. Wartości współczynnika THD obliczone według wzoru (1) przy wykorzystaniu widma prądu wyznaczonego za pomocą oscyloskopu oznaczono na wykresie liniami przerywanymi, natomiast wartości współczynnika THD zmierzone za pomocą analizatora PA1000 oznaczono na wykresie liniami ciągłymi.

Jak można zauważyć, wartości współczynnika zawartości harmonicznych THD silnie zależą od temperatury barwowej emitowanego promieniowania oraz od napięcia zasilającego. Można też zauważyć, że zależności współczynnika THD w funkcji napięcia zasilającego dla temperatury barwowej ciepłej i neutralnej są funkcjami monotonicznie rosnącymi. Przy nominalnej wartości napięcia zasilania badanej lampy LED równej 230 V można zauważyć, że największą wartość współczynnika THD uzyskuje się dla temperatury barwowej neutralnej i wartość ta wynosi 59%, natomiast najmniejszą wartość współczynnika THD uzyskuje się dla temperatury barwowej ciepłej i wynosi ona tylko 46%. W przypadku wartości obliczonych za pomocą wzoru (1) oraz pomiarów wykonanych za pomocą analizatora mocy PA1000 widać, że wartości te znacznie różnią się od siebie. Zaobserwowane różnice pomiędzy wartościami współczynnika THD uzyskanymi za pomocą różnych przyrządów pomiarowych wynikają z budowy tych urządzeń i osiągają nawet 17%. Analizatory mocy firmy Tektronix posiadają mocno rozbudowane obwody wejściowe, co pozwala na dokładniejsze odwzorowanie przebiegu prądu wejściowego badanych lamp LED oraz dokładniejsze zarejestrowanie większej liczby harmonicznych. W przypadku analizatora mocy PA1000 firmy Tektronix istnieje możliwość rejestracji do 70 harmonicznych, natomiast w przypadku pomiaru widma oscyloskopem cyfrowym z funkcją szybkiej transformacji Fouriera FFT (Fast Fourier Transform) liczba harmonicznych nie przekracza 20, co jest spowodowane zastosowaniem mniej rozbudowanych filtrów wejściowych.

## Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki badań parametrów elektrycznych i optycznych białej lampy LED typu HUE emitującej światło białe o trzech różnych barwach. Przedstawiono sposób regulacji parametrów użytkowych lampy, charakterystykę regulacji natężenia oświetlenia oraz charakterystykę widmową badanej lampy LED.

Zwrócono szczególną uwagę na parametry opisujące właściwości układu zasilającego badaną lampę LED. Omówiono zarówno wpływ wartości skutecznej napięcia zasilającego i temperatury barwowej emitowanego promieniowania, jak i współczynnika natężenia oświetlenia na wartość skuteczną prądu zasilającego oraz wartość współczynnika zawartości harmonicznych THD prądu zasilającego.

Pomiary zostały wykonane z użyciem autorskiego układu pomiarowego. Zarejestrowane podczas badań eksperymentalnych przebiegi prądu zasilającego potwierdzają silne odkształcenia i mogą stanowić dowód na to, że w układzie zasilania nie zastosowano bloku korekcji współczynnika mocy. Przeprowadzone pomiary i obliczenia współczynnika zawartości harmonicznym THD pokazują również, że badana lampa LED wpływa niekorzystnie na jakość energii w sieci elektroenergetycznej. Należy zwrócić uwagę na fakt, że wartość parametru THD otrzymana za pomocą analizatora mocy przyjmuje znacznie mniej korzystne wartości niż w przypadku korzystania z pomiarów oscyloskopowych. Zaobserwowane różnice wynikają z faktu, że pasmo częstotliwościowe, w którym mierzone są wartości harmonicznym prądu zasilającego, jest w przypadku jednofazowego analizatora mocy znacznie szersze. Przy zastosowaniu oscyloskopu realizowana jest szybka transformacja Fouriera, uwzględniająca tylko około 20 harmonicznym częstotliwości sieci elektroenergetycznej. W związku z tym, zaburzenia o częstotliwości wyższej niż 1 kHz nie zostały uwzględnione przy określaniu wartości współczynnika zawartości harmonicznym THD.

Wyniki przedstawione w pracy mogą być przydatne dla projektantów systemów oświetleniowych z bezprzewodowo sterowanymi lampami LED. Właściwym jest uwzględnienie harmonicznym wyższego rzędu, powyżej 1 kHz, w celu zbadania wpływu układów energoelektronicznym zasilających lampy LED na zniekształcenia prądu pobieranego z sieci elektroenergetycznej. Celem dalszych badań będzie zaproponowanie rozwiązań układowych pozwalających na polepszenie wartości współczynników opisujących odkształcenia prądu pobieranego z sieci elektroenergetycznej.

**Autorzy:** dr inż. Przemysław Ptak, prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, inż. Jakub Heleniak, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mails: p.ptak@we.umg.edu.pl; k.gorecki@we.umg.edu.pl; kuba.97-1997@o2.pl.

#### LITERATURA

- [1] Weir B., „Driving the 21st Century's lights”, *IEEE Spectrum*, 49 (2012), n. 3, 42-47
- [2] Martin P. S., „High power white LED technology for solid state lighting”, Lumileds, <https://www.ele.uva.es/~pedro/optoele/LEDs/LEDillumination.pdf>, (10 maja 2020).
- [3] Krames M., „Progress and future direction of LED technology”, <https://www.netl.doe.gov/ssl/PDFs/Krames.pdf>, (10 maja 2020).
- [4] Czyżewski D., „LED substitutes of conventional incandescent lamps”, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), n. 11a, 123-127
- [5] Schubert E. F., „Light emitting diodes, 2nd ed.”, Cambridge University Press, New York, USA, 2008.
- [6] Chang M. H., Das D., Varde P. V., Pecht M., „Light emitting diodes reliability review”, *Microelectronics Reliability*, 52 (2012), 762-782
- [7] Ptak P., Górecki K., „Modelling power supplies of LED lamps”, *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 46 (2018), n. 3, 629-636
- [8] Górecki K., Ptak P., „Modelling LED lamps with thermal phenomena taken into account”, *Microelectronics Reliability*, 79 (2017), 440-447
- [9] Apse-Apsiti P., Avotins A., Ribickis L., „Wirelessly controlled LED lighting system”, 2nd IEEE Energycon Conference and Exhibition, (2012), 952-955
- [10] Mishra B.C., Panda A.S., Rout N.K., Mohapatra S.K., „A novel efficient design of Intelligent Street Lighting monitoring system using ZigBee network of devices and sensors on Embedded Internet Technology”, International Conference on Information Technology, (2015), 201-205
- [11] Svilainis L., „Comparison of the EMI Performance of LED PWM Dimming Techniques for LED Video Display Application”, *Journal of Display Technology*, 8 (2012), n. 3, 162-165
- [12] Górecki K., „The influence of power supply voltage on exploitive parameters of the selected lamps”, *Informacje MIDEM - Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials*, 43 (2013), n. 3, 193-198
- [13] Lasance C.J.M., Poppe A., „Thermal management for LED applications”, Springer Science+Business Media, New York, (2014)
- [14] Górecki K., Górecka K., Górecki P., „Porównanie właściwości eksploatacyjnych wybranych typów lamp LED”, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 11a, 111-114
- [15] Uddin S., Shareef H., Mohamed A., Hannan, „Harmonics and thermal characteristics of low wattage LED lamps”, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), n. 11a, 266-271
- [16] Ndokaj A., Di Napoli A., „LED Power Supply and EMC Compliance”, 2nd IEEE Energycon Conference and Exhibition, (2012), 254-258
- [17] Uddin S., Shareef H., Mohamed A., Hannan M., „An Analysis of Harmonics from Dimmable LED Lamps”, IEEE International Power Engineering and Optimization Conference, Malesia, (2012), 182-185
- [18] Lho Y. H., „A Study on methodology to improve the power factor of high power LED modul”, 14th International Conference on Control, Automation and Systems, Gyeonggi-do, Korea, (2014), 1404-1406
- [19] Pollock A., Pollock H., Pollock C., „High Efficiency LED Power Supply”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3 (2015), n. 3, 617-622
- [20] Rata G., Rata M., „The Study of Harmonics from Dimmable LED Lamps, using CompactRIO”, 13th International Conference on Development and Application Systems, Romania, (2016), 180-183
- [21] Ionescu C., Dima M., Bonfert D., „Flicker Distortion Power Factor Analysis in Lighting LED's”, 23rd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging, Romania, (2017), 280-285
- [22] Strona internetowa systemu HUE, <https://www2.meethue.com/pl-pl/p/huemostek/8718696511800>, (20 lutego 2020).
- [23] Chung Y. C., Lee K. M., Choe H. J., Sung C. H., Kang B., „Low-cost drive circuit for AC-direct LED lamps”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30 (2015), n. 10, 5776-5782
- [24] Sreedevi V. T., Devi V., Sunil A. A., „Analysis and Simulation of A Single Stage Power Supply for LED Lighting”, International Conference on Green Computing, Communication and Conservation of Energy, (2013), 453-456
- [25] Nota katalogowa Autotransformatora ATS-REG1.2, <https://www.sklep.cyfronika.com.pl/pl/p/ATS-REG1.2-Autotransformator-z-regulowanym-napieciem-moc-1.25-kW/15527>, (29 stycznia 2020).
- [26] Nota katalogowa Multimietru UNIT UT 804, <https://www.gotronik.pl/ut804-cyfrowy-multimetrlaboratoryjny-p-326.html>, (29 stycznia 2020).
- [27] Nota katalogowa Sondy prądowej Tektronix TCPA300, <https://pl.rs-online.com/web/p/akcesoria-do-sond/7644391/>, (29 stycznia 2020).
- [28] Nota katalogowa Analizatora mocy Tektronix PA1000, <https://pl.farnell.com/tektronix/pa1000/ac-power-analyzer-1ph-1v-to-600v/dp/2772544>, (29 stycznia 2020).
- [29] Nota katalogowa Oscyloskopu Gw Instek GDS 2104a, <https://www.tme.eu/pl/details/gds-2104a/oscyloskopy-cyfrowe/gw-instek/>, (29 stycznia 2020).
- [30] Nota katalogowa Luksomierza L 200, <https://www.sonopan.com.pl/pl/produkty/swiatlo/luksomierz-precyzyjny-l-200/>, (29 stycznia 2020).
- [31] Nota katalogowa Radiometru HD2302, <https://sklep.emd.net.pl/foto-radiometr-hd2302-delta-ohm-p-2724.html>, (29 stycznia 2020).
- [32] Nota katalogowa Spektrometru USB 650 Ocean Optics, <https://www.oceaninsight.com/products/spectrometers/usb-series/>, (29 stycznia 2020).
- [33] Rashid M. H., „Power Electronics Handbook”, Elsevier, 2007.