

Badanie możliwości transmisji danych poprzez instalacje oświetleniowe LED

Streszczenie. Coraz powszechniejsze stosowanie urządzeń wykorzystujących bezprzewodową łączność radiową może w niedługim czasie doprowadzić do sytuacji, w której ograniczone zasoby dozwolonych pasm częstotliwości ulegną wyczerpaniu. W takim wypadku istotnego znaczenia nabierają badania koncentrujące się na opracowaniu alternatywnych metod transmisji sygnału. Taką transmisję można zrealizować poprzez odpowiednią modulację strumienia światła lamp wykorzystywanych w instalacjach oświetleniowych. Ważną właściwością diod LED jest bardzo łatwa modulacja strumienia światła, nawet z bardzo wysoką częstotliwością. W komunikacie opisano możliwości transmisji danych z wykorzystaniem różnego rodzaju systemów oświetleniowych bazujących na technologii SSL. Przedstawiono i omówiono wyniki pomiarów charakterystyki częstotliwościowych diod LED wykorzystywanych w modułach świecących.

Abstract. Due to the more and more widespread applications of devices that use wireless radio communication, it is possible to come to a point soon in which the limited resources of the available frequency bands will be exhausted. From this point of view, research focused on the development of alternative methods of signal transmission is becoming very important. Such transmission may be effected by proper modulation of the luminous flux of lamps used in lighting installations. LEDs allow particularly easy modulation of their luminous flux, even with a high frequency. This report describes the possibility of data transmission with the use of various lighting systems based on the SSL technology. Some results of measurements of the frequency response of LEDs used in lighting modules are presented and discussed. (**Examination of the possibility of data transmission over LED lighting installations**).

Słowa kluczowe: VLC, SSL, LED, CSK, CCT, visible light communication, temperature barwowa, modulacja PWM

Keywords: VLC, SSL, LED, CSK, CCT, visible light communication, colour temperature, PWM

Wprowadzenie

W ostatnich latach intensywnie zachodzi proces zastępowania mało wydajnych, tradycyjnych źródeł światła w postaci lamp żarowych, jak również bardziej wydajnych lamp fluorescencyjnych, źródłami światła opartymi na wykorzystaniu diod LED. Podstawowymi zaletami półprzewodnikowych źródeł światła są wysoka wydajność świetlna, obecnie przekraczająca 150 lm/W, oraz trwałość sięgająca nawet 50 tysięcy godzin. Przy użyciu lamp LED łatwa jest ciągła regulacja natężenia oświetlenia, która jest realizowana poprzez zmianę natężenia prądu stałego płynącego przez diody LED lub zasilanie ich przebiegiem prostokątnym o modulowanej szerokości impulsów (modulacja PWM). LAMPY LED, w odróżnieniu od wcześniej wymienionych źródeł światła, charakteryzują się również zdolnością do bardzo szybkiej zmiany intensywności świecenia. Ta unikalna cecha spowodowała, że już na początku ubiegłej dekady rozpoczęto badania nad wykorzystaniem lamp LED do transmisji danych z dużą szybkością [1].

Komunikacja za pośrednictwem oświetlenia LED określana jest skrótem VLC (ang. Visible Light Communication). W roku 2011 opracowano normę IEEE 802.15.7, która zawiera zalecenia dotyczące warstwy łącza i warstwy fizycznej [2] dla transmisji danych z szybkością do 96 Mb/s. Norma ta omawia sposoby modulacji strumienia światła przy zachowaniu możliwości regulacji natężenia oświetlenia w sposób eliminujący efekt migotania. Rozpatrywane są trzy sposoby modulacji: OOK (On Off Keying), VPPM (Variable Pulse Position Modulation) i CSK (Colour Shift Keying).

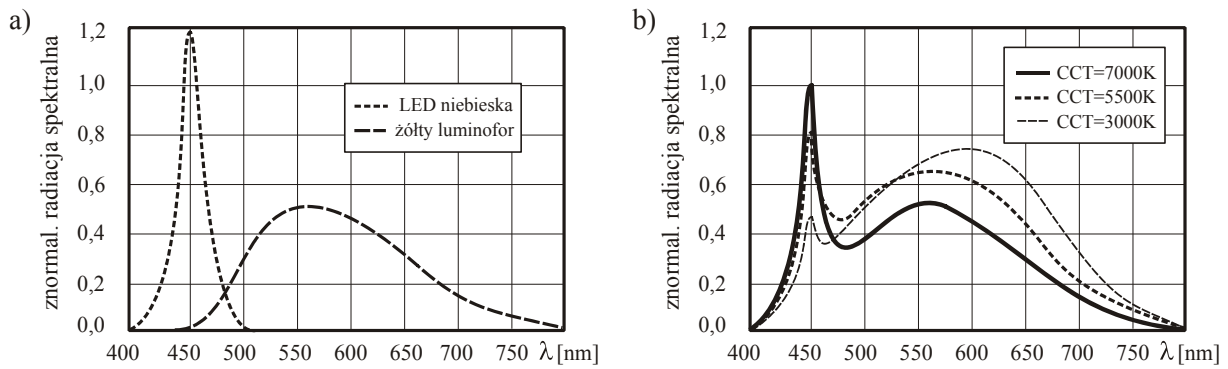
Praktyczne realizacje sterowników przeznaczonych do zasilania lamp LED wykorzystywanych do transmisji danych opierają się zazwyczaj na typowych strukturach przetwornic impulsowych, które realizują funkcję źródła prądowego, dołączanego za pomocą dodatkowego przełącznika elektronicznego do łańcucha diod LED [3, 4, 5]. Przełącznik ten sterowany jest w sposób zapewniający uzyskanie wybranego rodzaju modulacji natężenia oświetlenia.

Przewidywany obszar zastosowań techniki VLC jest bardzo szeroki, obejmując transfer danych w sieciach sensorowych, lokalizację wewnątrz pomieszczeń, wymianę

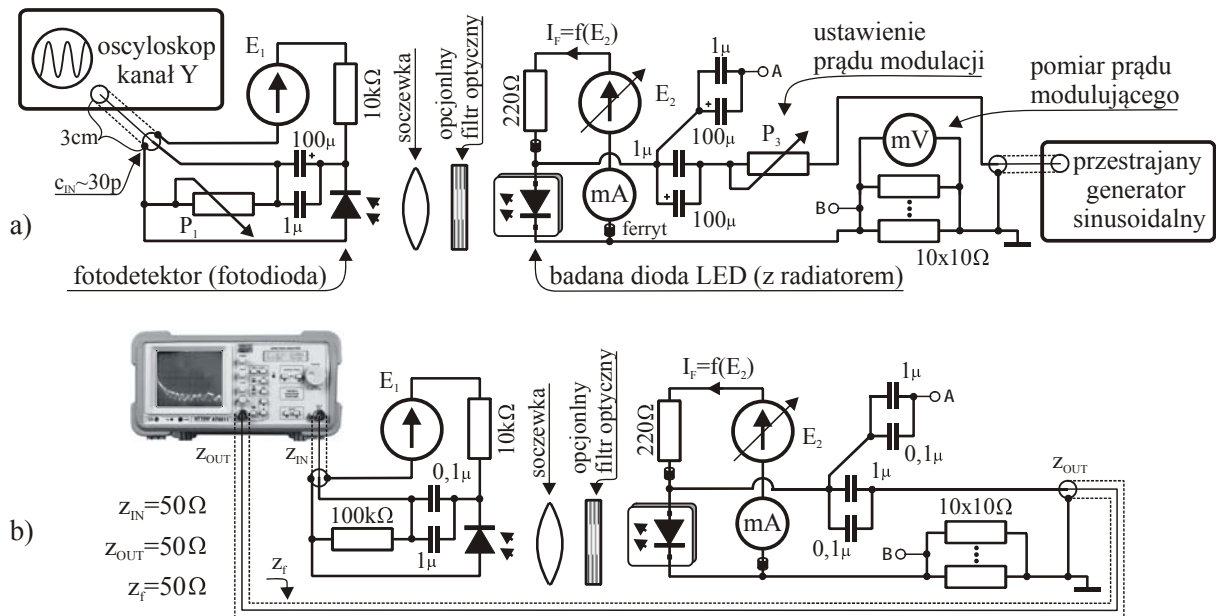
danych między pojazdami i infrastrukturą i wiele innych [6]. Komunikacja za pośrednictwem oświetlenia LED może stanowić rozwiązanie problemów związanych z możliwością wykorzystania łączności radiowej do komunikacji pomiędzy wieloma obiektami w ramach tzw. „internetu rzeczy” (ang. IoT, Internet of Things) lub w systemach tzw. „inteligentnego” budynku [5]. Szczególnie istotnymi zaletami techniki VLC w takich zastosowaniach jest nieprzenikanie światła przez ściany pomieszczeń, co zapobiega interferencjom pomiędzy sąsiadującymi komórkami sieci oraz zapewnia dużą selektywność transmisji.

Pomiary charakterystyk częstotliwościowych diod LED emitujących światło białe

Uzyskanie światła białego za pomocą diod LED zazwyczaj realizuje się dwiema metodami. Pierwsza z nich, to wykorzystanie monochromatycznych diod LED RGB, gdzie poprzez zmieszanie koloru czerwonego, zielonego i niebieskiego uzyskuje się wypadkowe światło białe. Druga metoda wykorzystuje diody LED emitujące światło niebieskie ($\lambda_{PEAK} \approx 450$ nm), w których kryształ półprzewodnikowy zatopiony jest w żółtym luminoforze. Światło niebieskie przenikające przez luminofor w pewnej części zostaje przez niego pochłonięte i następuje konwersja do światła żółtego. Zsumowanie składowej niebieskiej i żółtej pozwala uzyskać strumień światła białego (rys.1). Poprzez zmianę grubości warstwy luminoforu otaczającego półprzewodnik, jak również modyfikując jego skład można wyprodukować „białe” diody LED z wymaganą temperaturą barwową, tj. wartością parametru CCT (Correlated Colour Temperature). Ten typ diody jest najczęściej stosowany na rynku oświetleniowym. Z punktu widzenia transmisji sygnału może jednak okazać się trochę gorszy od diod RGB. Przyczyną jest nieznaczna poświata luminoforu, która ograniczy pasmo transmisji. Z kolei modulacja strumienia światła samego półprzewodnika może odbywać się z wysoką częstotliwością. Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie odpowiednio dobranego filtra optycznego po stronie detektora, tzn. filtra przepuszczającego światło niebieskie o długości fali ok. 450 nm.



Rys. 1. Widma „białej” diody LED: składowa niebieska i żółta (a), widmo diod LED z różną wartością temperatury barwowej (b)



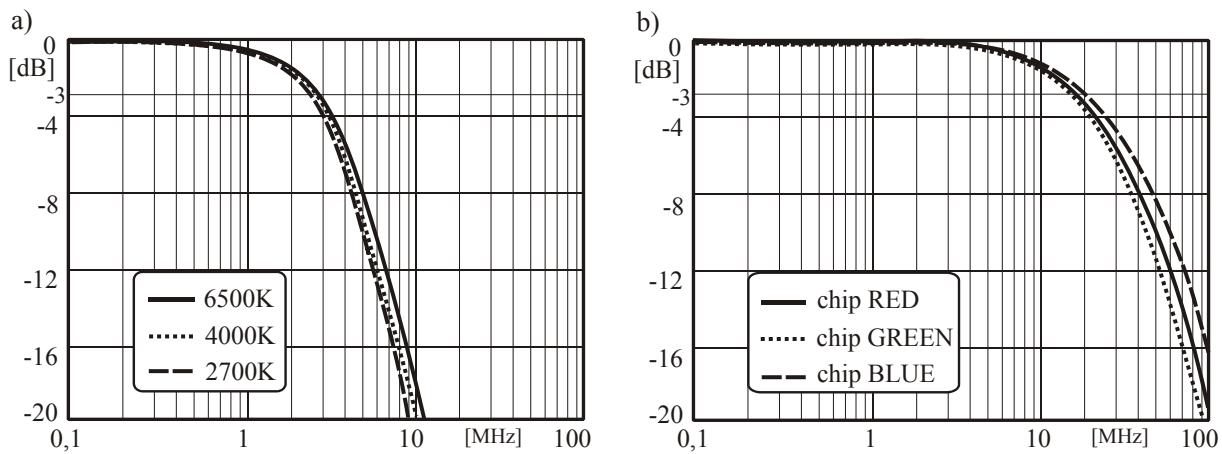
Rys. 2. Stanowiska pomiarowe do badania charakterystyk częstotliwościowych diod LED: konfiguracja klasyczna (a) oraz układ z wykorzystaniem analizatora widma ATEN AT6011 (b)

Na rysunku 2 przedstawiono układy do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych badanych diod LED. Wykorzystano dwa układy pomiarowe: klasyczny (rys.2a) oraz układ z analizatorem widma (rys.2b). Założono regulację częstotliwości od pojedynczych kiloherców do nawet kilkuset megaherców. Przy tak dużym zakresie zmian częstotliwości pomiarowej trudno byłoby wykonać pomiary posługując się tylko metodą klasyczną. Niełatwe jest znalezienie precyzyjnych przyrządów i mierników pracujących zarówno przy niskich, jak i bardzo wysokich częstotliwościach, przy których należy dodatkowo uwzględnić zjawiska związane z dopasowaniem falowym. Układ pierwszy wykorzystano do dokładnego pomiaru charakterystyk w zakresie małych i średnich częstotliwości (do 5 MHz). Przede wszystkim posłużył on do zmierzenia górnej częstotliwości granicznej diod „białych” (f_g dla spadku 3 dB). Z kolei układ z analizatorem widma umożliwił obserwacje i pomiary w zakresie średnich i wysokich częstotliwości, tj. 1-100 MHz.

W roli fotodetektora wykorzystano szybką fotodiode. Jest to najistotniejszy element toru odbiorczego. Testowano: SFH-213, SFH-203P, S-5972. Każdy wybór był kompromisem pomiędzy czułością i właściwościami dynamicznymi. We wszystkich przypadkach bardzo korzystny wpływ na parametry dynamiczne fotodiody miało

zastosowanie wstecznej polaryzacji napięcia w postaci obwodu z siłą E_1 (9-18 V). Znacząco minimalizuje on wartość pojemności złączeniowej fotodiody. Za pomocą potencjometru P_1 ustawiano czułość toru odbiorczego. W układzie z analizatorem widma zastąpiła go rezystancja wejściowa przyrządu $Z_{IN} = 50 \Omega$. Napięcie E_2 reguluje wartość składowej stałej prądu diody LED. Regulacja składowej zmiennej, tj. wartości prądu modulującego I_m , odbywała się za pomocą nastawy potencjometru P_2 lub poprzez zmianę amplitudy napięcia generatora śledzącego (rezystancja dynamiczna diody LED jest dużo mniejsza niż Z_{OUT}). Pomiar wartości I_m dokonywany jest na boczniku prądowym składającym się z dziesięciu równolegle połączonych rezystorów 10 Ω (redukcja indukcyjności szeregowej).

Badaniom poddano diody LED jednego z największych europejskich producentów (seria DURIS E5). Są to diody średniej mocy powszechnie stosowane w technice oświetleniowej. Przebadano diody o temperaturze barwowej CCT = 2700K, 4000K oraz 6500K. Wyznaczono także charakterystyki diod monochromatycznych emitujących światło czerwone, zielone i niebieskie (dioda RGB w obudowie PLCC6). Znormalizowane wykresy przedstawiono na rysunku 3, natomiast zmierzone częstotliwości graniczne w tabeli 1.



Rys.3. Zmierzone charakterystyki częstotliwościowe „białych” diod LED z luminoforem (seria DURIS E5) z CCT: 2700K, 4000K, 6500K (a) oraz diody RGB (b) znormalizowane względem poziomu 0dB

Tabela 1. Wartości zmierzonych parametrów badanych diod LED

CCT lub barwa	opis diody	I_F	I_m	R_S+r_D	f_g (-3dB)	f_{-20} (-20dB)	
2700K (CRI \approx 85)	z luminoforem (DURIS E5)	50 mA	20 mA _{pp}	3,6 Ω	2,4 MHz	9,1 MHz	
4000K (CRI \approx 85)	z luminoforem (DURIS E5)	50 mA	20 mA _{pp}	3,8 Ω	2,5 MHz	10,3 MHz	
6500K (CRI \approx 85)	z luminoforem (DURIS E5)	50 mA	20 mA _{pp}	3,8 Ω	2,6 MHz	11,1 MHz	
RED ($\lambda_{dom} \approx$ 625 nm)	RGB w obudowie PLCC6	20 mA	10 mA _{pp}	10 mA _{pp}	9,8 Ω	16 MHz	102,5 MHz
GREEN ($\lambda_{dom} \approx$ 528 nm)	RGB w obudowie PLCC6	20 mA	10 mA _{pp}	18,5 Ω	15 MHz	95,0 MHz	
BLUE ($\lambda_{dom} \approx$ 470 nm)	RGB w obudowie PLCC6	20 mA	10 mA _{pp}	10,5 Ω	19 MHz	115,5 MHz	

Analizując przedstawione wykresy i częstotliwości graniczne diod LED z luminoforem, łatwo zauważyć negatywny wpływ samego luminoforu na szerokość pasma „białych” diod LED. Widoczna jest pewna zależność pomiędzy temperaturą barwową a częstotliwością graniczną. Wpływ ten jest oczekiwany (diody z niższym CCT mają bardziej wytlumione światło niebieskie), jednak na tyle niewielki, że pozbawiony praktycznego znaczenia. Badania potwierdziły również wpływ niebieskich filtrów optycznych, zastosowanych po stronie detektora, na podniesienie częstotliwości granicznej. Zabieg ten odbywa się jednak kosztem znacznej redukcji wartości natężenia światła na fotodiodzie (tłumienie wszystkich barw poza niebieską). W takim przypadku pogorszy się inny, ale równie istotny parametr określający możliwości transmisji danych, tj. stosunek mocy sygnału do mocy szumu. Na podstawie twierdzenia Shannona - Hartleya przepustowość kanału komunikacyjnego można wyrazić następującym wzorem [7]:

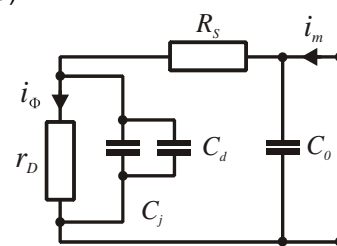
$$(1) \quad C = W \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

gdzie: C to przepustowość kanału komunikacyjnego (bity na sekundę), W jest szerokością pasma przenoszenia (w hercach), natomiast S/N to stosunek mocy sygnału do szumu wyrażony w skali liniowej. Korzyści z zastosowania filtra niebieskiego można się spodziewać przy prostych metodach modulacji, gdzie wyższa częstotliwość graniczna i płaskie pasmo przenoszenia mogą mieć znaczenie. Zastosowanie takiego filtra przy zaawansowanych transmisjach cyfrowych nie powiększy jednak przepustowości kanału komunikacyjnego [8].

W technice oświetleniowej diody RGB wykorzystuje się do zastosowań dekoracyjnych lub w lampach (razem z „białymi” diodami LED) z regulacją temperatury barwowej [9].

Na rysunku 3b pokazano wykresy dla diod monochromatycznych. Odnotowano wyższe częstotliwości

graniczne. Transmisja danych przy optymalnym wykorzystaniu właściwości modułów RGB może odbywać się z wielokrotnie większą prędkością niż przy użyciu diod LED z luminoforem. Niewielkie różnice pomiędzy kolejnymi wykresami wynikają z fizycznych różnic oddzielnie wykonanych kryształów półprzewodnikowych umieszczonych w jednej obudowie (dioda RGB). Analizując kształt charakterystyk oraz zmianę w funkcji częstotliwości przebiegów napięciowych w punktach A i B układu pomiarowego z rysunku 2, zaproponowano model monochromatycznej diody LED dla składowej zmiennej (rys.4). W modelu tym C_0 przedstawia pojemność wyprowadzeń diody oraz ścieżek PCB, C_j to pojemność złącza, C_d to pojemność dyfuzyjna. R_S przedstawia rezystancję kontaktów oraz półprzewodnikowych obszarów przed i za złączem. Wartość rezystora r_D jest zależna od wartości prądu stałego płynącego przez diodę i może być wyznaczona na podstawie równania Shockleya jako rezystancja dynamiczna idealnego złącza p-n. We wszystkich badanych diodach LED rezystancja ta była mniejsza od rezystancji szeregowej R_S (pomiaru dla $I_F = 20-100\%$ dopuszczalnej wartości katalogowej). W zaproponowanym modelu składowa i_Φ prądu i_m jest ściśle powiązana ze zjawiskiem rekombinacji promienistej i jest źródłem – w zależności liniowej – składowej zmiennej strumienia światła monochromatycznej diody LED (dla diod z luminoforem taka zależność wystąpi tylko w niebieskim zakresie widma).



Rys.4. Model małosygnałowy diody LED

W sterowanych instalacjach oświetleniowych LED stosowane są dwie metody regulacji jasności. Metoda pierwsza, to zmiana wartości prądu przewodzenia diody. Druga natomiast wykorzystuje modulację PWM (ang. Pulse Width Modulation). Oba sposoby mają swoje wady i zalety. Parametry chromatyczne diody LED ulegają zauważalnej zmianie wraz ze zmianą wielkości płynącego przez nią prądu [10], z kolei modulacja PWM (gdzie komutowana jest stała wartość I_F) często będzie źródłem różnego rodzaju zakłóceń [11]. Regulację prądową najczęściej stosuje się w punktowych źródłach światła, np. w lampach z modułami COB (ang. Chip On Board). W przypadku światła rozproszonego, np. duże powierzchnie świecące przesłonięte folią rozpraszającą światło, stosowanych będzie wiele modułów LED mniejszej mocy sterowanych kluczowanym napięciem zasilającym (są to moduły napięciowe wyposażone we własne stabilizatory prądu).

Dla każdej z wyżej opisanych instalacji transmisja danych będzie zrealizowana w odmienny sposób. W przypadku autonomicznych opraw oświetleniowych układ modulatora musi być umieszczony w każdej oddzielnej lampie, do której doprowadzony również zostanie dodatkowy przewód sygnałowy. Taka struktura zapewnia największą szybkość transmisji (modulator jest blisko modułu LED) i najmniejszy poziom emitowanych zaburzeń radioelektrycznych [11]. Amplituda prądu modulującego (I_m) nie może być zbyt duża, żeby nie powodować krótkotrwałych – i przez to dostrzegalnych – zmian parametrów chromatycznych oświetlenia [10]. W instalacjach wykorzystujących modulację PWM i napięciowe moduły LED transmisja danych napotka na istotne ograniczenia. Teoretycznie wystarczy zastosować jeden modulator sprzężony z centralnym sterownikiem PWM. Ze względu jednak na spore oddalenie modułów LED od sterownika, pasmo transmisji będzie zawężone. Przewody zasilające napięciowe moduły LED ograniczą możliwość przesyłania szybkich sygnałów, a także mogą spowodować emisję zaburzeń radioelektrycznych [11].

Podsumowanie

Z powodu ograniczeń formalnych, w niniejszej pracy zdołano zamieścić tylko niewielką część wyników wykonanych pomiarów. Przebadano wiele serii diod LED używanych w technice oświetleniowej. Poza diodami producentów europejskich badano także produkty firm amerykańskich i azjatyckich. We wszystkich przypadkach diody LED z luminoforem miały zdecydowanie niższe częstotliwości graniczne od diod monochromatycznych ($f_g \approx 1\text{-}3$ MHz). Zaproponowane stanowisko pomiarowe z analizatorem widma zawierającym generator śledzący okazało się być doskonałym uzupełnieniem układu klasycznego. Bardzo wysoka czułość analizatora w połączeniu z niską impedancją wejściową ($Z_{IN} = 50 \Omega$) pozwoliła uzyskać szerokie pasmo przenoszenia fotodetektora, tj. ponad 100 MHz.

Opisując transmisję danych poprzez lampy instalacji oświetleniowej, nie sposób nie wspomnieć o dość nietypowym zastosowaniu takiej metody. Odpowiednio przygotowane lampy mogą zostać wykorzystane do zastosowań szpiegowskich. Dość duże prędkości transmisji umożliwią przesłanie obrazu i dźwięku za pomocą niewidocznej dla oka modulacji strumienia światła. Optyczny układ odbiorczy podobny do teleskopu mógłby z

nawet dość dużej odległości „obserwować” szpiegowane obiekty i odbierać zmodulowane światło (np. światło przenikające przez zasłony okna). Biorąc pod uwagę, że same lampy oświetlające pomieszczenie nie budzą specjalnych podejrzeń, oraz że przy rutynowej kontroli na obecność „nielegalnych” urządzeń zwykle nie używa się aparatury wykrywającej modulację w widzialnym zakresie widma fal elektromagnetycznych, opisana metoda szpiegowska może być niezwykle skuteczna. Istotny jest również fakt, że przy zastosowaniu złożonego układu optycznego taka „obserwacja” może odbywać się z wyjątkowo wysoką selektywnością. Oczywiście w roli urządzenia służącego do wykrywania „nielegalnej” transmisji mógłby zostać wykorzystany analizator widma i układ odbiorczy z fotodiody, użyty do pomiarów charakterystyk częstotliwościowych diod LED.

Przedstawione w tym komunikacie układy pomiarowe i wyniki, uzyskane zostały w ramach badań statutowych Instytutu Elektroniki.

Autorzy: dr inż. Jacek Chęciński, dr hab. inż. Zdzisław Filus, prof. Pol. Śl., Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, E-mail: jacek.checinski@polsl.pl, Zdzislaw.Filus@polsl.pl.

LITERATURA

- [1] Komino T., Nakagawa M., Fundamental Analysis for Visible Light Communication System using LED Lights, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 50, No. 1, February 2004, 100-107
- [2] Rajagopal S., Roberts R., Lim S.K., IEEE 802.15.7 Visible Light Communication: Modulation Schemes and Dimming Support, *IEEE Communications Magazine*, March 2012, 72-82
- [3] Modepalli K., Parsa L., Dual-Purpose Offline LED Driver for Illumination and Visible Light Communication, *IEEE Transactions on Industrial Applications*, Vol. 51, No. 1, January/February 2015, 406-419
- [4] Mirvakili A., Koomson V., A flicker-free CMOS LED driver control circuit for visible light communication enabling concurrent data transmission and dimming control, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, Vol. 80 (2014), Issue 2, 283-292
- [5] Zhao S., Xu J., Trescases O., Burst-Mode Resonant LLC Converter for an LED Luminaire with Integrated Visible Light Communication for Smart Buildings, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 8, August 2014, 4392-4402
- [6] Pathak P., Feng X., Hu P., Mohapatra P., Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 17, No. 4, (2015), 2047-2077
- [7] Chojcan J., Dustor A., Transmisja danych z widmem rozproszonym, *Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej* 2000, seria: Elektronika z.12, 201-219
- [8] Sung J.-Y., Chow C.-W., Yeh C.-H., Is blue optical filter necessary in high speed phosphor-based white light LED visible light communications?, *OPTICS EXPRESS* 20646, Vol. 22, No. 17, 25 August 2014
- [9] Chęciński J., Filus Z., Lampa LED o regulowanej temperaturze barwowej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2016/9, Wydawnictwo SIGMA-NOT
- [10] Chęciński J., Filus Z., Wpływ metody sterowania na stabilność parametrów chromatycznych diod LED, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2015/9, Wydawnictwo SIGMA-NOT
- [11] Chęciński J., Filus Z., Zaburzenia radioelektryczne generowane przez instalacje oświetleniowe LED, *Elektronika-Konstrukcja, Technologie, Zastosowania*, 2013/10, Wydawnictwo SIGMA-NOT