

Wpływ systemów oświetleniowych LED na zaburzenia nisko częstotliwościowe

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów i analizy wpływu systemów oświetleniowych opartych o oprawy LED w dwóch różnych konfiguracjach stosowania na ogólny poziom zaburzeń mało częstotliwościowych. Dodatkowo przeprowadzono badania dostępnych komercyjnie układów oświetleniowych LED oraz jarzeniowych w izolowanym środowisku pracy, badając wpływ wysokich poziomów zaburzeń na charakterystyki ich pracy. W podsumowaniu zaprezentowano proponowane kierunki rozwoju zarówno doboru układów oświetleniowych LED jak i proponowanych dróg ich dalszego rozwoju.

Abstract. The article presents the results of measurements and analysis of the impact of lighting systems based on LED luminaires in two different application configurations on the general level of low frequency disturbances. In addition, research was conducted on commercially available LED and fluorescent lighting systems in an isolated work environment, investigating the impact of high levels of disturbances on their performance characteristics. The summary presents the proposed development directions for both the selection of LED lighting systems and the proposed paths for their further development. **Impact of lightning systems LED on low frequency disturbances**

Słowa kluczowe: systemy oświetlenia, LED, przyrosty temperatury, moc bierna pojemnościowa.

Keywords: LED lighting systems, temperature increments, capacitive reactive power.

Wstęp

W ramach istniejącego na Politechnice Gdańskiej Laboratorium Inteligentnej Energetyki LAB-6 przy współdziałaniu Pomorskiej Specjalnej Strefy Ekonomicznej wykonywane są różnorodne prace związane szeroko rozumianymi badaniami w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej i jakości energii. W ramach prowadzonych prac zaobserwowano zmiany dotyczące zarówno, jakości energii elektrycznej jak i rodzaju występującej mocy biernej. Praca różnorodnych systemów oświetleniowych, elektronicznych i energoelektronicznych w warunkach występowania harmonicznych napięć i prądów stanowi od dawna ważny aspekt różnorodnych prac badawczych [1 - 6]. Wiąże się one z minimalizacją niekorzystnych oddziaływań wyższych harmonicznych na różnorodne elementy infrastruktury elektroenergetycznej. Jakość energii elektrycznej - to zbiór parametrów opisujących właściwości procesu dostarczania energii do użytkownika w normalnych warunkach pracy, określających ciągłość zasilania (długie i krótkie przerwy w zasilaniu) oraz charakteryzujących napięcie zasilania (wartość, niesymetrię, częstotliwość, kształt przebiegu). Do podlegających kontroli parametrów JEE należą: częstotliwość, wartość napięcia, wahania i odchylenia napięcia, zapady napięcia, przerwy w zasilaniu, przepięcia przejściowe i dorywcze, przepięcia o częstotliwości sieciowej, asymetria napięcia zasilającego, harmoniczne i interharmoniczne dla napięcia, napięcia sygnalizacyjne nałożone na napięcie zasilające. Określenie obowiązujących parametrów jakościowych energii elektrycznej dostarczanej odbiorcom w poszczególnych grupach przyłączeniowych podano w „rozporządzeniu systemowym” [7]. Za wprowadzanie do sieci każdej ilości mocy biernej pojemnościowej odbiorcy płacą dodatkową opłatę karną. Prowadzone na potrzeby zewnętrznych firm pomiary, jakości energii elektrycznej na różnorodnych obiektach zarówno przemysłowych jak i komercyjnych (biura, hotele) wykazują w okresie ostatnich 3-4 lat tendencję do zmiany ich charakteru. Pomiary na nich wykazują rozszerzenie się spektrum zaburzeń harmonicznymi. Przy równoczesnej zmianie charakteru obciążeń mocą bierną z indukcyjnego na pojemnościowy. Skutkuje to koniecznością wprowadzania kompensacji mocy biernej pojemnościowej. Zaobserwowane zmiany

dotyczą obiektów nowych wyposażanych zarówno w oświetlenie o charakterze jarzeniowym jak i źródła oświetlenia LED. Przeprowadzone inwentaryzacje wykazują niestety, iż nierzadko na obiektach tych znalazły masowe zastosowanie najtańsze źródła światła LED w postaci tzw. żarówek LED. Masowe wprowadzenie oświetlenia LED, poza spodziewanym dalszym spadkiem zapotrzebowania na pobieraną moc czynną, może skutkować wprowadzaniem dodatkowych zaburzeń związanych z poborami prądów niesinusoidalnych, pogorszeniem współczynnika mocy oraz wzrostem mocy biernej pojemnościowej, co zostało przedstawione min. w pracach: [8 - 12]. Szczegóły dotyczące podstawowych informacji o ich zastosowaniu znajdują się min w pracach [10 - 14] dodatkowo w szeregu opracowań [15 - 17] zawarto informacje o bezpieczeństwie użytkowania oświetlenia opartego o źródła LED i pojawiających się zagrożeniach związanych z stosowaniem tej technologii oświetlenia. Jednakże aspekty związane z efektywnością widmową i jej bezpieczeństwem nie są rozpatrywane w niniejszej pracy.

Parametrami podstawowymi z zakresu szeroko rozumianej jakości energii elektrycznej które zdaniem autorów pozwalają dobrze zdefiniować dany obiekt są:

- współczynnik zawartości harmonicznych THD w napięciu zasilania (oznaczany THD_U),
- indywidualne poziomy składowych harmonicznych napięcia,
- moc czynna (P), pozorna (S), bierna (składowych podstawowych) (QV), nieaktywna (N) wyznaczone zgodnie z [18],
- współczynnika mocy (PF) oraz $\cos(\phi)$.

Parametry powyższe powinny być wyznaczone zgodnie z zaleceniami zawartymi m.in w normach [18], [19]. Natomiast w zakresie oceny źródeł światła w zakresie ich oddziaływania na sieć zasilającą warto ocenie podać:

- pobory mocy zarówno czynnej, pozornej, biernej,
- współczynnik mocy.

Niestety parametry te nominalnie powinny być wyznaczone przy zasilaniu napięciem nieodkształconym. W rzeczywistym użytkowaniu ulegną one zmianie. W artykule zaprezentowano wybrane pomiary i badania przeprowadzone zarówno na obiektach przemysłowych oraz badania laboratoryjne wybranych małych źródeł oświetlenia (poniżej 25 W).

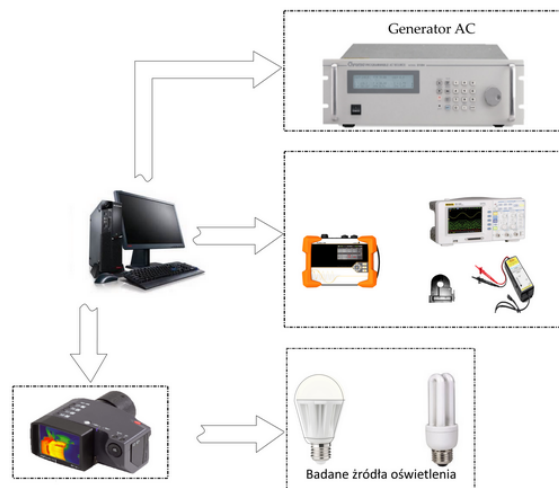
Układy pomiarowe w obiektach przemysłowych badania, jakości energii

Pomiary przeprowadzone w zakładzie oznaczonym „obiekt nr 1” wykonywano na nowo otwieranym budynku składającym się z dwóch kondygnacji, przeznaczonych pod biura i laboratoria badawcze o niskiej intensywności. Całkowita powierzchnia użytkowa budynku wynosiła ~1000 m². W czasie prowadzenia badań na obiekcie pracowało ~30 osób. Zidentyfikowane wyposażenie obiektu składało się głównie z rozproszonych obciążeń w postaci komputerów. W obiekcie nie zainstalowano żadnej specjalistycznej aparatury mogącej mieć wpływ na pobór mocy. Oszacowane całkowite zapotrzebowanie na moc włącznie z pracującymi urządzeniami klimatyzacyjnymi określone było na poziomie ~20 kW (zgodnie z umową moc zamówiona maksymalna wynosi 40 kW). Zasilanie obiektu było wykonane w oparciu o własną abonencką stacją transformatorową o mocy 250 kVA. Podstawowe oświetlenie na obiekcie jest realizowane za pomocą opraw jarzeniowych wspomaganych przez znaczną liczbę tanich opraw oświetleniowych dostosowanych do montażu popularnych źródeł oświetlenia LED małych mocy. Badania przedstawione w pracy zostały przeprowadzone na niektórych z zidentyfikowanych źródeł oświetlenia LED występujących na „obiekcie nr 1”. Przedstawione w pracy pomiary przeprowadzone na drugim obiekcie oznaczono „obiekt nr 2”. Były one wykonywane na zasilaniu hali produkcyjno - magazynowej o powierzchni około 10000 m² znajdującej się w fabryce produkcji okien. W obiekcie 2 występują sprężarki śrubowe firmy Kaeser Kompressoren z przekształtnikami energoelektronicznymi (3 sztuki o mocy elektrycznej 45 kW, 55 kW i 75 kW), urządzenia biurowe (około 20 komputerów) oraz oświetlenie LED w większości typu HIGHBAY z zasilaczami firmy Helvar o mocy 150 W (170 sztuk). Sprężarki w czasie pomiarów pracowały z małym obciążeniem. W obiekcie nie występują odbiory przemysłowe (silniki i urządzenia przetwarzania energii elektrycznej dużych mocy), a jedynie małe urządzenia pakujące, gdyż hala ma charakter magazynowy. Na wszystkich obiektach pomiary przeprowadzano miernikiem typu PQ - BOX 200 [20]. Przedstawione pomiary na obiektach przeprowadzano w okresie od ~4 godzin do 4 dni w czasie ich normalnego funkcjonowania.

Układy pomiarowe w badaniach źródeł oświetlenia

Do badań wybranych źródeł oświetlenia małych mocy w izolowanym układzie zasilania zastosowano system pomiarowy przedstawiony na rysunku 1. Wykorzystano w nim zasilacz Chroma typu 61503 [21] umożliwiający generację napięć przemiennych o zadanej zawartości harmonicznych. Badania przeprowadzano w systemie pomiarowym przedstawionym na rysunku 1. W skład systemu pomiarowego wchodziły dodatkowo: sonda napięciowa R&S RT - ZD 01, prądowa ALCL - 40 D, oscyloskopu RIGOL 1102 D, miernika PQ - BOX 200, kamery termowizyjnej VIGOCAM v.50 z polem wzorcowym. Do badań w izolowanym środowisku zasilania wytypowano źródła oświetlenia małej mocy (LED, jarzeniowe) o deklarowanych mocach rzędu 10 W - 14 W. Źródło jarzeniowe przebadano, jako reprezentanta starszej technologii. Stosowane jest jeszcze w znacznej ilości obiektów. Pomiary wykonywano na nowych źródłach, które przepracowały wcześniej 100 h przy zasilaniu nieodkształconym napięciem 230 V. Badania wykonywano przez okres, co najmniej 120 min gwarantujący osiągnięcie stabilności temperaturowej badanych obiektów, w temperaturze otoczenia 25°C±5°C.

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



Rys. 1. Schemat blokowy zastosowanego systemu pomiarowego

Tabela 1. Deklarowane parametry źródeł światła małych mocy

Producent	Oznaczenie w pracy	Moc [W]	Strumień świetlny [lm]	Napięcie pracy [V]	Współczynnik PF
Pila	E 1	14	1521	220 ÷ 240	ND *
Philips	E 2	13	1521	220 ÷ 240	ND *
Toshiba	E 3	11	1055	230	ND *
Kobi	E 4	10	810	230	0,5
Foxter	E 5	11	600	220 ÷ 240	ND *
Osram	E 6	29	1300	220 ÷ 240	>0,5

Źródła LED, źródła jarzeniowe

* - ND – wartość niezadeklarowana przez producenta

W tabeli 2 podano wartości poszczególnych testów, jakim podawano badanie źródła oświetlenia. Jako poziom odniesienia przyjęto badanie oznaczone test T1, w którym źródła oświetlenia były zasilane napięciem pozbawionym zaburzeń harmonicznych. Dla testów T2, T3 i T4 wartości poziomów zaburzeń harmonicznych napięcia zostały dobrane arbitralnie. Wszystkie pomiary prowadzono przy poziomie składowej podstawowej (50 Hz) wynoszącym 230 V. Wartości wszystkich harmonicznych w zakresie od 14 - tej harmonicznej do 40 - tej harmonicznej wynosiły 0%. Wartości wprowadzanych zaburzeń harmonicznych podano w % w stosunku do wartości składowej podstawowej podano również wartość współczynnika zawartości harmonicznych w napięciu THD_U (wartość teoretyczna).

Tabela 2. Zastosowane poziomy testów w badaniach izolowanym środowisku zasilania

Rząd harmonicznej	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
Kod badania	T1	T2	T3	T4
3	0.0%	3.0%	5.0%	8.0%/90°
5	0.0%	3.0%	6.0%	8.0%
7	0.0%	2.0%	5.0%	8.0%/90°
9	0.0%	1.5%	1.5%	0.0%
11	0.0%	1.0%	3.5%	0.0%
13	0.0%	1.0%	3.0%	0.0%
THD	0%	5.1%	10.5%	13.9%

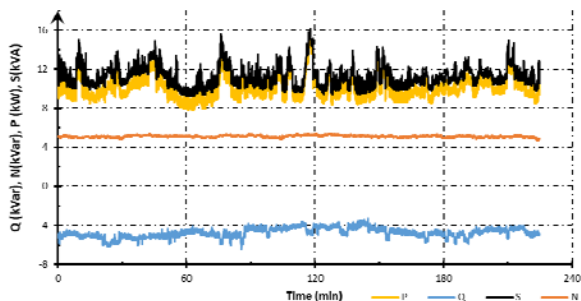
- gdzie 90° oznacza przesunięcie o kąt 90° względem składowej podstawowej U₁

Pomiary wykonane w systemie wskazują iż poziom THD_U dla testu T1 wynosił 0,11%. Badania przyrostów temperatury źródeł światła zrealizowano poprzez rejestrację ich termogramów za pomocą kamery termowizyjnej VIGOCAM v.50, oraz wzorcowego źródła odniesienia o znanym współczynniku emisyjności (ε) umieszczonego w polu widzenia kamery. Takie podejście pozwalało na minimalizację wpływu zmienności współczynnika emisyjności (ε) badanego obiektu, którego znajomość jest konieczna do wyznaczenia temperatury. Podawane w pracy średnie przyrosty temperatury (ΔT_{AV}) powierzchni

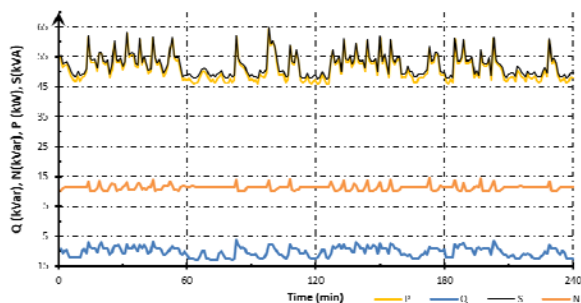
obserwowanej wyznaczano względem wzorcowego źródła odniesienia. Pomiary zmian przyrostów temperatury (ΔT_{AV}) źródeł oświetlenia wykonywano w celu weryfikacji zachowania się tego typu odbiorników w przypadku zasilania napięciem silnie odkształconym [6].

Wyniki pomiarów obiektów przemysłowych

W rysunku 2 i rysunku 3 przedstawiono zarejestrowane przebiegi zmienności mocy (czynnej, pozornej, biernej, nieaktywnej) zarejestrowane na obiektach nr 1 nr 2.

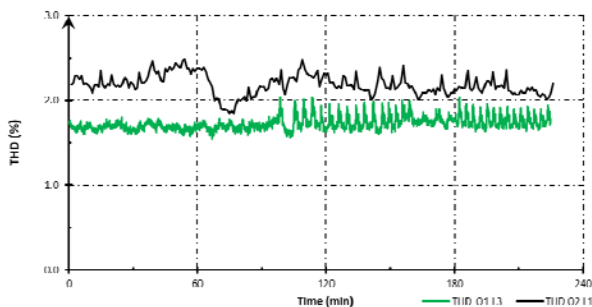


Rys. 2. Pomiary mocy na obiekcie nr 1



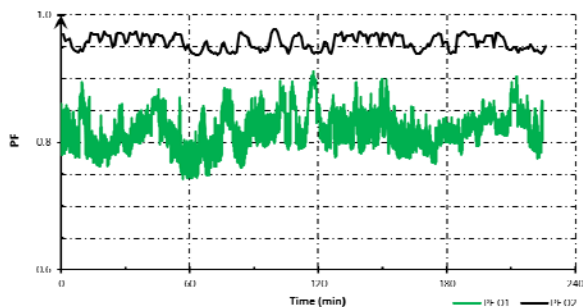
Rys. 3. Pomiary mocy na obiekcie nr 2

Badany obiekt nr 1 charakteryzował się mocą bierną pojemnościową na poziomie 6 kVar natomiast obiekt nr 2 mocą bierną pojemnościową na poziomie 10 kVar. Na rysunku 4 przedstawiono zarejestrowane maksymalne wartości współczynnika THD_U (w napięciu zasilania) dla fazy L 3 dla obiektu nr 1 oraz w fazie L 1 dla obiektu nr 2 (w pozostałych fazach zarejestrowano niższe poziomy współczynnika THD_U w obu przypadkach mamy do czynienia z poziomem THD_U w okolicach 2% co zdaniem autorów należy uznać za typowy poziom zaburzeń.

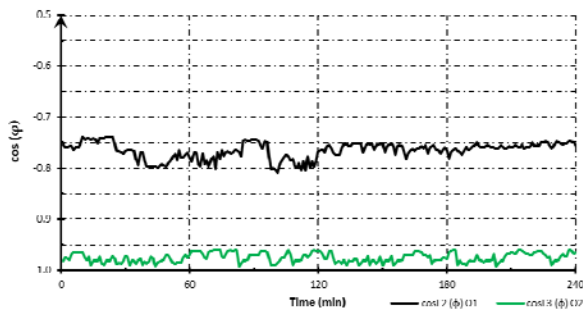


Rys. 4. Zarejestrowane wartości THD na obiekcie nr 1 i nr 2

Na rysunku 5 przedstawiono zarejestrowane wartości współczynnika mocy PF dla obu obiektów. Obiekt nr 2 charakteryzował się mimo występowania większych odbiorników aktywnych wyższym poziomem współczynnika mocy oraz $\cos(\phi)$ bardziej zbliżonym do wartości -1. Wartość współczynnika $\cos(\phi)$ w fazach L 2 dla obiektu nr 1 oraz w fazie L 3 dla obiektu nr 2 przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 5. Zarejestrowane wartości współczynnika mocy (PF) na obiekcie nr 1 i nr 2



Rys. 6. Zarejestrowane wartości $\cos(\phi)$ na obiekcie nr 1 i nr 2

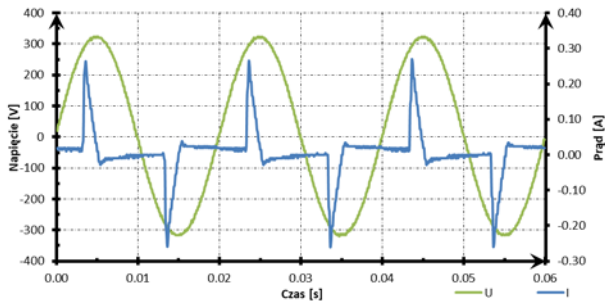
Wyniki pomiarów źródeł oświetlenia małej mocy

W tabeli 4 podano zestawienie wyników pomiarów podstawowych parametrów elektrycznych i średnich przyrostów temperatury ΔT_{AV} otrzymanych dla badanych źródeł oświetlenia przy różnych poziomach występujących zaburzeń harmonicznymi w napięciu zasilania.

Tabela 3. Wybrane wyniki pomiarów podstawowych parametrów źródeł oświetlenia małych mocy

Oznaczenie / Kod testu	P [W]	Q [Var]	PF	CF	ΔT_{AV} [°C]
E 1 / T 1	14.19	-21.49	0.56	3.58	56.0
E 1 / T 2	14.12	-20.96	0.58	3.43	56.1
E 1 / T 3	14.27	-26.81	0.50	3.53	56.2
E 1 / T 4	14.19	-26.93	0.50	3.82	57.5
E 2 / T 1	13.26	-21.35	0.50	3.16	64.0
E 2 / T 2	13.12	-20.40	0.51	2.89	64.2
E 2 / T 3	13.14	-26.59	0.40	4.35	64.8
E 2 / T 4	13.31	-21.35	0.40	4.31	65.1
E 3 / T 1	10.74	-17.02	0.50	2.93	59.6
E 3 / T 2	10.76	-16.74	0.50	2.89	59.4
E 3 / T 3	10.89	-21.80	0.41	3.44	59.6
E 3 / T 4	10.86	-21.89	0.41	3.41	60.1
E 4 / T 1	9.66	-15.85	0.50	3.30	67.3
E 4 / T 2	9.59	-15.16	0.50	2.97	66.9
E 4 / T 3	9.68	-20.37	0.40	4.45	70.1
E 4 / T 4	9.85	-20.97	0.40	4.34	71.8
E 5 / T 1	10.38	-14.29	0.60	2.59	58.73
E 5 / T 2	10.29	-14.34	0.60	2.48	62.22
E 5 / T 3	10.26	-17.75	0.50	3.39	63.22
E 5 / T 4	11.69	-19.51	0.50	3.04	63.76
E 6 / T 1	16.08	-21.18	0.60	2.53	59.61
E 6 / T 2	15.82	-20.95	0.60	2.54	59.42
E 6 / T 3	15.39	-25.27	0.50	3.42	61.23
E 6 / T 4	17.94	-28.27	0.51	3.05	61.91

Na rysunku 7 przedstawiono typowy dla badanych źródeł światła chwilowy przebieg napięć i prądów dla badanego źródła światła oznaczonego E4 (producent Kobi). Uzyskane wyniki wskazują, iż źródła światła o małej mocy charakteryzują się znacznymi poborem mocy biernej a tym samym niskim współczynnikiem mocy. Dodatkowo należy zauważyć, iż moc ma charakter pojemnościowy oraz współczynnik mocy ulega dalszemu zmniejszeniu w przypadku pracy z napięciem silnie odkształconym.



Rys. 7. Przebieg napięć i prądów chwilowych na badanym źródle światła E4

Równocześnie należy zauważyć, iż wyznaczone przyrosty średniej temperatury są niewielkie w przypadku zasilania ich napięciem silnie odkształconym.

Wnioski

Przedstawione problemy wydają się wspólne dla nowo powstających bądź modernizowanych obiektów, na których zastosowano oświetleniowe źródła LED. Przeprowadzone pomiary wskazują, iż masowe zastosowanie z jednej strony energooszczędnych źródeł oświetlenia LED zmniejsza zapotrzebowanie na moc. Jednakże w przypadku stosowania najtańszych rozwiązań małych mocy układy te są w wielu przypadkach dodatkowym źródłem zaburzeń. Pomiary pojedynczych źródeł oświetlenia LED (poniżej 25 W) wskazują, iż mamy do czynienia w ich przypadku z spadkiem współczynnika mocy (PF) do wartości około 0,5. Zaimplementowanie ich w obiektach wskazuje, iż mimo ich małej mocy, ale w wyniku dużej ich liczby mogą one w znaczący sposób obniżyć całkowity współczynnik mocy na danym obiekcie. Należy też zauważyć, iż gdyby na obiektach następował dalszy wzrost poziomu zaburzeń harmonicznymi napięcia należy się spodziewać dalszego spadku tego współczynnika. Równocześnie na obiektach występuje ze względu na charakter konstrukcji źródeł oświetlenia konieczność kompensacji mocy biernej pojemnościowej. W przypadku braku takiej kompensacji najczęściej skutkuje to pojawieniem się opłat za wprowadzanie energii biernej pojemnościowej. Celowym w takich przypadkach wydaje się zastosowanie systemów zarządzania energią. Pozwalają one z jednej strony na ciągły monitoring pobieranej energii, jaki i sterowanie stosowanymi układami kompensacji mocy biernej. Dodatkowo przeprowadzone badania pozwalają wnioskować o wprowadzenie wymagań dotyczące minimalnych współczynników mocy dla oświetleniowych źródeł LED małych mocy (poniżej 25 W). Ponieważ przy masowym ich stosowaniu mogą znacząco wpływać na obiekt. Autorzy proponują, aby wprowadzić wymóg stosowania w małych źródłach światła LED współczynnika mocy o wartości większej niż 0,9 tak jak dla układów wyższych mocy, miałyby to charakter prewencyjny. Niestety będzie się to na pewno wiązało z wzrostem ich ceny. Takie rozwiązania są obecnie dostępne na niektórych rynkach [22].

Autorzy: dr inż. Stanisław Galla, Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Katedra Metrologii i Optoelektroniki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233, Gdańsk, E-mail: galla@eti.pg.edu.pl; dr inż. Mirosław Włas, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Automatyki Napędu Elektrycznego i Konwersji Energii, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233, Gdańsk, E-mail: mwlas@pg.edu.pl

LITERATURA

- [1] Dolara, A., and Leva, S., 2012, "Power Quality and Harmonic Analysis of End User Devices," *Energies*, **5**(12), pp. 5453–5466.
- [2] Molina, J., Mesas, J. J., Mesbahi, N., and Sainz, L., 2017, "LED Lamp Modelling for Harmonic Studies in Distribution Systems," *Transmission Distribution IET Generation*, **11**(4), pp. 1063–1071.
- [3] A. F. Zobaa, and S. H. E. Abdel Aleem, 2014, "A New Approach for Harmonic Distortion Minimization in Power Systems Supplying Nonlinear Loads," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **10**(2), pp. 1401–1412.
- [4] Peretto, L., Tinarelli, R., Rovati, L., and Bernabei, M., 2017, "On the Behavior of LED Lamps under Non-Sinusoidal Voltage Conditions," *2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, pp. 1–6.
- [5] "Power Quality Problems with Industrial LED Lighting" [Online]. Available: <http://www.ecmweb.com/power-quality-reliability/uncovering-pq-problems-industrial-led-lighting>. [Accessed: 10-Jan-2018].
- [6] Wlas, M., and Galla, S., 2018, "The Influence of LED Lighting Sources on the Nature of Power Factor," *Energies*, **11**(6).
- [7] *Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z 04.05.2007 r. w sprawie Szczegółowych Warunków Funkcjonowania Systemu Elektroenergetycznego*, Dz. U. Nr 93, Poz. 623, 2007.
- [8] Tan, S. T., Sun, X. W., Demir, H. V., and DenBaars, S. P., 2012, "Advances in the LED Materials and Architectures for Energy-Saving Solid-State Lighting Toward #x201C;Lighting Revolution #x201D;," *IEEE Photonics Journal*, **4**(2), pp. 613–619.
- [9] Aman, M. M., Jasmon, G. B., Mokhlis, H., and Bakar, A. H. A., 2013, "Analysis of the Performance of Domestic Lighting Lamps," *Energy Policy*, **52**, pp. 482–500.
- [10] Gayral, B., 2017, "LEDs for Lighting: Basic Physics and Prospects for Energy Savings," *Comptes Rendus Physique*, **18**(7), pp. 453–461.
- [11] Wiśniewski, A., 2017, "Lampy LED nowej technologii - zamienniki żarówek tradycyjnych i halogenowych," *Przegląd Elektrotechniczny*, **1**(12), pp. 291–294.
- [12] Ptak, P., Górecki, K., and Zarębski, J., 2017, "Układy zasilające stosowane w lampach LED," *Przegląd Elektrotechniczny*, **R. 93**, nr 3.
- [13] Salvadori, G., Fantozzi, F., Rocca, M., and Leccese, F., 2016, "The Energy Audit Activity Focused on the Lighting Systems in Historical Buildings," *Energies*, **9**(12).
- [14] Khan, N., and Abas Kalair, N., 2011, *Comparative Study of Energy Saving Light Sources*.
- [15] Behar-Cohen, F., Martinsons, C., Viénot, F., Zissis, G., Barlier-Salsi, A., Cesarini, J. P., Enouf, O., Garcia, M., Picaud, S., and Attia, D., 2011, "Light-Emitting Diodes (LED) for Domestic Lighting: Any Risks for the Eye?," *Progress in Retinal and Eye Research*, **30**(4), pp. 239–257.
- [16] Bellia, L., Bisegna, F., and Spada, G., 2011, *Lighting in Indoor Environments: Visual and Non-Visual Effects of Light Sources with Different Spectral Power Distributions*.
- [17] Bellia, L., Bisegna, F., and Spada, G., 2011, *Lighting in Indoor Environments: Visual and Non-Visual Effects of Light Sources with Different Spectral Power Distributions*.
- [18] 2010, "IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions," *IEEE Std 1459-2010* (Revision of IEEE Std 1459-2000), pp. 1–50.
- [19] "PN-EN 50160:2010+A1:2015" [Online]. Available: <https://wiedza.pkn.pl>. [Accessed: 21-Apr-2018].
- [20] "TD_PQ-Box 200_en_160506.Pdf." [Online]. Available: https://www.a-eberle.de/sites/default/files/media/TD_PQ-Box%20200_en_160506.pdf [Accessed: 21-Apr-2018].
- [21] "61500-Acsource.Pdf." [Online]. Available: <http://www.chromausa.com/pdf/61500-acsource.pdf> [Accessed: 21-Apr-2018].
- [22] "PF_Factor_california." [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/2a03/8b20e758b6d60f050ae18746ca413dbaa48b.pdf> [Accessed: 10-Jan-2018].