

Porównanie właściwości dynamicznych wybranych czujników fotometrycznych

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów parametrów dynamicznych dwóch arbitralnie wybranych czujników natężenia oświetlenia. Czujniki te wykonano z użyciem fotodiody oraz fototranzystora. Mogą być one wykorzystywane w systemach oświetleniowych jako źródło sygnału zwrotnego dla układów wykonawczych w postaci półprzewodnikowych źródeł światła. Za pomocą wykonanego układu pomiarowego zarejestrowano kształt napięcia na oświetlonych czujnikach fotometrycznych. Uzyskane wyniki badań zostały zaprezentowane i przedyskutowane.

Abstract. This paper presents the result of the measurements of the dynamic parameters of two arbitrarily selected photometric sensors. These sensors contain a photodiode or a phototransistor. These sensors could be used in lighting systems as a source of feedback for executive systems in the form of the semiconductor light sources. The waveform of voltage of illuminated photometric sensors has been recorded with the use of the authors' measurement system. The obtained measurement results were presented and discussed. (**Comparison of dynamic properties of the selected photometric sensors**).

Słowa kluczowe: fotodioda, fototranzystor, czujnik fotometryczny, element systemu oświetleniowego, oświetlenie LED, pomiary dynamiczne

Keywords: photodiode, phototransistor, photometric sensor, lighting system component, LED lighting, dynamic measurements

Wprowadzenie

Jednym z istotnych zagadnień metrologicznych jest wiarygodny pomiar parametrów fotometrycznych wybranych źródeł światła [1-4]. Niezbędnym komponentem układów pomiarowych umożliwiającym realizację takich pomiarów są czujniki fotometryczne zawierające w swojej strukturze fotodiodę oraz fototranzystor [5-7]. Na rynku dostępnych jest wiele typów takich czujników.

W pracach [8-12] zaproponowano systemy cyfrowe wykorzystujące jako czujnik natężenia oświetlenia sensor BH1750FVI, zawierający element światłoczuły w postaci fotodiody z dodatkowymi układami peryferyjnymi. Przedstawione systemy są wykorzystywane głównie w technice motoryzacyjnej oraz telekomunikacji do sterowania podświetleniem wyświetlaczy samochodowych, ekranów urządzeń mobilnych oraz innych urządzeń wyposażonych w ekrany pracujące w zmiennych warunkach oświetleniowych. W cytowanych pracach opisano dodatkowo budowę czujników fotometrycznych wykorzystujących fotodiodę jako element światłoczuły.

W pracach [13-16] zaproponowano systemy wbudowane do sterowania oświetleniem stanowiska roboczego, oparte na czujniku fototranzystorowym TEMT6000. Zadaniem tego czujnika jest ciągły pomiar natężenia oświetlenia i reagowanie na wszelkie zmiany natężenia oświetlenia.

Najważniejszymi parametrami statycznymi badanych czujników natężenia oświetlenia, z punktu widzenia praktycznych aplikacji, są napięcie zasilania czujnika, dopuszczalna moc wydzielana w strukturze półprzewodnikowej czujnika oraz zakres czułości widmowej podawany w nm [1, 17]. Rozpatrywane czujniki natężenia oświetlenia opisane w pracach [5-7] są bardzo często stosowane w dynamicznych układach sterowania oświetleniem. Z punktu widzenia tych układów jednym z najważniejszych parametrów czujników fotometrycznych jest graniczna częstotliwość pracy, która dla fototranzystorów nie przekracza dziesiątek kHz, natomiast dla fotodiod sięga setek MHz [1]. Należy także brać pod uwagę czasy narastania i opadania sygnałów napięciowych badanych czujników natężenia oświetlenia.

W pracy [18] opisano wyniki badań parametrów statycznych dwóch grup czujników natężenia oświetlenia zawierających w swojej strukturze fotodiodę oraz fototranzystor, natomiast zauważa się brak wyników pomiarów charakteryzujących właściwości dynamiczne

czujników fotometrycznych. Można również zauważyć w literaturze brak analizy kształtu przebiegów dynamicznych rozpatrywanych czujników natężenia oświetlenia.

Celem pracy jest zbadanie parametrów dynamicznych wybranych czujników natężenia oświetlenia oraz określenie przydatności tych czujników do pomiaru natężenia oświetlenia w dynamicznych systemach sterowania oświetleniem stanowisk pracy.

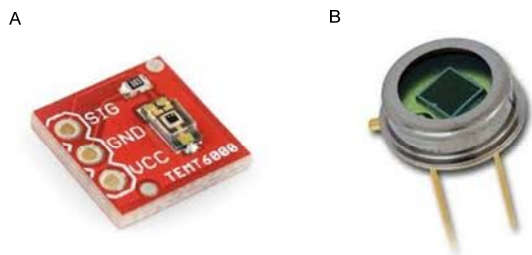
W rozdziale drugim opisano budowę oraz podstawowe parametry eksploatacyjne dwóch arbitralnie wybranych czujników natężenia oświetlenia. Rozdział trzeci zawiera opis wykonanego stanowiska pomiarowego do badań parametrów dynamicznych wybranych czujników natężenia oświetlenia oraz opis wybranego źródła światła. Z kolei, w rozdziale czwartym zostały przedstawione wyniki pomiarów parametrów dynamicznych rozważanych czujników natężenia oświetlenia.

Badane czujniki natężenia oświetlenia

Badaniom eksperymentalnym poddano dwa arbitralnie wybrane czujniki natężenia oświetlenia zawierające w swojej strukturze fototranzystor (rysunek 1A) oraz fotodiodę (rysunek 1B). Na rysunku 1A pokazano widok czujnika natężenia oświetlenia typu TEMT6000 [5], w którym elementem światłoczułym jest fototranzystor o przewodnictwie typu npn. W swojej strukturze czujnik natężenia oświetlenia posiada także rezystor ograniczający prąd kolektora o wartości 10 k Ω szeregowo połączony z emiterem fototranzystora. Element światłoczuły w tym czujniku charakteryzuje się wąskim przedziałem mierzonych wartości natężenia oświetlenia, ze względu na dość szybkie wchodzenie fototranzystora w stan nasycenia i ograniczenie jego właściwości pomiarowych. Wadą czujników wykorzystujących fototranzystor w swojej strukturze jest ich mała graniczna częstotliwość pracy, nie przekraczająca 100 kHz [1, 17].

Na rysunku 1B przedstawiono widok fotodiody typu BPW21R produkowanej przez firmę Vishay [6]. Fotodioda BPW21R jest przeznaczona do pracy w zakresie widma światła widzialnego. Do zalet fotodiody możemy zaliczyć dużą częstotliwość graniczną pracy tego elementu w zakresie od 10 do 100 MHz w zależności od typu konstrukcji. Badany element charakteryzuje się dużą detekcyjnością sygnału optycznego przy zachowaniu niskiego poziomu szumów śrutowych i termicznych. Badana fotodioda odznacza się również dużą liniowością napięcia

na diodzie w funkcji mocy promieniowania dostarczanego do elementu [1, 17]. Parametry eksploatacyjne badanych czujników natężenia oświetlenia zostały przedstawione w Tabeli 1.

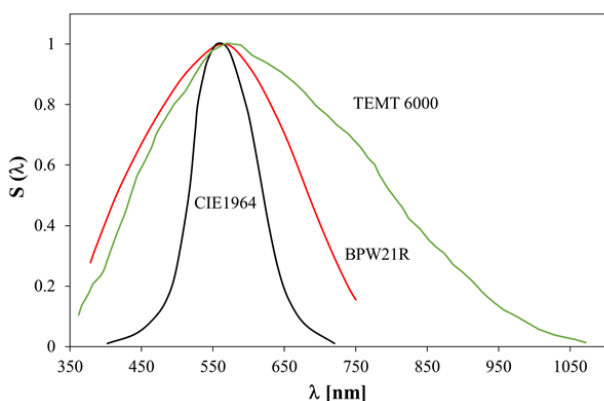


Rys. 1. Widok fototranzystora TEMT6000 (A) oraz fotodiody BPW21R (B) [5, 6]

Tabela 1. Parametry eksploatacyjne badanych czujników natężenia oświetlenia [5, 6]

Parametr	TEMT6000	BPW21R
Maksymalne napięcie kolektor-emiter $U_{CE,max}$ [V]	6	-
Maksymalny prąd kolektora $I_{C,max}$ [mA]	20	-
Maksymalne napięcie wsteczne V_R [V]	-	10
Maksymalne napięcie przewodzenia $V_{F,max}$ [V]	-	1,3
Dopuszczalna moc strat P_{tot} [mW]	100	300
Maksymalny prąd ciemny przy $E = 0$ [nA]	3	30
Środkowa długość fali λ_{nom} [nm]	570	565
Zakres czułości widmowej λ [nm]	440-800	420-675
Graniczna częstotliwość pracy f [MHz]	0,01-0,1	10-100

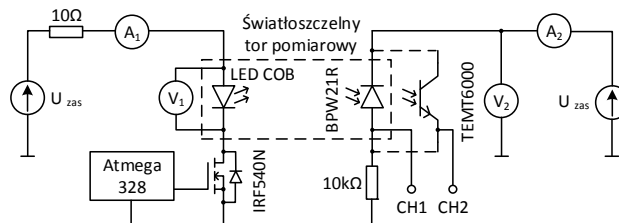
Na rysunku 2 przedstawiono zależność względnej czułości widmowej S w funkcji długości fali λ [nm] dla badanych czujników natężenia oświetlenia [5, 6] oraz dla ludzkiego oka według normy CIE 1964 [1, 2]. Można zauważyć, że czujnik natężenia oświetlenia TEMT6000, który zawiera fototranzystor jako element światłoczuły, charakteryzuje się najszerszym zakresem widmowym sięgającym od początku widma światła widzialnego do dalekiej podczerwieni. Badana fotodiody charakteryzuje się węższym zakresem czułości widmowej, natomiast jej maksimum bardziej odpowiada czułości ludzkiego oka według normy CIE 1964.



Rys. 2. Zależność względnej czułości widmowej $S(\lambda)$ w funkcji długości fali λ badanych czujników natężenia oświetlenia i ludzkiego oka

Stanowisko pomiarowe

W celu wykonania pomiaru parametrów dynamicznych badanych czujników natężenia oświetlenia przygotowano autorski układ pomiarowy, którego schemat pokazano na rysunku 3.

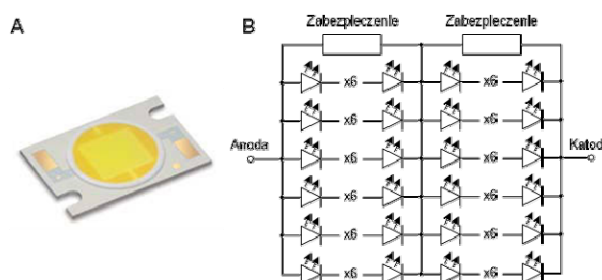


Rys. 3. Schemat układu do pomiaru parametrów dynamicznych czujników fotometrycznych

Jako źródło światła została zastosowana dioda LED typu CL-L234A-MC18W1-C w obudowie COB (Chip On Board) [19], dalej nazywana diodą LED COB. Wartość napięcia oraz prądu przepływającego przez diodę LED COB jest kontrolowana za pomocą woltomierza oraz amperomierza UT804 firmy UNIT [20]. Dioda LED COB podczas badań eksperymentalnych jest zasilana za pomocą zasilacza Array 3646A [21] oraz jest szeregowo połączona z rezystorem $R = 10\Omega$ ograniczającym przepływający przez nią prąd. Szeregowo z diodą LED COB został połączony tranzystor MOSFET typu IRF540N [22] z kanałem typu n. Umożliwia on zasilanie źródła światła sygnałem prostokątnym generowanym za pomocą układu mikrokontrolera Microchip ATmega328 [23]. Układ ten pozwolił na wygenerowanie sygnału prostokątnego o maksymalnej częstotliwości równej 30 kHz.

Za pomocą diody LED COB oraz zastosowanego układu zasilania podczas pomiaru parametrów dynamicznych wybranych czujników natężenia oświetlenia uzyskano największą wartość natężenia oświetlenia równą 11 klx. Wartość natężenia oświetlenia jest kontrolowana za pomocą luksomierza L200 firmy Sonopan [24].

Na rysunku 4A przedstawiono widok obudowy zastosowanej diody LED COB, natomiast na rysunku 4B przedstawiono schemat wewnętrzny tego elementu. Dioda LED COB w swojej strukturze zawiera matrycę 72 złącza p-n połączonych w konfiguracji szeregowo-równoległej oraz elementy odpowiedzialne za zabezpieczenie diody przed odrotną polaryzacją, jak i przed wyładowaniami elektrostatycznymi ESD (Electrostatic Discharge). Parametry eksploatacyjne diody LED COB zostały przedstawione w Tabeli 2.



Rys. 4. Widok obudowy diody COB typu CL-L234A-MC18W1-C (A) oraz struktura wewnętrzna diody LED COB (B)

Tabela 2. Parametry eksploatacyjne diody LED typu CL-L234A-MC18W1-C [19]

Parametr	Wartość
Maksymalny prąd przewodzenia I_F [mA]	720
Prąd wsteczny I_R [mA]	1
Maksymalna moc strat P_{tot} [W]	29
Temperatura złącza p-n $T_{j,max}$ [°C]	150
Napięcie przewodzenia U_F [V] @ $I_F = 480$ mA	38,2
Strumień świetlny Φ_v [lm] @ $I_F = 480$ mA	1337
Rezystancja termiczna między złączem a obudową $R_{th,j-c}$ [K/W]	2,4

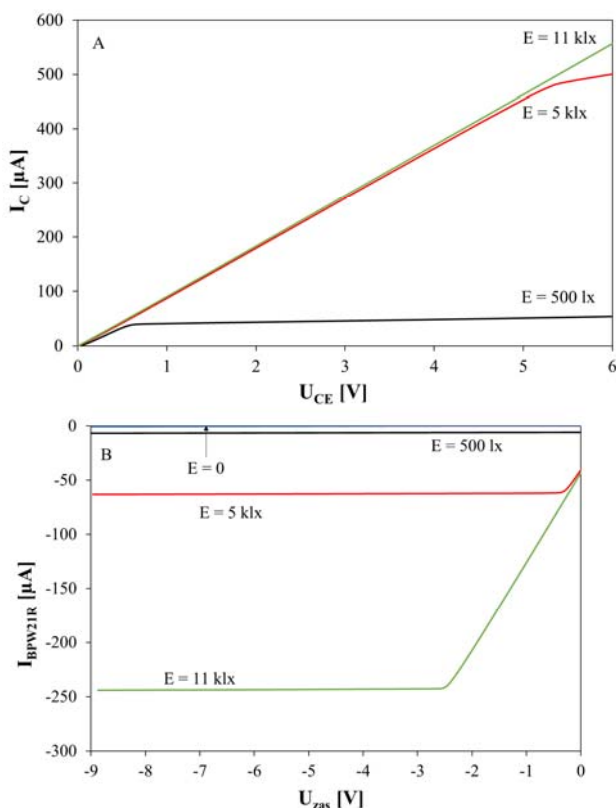
Źródło światła oraz rozpatrywane czujniki natężenia oświetlenia podczas badań eksperymentalnych zostały umieszczone w światłoszczelnym torze pomiarowym o długości 22,5 cm, wykonanym z jednolitego kawałka rury PCV. Badane czujniki natężenia oświetlenia były zasilane za pomocą zasilacza ARRAY typu 3646A [21]. Szeregowo z badanymi czujnikami natężenia oświetlenia został połączony rezystor o wartości 10 kΩ w celu ograniczenia przepływającego przez nie prądu. Wartości skuteczne napięcia i prądu dla badanych czujników zostały zmierzone za pomocą multimetrów cyfrowych UT804 firmy UNIT [20]. Przebiegi napięcia na badanych czujników natężenia oświetlenia zostały zarejestrowane za pomocą oscyloskopu MSO7024 firmy Rigol [25], natomiast przebiegi prądowe źródła światła zostały zmierzone za pomocą sondy prądowej ze wzmacniaczem TCPA300 firmy Tektronix [26].

Wyniki pomiarów

Wykorzystując autorski układ pomiarowy opisany w rozdziale trzecim zmierzono wybrane parametry rozważanych czujników natężenia oświetlenia. Pomiar przeprowadzono w warunkach statycznych oraz dynamicznych.

Na rysunku 5A przedstawiono charakterystykę prądowo-napięciową badanego fototranzystora typu TEMT6000 [5]. Charakterystyka ta została zmierzona dla trzech różnych wartości natężenia oświetlenia równych odpowiednio $E = 500$ lx, $E = 5$ klx oraz $E = 11$ klx.

Na rysunku 5B przedstawiono charakterystykę prądowo-napięciową fotodiody BPW21R dla czterech różnych wartości natężenia oświetlenia równych odpowiednio $E = 0$, $E = 500$ lx, $E = 5$ klx oraz $E = 11$ klx. Badany element był spolaryzowany wstecznie, a charakterystyka prądowo-napięciowa została zarejestrowana dla zakresu napięć od 0 do 9 V.



Rys. 5. Charakterystyka prądowo-napięciowa fototranzystora TEMT6000 (A) oraz fotodiody BPW21R (B).

Analizując charakterystyki przedstawiono na rysunku 5 można zauważyć, że fototranzystor charakteryzuje się

znacznie większą czułością niż fotodioda, a wynika to z jego konstrukcji, w której prąd generowany na skutek padającego promieniowania jest dodatkowo wzmacniany. Można zauważyć, że największą wartość prądu kolektora uzyskuje się dla fototranzystora przy natężeniu oświetlenia o wartości 11 klx. Wynosi ona 557 μA , z kolei prąd fotodiody przy tych samych warunkach oświetlenia wynosi tylko 243 μA . Najmniejszą wartość prądu uzyskuje się dla fotodiody przy natężeniu oświetlenia o wartości 500 lx. Wynosi ona tylko 6,41 μA . Zmierzono również prąd ciemny fotodiody, dla napięcia wstecznego równego 9V i natężenia oświetlenia $E = 0$. Wynosi on 0,79 μA .

Pomiary dynamiczne przeprowadzono dla trzech arbitralnie wybranych częstotliwości sterujących bramką tranzystora MOSFET typu IRF540N równych odpowiednio 1 kHz, 5 kHz i 30 kHz oraz współczynnika wypełnienia równym 50%. Parametry dynamiczne zmierzono dla trzech różnych wartości natężenia oświetlenia generowanych przez źródło światła. Badane czujniki natężenia oświetlenia podczas badań eksperymentalnych były zasilane napięciem o module równym 5V. Za pomocą oscyloskopu zarejestrowano przebiegi napięcia na rezystorze o wartości 10 kΩ, szeregowo połączonym z emiterem lub anodą badanych czujników natężenia oświetlenia. Zarejestrowane chwilowe wartości prądu oraz duża częstotliwość próbkowania oscyloskopu MSO7024 pozwoliły na przeanalizowanie czasów narastania i opadania zarejestrowanych odpowiedzi badanych czujników natężenia oświetlenia.

Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi chwilowych wartości prądu badanych czujników natężenia oświetlenia dla dwóch skrajnych wartości natężenia oświetlenia równych 500 lx i 11 klx oraz częstotliwości sygnału sterującego równego 1 kHz.

Analizując przebiegi czasowe prądu pokazane na rysunku 6 można zauważyć, że wraz ze wzrostem rejestrowanego natężenia oświetlenia wzrasta wartość międzyszczytowa prądu dla obu badanych czujników. Można również zauważyć że fotodioda BPW21R wykazuje się bardzo dużą szybkością działania, a czas opadania sygnału generowanego przez fotodiodę nie przekracza kilku mikrosekund. Aby wyizolować zbrocze opadające mierzonego sygnału na rysunku 6 pokazano również powiększony fragment przebiegu w zakresie zbrocza opadającego. Można również zauważyć, że czas opadania sygnału dla fototranzystora TEMT6000 pracującego przy natężeniu oświetlenia równym 11 klx jest nawet piętnaście razy większy i wynosi około 274 μs .

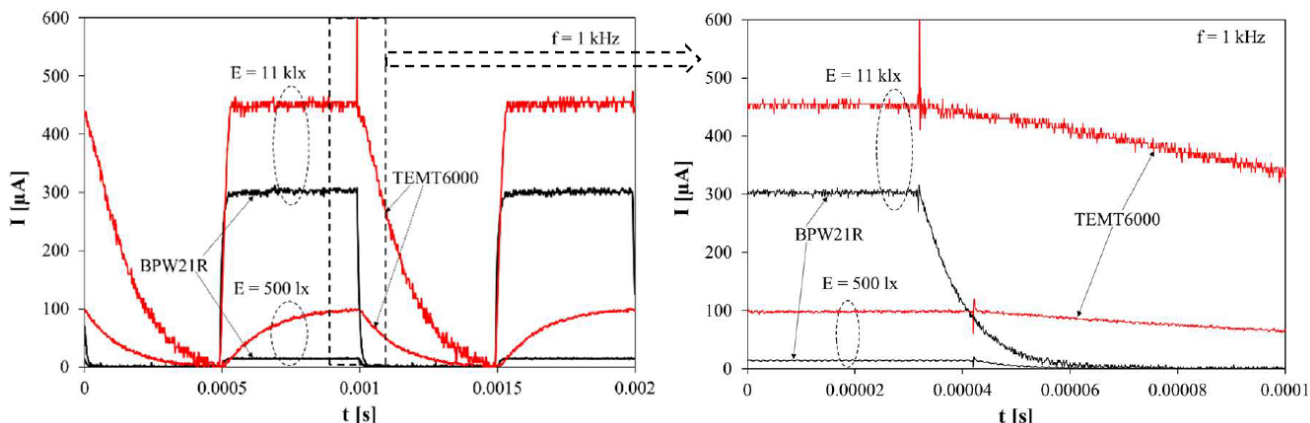
Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi chwilowych wartości prądu badanych czujników dla dwóch wartości natężenia oświetlenia równych 500 lx i 11 klx oraz częstotliwości sygnału sterującego równej 30 kHz.

Analizując przebiegi czasowe prądu pokazane na rysunku 7 można zauważyć, że wraz ze wzrostem rejestrowanego natężenia oświetlenia wzrasta wartość międzyszczytowa prądu dla obu badanych czujników. Można także zauważyć, że przebieg prądu fototranzystora TEMT6000 dla rozpatrywanej częstotliwości kluczowania ($f = 30$ kHz) jest prawie stały.

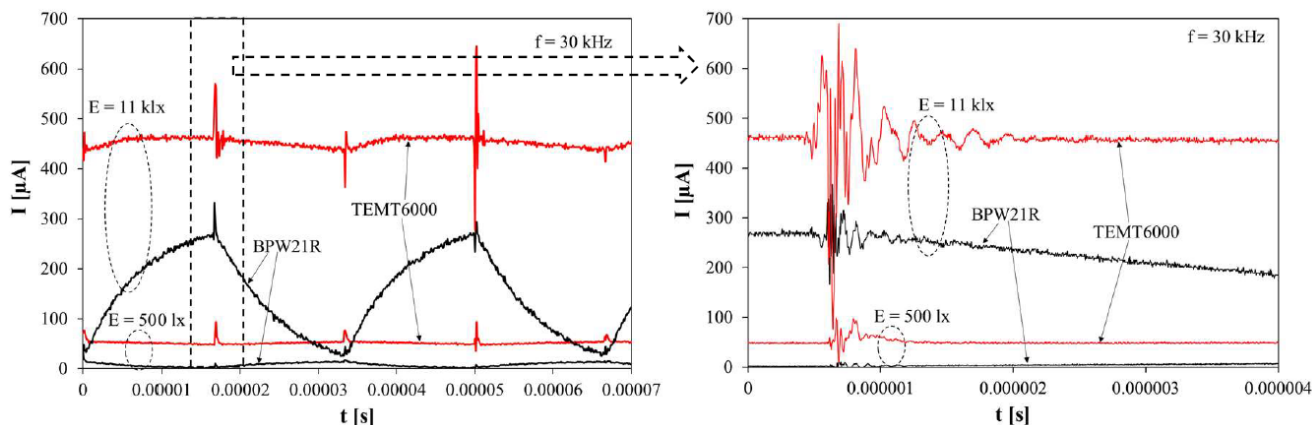
Analizując przebiegi czasowe prądów pokazane na rysunkach 6 i 7 można zauważyć, że czasy narastania i opadania sygnału są malejącą funkcją częstotliwości sygnału sterującego tranzystor MOSFET. Największe wartości czasu narastania sygnału uzyskuje się dla czujników natężenia oświetlenia pracujących z częstotliwością równą 1 kHz i przy natężeniu oświetlenia równym 11 klx. Wynoszą one 30 μs dla fototranzystora oraz 20 μs dla fotodiody. Biorąc pod uwagę wartość czasu opadania sygnału rozważanych czujników dla tych samych

parametrów eksploatacyjnych można zauważyć, że fototranzystor jest dużo wolniejszy, a czas ten jest równy 274 μs , natomiast wartość czasu opadania sygnału fotodiody jest równa tylko 18 μs . Najkrótsze czasy narastania i opadania sygnału uzyskuje się dla fotodiody pracującej z częstotliwością równą 30 kHz i przy natężeniu oświetlenia równym 11 klx i wynoszą one około 13 μs .

Analizując przebiegi czasowe prądów pokazane na rysunku 7 można zauważyć, że przy częstotliwości sygnału sterującego równej 30 kHz fototranzystor przestaje kluczować a wartości czasów opadania i narastania sygnału są niemożliwe do zmierzenia.



Rys. 6. Zarejestrowane chwilowe wartości prądu przepływającego przez badane czujniki natężenia oświetlenia dla częstotliwości sygnału sterującego $f = 1$ kHz.



Rys. 7. Zarejestrowane chwilowe wartości prądu przepływającego przez badane czujniki natężenia oświetlenia dla częstotliwości sygnału sterującego $f = 30$ kHz.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono i przedyskutowano wyniki pomiarów parametrów dynamicznych wybranych czujników fotometrycznych zawierających fotodiody i fototranzystor. Opracowano autorski układ pomiarowy, który pozwolił na pomiar zarówno charakterystyk statycznych, jak i dynamicznych rozważanych czujników natężenia oświetlenia. Przeprowadzone badania eksperymentalne pozwoliły na ocenę przydatności badanych czujników natężenia oświetlenia do zastosowań w dynamicznych układach regulacji natężenia oświetlenia pomieszczeń lub wybranych powierzchni.

Z przeprowadzonych badań wynika, że najbardziej czułym, a zarazem najszybciej działającym czujnikiem natężenia oświetlenia jest czujnik posiadający w swojej strukturze fotodiody. Element ten może pracować w systemach dynamicznej regulacji natężenia oświetlenia z częstotliwościami przekraczającymi kilkadziesiąt kHz oraz z odpowiednio wysokim natężeniem oświetlenia przekraczającym 1 klx. Oba badane czujniki mogą być z powodzeniem stosowane w statycznych pomiarach natężenia oświetlenia, natomiast należy pamiętać o ograniczeniach fototranzystora wynikających z jego

szybkiego wchodzenia w stan nasycenia, co uniemożliwia dalszy pomiar natężenia oświetlenia.

W dalszych badaniach przewiduje się zastosowanie wybranych czujników w dynamicznym systemie regulacji natężenia oświetlenia. System ten będzie wyposażony w punktowe źródła światła, zasilane w szerokim zakresie napięć i prądów oraz w wielopunktowy układ detektorów natężenia oświetlenia.

Autorzy: dr inż. Przemysław Ptak, prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, inż. Michał Gensikowski, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mails: p.ptak@we.umg.edu.pl; k.gorecki@we.umg.edu.pl; michal_gensikowski@wp.pl.

LITERATURA

- [1] Haus J., „Optical Sensors. Basics and Applications“, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, Federal Republic of Germany, 2010.
- [2] Mizeraczyk J., „Podstawy Optoelektroniki“, Akademia Morska w Gdyni, 2010.
- [3] Żagan W., „Podstawy Techniki Świetlnej“, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2014.
- [4] Ziętek B., „Optoelektronika“, Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń, 2004.
- [5] Czujnik natężenia oświetlenia TEMT6000: <https://www.vishay.com/docs/81579/temt6000.pdf>.

- [6] Fotodioda BPW21R: <https://www.vishay.com/docs/81519/bpw21r.pdf>.
- [7] Czujnik natężenia oświetlenia BH1750FVI: <https://www.mouser.com/ds/2/348/bh1750fvi-e-186247.pdf>.
- [8] Cheng W. C., Pedram M.: „Power minimization in a backlit TFT-LCD display by concurrent brightness and contrast scalling”, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 51 (2004), n.1, 25-32.
- [9] Magno M., Polonelli T., Benini L., Popovici E.: „A low cost, highly scalable wireless sensor network solution to achieve smart LED light control for green buildings”, *IEEE Sensors Journal*, 15 (2015), n.5, 2963-2973.
- [10] Yun Z., Bai T.: „Indoor Light Intensity Measuring Instrument Based on BH1750FVI”, *Microcontrollers & Embedded Systems*, 2012, 27-29.
- [11] Wang J., Mao T.F., Chen Y.G., „Design and Implementation of Luminometer System Based on Novel BH1750 IC”, *Journal of Changshu Institute of Technology*, 2011, 586-589.
- [12] Gao J., Luo J., Xu A., Yu J., „Light intensity intelligent control system research and design based on automobile sun visor of BH1750”, 29th IEEE Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2017, 3957-3960.
- [13] Ptak P., Górecki K., Wnuczko S., „System wbudowany do sterowania oświetleniem stanowiska biurowego”, *Przegląd Elektrotechniczny*, 94 (2018), nr.11, 76-79.
- [14] Meng-Shiuan P., Lun-Wu Y., Yen-Ann C., Yu-Hsuan L., Yu-Chee T.: „A WSN-based intelligent light control system considering user activities and profiles”, *IEEE Sensors Journal*, 8 (2008), n.10, 1710-1721.
- [15] Lun-Wu Y., Che-Yen L., Chi-Wai K., Yu-Chee T., Chih-Wei Y.: „Autonomous light control by wireless sensor and actuator networks”, *IEEE Sensors Journal*, 10 (2010), n.6, 1029-1041.
- [16] Yen-Kheng T., Truc-Phuong H., Zizhen W.: „Smart personal sensor network control for energy saving in DC grid powered LED lighting system”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4 (2013), n.2, 669-676.
- [17] Cieślak J., „Półprzewodnikowe elementy optoelektroniczne”, Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa 1981.
- [18] Ptak P., Gensikowski M., Kołodziejczyk P., Górecki K.: „Porównanie właściwości statycznych wybranych czujników fotometrycznych”, *Przegląd Elektrotechniczny*, 95 (2019), nr.10, 138-141.
- [19] Nota katalogowa diody LED COB typu CL-L234A-MC18W1-C: http://ce.citizen.co.jp/lighting_led/dl_data/spec/en/CL-L234A/2012/CL-L234A-MC18W1-C_P2133_0612_E.pdf.
- [20] Nota katalogowa Multimetru UNIT UT 804, <https://www.gotronik.pl/ut804-cyfrowy-multimetr-laboratoryjny-p-326.html>.
- [21] Nota katalogowa zasilacza ARRAY 3646A: <http://www.array.sh/download/364X%20User%27s%20Manual.pdf>
- [22] Nota katalogowa tranzystora IRF540N: <https://www.vishay.com/docs/91021/91021.pdf>.
- [23] Nota katalogowa mikrokontrolera Microchip ATmega328: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf.
- [24] Nota katalogowa luksomierza L200: <https://www.sonopan.com.pl/pl/produkty/swiatlo/luksomierz-precyzyjny-l-200.pdf>.
- [25] Nota katalogowa oscyloskopu MSO7024: https://rigol.com.pl/pl/p/file/d844c8308a1435ef08c2f7560d5349a3/MSO7000DS7000_UserGuide_EN.pdf.
- [26] Nota katalogowa sondy prądowej TCPA300: <https://pl.rs-online.com/web/p/akcesoria-do-sond/7644391/>.