

Andrzej ODON\*  
Anna SZLACHTA\*\*

## STEROWNIK DIOD LED DUŻEJ MOCY DO BADAŃ CHARAKTERYSTYKI CZĘSTOTLIWOSCIOWEJ DETEKTORÓW PIROELEKTRYCZNYCH

Charakterystyka częstotliwościowa detektora piroelektrycznego opisuje zależność czułości napięciowej detektora od częstotliwości i stanowi źródło kluczowych informacji o jego osiągnięciach. Eksperymentalne badanie charakterystyki częstotliwościowej detektora wymaga zastosowania sinusoidalnie modulowanego promieniowania o regulowanej wartości częstotliwości. W artykule omówiono techniczne problemy realizacji badań charakterystyki częstotliwościowej detektorów piroelektrycznych wykonywanych za pomocą mechanicznych modulatorów źródła promieniowania optycznego. Głównym celem artykułu jest prezentacja opracowanego układu sterownika diod LED zapewniającego uzyskanie praktycznie dowolnego kształtu przebiegu sygnału promieniowania tych diod, a zwłaszcza kształtu sinusoidalnego niezbędnego dla realizacji badań charakterystyki częstotliwościowej badanego detektora piroelektrycznego.

SŁOWA KLUCZOWE: czułość napięciowa detektora piroelektrycznego, sterownik diod LED

### 1. WSTĘP

Detektory piroelektryczne odgrywają ważną rolę w takich zastosowaniach jak: detekcja promieniowania podczerwonego dla zastosowań militarnych i cywilnych, pomiary parametrów emisyjnych źródeł promieniowania, zdalne pomiary temperatury a także pomiary termowizyjne. Informacja o mierzalnych wielkościach promieniowania zawarta jest w parametrach odpowiedzi napięciowej detektora piroelektrycznego na pobudzenie termiczne wywołane przez energię pochłoniętego przez ten detektor promieniowania.

Detektor piroelektryczny, jak wiadomo, nie reaguje na promieniowanie o stałej wartości mocy promieniowania  $\Phi = \text{const}$ . Reakcja detektora piroelektrycznego w formie odpowiedzi napięciowej ma miejsce tylko wtedy, gdy padające na jego powierzchnię aktywne promieniowanie ulega zmianom w czasie –  $\Phi = f(t)$ . Oznacza to, że zarówno dla celów aplikacyjnych, jak i badawczych dla prawidłowego działania detektora piroelektrycznego konieczne jest zastosowa-

---

\* Politechnika Poznańska.

\*\* Politechnika Rzeszowska.

nie w torze optycznym modulowanego źródła promieniowania. W praktyce modulację źródła promieniowania można osiągnąć dwoma sposobami. Pierwszy z nich wykorzystuje źródło promieniowania charakteryzujące się emisją mocy promieniowania o stałej wartości, na przykład żarówki halogenowe lub lasery CW, których promieniowanie jest następnie modulowane za pomocą modulatorów optyczno-mechanicznych lub elektrooptycznych. Drugi sposób modulacji mocy emitowanej przez źródła promieniowania, takie jak diody elektroluminescencyjne lub lasery półprzewodnikowe, polega na elektronicznym sterowaniu prądem zasilania tych źródeł.

Jedną z kluczowych wielkości charakteryzujących osiągi detektora piroelektrycznego jest czułość napięciowa  $R_V$  charakteryzująca stosunek amplitudy wartości napięciowego sygnału wyjściowego detektora do amplitudy sygnału wejściowego, jaką stanowi moc promieniowania pochłanianego przez detektor, przy założeniu współpracy detektora ze wzmacniaczem napięciowym o dużej wartości rezystancji wejściowej. Czułość napięciowa  $R_V$  zależy od częstotliwości  $f$  sygnału mocy  $\Phi$  promieniowania pobudzającego detektor piroelektryczny. Badania eksperymentalne amplitudowej charakterystyki częstotliwościowej  $R_V = f(f)$  detektora piroelektrycznego powinny być przeprowadzone przy zastosowaniu promieniowania o sinusoidalnym kształcie przebiegu czasowego, co wynika jednoznacznie z dobrze znanych wymogów tworzenia charakterystyk częstotliwościowych Bodego. Jednak w wielu publikacjach opisywane wyniki badań zależności czułości napięciowej detektora piroelektrycznego od częstotliwości uzyskiwane są za pomocą sygnału promieniowania o przebiegu trapezowym [1] lub prostokątnym [2], co zwykle ma ścisły związek z zastosowaniem mechanicznego modulatora promieniowania do badań eksperymentalnych. Uzyskana w ten sposób charakterystyka przedstawia wprawdzie zależność stosunku amplitud sygnału wyjściowego i wejściowego od częstotliwości, ale nie spełnia wymogów formalnych stawianym charakterystykom częstotliwościowym Bodego. Należy jednak zauważyć, że w wielu przypadkach charakterystyka taka ma istotną wartość poznawczą osiągnięć detektora i jest ona niezbędna dla projektowania i weryfikacji działania tych optoelektronicznych urządzeń z sensorem piroelektrycznym, w których stosowane są modulatory wytwarzające sygnały promieniowania o kształcie na przykład trapezoidalnym lub quasi-prostokątnym.

W większości przypadków wymagania dotyczące częstotliwości modulowanego promieniowania optycznego w badaniach detektorów piroelektrycznych obejmują zakres częstotliwości od około 0,1 Hz do kilku kHz, a więc badania takie mogą być skutecznie realizowane za pomocą komercyjnie dostępnych modulatorów. Ogólnie modulatory elektromechaniczne, poza licznymi zaletami, charakteryzują się jednak również pewnymi wadami, z których najważniejszą jest ograniczona liczba kształtów wytwarzanego sygnału promieniowania. Alternatywą dla tradycyjnych źródeł światła z modulatorem mechanicznym są

elektronicznie sterowane źródła promieniowania optycznego z diodami laserowymi lub diodami LED dużej mocy. Jedną z najważniejszych zalet tego typu sterowania jest możliwość uzyskania praktycznie dowolnego kształtu przebiegu sygnału wejściowego, a zwłaszcza kształtu sinusoidalnego niezbędnego dla realizacji badań charakterystyki częstotliwościowej badanego detektora piroelektrycznego. Głównym celem artykułu jest zaprezentowanie opracowanego rozwiązania układowego sterownika diod LED dużej mocy zapewniającego prądowe sterowanie i stabilizację termiczną diod LED oraz przedstawienie wybranych wyników badań tego sterownika. Prezentowana w niniejszym artykule problematyka stanowi jeden z wątków kilkietapowej pracy badawczej dotyczącej badań i poszukiwań własnych rozwiązań konstrukcyjnych pomiarowych źródeł światła z półprzewodnikowymi źródłami promieniowania optycznego dedykowanych zwłaszcza do badań detektorów piroelektrycznych.

## 2. MECHANICZNE MODULATORY PROMIENIOWANIA

Modulacja źródeł promieniowania za pomocą modulatorów mechanicznych jest powszechnie stosowana w eksperymentach badawczych mających na celu poznanie właściwości dynamicznych dowolnego typu fotodetektorów, w tym oczywiście również detektorów piroelektrycznych. Zastosowanie takich modulatorów promieniowania umożliwia wyznaczenie zależności odpowiedzi odbiorników promieniowania na wymuszenia sygnałem quasi-prostokątnym lub trapezowym o różnych wartościach częstotliwości. W badaniach, w których konieczne jest zastosowanie systemu zapewniającego poprawę współczynnika sygnału do szumu metodą detekcji fazoczułej (ang. *phase sensitive detection*), modulatory optyczno-mechaniczne są znakomicie technicznie przygotowane do włączenia się w pracę takiego systemu. Modulatory mechaniczne promieniowania optycznego (ang. *optical chopper*) praktycznie nie stwarzają żadnych istotnych ograniczeń odnośnie do pozostałych elementów wyposażenia stanowiska badawczego, a zwłaszcza mogą współpracować praktycznie z dowolnym rodzajem źródła promieniowania. W odróżnieniu od modulatorów elektrooptycznych, takich jak migawka ciekłokrystaliczna (ang. *LCD shutter*), modulatory optyczno-mechaniczne nie ograniczają, ani nie zniekształcają widma źródła promieniowania.

Znanych jest kilka rozwiązań konstrukcyjnych modulatorów mechanicznych, z których najczęściej stosowany jest modulator z wirującą tarczą ze szczelinami napędzaną silnikiem elektrycznym o precyzyjnie regulowanej prędkości obrotowej. Na rysunku 1 przedstawiono fotografię jednego z komercyjnie dostępnych rodzajów modulatora mechanicznego produkowanego przez firmę Stanford Research Systems [3].

Najczęściej modulatory mechaniczne umożliwiają modulację w wyniku której uzyskuje się quasi-prostokątny lub trapezoidalny kształt sygnału mocy pro-

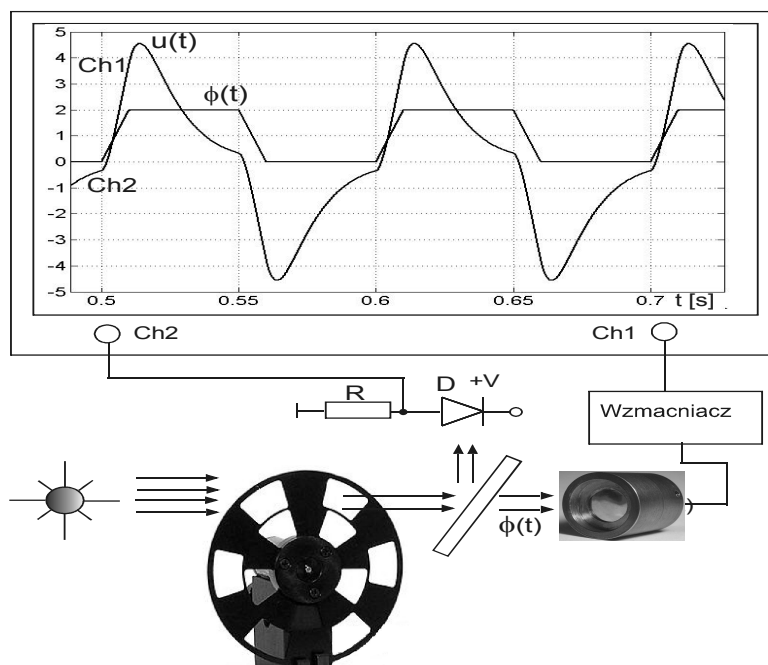
mieniowania. W dostępnej literaturze [4] można dotrzeć do informacji wskazujących na możliwość wykonania specjalnych kształtów szczelin wirującej tarczy modulatora mechanicznego zapewniających sinusoidalną modulację promieniowania, ale tego typu modulatory raczej nie są komercyjnie dostępne.



Rys. 1. Widok modulatora optyczno-mechanicznego firmy Stanford Research Systems [3]

Modulatory mechaniczne dobrze nadają się do tych specyficznych badań detektora piroelektrycznego, w których wymagane jest promieniowanie modulowane o kształcie niesinusoidalnym, zwłaszcza trapezowym lub prostokątnym. Ma to zwykle ścisły związek z zastosowaniami detektorów piroelektrycznych w takich urządzeniach jak pirometry lub kamery termowizyjne, w których zamontowane są modulatory modulujące trapezoidalnie promieniowanie emitowane z obiektu badanego. Jeżeli jednak celem badań eksperymentalnych jest wyznaczenie częstotliwościowych charakterystyk Bodego detektora piroelektrycznego, które to badanie jest wykonywane za pomocą takich właśnie kształtów sygnału promieniowania, to oznacza, że autorzy publikujący wyniki takich badań nie doceniają konsekwencji wynikających z zastosowania niesinusoidalnych kształtów sygnałów promieniowania [5–7]. Na rysunku 2 pokazano uproszczony widok stanowiska do badań napięciowej odpowiedzi częstotliwościowej  $u(t)$  detektora na wymuszenie sygnałem promieniowania o kształcie trapezoidalnym.

Reasumując, zdaniem autorów niniejszej pracy, komercyjnie dostępne modulatory mechaniczne nie nadają się do badania zależności czułości napięciowej  $R_V$  detektora od pulsacji  $\omega$  sygnału optycznego, bo wejściowy sygnał optyczny nie jest sygnałem sinusoidalnym i w rezultacie napięciowy sygnał odpowiedzi jest sygnałem odkształconym. Uzyskana w ten sposób charakterystyka nie jest częstotliwościową charakterystyką Bodego i nie można jej porównywać z wynikami uzyskanymi na drodze teoretycznej.



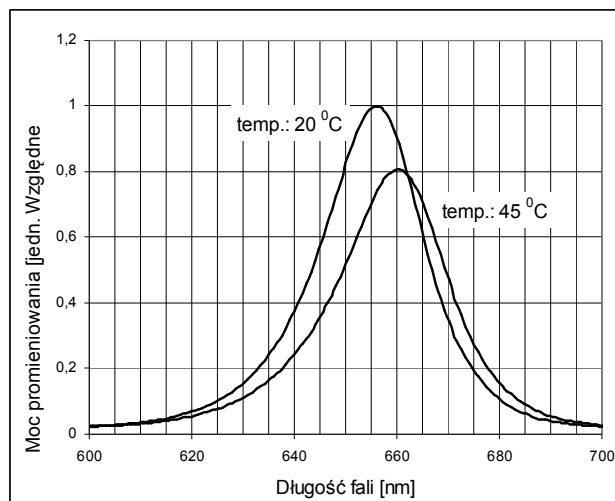
Rys. 2. Uproszczony widok stanowiska do badań napięciowej odpowiedzi częstotliwościowej detektora na wymuszenie sygnałem promieniowania o kształcie trapezoidalnym

### 3. WPŁYW TEMPERATURY NA PARAMETRY EMISYJNE DIOD LED

W badaniach eksperymentalnych niezbędne jest rygorystyczne zapewnienie stabilnej wartości emitowanej mocy i stałości charakterystyki widmowej źródła promieniowania. W przypadku zastosowania diod LED najważniejszą przyczyną niestałości tych dwóch parametrów są zmiany temperatury złącza diody elektroluminescencyjnej, które mogą być wywołane zarówno oddziaływaniem otoczenia, jak i efektem nagrzewania własnego spowodowanego przepływem prądu przez złącze diody. Na rys. 3 pokazano uzyskane eksperymentalnie przykładowe charakterystyki spektralne diod superelektroluminescencyjnych (SLED) typu W793SRC-F dla dwóch różniących się wartości temperatur.

W miarę zwiększanie temperatury złącza diody LED następuje zmniejszanie mocy emisyjnej promieniowania diody elektroluminescencyjnej a ponadto zmniejszaniu ulega również napięcie przewodzenia diody LED dla danego prądu zasilania. W praktyce można szacować, że względny współczynnik temperaturowy zmian mocy emisyjnej mieści się w przedziale wartości od  $-0,2\%/^{\circ}\text{C}$  do  $-0,8\%/^{\circ}\text{C}$ . Jednocześnie wraz ze wzrostem temperatury złącza

maksimum charakterystyki spektralnej przesuwa się w stronę fal o większych długościach – w praktyce można przyjąć, że współczynnik zmiany długości fali wynosi przeciętnie ok.  $0,07 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$  do  $0,2 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ .



Rys. 3. Charakterystyki widmowe diod SLED typu W793SRC-F

### 3.1. Prądowy sterownik diod LED dużej mocy ze stabilizacją termiczną

Na rysunku 4 pokazano uproszczony schemat układu sterownika, którego zadaniem jest prądowe sterowanie diody LED dużej mocy zamontowanej w głowicy z modułami termoelektrycznymi Peltiera zapewniającymi chłodzenie diody LED.

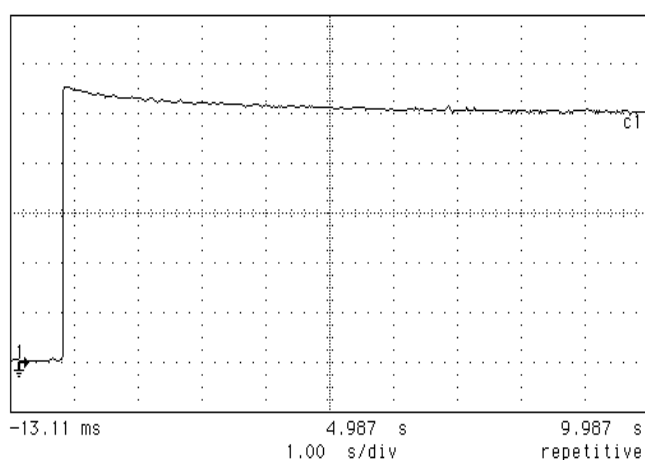
Rozwiązanie konstrukcyjne sterownika zawiera układ regulacji temperatury zapewniający stabilizację temperatury diody LED przy wykorzystaniu modułów Peltiera. Sterownik umożliwia sterowanie diody LED sygnałem o stałej lub modulowanej wartości prądu ze źródła prądowego wykonanego za pomocą wzmacniacza operacyjnego  $M2$  i wzmacniacza mocy na tranzystorze unipolarnym  $T1$ . Źródło prądowe pracuje w konfiguracji przetwornika prąd-napięcie i sterowane jest sygnałem napięciowym  $u_{we}(t)$  uzyskanym na przykład z wyjścia generatora funkcyjnego. W szczególności dla potrzeb wykonywania badań charakterystyki częstotliwościowej detektora piroelektrycznego zastosowany powinien być napięciowy sygnał wejściowy  $u_{we}(t)$  opisany zależnością:

$$u_{we}(t) = U_0 + U_m \sin \omega t \quad (1)$$

przy czym wartość amplitudy  $U_m$  powinna być mniejsza od wartości składowej stałej  $U_0$ .



żądany wpływ temperatury na parametry emisyjne diody. Efekty termicznej stabilizacji mocy promieniowania emitowanego przez diody LED nie są jednak doskonałe, gdyż bezpośrednio po każdej skokowej zmianie prądu wysterowania diody wymagany jest pewien upływ czasu na ustabilizowanie się temperatury złącza diody. Na rys. 5 pokazano zarejestrowany sygnał mocy promieniowania emitowanego przez diody LED stanowiący odpowiedź na wymuszenie skokowe prądu sterowania  $i_{LED}$ .



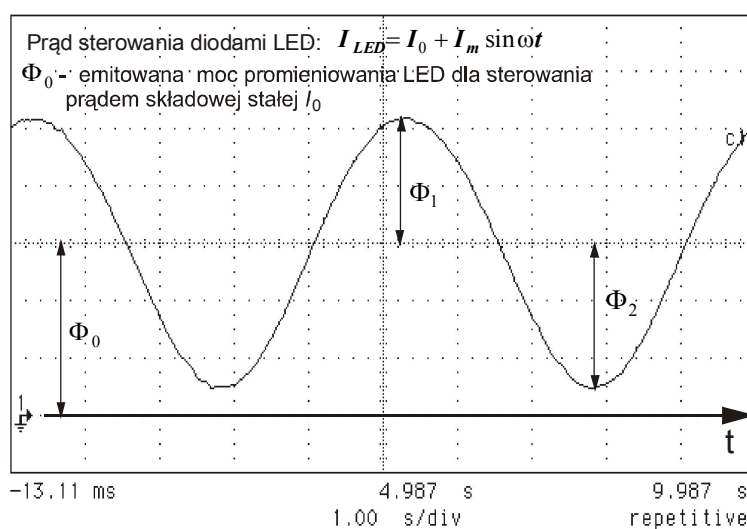
Rys. 5. Przebieg sygnału mocy promieniowania emitowanego przez diodę LED stanowiący odpowiedź na wymuszenie skokowe prądu sterowania  $i_{LED}$

Wynik rejestracji odpowiedzi przebiegu mocy promieniowania pokazany na rys. 5 wykazuje jednoznacznie, że w odpowiedzi na wymuszenie skokowe prądu sterowania  $i_{LED}$ , wartość sygnału mocy promieniowania emitowanego przez diodę LED na skutek efektu nagrzewania złącza zmniejsza się eksponencjalnie, aby po pewnym czasie osiągnąć wartość ustaloną. Bezpośrednio po wystąpieniu skokowej zmiany prądu sterującego  $i_{LED}$  w przebiegu odpowiedzi mocy promieniowania występuje przerost, którego wartość przekracza o ok. 12% wartość ustaloną. Warto również zwrócić uwagę na stosunkowo długi czas ustalania przebiegu mocy promieniowania wynoszący około 9 s.

Detektor piroelektryczny należy do tych szczególnych odbiorników promieniowania, którego badanie powinno być przeprowadzone również dla wolnozmiennych sygnałów promieniowania o częstotliwości nawet poniżej 0,5 Hz.. Dla tak wolnozmiennych sinusoidalnych przebiegów prądu sterującego diodę LED należy się spodziewać nieliniowych efektów w sygnale odpowiedzi diody LED spowodowanych zmianami temperatury złącza LED w trakcie procesu sterowania. W konsekwencji kształt sygnału mocy promieniowania będzie zde-



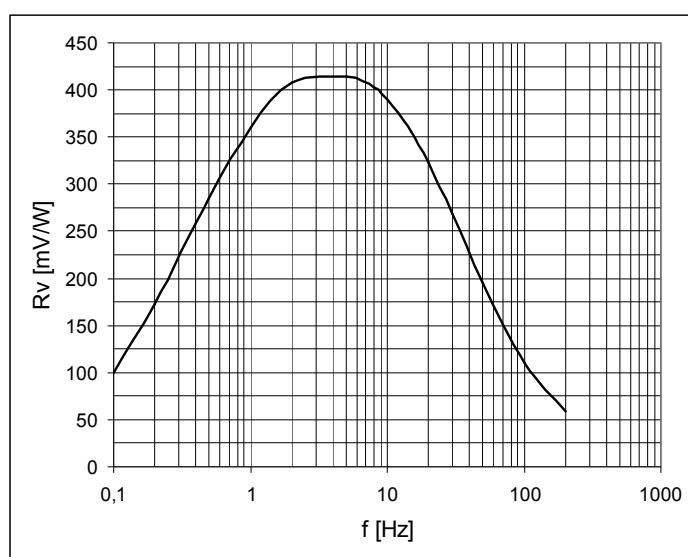
formowany w porównaniu do kształtu sygnału prądu sterującego, Na rysunku 6 pokazano niekorzystne efekty zdeformowania kształtu sygnału mocy promieniowania diod LED (spowodowane nagrzewaniem ich złączy półprzewodnikowych) przy przepływie wolnozmiennego prądu  $i_{LED}(t)$  sterującego diodą LED o przebiegu sinusoidalnym ze składową stałą:  $i_{LED}(t) = I_0 + I_m \sin \omega t$ . W odpowiedzi na wymuszenie sygnałem prądu  $I_{LED}(t)$  o przebiegu sinusoidalnym ze składową stałą  $i_{LED}(t) = I_0 + I_m \sin \omega t$  sygnał mocy promieniowania diod LED ma kształt zbliżony do sinusoidy, ale z zauważalnymi odkształceniami.



Rys. 6. Zdeformowanie kształtu sygnału mocy promieniowania diod LED spowodowane efektem ich nagrzewania przy przepływie wolnozmiennego prądu sterującego o sinusoidalnym kształcie przebiegu  $I_{LED}(t) = I_0 + I_m \sin \omega t$  ze składową stałą  $I_0$  i częstotliwości 0,2 Hz

Należy podkreślić, że niekorzystny efekt zdeformowania kształtu sygnału mocy promieniowania w odpowiedzi na sinusoidalny sygnał prądu LED o bardzo małej wartości częstotliwości nie jest znaczny. Ponadto jak wykazały badania eksperymentalne dla częstotliwości przekraczających kilka Hz efekt zniekształceń jest praktycznie pomijalnie mały, gdyż temperatura złącza ustala się wtedy na pewnym średnim poziomie z niewielkimi fluktuacjami. W badaniach charakterystyki częstotliwościowej stosowana jest stała wartość amplitudy sygnału promieniowania, a więc jedynie bezpośrednio po załączeniu prądu sterującego wymagany jest pewien czas odczekania na ustabilizowanie się temperatury złącza, po którym można przystąpić do zadawania kolejnych wartości częstotliwości.

Reasumując, wykonany model sterownika diod LED dużej mocy stanowi wygodne narzędzie do badań charakterystyk częstotliwościowych detektorów piroelektrycznych. Badania detektorów piroelektrycznych z wykorzystaniem opracowanego źródła promieniowania optycznego diod LED w pełni potwierdziły jego walory użytkowe. Na rys 7 pokazano eksperymentalnie uzyskaną charakterystykę częstotliwościową detektora piroelektrycznego typu PE firmy Ophir. Do przeprowadzenia badań eksperymentalnych wykorzystano wykonany sterownik diod LED.



Rys. 7. Zależność czułości napięciowej  $R_V$  detektora piroelektrycznego typu PE firmy Ophir od częstotliwości sinusoidalnego sygnału promieniowania pobudzającego ten detektor

#### 4. PODSUMOWANIE

W fundamentalnych pracach z lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku opracowano dobry model matematyczny detektora piroelektrycznego opisujący jego zachowanie za pomocą liniowych równań różniczkowych, a zatem detektor ten można zakwalifikować do grupy elementów liniowych. Dzięki temu modelowi można w sposób analityczny wyznaczyć opis matematyczny zależności czułości napięciowej od częstotliwości sinusoidalnego sygnału promieniowania, która to zależność umożliwia wykonanie częstotliwościowej charakterystyki Bodego. Dla weryfikacji charakterystyki częstotliwościowej uzyskanej teoretycznie konieczne jest przeprowadzenie badań za pomocą promieniowania modulowanego sinusoidalnie. W pracy zwrócono uwagę, że wykorzystanie do badań eksperymental-

nych mechanicznych modulatorów promieniowania, skądinąd bardzo popularnych w technice badań optoelektronicznych, nie daje satysfakcjonujących rezultatów, bo modulatory te nie umożliwiają wytworzenia sygnału promieniowania o kształcie sinusoidalnym. Alternatywą dla tego typu urządzeń może być opracowany układ sterownika diod LED dużej mocy, który umożliwia wytworzenie sygnału promieniowania o praktycznie dowolnym kształcie, w tym szczególnie sinusoidalnym ze składową stałą. Wykonany model sterownika diod LED dużej mocy stanowi wygodne narzędzie do badań charakterystyk częstotliwościowych detektorów piroelektrycznych.

#### LITERATURA

- [1] Cicco G. D., Morten B., Dalmonego D., Prudenziati M., Pyroelectricity of PZT-based thick-films, *Sensors and Actuators* 76, pp. 409–415, 1999.
- [2] Mendes R. G., Eiras J. A., Influence of neodymium and lanthanum doping in the pyroelectric properties of strontium barium niobate (SBN) thin films, *Journal of the European Ceramic Society* 24, pp. 1637–1640, 2004.
- [3] Optical Chopper Model SR540, karta katalogowa, Stanford Research Systems, Inc., USA, <http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/Catalog/SR540c.pdf>, 2009.
- [4] Wallin W., Sinusoidal light chopper, United State Patent Office, 2813460, 1957.
- [5] Odon A., Wpływ kształtu modulowanego promieniowania optycznego na czułość napięciową detektora piroelektrycznego. *Pomiary Automatyka Kontrola*, nr 11, str. 997–999, 2012.
- [6] Benjamin K. D., Armitage A. F., South R. B., Harmonic errors associated with the use of choppers in optical experiments, *Measurement* 39, pp. 764–770, 2006.
- [7] Odon A., Measurement error of voltage responsivity of pyroelectric detector induced by use of non-sinusoidal modulation of radiation, *Measurement* 2013, Proc. of the 9th International Conference, Smolenice, Slovakia, pp 219–222, 2013

#### DRIVER OF HIGH POWER LEDS FOR INVESTIGATION OF FREQUENCY CHARACTERISTICS OF PYROELECTRIC DETECTORS

Theoretical and experimental studies of the frequency dependence of voltage responsivity of a pyroelectric detector should be performed applying sinusoidal modulated optical radiation. However, in the majority of papers, the measuring results of frequency characteristics were obtained for the optical radiation signal of trapezoidal or rectangular shape because of the use of an electromechanical modulator of optical radiation. Such results must be charged with error. In the paper the low cost electronic circuit of high power LED driver was proposed. The Led driver allows to produce sinusoidal current driving the LED and as result sinusoidal modulated radiation.

*(Received: 28. 02. 2017, revised: 06. 03. 2017)*