

doi:10.15199/48.2024.08.53

Trwałość łączeniowa i udarowa źródeł oświetlenia LED w środowiskach z występującymi zaburzeniami harmonicznymi

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań trwałości łączeniowej i udarowej źródeł światła LED w przypadku występowania zaburzeń harmonicznymi w napięciu zasilania. Przeprowadzone badania wskazują na znaczący wpływ odkształceń napięcia zasilania zarówno na trwałość łączeniową jak i na badania wytrzymałości udarowej przeprowadzane wg zaleceń zawartych w EN 61000-4-5.

Abstract. The article presents the results of testing the electrical and shock durability of LED light sources in the event of harmonic disturbances in the supply voltage. The tests carried out indicate a significant impact of supply voltage distortions on both the electrical durability and the impact strength tests carried out in accordance with the recommendations contained in EN 61000-4-5. (**Electrical and impulse durability of LED lighting sources in environments with occurring harmonic disturbances**)

Słowa kluczowe: harmoniczne, udary, czas życia.

Keywords: harmonics; surge; lifetime.

Wstęp

Trwałość łączeniowa jest jednym z ważnych parametrów charakteryzujących źródła oświetlenia wykorzystujące technologię LED, która obecnie dominuje już nad innymi technologiami produkcji źródeł światła. Źródła te popularnie nazywane żarówkami Ledowymi n260 stałe zagościły w zarówno w przemyśle jak i w domach. Do produkcji zaawansowanych źródeł oświetlenia LED wymaga się zarówno dysponowania odpowiednimi technologiami jak również stosownym zapleczem surowcowym. Masowe wprowadzenie ich do powszechnego użytku trwa już około 15 lat. (Za pierwsze komercyjne masowe źródło światła LED można uznać żarówkę opracowaną w Centrum Badawczym Philips w 2009 r). Od tego momentu źródła oświetleniowe LED przeszły bardzo radykalne zmiany zarówno w technologii wykonania diod LED jak i układów do ich zasilania. Do produkcji diod LED wykorzystywane są związki Galu (Ga) łączone z takimi pierwiastkami jak arsen, fosfor czy ind. Związki galu w zależności od substancji domieszkującej pozwalają na uzyskanie różnych barw podstawowych światła emitowanego przez diodę LED (Tab. 1 [1, 2, 3]).

Tabela 1. Kolory podstawowe LED w zależności od domieszkowania Ga

Materiał	Długość fali [nm]	Barwa	V _F at 20 [mA]
GaAs	850 – 940	Infra – Red	1,2
GaAsP	605 – 660	Red / Amber	1,8 / 2,0
GaAsP:N	605 – 620	Yellow	2,2
AlGaP	550 – 570	Green	3,5
GaInN	450	White	4,0

Technologie stosowane do produkcji diod LED są obecnie względnie tanie i dopracowane. Jednakże w ostatnim okresie można zaobserwować pewne ograniczenie wynikające z masowości ich produkcji. Obecnie światowa produkcja diod LED sięga około 18 MLD/ jednostek, co stanowi około 50 – 55% produkcji wszystkich źródeł oświetlenia wytwarzanych na świecie wg [4] a wg niektórych analiz [5], [6] do roku 2030 ma się ona, co najmniej podwoić. Co może stanowić dość poważne wyzwanie ze względu na ograniczone zdolności pozyskiwania materiału podstawowego do produkcji diod elektroluminescencyjnych, jakim jest Gal. Obecnie światowa produkcja Galu wyniosła około 430 ton w roku, 2021 z czego ponad 70% procent produkcji przypadało na Chiny. Ostatnie zawirowania na rynku surowcowym, związane z ograniczeniami wprowadzonymi w zakresie

eksportu Galu z Chin mogą zdecydowanie zakłócić rynek produkcji elektroniki a w tym źródeł oświetlenia LED. Oprócz wprowadzania nowych bardziej wydajnych metod recyklingu w celu odzyskiwania surowców strategicznych, jedną z metod zmniejszenia szacowanego zapotrzebowania na nowe źródła światła LED jest wydłużenie ich żywotności. O ile średnia żywotność diod elektroluminescencyjnych w warunkach standardowych (25°C±5°) sięga ponad 100 tys. godzin (jest ona minimalnie zależna od barwy światła emitowanego przez diodę LED). W przypadku lampy LED, jej żywotność dla średniej klasy lampy wynosi tylko około 25 tys. godzin. Stan ten wynika z jej budowy. Każda lampa LED w swej strukturze zawiera układu zasilania, układ odprowadzania ciepła, układ emitujący światło i kształtujący jego emisję. Ta mniejsza żywotność spowodowana jest to głównie zdecydowanie mniejszą niezawodnością elementów układu zasilającego jak i równocześnie większą ich podatnością na uszkodzenia spowodowane czynnikami środowiskowymi jak i zmianami starzeniowymi.

Należy jednakże tu zauważyć, że obecnie produkowane źródła oświetlenia zawierają zdecydowanie mniej elementów niż podobne rozwiązania sprzed paru lat. Dowodem tego stanu są przykłady przedstawione na fotografiach 1, 2.



a)

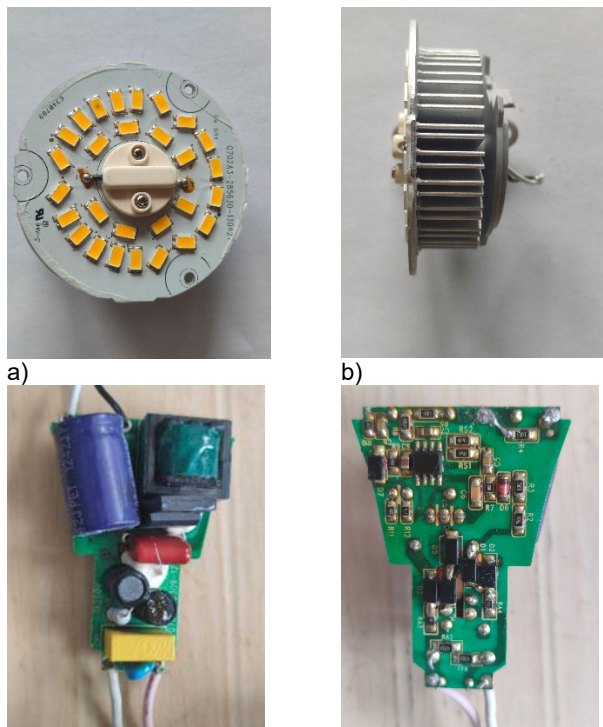


b)

Fot. 1 Poglądowe zdjęcie współczesnej płytki z źródła oświetlenia LED a) strona górna, b) strona dolna

Obecne rozwiązania zawierające zdecydowanie mniej elementów charakteryzują się wyższym czasem życia a tym samym zmniejszeniem zużycia materiałów podstawowych. Zmniejszenie ilości elementów użytych do budowy źródeł oświetlenia zdecydowanie wpływa na wydłużenie ich czasu życia. Badania nad modelowaniem czasu życia są szeroko

prowadzone na całym świecie. Przykłady znajdziemy m.in. w następujących publikacjach [7], [8], [9], [10]. Niestety na żywotność tych układów wpływają także szeroko rozumiane warunki środowiskowe nieograniczające się tylko do podstawowych parametrów pracy urządzenia takich jak wilgotność i temperatura.



a) Fot. 2 Poglądowe zdjęcie płytki z źródła oświetlenia LED sprzed 5 lat a) strona górna z diodami LED, b) radiator, c) strona górna płytki, d) strona dolna płytki

Obecnie w skład tego środowiska wchodzi także warunki zasilania, które zdaniem autorów zdecydowanie odbiegają od wskaźników określających jakość energii jakie zawarto w normie PN-EN 50160 [11]. Przebiegi napięcia zasilającego obserwowane w sieciach elektroenergetycznych charakteryzują się obecnie znacznymi odkształceniami, co istotnie wpływa na żywotność urządzeń zasilanych z sieci. Wzrost zakłóceń

występujących w sieciach energoelektrycznych niskiego napięcia jest spowodowany głównie przez wzrastający udział odbiorników nieliniowych. Obecnie każde urządzenie elektryczne, elektroniczne zasilane z sieci elektroenergetycznej posiada wbudowaną lub zewnętrzną przetwornicę AC/DC czy DC/DC. Na stan ten mają wpływ także mikro źródła zasilania, które w niektórych przypadkach są istotnymi źródłami zaburzeń. Do takich elementów zaliczamy lampy LED. Prowadzone w sieciach niskiego napięcia obserwacje wskazują istotny wzrost w nich poziomu zaburzeń niskoczęstotliwościowych. Stan ten potwierdzają wyniki badań zaprezentowane w publikacjach: [12], [13], [14], [15], [16], [17]. W wielu przypadkach zaburzenia te mogą bardzo niekorzystnie oddziaływać na innych odbiorniki zasilane z tej samej sieci [18], [19], [20], [21], [18], [19], [20], [21]. Na szczęście tylko w nielicznych jeszcze przypadkach dochodzi do znacznych odkształceń w napięciu zasilania, co znacząco może wpływać na czas życia niektórych urządzeń elektronicznych. Dlatego też autorzy podjęli się sprawdzenia trwałości łączeniowej popularnych źródeł oświetlenia LED występujących na rynku Środkowoeuropejskim (Polska) w warunkach synergicznego oraz pojedynczego występowania zaburzeń niskoczęstotliwościowych i udarowych w celu sprawdzenia czy w przypadku wystąpienia zakłóceń nastąpi wykrywalne obniżenie żywotności wybranych lamp LED.

Obiekty badań

Badaniom trwałości łączeniowej podawano po 21 szt. z danego typu ogólnie dostępnych źródeł oświetlenia LED (po 6 szt. na każdy z poziomów probierczych) oraz po 3 szt. dla badań udarowych. Wybrano źródła światła występujące w tzw. średniej półce cenowej (przedział cenowy 20 – 35 PLN, 3,5 – 8 Euro za sztukę, 4,4 Euro – 1 PLN). Podstawowe dane techniczne badanych źródeł oświetlenia LED zadeklarowane przez producentów zestawiono w Tab. 2.

Wszystkie badania były przeprowadzane na źródłach oświetlenia, które przepracowały w pracy ciągłej 100 h a następnie były podawane testom łączeniowym i udarowym. Testom łączeniowym poddawano po 6 próbek danego typu, testom udarowym poddano po 3 próbki z danego typu (badania przeprowadzono pojedynczo).

Tabela 2. Dane podstawowe deklarowane przez producentów dla badanych źródeł światła LED

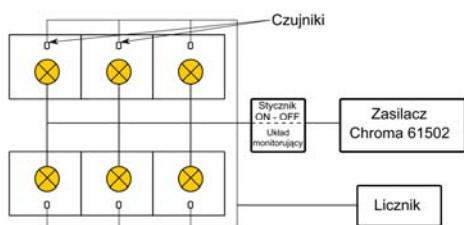
Producent:	Lampa A	Lampa B	Lampa C	Lampa D
Moc [W]	10	10	10	13
Strumień świetlny [lm]	1055	806	840	1521
Temperatura barwy [K]	2700	4000	3000	2700
Czas włączenia [s]	<0.5 – 60%	<0.1	<0.1	N/D
Oddanie barwy	80	97	>80	N/D
Trwałość [h]	15000	30000	40000	15000
Liczba cykli wł/wył [Cykl]	100000	25000	20000	30000
Temp pracy [°C]	-20° - 40°	-20° - 40°	N/D	N/D
Napięcie pracy [V]	220 - 240	230	220 - 240	220 - 240
Współczynnik mocy	N/D	N/D	>0,5	N/D
Częstotliwość napięcia pracy [Hz]	50 – 60	50	50 – 60	50 – 60
Funkcje inne	N/D	N/D	Tak *	N/D

*- możliwość pracy przy 3 poziomach strumienia świetlnego 100%, 50% i 10%
N/D – nie dotyczy

Układy pomiarowe

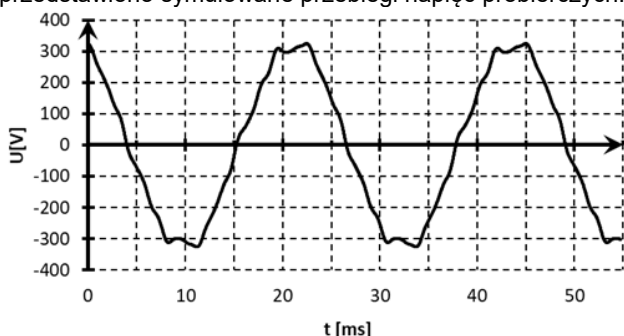
Na rysunku 1 przedstawiono konfigurację układu do badań trwałości łączeniowej. Układ składał się z zasilacza programowalnego Chroma 61502, układu przełączającego wraz z zestawem do pomiaru napięć i prądów, układu

kontroli luminacji wraz z licznikiem cykli załączenia badanej lampy oraz 6 opraw do zamocowania badanych lamp. Badania trwałości łączeniowej wykonywano dla trzech przebiegów napięcia zasilania, charakteryzujących się różną zawartością harmoniczną.

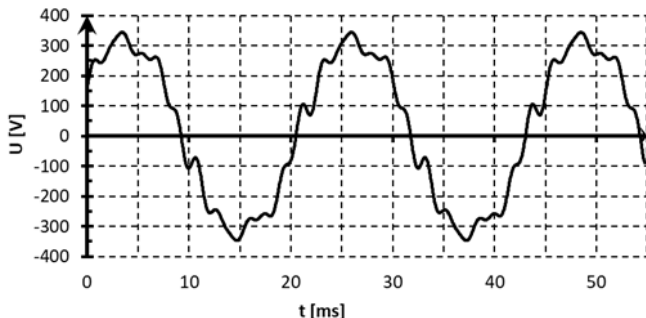


Rys.1. Schemat układu pomiarowego do badań trwałości łączeniowej

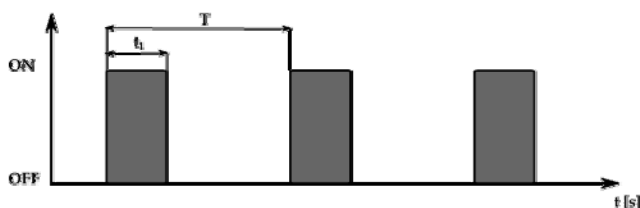
Zastosowane poziomy zniekształceń napięcia zasilania (napięcia probiercze) dla badań trwałości łączeniowej i udarowej oparto o badania własne autorów i są one efektem prowadzonych analiz emisji harmonicznych w sieciach elektroenergetycznych [21], [22]. Podczas testów za pomocą źródła Chroma 61502 symulowano dwa odkształcone przebiegi napięć charakteryzujące się współczynnikiem zawartości harmonicznych THD_U odpowiednio 5,8% oraz 12,3%. Na rysunku 2 i rysunku 3 przedstawiono symulowane przebiegi napięć probierczych.



Rys. 2 Przebieg napięcia testowego dla THD wynoszącego 5,8%



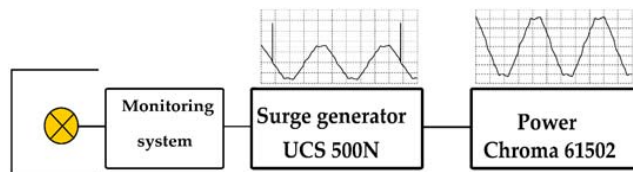
Rys. 3 Przebieg napięcia testowego dla THD wynoszącego 12,3%



Rys. 4 Przebieg czasowy operacji włącz - wyłącz

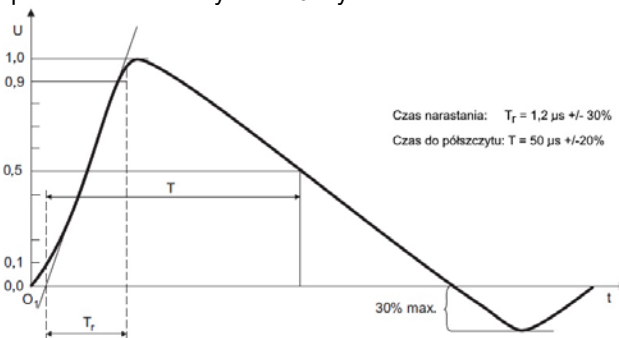
Typowy przebieg badania trwałości łączeniowej przedstawiono na rysunku 4, wszystkie badania przeprowadzono przy czasie t_1 włączenia źródła oświetlenia LED wynoszącym 4 s oraz okresie powtarzania T wynoszącym 12 s. Pomiary trwałości wykonywano w cyklach ciągłych. Dla badań napięciem nieodkształconym założono, iż badanie będzie zatrzymane po wykonaniu, co najmniej dwóch pełnych znamionowych cykli włączania/wyłączania (jeden cykl pomiarowy trwał około 2 minuty).

Na rysunku 5 przedstawiono układ do testów udarowych przy występowaniu składowych harmonicznych w napięciu zasilania. Układ zbudowany był z zasilacza Chroma 61502, generatora udarów testowych UCS500N oraz układu monitorującego.

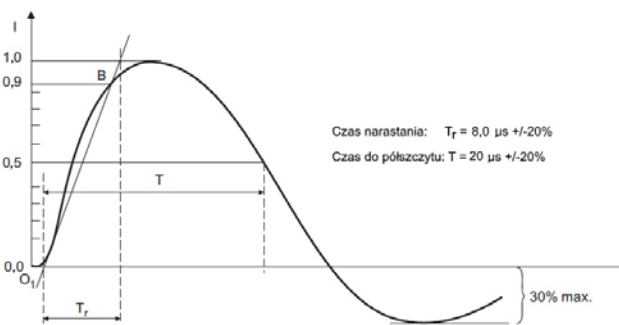


Rys. 5 Schemat układu pomiarowego w badaniach trwałości udarowej Przebieg napięcia testowego dla THD wynoszącego 5,8%

Badania odporności lamp na udar 1,2/50 μ s (8/20 μ s) przeprowadzono dla tych samych wartości współczynników THD zawartości harmonicznych jak w badaniach trwałości łączeniowej. Badania przeprowadzono zasilając obwody probiercze generatora UCS 500N z zasilacza Chroma 61502. Generator UCS 500N dostarczał do obwodu badanego udary testowe o kształcie zgodnym z wymaganiami normy EN 61000-4-5. Kształty typowego udaru napięciowego 1,2/50 μ s i prądowego 8/20 μ s przedstawiono na rysunku 6 i rysunku 7.



Rys. 6 Przebieg czasowy udaru napięciowego 1,2/50 μ s. Zaciski L, N generatora UCS 500N otwarte.



Rys. 7 Przebieg czasowy udaru prądowego 1,2/50 μ s. Zaciski L, N generatora UCS 500N zwarte rezystancją 2 Ω

Podczas testów badany obiekt narażony był pięcioma udarami o polaryzacji dodatniej i pięcioma o polaryzacji ujemnej.

Zgodnie z zaleceniami zawartymi w normie udary synchronizowano do przebiegu napięcia zasilającego przy następujących jego kątach 0°, 90°, 180°, 270°, 360°. Badania wykonywano przy napięciach udarowych wynoszących 500 V, 1000 V i 2000 V. Wszystkie badane lampy mieściły się w przedziale mocowym 5 + 25 W. Dla tego zakresu zgodnie z zaleceniami, każda lampa musi charakteryzować się odpornością 0,5 kV dla udarów wstrzykiwanych do przewodów L-N i 1 kV gdy udar jest wstrzykiwany do przewodów L-PE, N-PE

Wyniki badań trwałości łączeniowej

Przeprowadzone pomiary zestawiono w tab. 3. Podane wyniki przeprowadzonych cykli pracy zaokrąglano do tysięcy. W tabeli podano także deklarowane cykle znamionowe wytrzymywane przez źródło oświetlenia. Literą U oznaczono liczbę uszkodzonych źródeł oświetlenia (całkowity brak strumienia świetlnego), literą D oznaczono uszkodzenie charakteryzujące się uszkodzeniem układu regulacji strumienia świetlnego. Od razu należy zauważyć,

iż w przypadku zasilania napięciem nieodkształconym ($THD_U = 0\%$) dla wszystkich badanych próbek deklarowane trwałości są zdecydowanie wyższe. Żadna z badanych próbek źródeł oświetlenia LED nie uległa uszkodzeniu dla znamionowej liczby cykli przełączania. Badania prowadzono do uzyskania 2,5 – 4 krotności deklarowanych cykli łączeń przez danego producenta.

Tabela 3. Wyniki pomiarów trwałości łączeniowej źródeł oświetlenia przy zasilaniu napięciami probierczymi

Napięcie zasilania	Producent	Lampa A		Lampa B		Lampa C		Lampa D	
	Cykle znamionowe	100000		25000		20000		30000	
	THD_U	Cykl	U	Cykl	U	Cykl	U	Cykl	U
230 [V]	0	~250000	0	~100000	0	~80000	0	~90000	0
230 [V]	5,9	~250000	0	~100000	1	~80000	1D	~90000	2
230 [V]	12,3	~250000	1	~100000	3	~60000	5D/1U	~70000	6

U – uszkodzenia brak strumienia świetlnego, D – uszkodzone zmiana strumienia świeci wyłącznie na max

Tabela 4. Dane podstawowe deklarowane przez producentów dla badanych źródeł światła LED

Napięcie zasilania	Producent	Lampa A			Lampa B			Lampa C			Lampa D		
	THD_U [%]	500 [V]	1000 [V]	2000 [V]	500 [V]	1000 [V]	2000 [V]	500 [V]	1000 [V]	2000 [V]	500 [V]	1000 [V]	2000 [V]
230 [V]	0	PASS	PASS	FAIL	PASS	PASS	PASS	PASS	PASS	FAIL	PASS	PASS	FAIL
230 [V]	5,9	PASS	FAIL	N/A	PASS	PASS	PASS	PASS	FAIL	N/A	PASS	FAIL	N/A
230 [V]	12,3	PASS	FAIL	N/A	PASS	FAIL	N/A	FAIL	N/A	N/A	PASS	FAIL	N/A

PASS – wynik badania pozytywny źródło oświetlenia pracuje poprawnie po podaniu pełnej serii udarów o danym poziomie napięć tzn.

5 udarów o polaryzacji + i 5 udarów o polaryzacji – o danej wartości,

FAIL – uszkodzenie źródła oświetlenia w wyniku badania,

N/A – badanie niewykonywane

Wyniki badań trwałości udarowej przy zasilaniu napięciem odkształconym

Badania trwałości udarowej przy zasilaniu napięciem odkształconym przeprowadzone na próbkach nowych, które przepracowały po 100 h pracy ciągłej przy zasilaniu napięciem nieodkształconym. W tab.4 przedstawiono uzyskane wyniki trwałości na udary testowe w przypadku zasilania badanych lamp napięciem nieodkształconym oraz odkształconym o takich samych poziomach THD_U jak w badaniu trwałości łączeniowej.

Dyskusja nad wynikami

Uzyskane wyniki wskazują na istotny wpływ poziomu odkształcenia napięcia zasilającego badaną lampę na jej trwałość. Mimo iż nie uzyskano danych niezbędnych do wyznaczenia żywotności w warunkach zasilania nieodkształconego dla badań w przypadku zasilania napięciem odkształconym dokonano szeregu obserwacji. Dla średnich poziomów harmonicznych reprezentowanych w teście przez THD_U rzędu około 6% zaobserwowano widoczny wpływ odkształcenia przebiegu napięcia na trwałość łączeniową. Trwałość łączeniowa uległa istotnemu zmniejszeniu przy wzroście THD_U do wartości 12%. W tym przypadku wszystkie testowane lampy producenta C i D uległy uszkodzeniu. W przypadku producent 2 uszkodzona została połowa badanych lamp z badanej partii.. Dla pierwszego producenta uszkodzeniu uległa tylko jedna lampa. Dodatkowo na podstawie wyników uzyskanych dla testów, gdzie badane lampy narażane były udarem 1,2/50 μ s widać, że przy zasilaniu ich napięciem odkształconym THD_U rzędu 12% wszystkie badane próbki uległy zniszczeniu na niższych poziomach probierczych niż dla próbek zasilanych napięciem nieodkształconym. Uzyskane wyniki wskazują na istotny wpływ stopnia odkształcenia przebiegu napięcia zasilania na ogólny

poziom wytrzymałości badanego obiektu i silną zależność, od jakości napięcia zasilania. Można stwierdzić, że w przypadku występowania dużych poziomów harmonicznych w napięciu zasilania trwałość uległa, co najmniej dwukrotnemu zmniejszeniu.

Wnioski

Przeprowadzone badania wskazują na wyraźny wpływ stopnia odkształcenia przebiegu napięcia zasilania na trwałość układów oświetleniowych z lampami LED. Jednym z minusów wykonywanych badań trwałości łączeniowej był brak widocznych uszkodzeń dla testów łączeniowych wykonywanych przy nieodkształconym napięciu zasilania. W celu wyznaczenia trwałości w warunkach bez występowania harmonicznych wymagany byłoby wydłużenie czasu badania. Przeprowadzone testy wskazują, że popularne źródła oświetlenia LED charakteryzują się dobrymi parametrami trwałości łączeniowej oraz to, iż wszystkie badane źródła oświetlenia spełniały parametry deklarowane przez producentów dla napięć nieodkształconych. W przypadku odporności na udary należy zaznaczyć, że zgodnie z obecnie obowiązującymi wymaganiami dla urządzeń pracujących w publicznych sieciach elektroenergetycznych wszystkie badane próbki spełniały wymagania przedmiotowej normy EN 61547:2023 (wymagany poziom odporności to 500 V przy udarach wstrzykiwanych do przewodów L-N, dla lamp o mocy do 25 W). Równocześnie uzyskane wyniki testów wskazują, iż odporność udarowa systemów oświetlenia LED może silnie zależeć od harmonicznych występujących w sieci elektroenergetycznej niskiego napięcia. Przeprowadzone badania wskazują na konieczność podjęcia działań mających na celu poprawę, jakości napięć zasilających oraz przeprowadzenia dyskusji na temat zmiany metodyki wykonywania badań EMC. Obecnie

prorowadzone testy EMC (badania udarowe) powinny być wykonywane w idealnych warunkach zasilania obiektów badanych tzn. bez występowania dodatkowych zaburzeń. Niestety obecnie takie warunki w sieciach zasilających prawie już nie istnieją. Obecnie w publicznych sieciach zasilających standardem są zaburzenia na poziomie 3% – 4% THDu. Należy zaznaczyć, iż zdaniem autorów obecnie powinno się wykonywać wszelkiego rodzaju testy EMC również przy zasilaniu napięciami odkształconymi. Pozostaje tylko kwestia dyskusji o opracowanie wspólnych wytycznych dotyczących poziomów tych odkształceń. Wydaje się celowym zastosowanie, co najmniej dwóch poziomów, przy których powinno się przeprowadzać badania: poziomu dla środowisk domowych np. na poziomie 5% i poziomu około 12% dla środowisk przemysłowych. Oczywiście należałoby się zastanowić, jakie harmoniczne powinny wchodzić w skład napięć testowych i tutaj wydaje się, że powinny dominować harmoniczne nieparzyste. Ale pomiary prowadzone przez autorów wskazują, że powinno się także uwzględnić harmoniczne parzyste a także możliwość występowania składowej stałej [22], która potrafi się pojawiać w napięciach zasilających. Jednakże wprowadzenie takich dodatkowych wymagań będzie wymagało przeprowadzenia szeregu badań i pozostaje zdaniem autorów kwestią przyszłości. Prostszy i zarazem podnoszącym zdecydowanie osiągnięte wyniki rozwiązaniem jest zastosowanie różnego rodzaju technik ograniczających występowanie harmonicznych w sieciach zasilających. Uzyskane wyniki wskazują jednoznacznie, że ograniczenie występowania harmonicznych w sieciach zasilających powinno wydłużyć żywotność urządzeń a tym samym zmniejszyć zapotrzebowanie na nie. Zmniejszając tym samym zapotrzebowanie na różnego rodzaju surowce niezbędne do ich wytworzenia. Z drugiej strony widać także konieczność ciągłego monitorowania stanu napięć zasilających w sieciach w celu identyfikacji lokalizacji i obiektów, które wprowadzają takie odkształcenia do sieci.

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 Włás, 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.

LITERATURA

- [1] LED Colors & Materials – CERULEAN LED n.d. <https://ceruleanled.com/2018/10/08/led-colors-materials/> (accessed 19 December 2023).
- [2] Bourget CM. An introduction to light-emitting diodes. *HortScience* 2008;43:1944–6. doi:10.21273/HORTSCI.43.7.1944.
- [3] Gayral B. LEDs for lighting: Basic physics and prospects for energy savings. *Comptes Rendus Phys* 2017;18:453–61. doi:10.1016/J.CRHY.2017.09.001.
- [4] Zissis, G., Bertoldi, P., Serrenho T. Update on the Status of LED-Lighting world market since 2018, EUR 30500 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021, ISBN 978-92-76-27244-1, doi:10.2760/759859, JRC122760. 2018. doi:10.2760/759859.
- [5] LED Lighting Market Size, Share, Trends, Growth Drivers and Opportunities- 2030 n.d. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/led-lighting-market-201130554.html> (accessed 19 December 2023).
- [6] LED Lighting Market Size, Growth & Share | Forecast [2030] n.d. <https://www.fortunebusinessinsights.com/led-lighting-market-106832> (accessed 19 December 2023).
- [7] Narendran N, Liu Y. 62.2: Invited Paper: LED Life Versus LED System Life. *SID Symp Dig Tech Pap* 2015;46:919–22. doi:https://doi.org/10.1002/sdtp.10402.
- [8] Lumileds. Evaluating the Lifetime Behavior of LED Systems. 2016.
- [9] Li XP, Chen L, Chen M. An approach of LED lamp system lifetime prediction. 2011 IEEE Int Conf Qual Reliab ICQR 2011 2011:110–4. doi:10.1109/ICQR.2011.6031691.
- [10] PHILIPS LUMILEDS. Understanding power LED lifetime analysis. White Pap 2007:11.
- [11] PN-EN 50160:2010+A1:2015 n.d.
- [12] Dolara A, Leva S. Power quality and harmonic analysis of end user devices. *Energies* 2012;5:5453–66. doi:10.3390/EN5125453.
- [13] Anzalchi A, Sundararajan A, Moghadasi A, Sarwat A. Power quality and voltage profile analyses of high penetration grid-tied photovoltaics: A case study. 2017 IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet., 2017, p. 1–8. doi:10.1109/IAS.2017.8101854.
- [14] Hu D, Jiang X, Chen F, Fan D, Zhu Y. Study on Low-order Voltage Harmonic Behavior in Isolated Islands Formed by Distributed Photovoltaic Power. 2022 IEEE 7th Int Conf Power Renew Energy, ICPRE 2022 2022:68–73. doi:10.1109/ICPRE55555.2022.9960303.
- [15] Nömm J, Rönberg S, Bollen M. Harmonic voltage measurements in a single house microgrid. 2018 18th Int. Conf. Harmon. Qual. Power, 2018, p. 1–5. doi:10.1109/ICHQP.2018.8378921.
- [16] Ajeigbe OA, Munda JL, Hamam Y. Characterisation of Harmonic Distortions Produced by Small Domestic Back-Up Generators. 2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica, 2018, p. 432–7. doi:10.1109/PowerAfrica.2018.8520981.
- [17] Ramos J, Pocasangre C, Chevez L, Martinez A, Osorto J, Escobar D. Third harmonic voltage distortion levels in an urban distribution network in El Salvador. 2022 IEEE 40th Cent. Am. Panama Conv., 2022, p. 1–4. doi:10.1109/CONCAPAN48024.2022.9997804.
- [18] Slangen TMH, Cuk V, Cobben JFG, De Jong ECW. Harmonic Emission of EV Fast Charging Station under Different Supply- and Operating Conditions. IEEE PES Innov Smart Grid Technol Conf Eur 2022;2022-October. doi:10.1109/ISGT-EUROPE54678.2022.9960457.
- [19] Agrawal A, Singh DK. Harmonic Impact of Grid Connected Photovoltaic System on Low Voltage Power System. 2018 3rd Int. Conf. Converg. Technol., 2018, p. 1–5. doi:10.1109/I2CT.2018.8529567.
- [20] Milankov R, Radić M. Harmonics: Examples of negative impacts. 2014 16th Int. Conf. Harmon. Qual. Power, 2014, p. 435–8. doi:10.1109/ICHQP.2014.6842817.
- [21] Galla S. The methodology used for solving issues related to research electromagnetic compatibility (EMC) performed in factory research laboratories. *Przeegląd Elektrotechniczny* 2015;91. doi:10.15199/48.2015.11.06.
- [22] Galla S, Włás M. The Influence of a Photovoltaic Micro-Installation on the Low-Frequency Parameters of Electricity at PCC and Its Impact on the Thermal Characteristics of Selected Devices. *Energies* 2021;14. doi:10.3390/en14092355.