

Analiza wyższych harmonicznych generowanych przez lampy LED

Streszczenie. W artykule ukazano, jaki wpływ na parametry jakości energii w instalacjach zasilających mają elektroluminescencyjne źródła światła. Zamieszczono wyniki badań lamp LED wykonanych na trzonkach z gwintami E14 oraz E27. Przedstawiono uzyskane przebiegi napięć i prądów oraz charakterystyki widmowe wyższych harmonicznych prądu i porównano je z wytycznymi obowiązujących norm.

Abstract. In the paper shows how the electroluminescent light sources have an impact on energy quality parameters in power supply installations. The results of tests on LED lamps made on E14 and E27 bases are included. The obtained voltage and current waveforms as well as the spectral characteristics of higher harmonics of current were presented and compared with the guidelines of applicable standards. (**Analysis of higher harmonics generated by LED lamps**).

Słowa kluczowe: odkształcenia prądów i napięć, wyższe harmoniczne, kompatybilność elektromagnetyczna, zaburzenia generowane przez lampy LED.

Keywords: current and voltage distortion, higher harmonics, electromagnetic compatibility, disturbances generated by LED lamps.

Wstęp

W dobie intensywnego rozwoju cywilizacyjno-technicznego, kiedy nowoczesne układy elektryczne i elektroniczne pobierają często energię impulsowo, powszechnie stosowane są w nich elementy nieliniowe oraz bierne, jakość energii staje się niezwykle ważną problematyką. Zagadnienie to wiąże się z jednej strony z wzajemnymi oddziaływaniami elektromagnetycznymi urządzeń i systemów (czyli z oddziaływaniem zaburzeń, a w konsekwencji z trwałością oraz niezawodnością osprzętu elektrycznego), z drugiej natomiast z prawidłowością gospodarowania energią (z powstawaniem strat mocy, obciążaniem mocą bierną i mocą deformacji). Oba czynniki są szczególnie ważnymi w poprawności funkcjonowania układów i urządzeń elektrycznych oraz procesach zarządzania surowcami i energią, stąd kładziony jest duży nacisk na właściwe rozpoznawanie oraz skuteczne rozwiązywanie powstających w tym obszarze problemów.

W pracy zajęto się problematyką jakości energii, a głównie oddziaływań wyższych harmonicznych prądów i napięć w układach elektrycznych i sieciach zasilających. Szczególną uwagę skupiono na odkształceniu prądu pobieranego przez elektroluminescencyjne źródła światła. Zamieszczono wyniki badań przebiegów czasowych, charakterystyk widmowych oraz całkowitych współczynników zawartości harmonicznych prądu lamp LED wykonanych na trzonku z gwintem E14 oraz E27. W końcowej części pracy podsumowano uzyskane rezultaty.

Oddziaływanie zaburzeń oraz prawidłowość pracy elementów i urządzeń elektrycznych

Na parametry jakości energii w elektrycznych instalacjach zasilających znaczący wpływ ma intensywny rozwój urządzeń elektrycznych i elektronicznych, jaki się dokonał w ciągu ostatnich trzydziestu lat, a następnie masowe wprowadzanie tych urządzeń do użytku. We wszystkich elementach i układach, gdzie występują napięcia i płyną prądy powstają pola elektromagnetyczne. W wyniku wzajemnych ich oddziaływań (sprzężeń) powstają zaburzenia elektromagnetyczne. Dlatego istotne jest uwzględnienie możliwości generacji zaburzeń zarówno przez urządzenia silnoprądowe, jak również układy automatyki i sterowania, oświetlenia, klimatyzacji, energoelektrycznych urządzeń zasilających itp. [1-17]. Prawidłowość pracy systemów elektrycznych związana jest z ograniczaniem wytwarzania i oddziaływania zaburzeń elektromagnetycznych. Jednymi z najczęściej spotykanych

zaburzeń w instalacjach elektrycznych są odkształcenia prądów i napięć (oddziaływania wyższych harmonicznych).

Odształcenia przebiegu prądu powstają zawsze tam, gdzie występują elementy nieliniowe w odbiornikach [18-23]. Do grupy tej w dużej mierze należą zasilacze impulsowe, stosowane w wielu powszechnie wykorzystywanych urządzeniach. Efekty ich działania można zaobserwować zwłaszcza w instalacjach budynków biurowych, galerii handlowych, urzędów czy innych obiektów jednostek gospodarczych, gdzie pracuje duża liczba odbiorników z grupy IT. W budynkach tych działają również sterowane elektronicznie urządzenia wentylacyjne i klimatyzacyjne. Ponadto obecnie w takich obiektach stosuje się często oświetlenie bazujące na lampach LED, które również zasilane są impulsowo.

Elektroluminescencyjne źródła światła pobierają prąd, którego sygnał jest znacznie odkształcony od sinusoidy. Są odbiornikami o charakterze pojemnościowym. Na charakter odbiornika i kształt przebiegu prądu znaczący wpływ mają układy sterująco-zasilające zbudowane z wykorzystaniem impulsowych przetwornic DC-DC. W układach oświetleniowych wykorzystujących lampy LED generowane są wyższe harmoniczne prądu, które mają wpływ na odkształcenie napięcia w sieci zasilającej. Pogorszeniu ulega w nich współczynnik mocy i pobierana jest duża moc bierna. Elektroluminescencyjne źródła światła mogą generować wyższe harmoniczne prądu nawet kilkakrotnie przekraczające poziomy dopuszczalne normatywnie.

Stan normatywny w zakresie oddziaływań harmonicznych lamp LED

Ponieważ moc badanych lamp LED < 25 W, to powinny one spełniać wymagania dla urządzeń grupy C zawarte w normie IEC 61000-3-2:2019-04 [24], w której zamieszczono dwa zbiory wymagań z zaznaczeniem, że wystarczy spełnić tylko jeden z nich (dowolny), by spełnić wymagania normy:

- 1) poszczególne prądy harmoniczne odbiorników, przeliczone na jeden wat wejściowej mocy czynnej, nie powinny przekraczać poziomów dopuszczalnych przedstawionych w normie [24] (wartości naniesione na wykresy widmowe harmonicznych badanych lamp);
- 2) prądy trzeciej (h3) i piątej (h5) harmonicznej, wyrażone w procentach składowej podstawowej prądu odbiornika, nie powinny przekroczyć odpowiednio 86% i 61%, a jednocześnie kształt przebiegu czasowego prądu powinien spełniać określone parametry [24].

Charakterystyka przeprowadzanych badań

Pomiary przeprowadzono na stanowisku badawczym, które umożliwia realizację analiz instalacji oświetleniowych o mocy czynnej zainstalowanej do 1 kW. W celu odseparowania badanej instalacji od zakłóceń mogących występować w sieci energetycznej budynku stanowisko zasilano z zasilacza UPS, który pozwala na dostarczenie stabilnego sinusoidalnego napięcia 230 V o częstotliwości 50 Hz i odkształceniach harmonicznym nie większym niż 0,7%. Pomiary realizowano przy użyciu analizatora jakości energii FLUKE434/PWR. Badano wartości napięć oraz prądów (skuteczne i maksymalne), współczynniki szczytu tych sygnałów, częstotliwość, moce: czynną, bierną i pozorną, współczynniki mocy PF oraz $\cos\phi$, zawartość poszczególnych harmonicznym (charakterystyki widmowe), jak również współczynniki całkowitej zawartości harmonicznym THD. Badania powtórzono pięciokrotnie, a prezentowane wyniki są wartościami uśrednionymi z 5 serii pomiarowych. Wartości harmonicznym prądu przeliczono na 1 W mocy lampy (w celu umożliwienia ich konfrontacji z wymaganiami określonymi w normie [24]). Dokonywano także rejestracji przebiegów czasowych prądów i napięć.

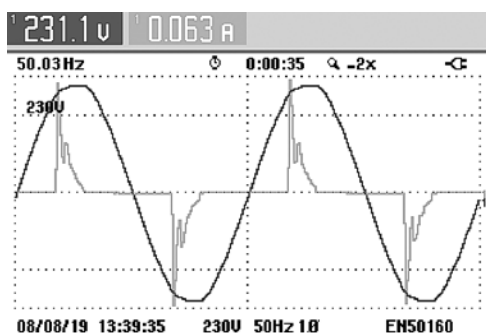
Badania lampy LED wykonanej na trzonku z gwintem E14 o mocy 8 W z diodami typu SMD2835

Pierwsza z badanych lamp zbudowana z 16 diod LED typu SMD2835 pobiera moc czynną 8 W. Napięcie jej pracy wynosi 85-265 V, a częstotliwość 50/60 Hz. Emituje strumień świetlny o wartości 700 lm. Jej temperatura barwowa wynosi 3000 K (barwa ciepła). Przetwornica DC-DC zbudowana w trzonku z gwintem E14 pracuje w topologii *buck* (obniżanie napięcia). Wyniki pomiarów wartości skutecznych oraz amplitud napięcia i prądu, ich współczynników szczytu, częstotliwości, mocy czynnej, biernej i pozornej oraz współczynników mocy w obwodzie badanej lampy zamieszczono w tabeli 1.

Na rysunku 1 zamieszczono zarejestrowane przebiegi czasowe napięcia (sygnał o kształcie sinusoidalnym, z nieco ściętymi szczytami sinusoidy) oraz natężenia prądu (przebieg silnie odkształcony, impulsowy) badanej lampy.

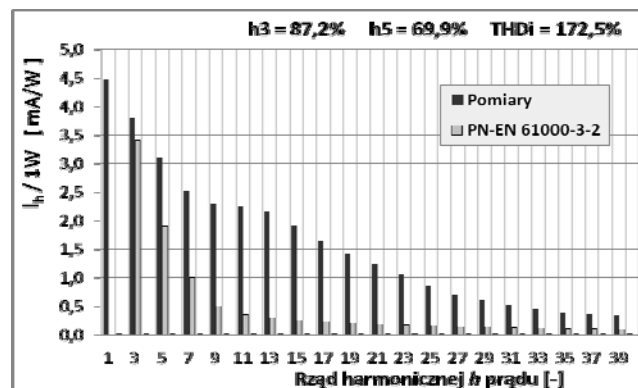
Tabela 1. Wyniki pomiarów parametrów elektrycznych w obwodzie z lampą LED SMD2835 8W E14

Wartość skuteczna napięcia zasilania U_{rms}	231,1 V
Amplituda napięcia zasilania U_m	318,9 V
Współczynnik szczytu dla napięcia CF_U	1,38
Częstotliwość napięcia zasilania f	50,03 Hz
Wartość skuteczna natężenia prądu I_{rms}	63 mA
Amplituda natężenia prądu I_m	249 mA
Współczynnik szczytu dla prądu CF_I	3,97
Moc czynna P	7,8 W
Moc bierna Q	2,6 var
Moc pozorna S	8,3 VA
Współczynnik mocy $\cos\phi$	0,93
Współczynnik mocy PF	0,49



Rys.1. Przebiegi czasowe napięcia oraz natężenia prądu lampy LED SMD2835 8W E14

Z kształtu sygnału prądu można jednoznacznie wnioskować, że w widmie częstotliwościowym będą występowały wyższe harmoniczne o dużych wartościach. Potwierdzeniem tych obserwacji jest charakterystyka widmowa zamieszczona na rysunku 2, na której wartości poszczególnych harmonicznym prądu przeliczono zostały na 1 W (dla ich konfrontacji z wymaganiami określonymi w normie, także przedstawionymi na rysunku). Dodatkowo zamieszczono na nim pomiarzoną wartość współczynnika całkowitej zawartości harmonicznym THD_i oraz procentowe zawartości trzeciej (h3) i piątej (h5) harmonicznym.



Rys.2. Widmo harmonicznym prądu (przeliczonych na 1 W) lampy LED SMD2835 8W E14

Badane źródło światła LED z zasilaczem zabudowanym w trzonku jest niskobudżetowym elementem bez zaawansowanych rozwiązań układów tłumiących propagację wyższych harmonicznym prądu czy korygujących współczynnik mocy. Świadczy o tym wysoka wartość współczynnika szczytu sygnału prądu $CF_I = 3,97$ (dla przebiegu sinusoidalnego byłoby to 1,41) oraz wartość współczynnika mocy PF , która jest dużo niższa od 1 i wynosi 0,49. Układ drivera generuje wyższe harmoniczne prądu o wartościach znacznie przekraczających poziomy dopuszczalne określone w normie, co przekłada się również na bardzo wysoką wartość wskaźnika THD_i , który osiąga aż 172,5%. Na wykresie spektralnym dominują nieparzyste harmoniczne prądu (sygnał jest symetryczny względem osi czasu), które nawet jeszcze do 23 rzędu przekraczają wartość 1 mA na każdy wat mocy czynnej lampy LED.

Badania lampy LED wykonanej na trzonku z gwintem E14 o mocy 6 W z diodami typu SMD3030

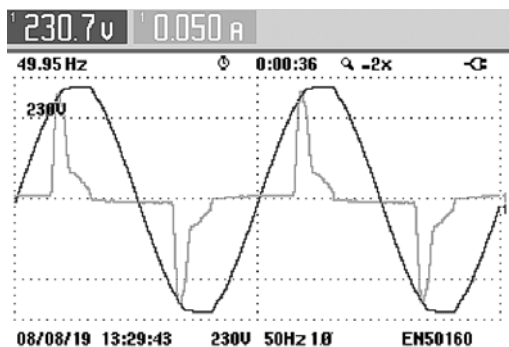
Z uwagi na zawartość wyższych harmonicznym o bardzo wysokich wartościach oraz bardzo dużą wartość współczynnika THD prądu pobieranego przez lampę LED SMD2835 (silne odkształcenie przebiegu prądu) przeprowadzono analogiczne badania dla innej lampy LED zabudowanej także na trzonku z gwintem E14 (w którym jest mało miejsca na zasilacz oraz rozbudowane układy korekcji wyższych harmonicznym). Z tego względu drugim badany źródłem światła jest lampa zbudowana z 7 diod LED SMD3030, o mocy 6 W. Jej napięcie znamionowe wynosi 220-240 V, a częstotliwość 50 Hz. Emitowany przez nią strumień świetlny ma wartość 470 lm, a temperatura barwowa wynosi 2700 K (barwa ciepła). Przetwornica DC-DC zbudowana w trzonku z gwintem E14 pracuje analogicznie jak w poprzedniej lampie w topologii *buck*. Wyniki pomiarów parametrów elektrycznych w obwodzie badanej lampy przedstawiono w tabeli 2.

Wysoka wartość współczynnika szczytu dla prądu $CF_I = 4,81$ oraz duża rozbieżność między współczynnikami mocy $\cos\phi = 0,92$ i $PF = 0,51$ oznaczają, że przebieg czasowy prądu jest silnie odkształcony od sinusoidy.

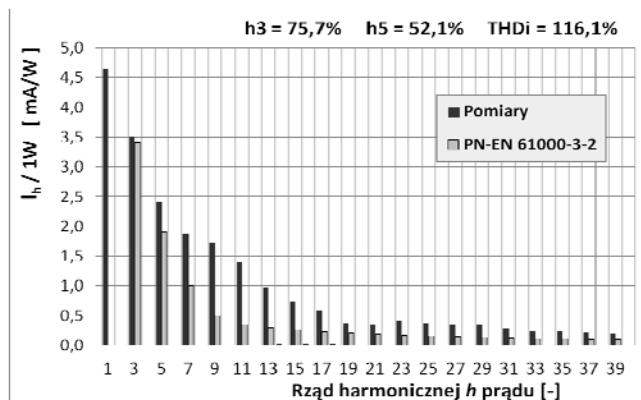
Tabela 2. Wyniki pomiarów parametrów elektrycznych w obwodzie z lampą LED SMD3030 6W E14

Wartość skuteczna napięcia zasilania U_{rms}	230,7 V
Amplituda napięcia zasilania U_m	320,7 V
Współczynnik szczytu dla napięcia CF_U	1,39
Częstotliwość napięcia zasilania f	49,95 Hz
Wartość skuteczna natężenia prądu I_{rms}	50 mA
Amplituda natężenia prądu I_m	240 mA
Współczynnik szczytu dla prądu CF_I	4,81
Moc czynna P	6,3 W
Moc bierna Q	2,0 var
Moc pozorna S	6,6 VA
Współczynnik mocy $\cos \varphi$	0,92
Współczynnik mocy PF	0,51

Na rysunkach 3 oraz 4 zamieszczono uzyskane dla badanej lampy: przebiegi czasowe napięcia (podobnie jak poprzednio o kształcie sinusoidalnym, z nieco ściętymi szczytami sinusoidy) oraz prądu (sygnał silnie odkształcony, impulsowy), a także charakterystykę widmową z wartościami poszczególnych harmonicznych prądu przeliczonymi na 1 W, pomierzoną wartość współczynnika THD_i, jak również procentowe zawartości harmonicznych h3 oraz h5.



Rys.3. Przebiegi czasowe napięcia oraz natężenia prądu lampy LED SMD3030 6W E14



Rys.4. Widmo harmonicznych prądu (przeliczonych na 1 W) lampy LED SMD3030 6W E14

W układzie zasilacza lampy LED SMD3030 generowane są wyższe harmoniczne prądu o bardzo dużych wartościach, a współczynnik zawartości harmonicznych prądu THD_i osiąga wartość 116,1%. Generowane nieparzyste harmoniczne wszystkie z zakresu od h3 do h39 przekraczają dopuszczalne normatywnie wartości. Źródło to spełnia jednak mniej restrykcyjne z dwóch założeń określonych w normie [24]. Przebieg czasowy natężenia prądu ma kształt zgodny z wymaganiami normatywnymi i jednocześnie składowe harmoniczne h3 oraz h5 osiągają wartości odpowiednio poniżej 86% oraz 61%. Z przeprowadzonej analizy wynika, że badany układ zasilacza

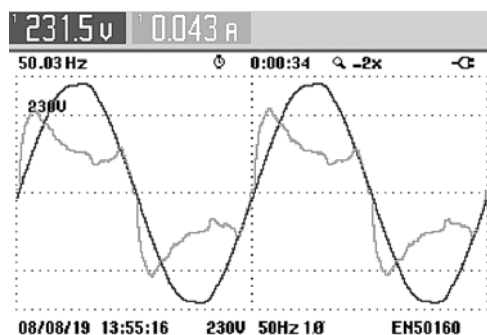
zintegrowanego w lampie LED SMD3030, mimo że spełnia jedno z dwóch alternatywnych wymagań norm, może wpływać negatywnie na parametry jakości energii elektrycznej w instalacji zasilającej takie źródła światła.

Badania lampy LED wykonanej na trzonku z gwintem E27 o mocy 9,5 W z diodami typu SMD5630

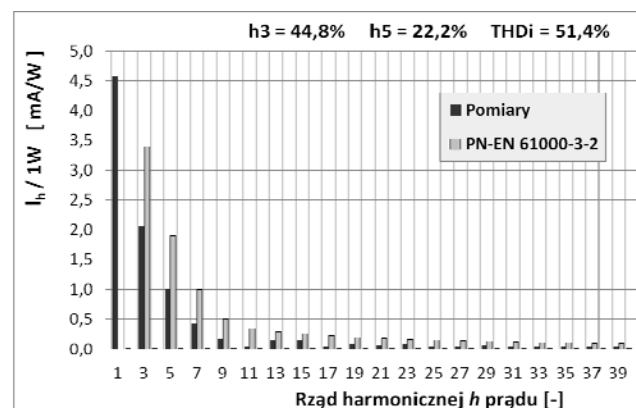
Kolejnym z badanych elektroluminescencyjnych źródeł światła jest lampa zbudowana z 32 diod LED SMD5630, o mocy 9,5 W. W odróżnieniu do poprzednich jest większa gabarytowo, zabudowana na trzonku z gwintem E27, a jej przetwornica pracuje w topologii boost (podwyższanie napięcia). Napięcie znamionowe lampy wynosi 220-240 V, częstotliwość 50/60 Hz, emitowany strumień świetlny ma wartość 806 lm, a temperatura barwowa wynosi 2700 K (barwa ciepła). Wyniki pomiarów parametrów elektrycznych w jej obwodzie zestawiono w tabeli 3, natomiast kształt przebiegu prądu oraz napięcia przedstawiono na rysunku 5, a charakterystykę widmową z wartościami poszczególnych harmonicznych prądu przeliczonymi na 1 W, pomierzoną wartość współczynnika THD_i, jak również procentowe zawartości harmonicznych h3 oraz h5 na rysunku 6.

Tabela 3. Wyniki pomiarów parametrów elektrycznych w obwodzie z lampą LED SMD5630 9,5W E27

Wartość skuteczna napięcia zasilania U_{rms}	231,5 V
Amplituda napięcia zasilania U_m	325,5 V
Współczynnik szczytu dla napięcia CF_U	1,41
Częstotliwość napięcia zasilania f	50,03 Hz
Wartość skuteczna natężenia prądu I_{rms}	43 mA
Amplituda natężenia prądu I_m	87 mA
Współczynnik szczytu dla prądu CF_I	2,03
Moc czynna P	9,5 W
Moc bierna Q	3,7 var
Moc pozorna S	10,2 VA
Współczynnik mocy $\cos \varphi$	0,93
Współczynnik mocy PF	0,88



Rys.5. Przebiegi czasowe napięcia oraz natężenia prądu lampy LED SMD5630 9,5W E27



Rys.6. Widmo harmonicznych prądu (przeliczonych na 1 W) lampy LED SMD5630 9,5W E27

Zmierzone parametry elektryczne świadczą o znacznie wyższej jakości układu zintegrowanego zasilacza zastosowanego w badanej lampie. Współczynnik szczytu przebiegu prądu $CF_1 = 2,03$ odbiega od współczynnika szczytu sygnału sinusoidalnego, co oznacza obecność wyższych harmonicznych w przebiegu czasowym prądu.

Współczynnik zawartości harmonicznych prądu THD_1 ma zdecydowanie mniejszą (choć nadal wysoką) wartość wynoszącą 51,4%. Mimo to badane źródło światła spełnia wszelkie wymagania normy [24]. Wykonanie drivera lampy LED na przetwornicy typu boost pozwoliło uzyskać dużo mniejsze odkształcenia prądu niż ma to miejsce w przypadku przetwornic obniżających napięcie, co zauważyć można na przebiegu czasowym oraz na charakterystyce widmowej harmonicznych. Mimo tego, że nie jest to sygnał impulsowy, to nadal znacznie odbiega od sygnału sinusoidalnego. Pozwoliło to jednak uzyskać wysokie (bliższe 1) i wyrównane wartości współczynników mocy ($\cos \varphi = 0,93$ i $PF = 0,88$), chociaż moc bierna pojemnościowa ($Q = 3,7$ var) jest ciągle wysoka w odniesieniu do mocy czynnej ($P = 9,5$ W). Wyniki pomiarów wskazują na to, że badana lampa LED może w dalszym ciągu stwarzać zagrożenie dla tej instalacji oraz innych odbiorników.

Uwagi końcowe i wnioski

Elektroluminescencyjne źródła światła są odbiornikami silnie odkształcającymi pobierany prąd. Jako pojedyncze elementy o małej mocy nie stwarzają kłopotu dla sieci zasilającej, do której są włączane. Jeśli liczba lamp LED przyłączonych do instalacji elektrycznych stanowi znaczną część wszystkich elektrycznych źródeł światła w obiekcie, to ze względu na poziom pobieranej mocy pojawiają się w takiej sieci zasilającej problemy z oddziaływaniem wyższych harmonicznych. Problem ten nie jest tylko lokalnym, ale ma charakter globalny (dotyczy wszystkich państw), bo wszędzie powszechnie stosuje się oświetlenie elektryczne, w dużych obiektach i rozbudowanych systemach składające się z bardzo dużej liczby elementów oświetleniowych. W naszym kraju obserwowany jest on bardziej intensywnie, ponieważ z uwagi na koszty inwestycyjne (stawiane na pierwszym miejscu podczas decyzji zakupowych) najczęściej stosowane są lampy LED tanie, o złych parametrach elektrycznych (wprowadzające silne zaburzenia i pobierające dużą moc bierną pojemnościową).

Powstały problem w niedalekiej przyszłości może się okazać bardzo poważnym. Liczba lamp LED dołączanych do sieci elektrycznej rośnie w bardzo szybkim tempie. Znajdują one szerokie zastosowanie w oświetleniu domowym i biurowym, w miejscach użyteczności publicznej, a także jako oświetlenie uliczne oraz przemysłowe. W niedługim czasie ten typ oświetlenia może wyprzeć z rynku oświetleniowego wszystkie inne wykorzystywane dotychczas źródła światła.

Autorzy: dr inż. Łukasz Putz, dr inż. Karol Bednarek, dr inż. Leszek Kasprzyk, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: Lukasz.Putz@put.poznan.pl; Karol.Bednarek@put.poznan.pl; Leszek.Kasprzyk@put.poznan.pl.

LITERATURA

- [1] Bednarek K., Electromagnetic action of heavy-current equipment operating with power frequency, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE)*, 16 (2010), n. 3, 357-368
- [2] Bednarek K., Electromagnetic field generated by heavy-current equipment and its effects on the environment, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 12, 9-12

- [3] Bednarek K., Jajczyk J., Effectiveness of optimization methods in heavy-current equipment designing, *Przegląd Elektrotechniczny*, 85 (2009), nr 12, 29-32
- [4] Bugała A., Bednarek K., The use of computer simulations and measurements in determining the energy efficiency of photovoltaic installations, *ITM Web of Conferences*, 19 (2018), 01021
- [5] Charoy A., Compatibilité électromagnétique. Parasites et perturbations des électroniques, 1-4 (1996), Dunod, Paris
- [6] Głuchy, D., Kurz, D., Trzmiel, G., Studying the impact of orientation and roof pitch on the operation of photovoltaic roof tiles, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), n.6, 281-283
- [7] Jajczyk J., Dobrzycki A., Filipiak M., Kurz D., Analysis of power and energy losses in power systems of electric bus battery charging stations, *E3S Web of Conferences*, 19 (2017), 01027
- [8] Jurasz J., Beluco A., Canales, F. A., The impact of complementarity on power supply reliability of small scale hybrid energy systems, *Energy*, 161 (2018), 737-743
- [9] Kasprzyk L., Pietracho R., Bednarek K., Analysis of the impact of electric vehicles on the power grid, EKO-DOK 2018, *E3S Web of Conferences* 44 (2018), 00065, 1-8
- [10] Kasprzyk L., Tomczewski A., Bednarek K., Bugała A., Minimisation of the LCOE for the hybrid power supply system with the lead-acid battery, EEMS'2017, *E3S Web of Conferences*, 19 (2017), n.01030, 1-6
- [11] Knypiński L., Adaptation of the penalty function method to genetic algorithm in electromagnetic devices designing, *COMPEL*, 38 (2019) 1285-1294
- [12] Korzeniewska E., Drzymala A., Szczesny A., et al., Photovoltaic power plants - legal, economic and ecological aspects, *Przegląd elektrotechniczny*, 95 (2019), n.1, 69-72
- [13] Lebioda M., Rymaszewski J., Korzeniewska E., Zastosowania taśm nadprzewodnikowych drugiej generacji do wytwarzania silnych pól magnetycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr 12, 265-268
- [14] Musiał E., Ocena jakości energii elektrycznej w sieciach przemysłowych, *Automatyka – Elektryka – Zakłócenia*, 2010, nr 1, 30-45
- [15] Otomanski P., Wiczynski G., Zajac B., Flicker Vision of Selected Light Sources, *Measurement Science Review*, 17 (2017), n.5, 232-240
- [16] Piatek Z., Kusiak D., Szczegieliński T., Magnetic field of the shielded conductor, *Przegląd elektrotechniczny*, 85 (2009), n.5, 92-95
- [17] Putz Ł., Typańska D., Evaluation of the energy efficiency of LED illumination in building office reception, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 3, 111-114
- [18] Bednarek K., Kasprzyk L., Suppression of higher harmonic components introduction to the networks and improvement of the conditions of electric supply of electrical equipment, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 12b, 236-239
- [19] Bednarek K., Typańska D., Jakość i bilans energii w sieci zasilającej obiektu biurowo-magazynowego, *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr 12 (93), 2017, s. 63-66
- [20] Putz Ł., Kurzawa M., Two-Step Power Supply Application to Reduce THDi Ratio in LED Light Sources with Integrated Driver, *IEEE Xplore*, 10.1109/CPEE.2016.7738743, DOI: 10.1109/CPEE.2016.7738743
- [21] Putz Ł., Nawrowski R., Energy efficiency analysis of lighting installations using LED technology, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr 6, 296-298
- [22] Typańska D., Bednarek K., Bugała A., Kasprzyk L., Specificity of energetic functioning of economic activity objects, *EKO-DOK 2018, E3S Web of Conferences*, 44 (2018), 00010, 1-8
- [23] Wiczynski, G., Analysis of flickermeter's signal chain for input signal with two sub/interharmonics, *Przegląd elektrotechniczny*, 86 (2010), n.4, 328-335
- [24] IEC 61000-3-2:2019-04 – Electromagnetic compatibility (EMC). Part 3-2: Limits. Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)