

Dostosowanie emisji zaburzeń elektromagnetycznych generowanych przez oprawę oświetleniową ze źródłami LED do wymagań norm EMC

Streszczenie. W pracy zajęto się dostosowywaniem emisji zaburzeń elektromagnetycznych generowanych przez urządzenia elektryczne do wymagań normatywnych w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej (EMC). Obiektem badań była oprawa oświetleniowa ze źródłami LED. Opisano zastosowane w praktyce metody redukcji emisji elektromagnetycznych zaburzeń przewodzonych i promieniowanych.

Abstract. The work involved adjustment of the emission of electromagnetic disturbances generated by electrical devices to the standard requirements in the field of electromagnetic compatibility (EMC). The research object was a lighting fixture with LED sources. Practical methods of emission reduction of electromagnetic conductive and radiated disturbances have been described. (**Adjusting the emission of electromagnetic disturbances generated by the luminaire with LED sources to the EMC Standards requirements**).

Słowa kluczowe: kompatybilność elektromagnetyczna, zaburzenia przewodzone, zaburzenia promieniowane, oprawa oświetleniowa LED.
Keywords: electromagnetic compatibility, conductive disturbances, radiated disturbances, LED lighting fixture.

Wstęp

W obecnych czasach człowiek silnie uzależnił swoją egzystencję i działalność od osiągnięć cywilizacyjnych, a szczególnie od technosfery. Na świecie zużywa się coraz więcej energii oraz zasobów naturalnych, co nie pozostaje bez wpływu na środowisko. Aby to zrekompensować, dąży się do jak najbardziej efektywnego wytwarzania energii z ekologicznych źródeł [1-4], racjonalnego gospodarowania energią oraz przetwarzania surowców pierwotnych i wtórnych, a także wykorzystywania osiągnięć badań naukowych w takich dziedzinach jak mechatronika, nanotechnika, tekstronika, nadprzewodnictwo, inżynieria materiałowa czy bioelektronika w celu poprawy jakości eksploatowanego osprzętu i zminimalizowania jego negatywnych oddziaływań na otoczenie [5-9].

Nowoczesne systemy elektryczne i elektroniczne są coraz bardziej zaawansowane technicznie. W procesach projektowania dąży się do osiągnięcia jak najkorzystniejszych ich parametrów eksploatacyjnych. Często wykorzystuje się w tym celu zaawansowane techniki optymalizacyjne. W rozbudowanych kryteriach optymalizacji uwzględnia się coraz więcej czynników, które mają sprawić, że wytwarzane produkty będą bardziej energooszczędne, ekonomiczne i ekologiczne, przy zachowaniu wymaganych parametrów związanych z celem ich zastosowania. Wykorzystywane metody optymalizacyjne są ciągle modyfikowane, adaptowane z innych dziedzin i rozwijane, aby osiągać poszukiwane ekstrema w sensie globalnym, z odpowiednią dokładnością, w możliwie najkrótszym czasie [10,11].

W ostatnich latach można zaobserwować dynamiczny rozwój dziedziny, jaką jest technika świetlna. W technice oświetleniowej również zmierza się do optymalizacji wytwarzanego osprzętu [12]. Dąży się do wytwarzania jak najsilniejszego strumienia świetlnego, przy minimalizacji poboru energii, powstających strat mocy oraz generowanego ciepła. Z tych względów w systemach oświetleniowych aktualnie odchodzi się od tradycyjnych lamp żarowych czy wyładowczych na rzecz energooszczędnych lamp elektroluminescencyjnych (LED). Wyprodukowanie zadowolająco działającej oprawy oświetleniowej wymaga prawidłowego zaprojektowania zasilacza i modułu LED, o odpowiednich parametrach świetlnych oraz (jak we wszystkich innych urządzeniach) termicznych i elektromagnetycznych [12-14].

Wszelki wytwarzany osprzęt elektryczny (w tym również oświetleniowy) oprócz wcześniej przedstawionych aspektów użytkowych i ekonomiczno-gospodarczych musi spełniać surowe wymagania normatywne w zakresie bezpieczeństwa oraz kompatybilności elektromagnetycznej (prawidłowego wzajemnego współistnienia w wytwarzanym środowisku elektromagnetycznym) [14-20]. Wprowadzenie produktu na rynek państw Unii Europejskiej jest możliwe po spełnieniu przez urządzenie wymogów dyrektywy kompatybilności elektromagnetycznej 2014/30/UE i związanych z nią uregulowań prawnych, potwierdzonych nadaniem znaku CE, a przede wszystkim badaniami przeprowadzonymi według określonych standardów (najlepiej w laboratorium akredytowanym).

Opis badanego obiektu

Badaniom podlegała oprawa oświetleniowa ze źródłami LED produkowana od kilku lat przez firmę LUG Light Factory Sp. z o.o. Jej obudowa ma kształt ściętego metalowego stożka z transparentną przesłoną z tworzywa sztucznego. Oprawa ta jest wyposażona w moduł oświetleniowy i zasilacz. Wprowadzona na rynek oprawa spełniała wymagane normy i miała nadany znak CE. W nowelizowanej wersji zastosowano inny, bardziej wydajny zasilacz. W związku z tym nowo powstały produkt musiał ponownie zostać przebadany i spełnić stosowne normy (w tym EMC). Zasilacz impulsowy lampy zawiera jedną płytkę drukowaną z wejściem sieciowym 230 V AC i wyjściem do zasilania modułu LED. Częstotliwość pracy przetwornicy wynosi ok. 70 kHz. Moduł oświetleniowy stanowi płytka PCB zawierająca 74 diody świecące, która została umieszczona w podstawie oprawy.

Ze względu na małą odległość modułu LED względem oprawy możliwość ingerencji w konstrukcję lampy w celu zmniejszenia niepożądanych emisji elektromagnetycznych jest znacznie ograniczona. Utrudnia to możliwości zastosowania odpowiednich środków, aby po zmianach nowelizacyjnych osiągnąć parametry lampy odpowiadające wymaganiom normatywnym.

Stanowisko pomiarowe i warunki realizacji badań

Jednym z najbardziej newralgicznych testów w zakresie badań kompatybilności elektromagnetycznej jest pomiar emisji zaburzeń elektromagnetycznych. Badań tych nie można wykonać bez specjalistycznych urządzeń

pomiarowych, takich jak np. analizator widma czy komora bezodbiwoła. Urządzenia te ze względu na koszty inwestycyjne i eksploatacyjne nie są wykorzystywane w jednostkach badawczych producentów, lecz przede wszystkim są na wyposażeniu jednostek do takich badań powołanych, czyli akredytowanych laboratoriów kompatybilności elektromagnetycznej. Część producentów urządzeń elektrycznych i elektronicznych ze względu na koszt osprzętu i badań pomija etap testów przed produkcją masową nowego urządzenia. W konsekwencji prowadzi to często do powstania dodatkowych kosztów, związanych z koniecznością wypracowania metod eliminacji emisji zaburzeń elektromagnetycznych przekraczających poziomy dopuszczalne w już wyprodukowanych urządzeniach.

Urządzenie badano w akredytowanym laboratorium (Centralnym Laboratorium Urzędu Dozoru Technicznego nr AB 001), wyposażonym w komorę semi-bezodbiwołą o pomiarze z odległości 3 m. Komorę przedstawiono na rys. 1. System pomiarowy do badań zaburzeń promieniowanych składał się z analizatora widma i dwóch anten pomiarowych, zmienianych w zależności od zakresu pomiarowego: 30÷230 MHz oraz 230÷300 MHz. System pomiarowy do badań zaburzeń przewodzonych składał się z analizatora widma i tzw. sztucznej sieci LISN.



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe w komorze semi-bezodbiwołej o pomiarze z odległości 3 m

Oprawa LED była badana ze względu na zgodność z wymaganiami opisanymi w normie PN-EN 55015: 2013-10, z uwzględnieniem zmian wprowadzanych przez dokument uzupełniający PN-EN 55015: 2013-10/A1 [21]. Norma nie zawiera klasyfikacji urządzeń w zależności od zastosowanego środowiska. Wszystkie badane urządzenia oświetleniowe mają takie same zakresy badań i limity (wartości dopuszczalne).

Zakres częstotliwości od 9 kHz do 30 MHz badanych emisji zaburzeń przewodzonych jest nietypowy i występuje tylko w normie dla urządzeń oświetleniowych. W tabeli 1 przedstawiono aktualne poziomy dopuszczalne wartości quasi-szczytowych oraz wartości średnich napięć zaburzeń przewodzonych wyrażone w dB (μ V), na zaciskach zasilania sieciowego, w pięciu podzakresach częstotliwości.

Tabela 1. Poziomy dopuszczalne napięcia zaburzeń przewodzonych na zaciskach zasilania sieciowego

Zakres częstotliwości	Poziomy dopuszczalne w [dB (μ V)]	
	Wartość quasi-szczytowa	Wartość średnia
9 kHz do 50 kHz	110	-
50 kHz do 150 kHz	90 do 80	-
150 kHz do 0,5 MHz	66 do 56	56 do 46
0,5 MHz do 5 MHz	56	46
5 MHz do 30 MHz	60	50

Zakres częstotliwości 30÷300 MHz badanych emisji zaburzeń promieniowanych jest również nietypowy i występuje tylko w normie dla urządzeń oświetleniowych. W tabeli 2 przedstawiono aktualne poziomy dopuszczalne wartości quasi-szczytowych zaburzeń promieniowanych wyrażonych w dB (μ V/m), w dwóch podzakresach częstotliwości, dla pomiaru z odległości 3 m i 10 m.

Tabela 2. Poziomy dopuszczalne emisji zaburzeń promieniowanych w zakresie częstotliwości od 30 MHz do 300 MHz dla odległości 3 m oraz 10 m

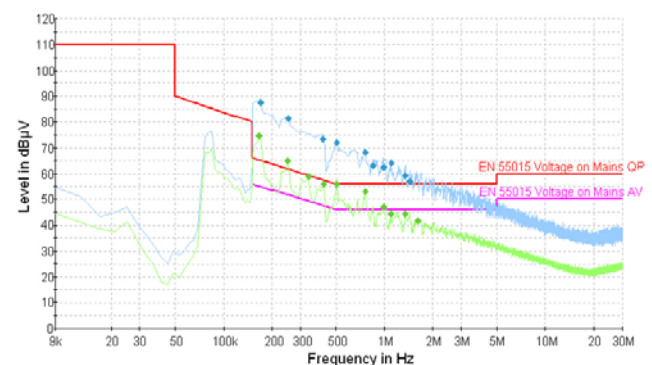
Zakres częstotliwości w [MHz]	Poziomy dopuszczalne dla wartości quasi-szczytowej w [dB (μ V/m)]	
	3 m	10 m
30 do 230	40	30
230 do 300	47	37

Każda aparatura pomiarowa wskazuje wartość mierzoną z określonym błędem pomiarowym. Błąd pomiarowy w badaniach emisji promieniowanej i przewodzonej wynosi $\pm 3,5$ dB. Jako poprawny wynik uznaje się wartość pomierzoną niższą od wartości limitu (dla danej częstotliwości) pomniejszonej o błąd pomiarowy. Na rysunkach przedstawiających wyniki przeprowadzonych badań zaznaczono poziomy dopuszczalne emisji (linie graniczne), wynikające z norm. Ułatwia to interpretację uzyskanych wyników pomiarów.

Rezultaty badań wstępnych

Początkowe badania emisji zaburzeń elektromagnetycznych zarówno przewodzonych, jak i promieniowanych przeprowadzono bez jakiegokolwiek ingerencji w urządzenie czy zastosowania środków doraźnych. Otrzymane wyniki badań w komorze semi-bezodbiwołej o pomiarze z odległości 3 m zostały przeliczone na limity dla komory 10 m.

Rezultaty pomiarów emisji zaburzeń przewodzonych w zakresie od 9 kHz do 30 MHz zaprezentowano na rys. 2. Wyniki testów w punktach o częstotliwościach z najsilniejszymi przekroczeniami poziomów dopuszczalnych przedstawiono w tabeli 3.



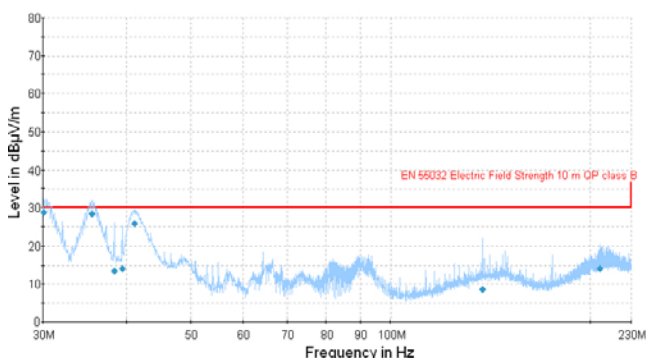
Rys. 2. Wyniki badań emisji elektromagnetycznych zaburzeń przewodzonych w zakresie 0,009÷30 MHz

Na rys. 3 oraz 4 przedstawiono wyniki pomiarów emisji zaburzeń promieniowanych odpowiednio w zakresach częstotliwości 30÷230 MHz oraz 230÷300 MHz. Wyniki tych testów w punktach z najsilniejszymi przekroczeniami poziomów dopuszczalnych przedstawiono w tabeli 4.

Wyniki badań emisji elektromagnetycznych zaburzeń przewodzonych wykazały przekroczenia dopuszczalnych wartości w wielu punktach w bardzo szerokim zakresie częstotliwości od 150 kHz do ponad 3 MHz, co spowodowało uznanie rezultatu badań jako negatywny.

Tabela. 3. Wyniki pomiaru emisji zaburzeń przewodzonych w punktach z najsilniejszymi przekroczeniami poziomów dopuszczalnych w zakresie częstotliwości 0,009÷30 MHz

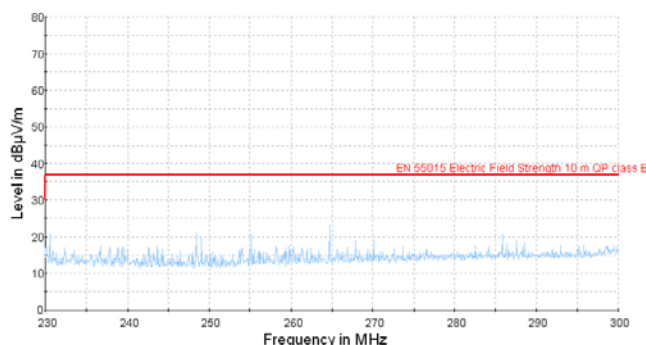
Często- tliwość [MHz]	Pomiar wartości średniej [dB (μV)]	Często- tliwość [MHz]	Pomiar quasi- szczytowy [dB (μV)]	Niepe- wność pomiarów [dB]
0,166	74,6	0,170	87,6	± 3,5
0,251	64,7	0,254	81,1	± 3,5
0,336	58,9	0,413	73,3	± 3,5
0,419	56,0	0,507	72,0	± 3,5
0,505	55,9	0,761	68,3	± 3,5
0,758	52,8	0,847	63,0	± 3,5
0,995	47,1	0,986	62,4	± 3,5
1,098	44,5	1,099	63,8	± 3,5
1,354	44,4	1,354	59,2	± 3,5
1,605	42,0	1,439	57,1	± 3,5



Rys. 3. Wyniki badań emisji elektromagnetycznych zaburzeń promieniowanych w zakresie 30÷230 MHz

Tabela. 4. Wyniki pomiaru emisji zaburzeń promieniowanych w punktach z najsilniejszymi przekroczeniami poziomów dopuszczalnych w zakresie częstotliwości 30÷230 MHz

Lp.	Częstotliwość [MHz]	Pomiar quasi-szczytowy [dB (μV/m)]	Niepe- wność pomiaru [dB]
1	30,12	28,8	± 3,5
2	35,58	28,4	± 3,5
3	38,40	13,5	± 3,5
4	39,48	14,1	± 3,5
5	41,28	25,9	± 3,5
6	137,70	8,7	± 3,5
7	206,40	14,0	± 3,5



Rys. 4. Wyniki badań emisji elektromagnetycznych zaburzeń promieniowanych w zakresie 230÷300 MHz

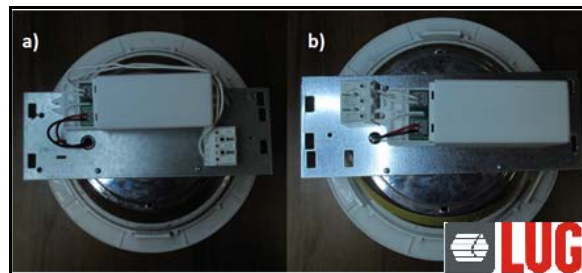
Badania emisji zaburzeń promieniowanych wykazały wyniki negatywne w zakresie częstotliwości 30 ÷ 230 MHz. Powyżej 230 MHz nie zarejestrowano zaburzeń przekraczających limity, a nawet znajdujących się na poziomie do 10 dB poniżej limitów. W dalszej części artykułu nie przedstawiono wyników powyżej 230 MHz, gdyż wszystkie uznano za pozytywne.

Redukcja emisji zaburzeń elektromagnetycznych

Ze względu na początkowe założenie jak najmniejszej ingerencji w konstrukcję urządzenia zastosowano różne metody pośrednie redukcji emisji zaburzeń elektromagnetycznych. Ostatecznie zmieniono w niewielkim stopniu konstrukcję płytki drukowanej zasilacza impulsowego oraz sposób montażu zasilacza w oprawie.

A. Zmiana ułożenia przewodów zasilających

Początkowo stwierdzono, iż przechodzące wzdłuż zasilacza przewody wejściowe (AC) wpływają negatywnie na wyniki pomiarów emisji zaburzeń przewodzonych z uwagi na sprzęganie się sygnałów niepożądanych i pominięcie filtra wejściowego w zasilaczu impulsowym znajdującym się w oprawie. Na rys. 5a i 5b przedstawiono sposoby ułożenia przewodów w oprawie przed i po zmianach.



Rys. 5. Ułożenie przewodów w oprawie: a) wersja pierwotna; b) wersja poprawiona

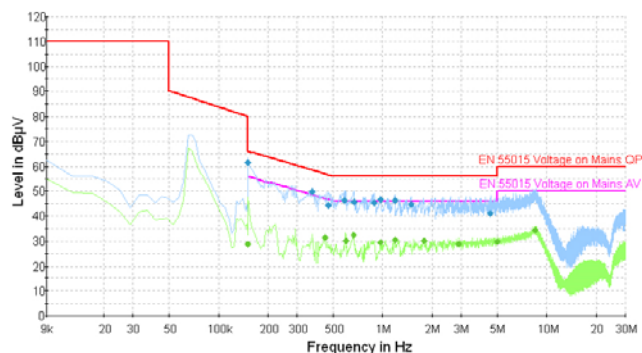
Zmiana ułożenia przewodów w oprawie spowodowała zmniejszenie zaburzeń przewodzonych w paśmie 200 kHz÷30 MHz. Jednak w zakresie częstotliwości 150÷500 kHz zaburzenia przekraczają limity dopuszczalne. Zmniejszona została również ilość negatywnych punktów na wykresie, jednak całkowity wynik ogólny testu nadal pozostał negatywny.

B. Umieszczenie modułu

Kolejnym sposobem ograniczenia emisji zaburzeń elektromagnetycznych było oddalenie modułu LED od metalowej obudowy oprawy oświetleniowej poprzez zastosowanie laminatu FR-4. Spowodowało to ograniczenie emisji zaburzeń przewodzonych w oprawie oświetleniowej, ale nadal występowały nieprawidłowości. Wynik ogólny testu został uznany jako negatywny.

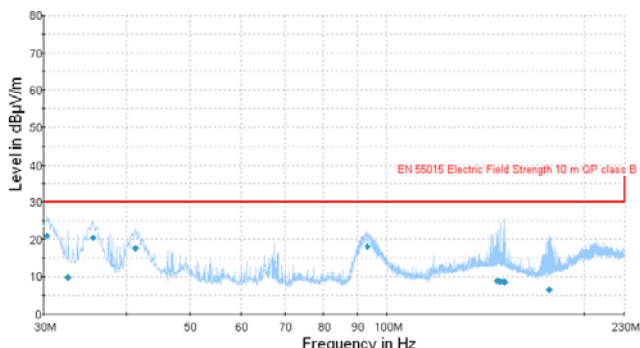
C. Zastosowanie filtrów i ekranów elektromagnetycznych

Stwierdzono, że zasilacz impulsowy emituje za wysokiego poziomu zaburzeń, ponieważ znajduje się zbyt blisko obudowy oprawy. Zasilacz wyposażony był w filtr wejściowy dławiący niepożądane sygnały z sieci, jednakże nie wpływał on na redukcję sygnałów mających swoje źródło na płycie PCB zasilacza. W związku z tym zastosowywano dodatkowy filtr na wyjściu zasilacza.



Rys. 6. Wyniki testów emisji elektromagnetycznych zaburzeń przewodzonych w zakresie 0,009÷30 MHz po wprowadzonych zmianach

Ponadto celem zmniejszenia wpływu sprzężenia pojemnościowego między zasilaczem i oprawą na poziom emisji zaburzeń przewodzonych i promieniowanych, wykonano ekran w postaci pola miedzi na stronie dolnej PCB zasilacza. Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono wyniki testów emisji zaburzeń przewodzonych i promieniowanych dla oprawy po wprowadzonych zmianach.



Rys. 7. Wyniki badań emisji elektromagnetycznych zaburzeń promieniowanych w zakresie 30÷230 MHz po wprowadzonych zmianach

Wyniki testów emisji zaburzeń promieniowanych w najgorszym punkcie (dla częstotliwości 37,8 MHz) obniżyły się do poziomu 4 dB poniżej wartości dopuszczalnej. Uwzględniając błąd pomiarowy 3,5 dB jest to wynik pozytywny. Również znacząco poprawiła się emisja przewodzona w całym zakresie 0,009÷30 MHz. Ogólny wynik badań został uznany za pozytywny.

Uwagi końcowe i wnioski

W procesie kreowania urządzenia od idei do sprzedaży należy mieć na uwadze wszystkie etapy podejmowanych działań, łącznie z testami kompatybilności elektromagnetycznej, które są niezbędne do zapewnienia bezpieczeństwa i właściwej jakości urządzenia. Jeżeli etap testów zostanie pominięty, może się okazać, że w przyszłości koszty i czas poświęcony na dostosowanie urządzenia do wymagań normatywnych będą większe.

Osiąganie kompatybilności elektromagnetycznej obiektów elektrycznych w praktyce jest skomplikowane. Jednak dysponowanie odpowiednim zapleczem technicznym i wiedzą w tym zakresie pozwala na dostosowanie parametrów technicznych wytwarzanych urządzeń do często surowych wymogów normatywnych. Jest to niezbędne zarówno z uwagi na prawidłowe funkcjonowanie danego urządzenia, jak również na jego nieszkodliwość dla środowiska i innych obiektów występujących w otoczeniu.

Autorzy: dr inż. Karol Bednarek, mgr inż. Dorota Typańska, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: Karol.Bednarek@put.poznan.pl; Dorota.Typanska@put.poznan.pl; mgr inż. Jakub Misiorny, Urząd Dozoru Technicznego, ul. Małeckiego 29, 60-706 Poznań, E-mail: Jakub.Misiorny@udt.gov.pl; inż. Arkadiusz Pietkiewicz, LUG Light Factory Sp z o.o., ul. Gorzowska 11, 65-127 Zielona Góra, E-mail: Arkadiusz.Pietkiewicz@lug.com.pl

LITERATURA

- [1] Bugała A., Bednarek K., Kasprzyk L., Tomczewski A., Statistical analysis of the electric energy production from photovoltaic conversion using mobile and fixed constructions, *EEMS 2017, E3S Web of Conferences*, 19 (2017), 01002, 1-6
- [2] Frydrychowicz-Jastrzębska G., Bugała A., Modeling the Distribution of Solar Radiation on a Two-Axis Tracking Plane for Photovoltaic Conversion, *Energies*, 8 (2015), 1025-1041
- [3] Jurasz J., Piasecki A., Wdowikowski M., Assessing temporal complementarity of solar, wind and hydrokinetic energy, *EDP Sciences, E3S Web of Conferences*, 10 (2016), 00032
- [4] Trzmiel G., Determination of a mathematical model of the thin-film photovoltaic panel (CIS) based on measurement data, *Maintenance and Reliability*, 19 (2017), n. 4, 516-521
- [5] 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
- [6] Bednarek K., Nawrowski R., Tomczewski A., Trójfazowe tory wieloprądowe złożone z przewodów rurowych w indywidualnych osłonach, *Przegląd Elektrotechniczny*, 84 (2008), nr 1, 62-64
- [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] Pawlak R., Korzeniewska E., Koneczny C., Hałgas B., Properties of thin metal layers deposited on textile composites by using the PVD method for textronic applications, *Autex Research Journal*, 17 (2017), Issue 3, 229-237
- [9] Rymaszcwski J., Lebiada M., Korzeniewska E., Simulation of the loss of superconductivity in a three-dimensional model of the metal-superconductor connection, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 12B, 183-186
- [10] Bednarek K., Nawrowski R., Tomczewski A., An application of genetic algorithm for three phases screened conductors optimization, *PARELEC'2000 International Conference on Parallel Computing in Electrical Engineering*, Canada, August 2000, 218-222
- [11] Nowak L., Knypiński Ł., Jędryczka C., Kowalski K., Decomposition of the compromise objective function in the permanent magnet synchronous motor optimization, *COMPEL*, 34 (2015), 496-504
- [12] Kasprzyk L., Analysis of a light field with the use of parallel computers, *Przegląd Elektrotechniczny*, 83 (2007), nr 12, 128-131
- [13] Matsumoto Y., Wu I., Gotoh K., Ishigami S., Measurement and modeling of electromagnetic noise from LED light bulbs, *IEEE EMC Magazine*, 2 (2013), n. 4, 58-66.
- [14] Putz Ł., Typańska D., Analysis of the light and energy performance inside a lobby with an illumination made in LED technology, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 3, 111-114
- [15] Bednarek K., Bugała A., Typańska D., Kasprzyk L., Specificity of energetic functioning of economic activity objects, *EKO-DOK 2018, E3S Web of Conferences*, 44 (2018), 00010, 1-8
- [16] 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
- [17] Bednarek K., Nawrowski R., Tomczewski A., Electromagnetic compatibility in the neighborhood of high-current lines, in *Electromagnetic Fields in Electrical Engineering, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 22, IOS Press, Amsterdam, Berlin, Oxford, Washington, 2002, 363-368
- [18] Charoy A., Compatibilite electromagnetique. Parasites et perturbations des electroniques, vol. 1-4, Dunod, Paris, 1996
- [19] Misiorny J., Bednarek K., Typańska D., The reduction of radiated electromagnetic disturbances in a multimedia travel recorder, *Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering*, 93 (2018), Poznań, 241-252
- [20] Typańska D., Maćkowiak A., Sieczkarek K., The immunity of the KNX model to continuous electromagnetic disturbances, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr 9, 243-245
- [21] PN-EN 55015:2013-10; PN-EN 55015:2013-10/A1 – Poziomy dopuszczalne i metody pomiaru zaburzeń radioelektrycznych wytwarzanych przez elektryczne urządzenia oświetleniowe i urządzenia podobne