

Dariusz PROKOP\*

## PRZETWORNIK PRĄD-NAPIĘCIE W KOMPUTEROWYM SYSTEMIE DO POMIARU SYGNAŁU FOTOPLETYZMOGRAFIKZNEGO

Sygnal fotopletyzmoграфiczny (PPG) zawiera szereg cennych diagnostycznie informacji na temat procesów fizjologicznych człowieka. W artykule przedstawiono układy przetwornika prąd-napięcie, które zastosowano do budowy komputerowego systemu pomiarowego sygnału fotopletyzmoграфicznego. Dla każdego z układów pokazano jak należy dobrać odpowiednie elementy w zależności od sposobu pozyskiwania przebiegu PPG. W pracy zamieszczono wyniki badań eksperymentalnych dla analizowanych przetworników prąd-napięcie.

SŁOWA KLUCZOWE: przetwornik prąd-napięcie, sygnał fotopletyzmoграфiczny, komputerowe systemy pomiarowe

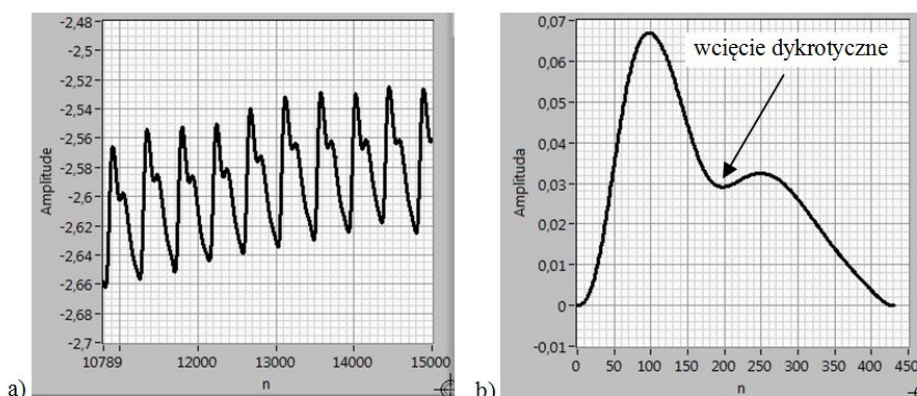
### 1. WSTĘP

Nieinwazyjne metody optyczne znajdują zastosowanie w badaniach wielu wielkości fizjologicznych obiektów biologicznych. Oddziałując promieniowaniem optycznym na warstwy tkanek za pomocą czujnika optoelektronicznego można pozyskać sygnał fotopletyzmoграфiczny PPG (*PhotoPlethysmographic Signal*) (rys. 1), którego główną składową jest fala tętna [7]. W procesie utworzenia sygnału biorą udział zarówno zjawiska optyczne, selektywnej absorpcji i rozpraszania, jak i mechaniczne związane z ruchami i odkształceniami ścian naczyń krwionośnych. Kształt krzywej zależy od stopnia ukrwienia badanego obszaru oraz parametrów hemodynamicznych układu krwionośnego [16]. Sygnał PPG zbliżony kształtem do przebiegu trójkątnego, z wyraźnym wcięciem dykrotycznym, świadczy o dobrym obwodowym przepływie krwi (rys 1b). Zmiana kształtu fali tętna w sposób naturalny zachodzi wraz z wiekiem badanej osoby oraz zależy od czynników fizycznych i cech osobniczych (temperatura, poziom hormonów, wydolność krążeniowo-naczyniowa). Zanik wcięcia dykrotycznego u osób młodych może stanowić informację o problemach zdrowotnych [2–4]. Na podstawie sygnału PPG można określić także inne cenne diagnostycz-

---

\* Politechnika Poznańska.

nie parametry takie jak: częstość tętna, miarowość, jak również częstość składowej oddechowej [1, 9].



Rys. 1. Przykładowy: a) fragment sygnału fotopletyzmoграфicznego i b) pojedynczy jego okres

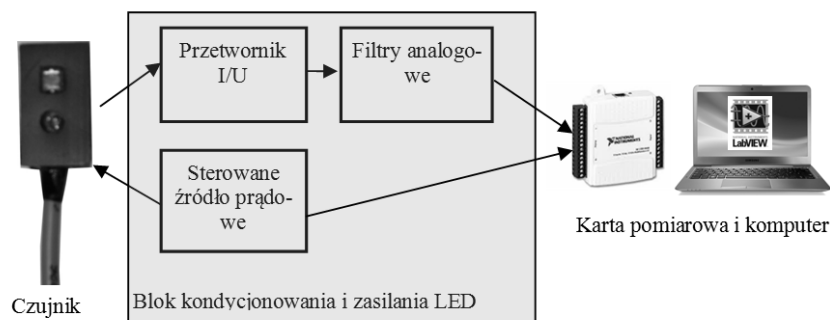
Ponadto wykrywalność pulsacji tętniczych jest warunkiem realizacji niezawyżnego monitorowania utlenowania krwi tętniczej metodą *pulse oximetry*, która znajduje wiele zastosowań diagnostycznych we współczesnej medycynie [5, 7, 10].

W procesie pozyskiwania sygnału PPG istotną rolę odgrywa konstrukcja i parametry systemu pomiarowego dostosowane do czujnika optoelektronicznego. W referacie przedstawiono szczegółową analizę przetwornika dwóch wariantów układu przetwornika prąd-napięcie wchodzącego w skład komputerowego systemu pomiarowego.

## 2. STRUKTURA SYSTEMU POMIAROWEGO

Komputerowe systemy pomiarowe, inaczej zwane „wirtualnymi przyrządami pomiarowymi”, stanowią najnowszą generację przyrządów pomiarowych. Często definiuje się je jako sprzężenie sprzętu komputerowego z różnego rodzaju modułami pomiarowymi poprzez odpowiednie interfejsy obsługiwane przez specjalistyczne oprogramowanie. Panel obsługiwany przez użytkownika, wyświetlany przez aplikację komputerową, umieszczony jest na monitorze komputera [8, 12, 15]. Struktura systemu pomiarowego do pozyskiwania sygnału fotopletyzmoграфicznego jest przedstawiona na rysunku 2. Pierwszym elementem systemu jest czujnik optoelektroniczny składający się z fotoemitera i fotodetektora typu odbiciowego lub transmisyjnego.

W wykonanych czujnikach fotoemiterami są diody LED o długościach fali 640, 880 lub 940 nm. Natomiast fotodetektorem jest fotodiody PIN BPW 34.



Rys. 2. Struktura komputerowego systemu pomiarowego sygnału PPG

Następnym elementem systemu jest blok kondycjonowania, w którym zawarto układ przetwornika prąd-napięcie, zespół filtrów analogowych oraz sterowane źródło prądowe. Sygnał wyjściowy bloku kondycjonowania połączono z wejściem analogowym karty pomiarowej USB-6211 dołączonej do komputera przez port USB. Wyjścia cyfrowe sterują pracą źródła prądowego zasilającego diodę LED czujnika. Dla systemu napisano aplikację w środowisku LabVIEW obsługującą kartę pomiarową i przetwarzającą pozyskany sygnał PPG. Fotoemitery mogą być zasilane stałą wartością prądu lub krótkimi impulsami prądowymi zsynchronizowanymi z pracą przetwornika analogowo-cyfrowego.

### 3. UKŁADY PRZETWORNIKA PRĄD-NAPIĘCIE

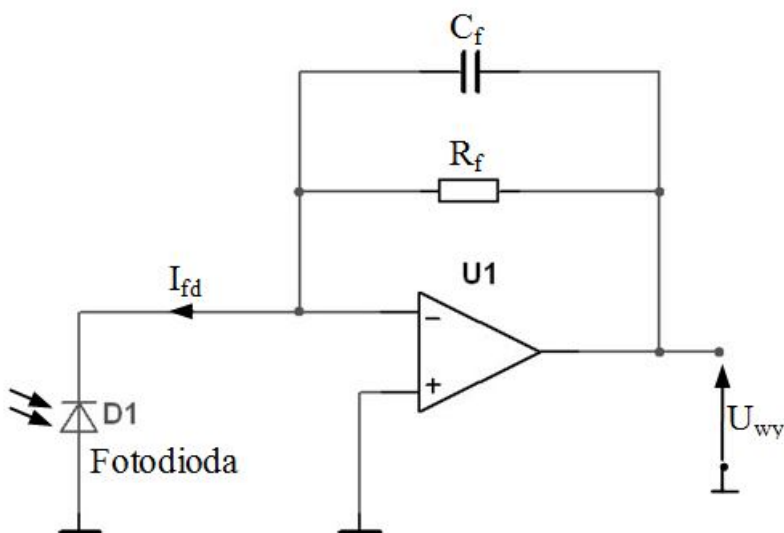
Fotodioda z uwagi na charakterystyki napięciowo-prądowe może pracować w obszarze fotowoltaicznym lub fotoprzewodzącym. W trybie fotowoltaicznym pracy fotodioda nie jest obciążona, a sygnałem wyjściowym jest napięcie, którego wartość nieliniowo zależy od mocy padającego na nią promieniowania. Praca w obszarze fotoprzewodzącym fotodiody zapewnia proporcjonalną zależność pomiędzy mocą padającego promieniowania na fotodiodę a jej prądem wyjściowym, zgodnie z zależnością (1) gwarantując liniowość pracy czujnika. W układzie fotoprzewodzącym fotodioda wymaga zerowej wartości rezystancji obciążenia, którą zapewnia wzmacniacz transimpedancyjny będący przetwornikiem prąd-napięcie [6]. Prądem wyjściowym czujnika optoelektronicznego jest prąd fotodiody  $I_{fd}$  wyrażony zależnością:

$$I_{fd} = \eta \frac{e\lambda}{hc} E \quad (1)$$

gdzie:  $\eta$  – efektywność kwantowa,  $e$  – ładunek elementarny,  $\lambda$  – długość fali światła,  $h$  – stała Plancka,  $c$  – prędkość światła,  $E$  – moc padającego promieniowania.

Układy przetworników prąd-napięcie często wykonuje się przy zastosowaniu wzmacniaczy operacyjnych. Szczególnie istotnym parametrem wykorzystanych do tego celu wzmacniaczy jest wartość wejściowego prądu polaryzacji  $I_{BIAS}$  [nA], który powinien być jak najmniejszy ze względu na małe wartości prądu generowanego przez fotodiode. Drugi parametr GBW (*Gain-Bandwidth*) [MHz] iloczyn wzmocnienia i częstotliwości granicznej wzmacniacza ma duże znaczenie w przypadku rejestracji krótkich impulsów światła. Najlepsze parametry do tego typu aplikacji gwarantują wzmacniacze zbudowane w oparciu o tranzystory FET np. TL082, TLC271, AD711, OP380, które wykorzystano w badaniach.

Podstawowa konfiguracja wzmacniacza transimpedancyjnego stosowana w układach detekcji promieniowania za pomocą fotodiody przedstawiona jest na rysunku 3 [11, 13, 14, 17].



Rys. 3. Schemat wzmacniacza transimpedancyjnego

Równanie przetwarzania układu jest wyrażona zależnością:

$$U_{wy} = -R_f I_{fd} \quad (2)$$

gdzie  $R_f$  jest rezystancją sprzężenia zwrotnego ustalającą współczynnik przetwarzania i akceptowalny zakres prądów wejściowych. Równoległe z rezystancją sprzężenia zwrotnego włączony jest kondensator, którego wartość należy dobrać w zależności od sposobu zasilania czujnika. Przy zasilaniu stałoprądowym diod LED dwójnik RC sprzężenia zwrotnego stanowi filtr dolnoprzepustowy o liniowej charakterystyce fazowej, ograniczający szum wysokoczęstotliwościowy. Częstotliwość graniczna filtra dolnoprzepustowego jest równa 30 Hz,

co wystarcza do przeniesienia wszystkich istotnych składowych sygnału PPG przy zasilaniu stałoprądowym. Pojemność  $C_f$  wyznaczana jest na podstawie wzoru:

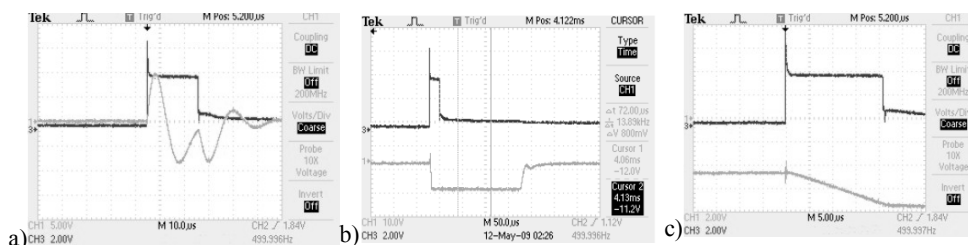
$$f_g = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \quad (3)$$

Uwzględniając powyższe informacje, określono wartości elementów sprzężenia zwrotnego i zawarto w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości elementów elektronicznych wzmacniacza transimpedancyjnego dla przyjętego wzmocnienia prądowego i pasma przenoszenia

Zakres wzm. pojedynczy	Współczynnik przetwarzania	Zasilanie stałoprądowe			Zasilanie impulsowe			Zakres wzm. różnicowy
		$R_f$	$C_f$	$f_g$	$C_f$	$R_f$	$C_{min}$	
$I_f$	$a$							$I_f$
5 $\mu\text{A}$	0,5 $\mu\text{A/V}$	2 M	2,8 nF	28,4 Hz	1,5 pF	2 M	2,02 pF	2,5 $\mu\text{A}$
10 $\mu\text{A}$	1 $\mu\text{A/V}$	1 M	5,6 nF	28,4 Hz	3,3 pF	1 M	2,85 pF	5 $\mu\text{A}$
20 $\mu\text{A}$	2 $\mu\text{A/V}$	500 k	11 nF	28,9 Hz	6,8 pF	500 k	4,04 pF	10 $\mu\text{A}$
40 $\mu\text{A}$	4 $\mu\text{A/V}$	255 k	22 nF	28,4 Hz	10 pF	255 k	5,66 pF	20 $\mu\text{A}$
100 $\mu\text{A}$	10 $\mu\text{A/V}$	100 k	56 nF	28,4 Hz	20 pF	100 k	9,04 pF	40 $\mu\text{A}$
200 $\mu\text{A}$	20 $\mu\text{A/V}$	50 k	110 nF	28,9 Hz	33 pF	50 k	12,78 pF	100 $\mu\text{A}$
400 $\mu\text{A}$	40 $\mu\text{A/V}$	25,5 k	220 nF	28,4 Hz	68 pF	25,5 k	17,89 pF	200 $\mu\text{A}$

Przy zasilaniu impulsowym układ powinien mieć znacznie szersze pasmo przenoszenia, a zatem pojemność  $C_f$  w tym przypadku powinna mieć inną wartość przy tych samych zakresach prądów wejściowych. Dobór czasu trwania impulsu zasilającego uzależniony jest od czasu próbkowania przetwornika analogowo-cyfrowego i dla pojedynczego kanału zastosowanej karty pomiarowej nie powinien być mniejszy niż 10  $\mu\text{s}$ . Dla skonstruowanego systemu przyjęto czas świecenia diody LED równy 25  $\mu\text{s}$ , co odpowiada przy 50%-owemu wypełnieniu częstotliwości 25 kHz. Przetwornik prąd-napięcie z fotodiodą o określonej pojemności należy rozpatrywać wtedy jako układ inercyjny drugiego rzędu, czego konsekwencją jest jego nie zawsze stabilne zachowanie. Szybkie zmiany prostokątnego sygnału optycznego wywołują składową przejściową w postaci oscylacji o dużej amplitudzie i długim czasie zaniku. Powodem tego są pojemności fotodiody oraz pojemność wejściowa wzmacniacza transimpedancyjnego ograniczające pasmo przenoszenia całego układu. Włączenie pojemności sprzężenia zwrotnego koryguje charakterystykę częstotliwościową, a tym samym odpowiedź czasową układu, likwidując pojawiające się oscylacje [6, 17]. Na rysunku 4 pokazano obrazy sygnału rejestrowanego na wyjściu przetwornika prąd-napięcie w przypadku zastosowania różnych wariantów pojemności sprzężenia zwrotnego  $C_f$ .



Rys. 4. Przebiegi czasowe odpowiedzi przetwornika prąd-napięcie na prostokątny impuls świetlny w przypadku: a) braku kondensatora sprzężenia zwrotnego, b) odpowiednio dobranej pojemności, c) zbyt dużej wartości pojemności (przebieg fioletowy - napięcie zasilające diodę LED, przebieg pomarańczowy - napięcie na wyjściu przetwornika I/U)

Zależność na częstotliwość graniczną przetwornika przy zasilaniu impulsowym diody LED określa zależność uwzględniająca szereg dodatkowych pojemności układu:

$$f_0 = \frac{K_{uo}}{2\pi R_f (C_f + C_T)} \quad C_T = C_j + C_i \quad (4)$$

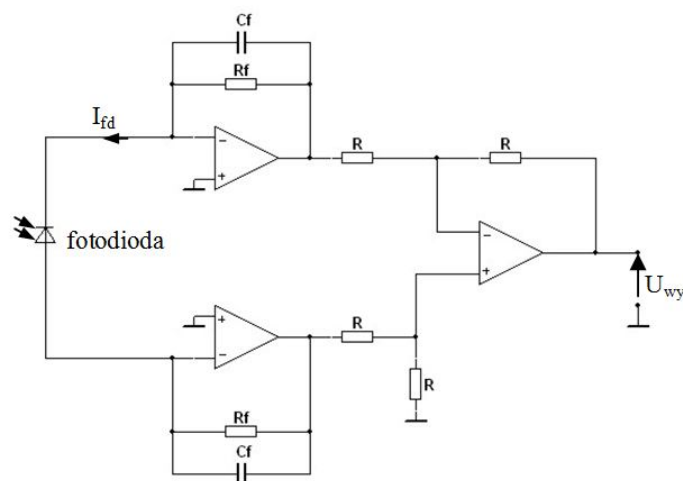
gdzie:  $K_{uo}$  – wzmacnienie wzmacniacza operacyjnego w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego,  $C_f$  – pojemność sprzężenia zwrotnego,  $C_T$  – sumaryczna pojemność wejściowa, na którą składa się pojemność fotodiody  $C_j$  oraz pojemność wejściowa wzmacniacza operacyjnego  $C_i$ .

Wyznaczenie pojemności  $C_f$  wymaga założenia warunków stabilności układu drugiego rzędu, a w wyniku przekształceń otrzymuje się wzór na pojemność kompensacyjną sprzężenia zwrotnego:

$$C_f = \sqrt{\frac{C_T}{2\pi R_f K_{uo}}} \quad (5)$$

Wykorzystując zależność (5) dla kolejnych zakresów pomiarowych układu wejściowego, wyznaczono wartości pojemności kondensatora sprzężenia zwrotnego  $C_f$  zawarte w tabeli 1. Ponieważ pojemności rzędu pojedynczych pF mogą zmieniać właściwości dynamiczne układu, precyzyjnego doboru wartości  $C_f$  dokonano na podstawie obserwacji wyjściowych przebiegów czasowych przetwornika.

Innym rozwiązaniem przetwornika prąd-napięcie jest zastosowanie konstrukcji wzmacniacza różnicowego przedstawionego na rysunku 5 [11]. Główną zaletą tego rozwiązania jest tłumienie zakłóceń pojawiających się na przewodach sygnałowych czujnika oraz mniejsze wartości rezystancji sprzężenia zwrotnego.



Rys. 5. Schemat różnicowego układu wzmacniacza transimpedancyjnego

W celach porównawczych wykonano konstrukcję zespołu tego typu wzmacniaczy, stanowiącego alternatywę dla układu z pojedynczym wzmacniaczem. Równanie przetwarzania układu wyrażona jest przez zależność:

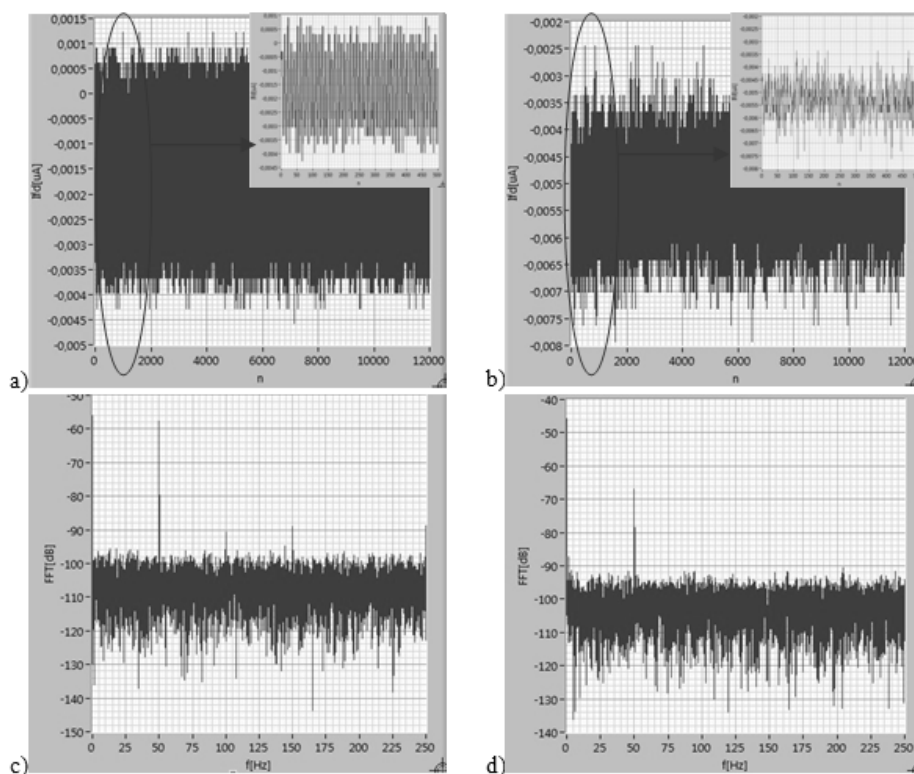
$$U_{wy} = 2I_{fd}R_f \quad (6)$$

Tak jak w przypadku pojedynczego wzmacniacza, wyznaczono wartości rezystancji  $R_f$  sprzężenia zwrotnego dla zadanego zakresu prądów wejściowych. Procedura wyznaczania pojemności występującej w sprzężeniu zwrotnym jest identyczna z zastosowaną w przypadku przetwornika z pojedynczym wzmacniaczem. Pojemności  $C_f$  i rezystancje  $R_f$  sprzężenia zwrotnego wzmacniacza różnicowego mają identyczne wartości jak te dla układu z pojedynczym wzmacniaczem, ale jednak odpowiadają o połowę mniejszym zakresom prądów wejściowych. Przedstawione rozwiązanie systemu pomiarowego wymaga użycia większej liczby elementów elektronicznych lecz gwarantuje mniejszy poziom zakłóceń oraz „dobre parametry” sygnału wyjściowego.

#### 4. WYNIKI BADAŃ UKŁADÓW PRZETWORNIKÓW PRĄD-NAPIĘCIE

Dla systemu pomiarowego wykonano dwa moduły przetwornika I/U, z których pierwszy jest oparty na konstrukcji z pojedynczym wzmacniaczem operacyjnym, natomiast drugi ze wzmacniacza różnicowym.

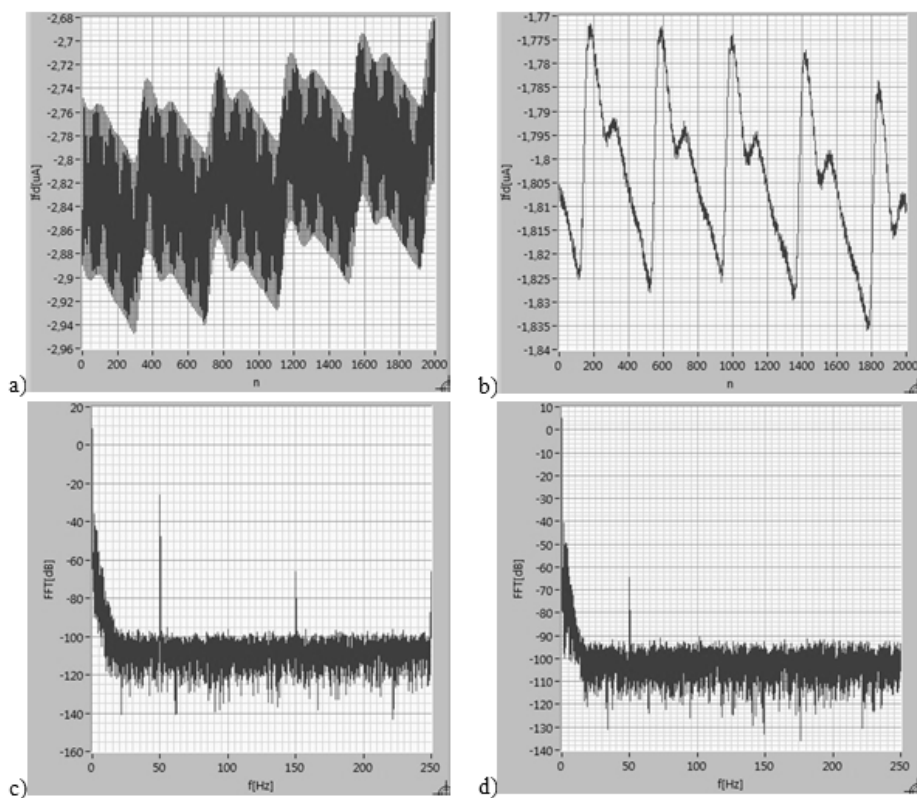
W ramach testu układów kondycjonowania z pojedynczym wzmacniaczem oraz ze wzmacniaczem różnicowym do układów przyłączono czujnik z zasłoniętym fotodetektorem, rejestrując szumy własne systemu.



Rys. 6. Przebiegi czasowe sygnału napięcia z przetwornika prąd–napięcie: a) z pojedynczym wzmacniaczem, b) ze wzmacniaczem różnicowym oraz ich charakterystyki amplitudowe: c) dla pojedynczego wzmacniacza, d) dla wzmacniacza różnicowego

Rysunki 6a i b przedstawiają rzeczywiste wyjściowe przebiegi czasowe przy zerowej wartości sygnału wejściowego, co odpowiada szumom własnym rejestrowanym za pomocą poszczególnych przetworników prąd–napięcie. Struktura obserwowanych przebiegów czasowych wyraźnie wskazuje na dużo mniejszą zawartość składowych wysokoczęstotliwościowych dla układu ze wzmacniaczem różnicowym. Zdają się to potwierdzać również wykresy spektralne (rys. 6), gdzie główne zakłócenia są wyraźnie widoczne na charakterystykach amplitudowych i związane są z częstotliwością sieciową i jej harmonicznymi. Wzmacniacz różnicowy w naturalny sposób dokonuje tłumienia o 10 dB zakłóceń sieciowych o częstotliwościach 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz. Kolejnym testem układów kondycjonowania była rejestracja sygnału PPG w konfiguracji z pojedynczym wzmacniaczem oraz wzmacniaczem różnicowym. Analizując postać czasową sygnałów, można zauważyć zdecydowanie lepiej zarysowany kształt przebiegu PPG w przypadku zastosowania przetwornika ze wzmacniaczem różnicowym (rys. 7).





Rys. 7. Przebiegi PPG otrzymane na wyjściu przetwornika prąd-napięcie: a) z pojedynczym wzmacniaczem, b) ze wzmacniaczem różnicowym oraz charakterystyki amplitudowe: c) układu z jednym wzmacniaczem, d) ze wzmacniaczem różnicowym

Porównując charakterystyki amplitudowe (rys. 7), można "odnaleźć" również główne składowe zakłócające sieci elektroenergetycznej. Na charakterystyce amplitudowej w układzie z pojedynczym wzmacniaczem widać wyraźnie większość głównych harmonicznych zakłócających (50 Hz, 150 Hz, 250 Hz) pochodzących z sieci elektroenergetycznej (rys. 7c). Natomiast charakterystyka amplitudowa układu ze wzmacniaczem różnicowym pokazuje tylko dominującą główną harmoniczną 50 Hz.

## 5. PODSUMOWANIE

Przedstawiona analiza pokazuje właściwości przetworników prąd-napięcie, które wykorzystano do budowy systemu pomiarowego sygnału fotopletyzmograficznego. W przypadku stałoprądowego zasilania fotoemitery w czujniku opto-

elektronicznym, elementy sprzężenia zwrotnego przetwornika prąd-napięcie stanowią filtr dolnoprzepustowy, które łatwo dobrać ze względu na założony współczynnik przetwarzania i częstotliwość graniczną. Natomiast jeśli fotoemiter zasilany jest krótkimi impulsami prądowymi, należy wyznaczyć pojemność kondensatora sprzężenia zwrotnego, która uzależniona jest od wielu czynników. Nawet małe wartości pojemności występujące w układzie (pojemność rezystora sprzężenia zwrotnego, pojemność ścieżek płytki elektronicznej, pojemność przewodów sygnałowych czujnika) mogą zmienić jego właściwości dynamiczne. Mimo danej zależności analitycznej, obliczoną wartość pojemności należy zweryfikować doświadczalnie przez obserwację przebiegów czasowych odpowiedzi przetwornika. Układ ze wzmacniaczem różnicowym szczególnie nadaje się do zastosowania w trudnych warunkach pomiarowych, gdy występuje wysoki poziom zakłóceń przy względnie niskiej wartości sygnału PPG.

#### LITERATURA

- [1] Ahlstrom C., Johansson A., Lanne T., Ask P., A respiration monitor based on electrocardiographic and photoplethysmographic sensor fusion, w *26th Annual International Conference on the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society IEMBS '04*, 2004, Tom 1, s. 2311–2314.
- [2] Alian A.A., Shelley K.H., Photoplethysmography, *Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology*, Tom 28, Number 4, ISSN 1521-6896, 2014.
- [3] Allen J., Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement, *Physiological Measurement*, Tom 28, Number 3, 2007.
- [4] Allen J., Murray A., Age-related changes in the characteristics of the photoplethysmographic pulse shape at various body sites, *Physiological Measurement*, Tom 24, Number 2, ISSN 0967-3334, 2003.
- [5] Aoyagi T., Pulse oximetry: its invention, theory, and future, *Journal of Anesthesia*, Tom 17, Number 4, ISSN 0913-8668, s. 1438-8359, 2003.
- [6] Bielecki Z., Rogalski A., *Detekcja sygnałów optycznych*, Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2001.
- [7] Cysewska-Sobusiak A., *Modelowanie i pomiary sygnałów biooptycznych*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2001.
- [8] Czabanowski R., *Sensory i systemy pomiarowe*, Politechnika Wrocławska, 2010.
- [9] Daimiwal N., Sundhararajan M., Shriram R., Respiratory rate, heart rate and continuous measurement of BP using PPG, w *2014 International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP)*, 2014, s. 999–1002.
- [10] Fouzas S., Priftis K.N., Anthracopoulos M.B., Pulse Oximetry in Pediatric Practice, *Pediatrics*, Tom 128, Number 4, ISSN 0031-4005, s. 1098-4275, 2011.
- [11] Graeme J.G., *Photodiode amplifiers: op amp solutions*, New York [etc.], McGraw Hill, 1996.
- [12] Nawrocki W., *Rozproszone systemy pomiarowe*, Warszawa, WKŁ, 2006.
- [13] Nawrocki W., Lange K., Arnold K., *Układy elektroniczne*, wyd. 2. Poznań, Wyd. Politechniki Poznańskiej, 2002.

- [14] Tietze U., Schenk C., Błaszowski A., *Układy półprzewodnikowe*, Wyd. 3 zm. (dodr.). WNT, Warszawa 1997.
- [15] Tłaczała W., *Środowisko LabView TM w eksperymencie wspomaganym komputerowo*, Wyd. 1, WNT, Warszawa 2014.
- [16] Traczyk W.Z., *Fizjologia człowieka w zarysie*, PZWL, Warszawa 1989.
- [17] Westerman D., Understand and apply the transimpedance amplifier (Part 1 of 2), 2007, Dostępne na: [http://www.planetanalog.com/document.asp?doc\\_id=527534](http://www.planetanalog.com/document.asp?doc_id=527534), [Udostępniono: 05-11-2015].

#### **CURRENT-VOLTAGE CONVERTERS USED IN COMPUTER SYSTEM FOR MEASUREMENTS OF PHOTOPLETHYSMOGRAPHIC SIGNAL**

Photoplethysmographic signal (PPG) contains a lot of important diagnostic information about physiological processes in human body. In the article current-voltage converters, which were applied in a computer-assisted system for measurement of PPG signals are presented. For each of these converters it is shown how to select proper elements depending on a way of the acquisition of PPG signals. Some of the experimental results are presented for the analyzed current-voltage converters.

*(Received: 15. 02. 2016, revised: 8. 03. 2016)*