

**Andrzej ODON, Zbigniew KRAWIECKI**

POLITECHNIKA POZNAŃSKA, INSTYTUT ELEKTROTECHNIKI I ELEKTRONIKI PRZEMYSŁOWEJ

## Źródło światła z matrycą diod superelektroluminescencyjnych (SLED) dla celów pomiarowych

Dr inż. Andrzej ODON

Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej w 1974 roku. W roku 1983 uzyskał tytuł doktora n. t. Jest autorem ponad 50 prac naukowych. Główne zainteresowania naukowe dotyczą badań przetworników i czujników pomiarowych zwłaszcza dla optoelektronicznych zastosowań pomiarowych. Od 1999 r. członek Sekcji Podstawowych Problemów Metrologii Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN.



e-mail: [odon@et.put.poznan](mailto:odon@et.put.poznan)

Dr inż. Zbigniew KRAWIECKI

Absolwent Politechniki Poznańskiej. Studia na kierunku Elektrotechnika, specjalność Elektroniczna Aparatura i Systemy Pomiarowe ukończył w 1996 roku. W 2005 roku uzyskał tytuł doktora n.t. Obecnie na stanowisku adiunkta w Zakładzie Metrologii i Optoelektroniki. Zainteresowania naukowe dotyczą modelowania, symulacji, programowania, przetwarzania sygnałów pomiarowych (w szczególności biooptycznych).



e-mail: [zbigniew.krawiecki@put.poznan.pl](mailto:zbigniew.krawiecki@put.poznan.pl)

### Streszczenie

Zaprezentowano opis konstrukcji i zasady działania stabilizowanego źródła światła z matrycą zawierającą dziesięć szeregowo połączonych diod superluminescencyjnych (SLED) przeznaczonego dla celów pomiarowych. Dzięki zastosowaniu stabilizacji temperaturowej diod i układu regulacji z ujemnym, optycznym sprzężeniem zwrotnym uzyskano efekt stabilizacji mocy promieniowania i charakterystyki spektralnej diod superelektroluminescencyjnych.

**Słowa kluczowe:** stabilizowane źródła światła, diody superelektroluminescencyjne, stabilizowane półprzewodnikowe źródła światła, matryce LED

### The source of light with array of superluminescent diodes (SLED) for measurement purposes

#### Abstract

In this paper the construction and principle of operation of a stabilized source of the light with an array made by 10 connected in series superluminescent diodes are described. By using the thermal stabilisation of the diodes and an optical feedback loop the output power level of SLEDs as well radiation spectral characteristics of SLEDs can be stabilized.

**Keywords:** stabilized source of light, superluminescent light-emitting diodes, stabilized LED sources, Led arrays

### 1. Wstęp

Pomiarowe źródła światła stanowią niezbędny element wyposażenia aparaturowego we wszystkich tych badaniach, w których promieniowanie świetlne stanowi sygnał o istotnej zawartości informacyjnej. Ze względu na różnorodność zastosowań i wymogów dotyczących parametrów techniczno-użytkowych w technice pomiarowej wykorzystuje się kilka typów źródeł światła. Istotnymi cechami, na jakie zwraca się uwagę przy wyborze odpowiedniego źródła promieniowania są: długość emitowanej fali (ogólnie kształt charakterystyki widmowej), maksymalna moc promienista, jaką można uzyskać z danego źródła, wymagania dotyczące układów zasilania i sterowania, niezawodność eksploatacji oraz koszty danego rozwiązania konstrukcyjnego. Obecnie w praktyce najczęściej stosuje się następujące typy źródeł światła: wyładowcze (lampy ksenonowe lub deuterowe), żarowe – najczęściej halogenowe oraz półprzewodnikowe na przykład lasery lub diody elektroluminescencyjne. Ogromny postęp w technologii wykonania półprzewodnikowych źródeł światła zwłaszcza diod

elektroluminescencyjnych sprawił, że stały się one konkurencyjne dla tradycyjnych typów źródeł światła. Opanowanie technologii wytwarzania diod superelektroluminescencyjnych (SLED) pozwoliło na wykorzystanie diod elektroluminescencyjnych w tych aplikacjach, w których wymagane są większe wartości mocy promieniowania. Istotnymi zaletami diod elektroluminescencyjnych, które decydują o atrakcyjności ich zastosowania w konstrukcjach urządzeń oświetleniowych przeznaczonych dla różnorodnych celów oraz pomiarowych źródeł światła są między innymi: bardzo duża niezawodność pracy w szczególności duża żywotność szacowana na 100000 godzin pracy, odporność na wibracje i wpływ czynników środowiskowych, duża sprawność energetyczna, stosunkowo szeroka paleta barw promieniowania w zakresie widmowym od 450 nm do dalekiej podczerwieni, dobra sprawność energetyczna, niski poziom emisji energii cieplnej, łatwa możliwość regulacji wartości emitowanego promieniowania, niska cena. Ewentualny problem zbyt małej wartości emitowanej mocy przez pojedynczą diodę elektroluminescencyjną może być łatwo rozwiązany przez wykonanie matrycy z odpowiednio dużą liczbą diod elektroluminescencyjnych [1], [2], [3] [4].

Prezentowana w niniejszym artykule problematyka stanowi jeden z wątków kilkuetapowej pracy badawczej dotyczącej opracowania własnych rozwiązań pomiarowych źródeł światła z diodami elektroluminescencyjnymi [5]. Źródła te przeznaczone są do wyposażenia stanowiska badawczego dla różnych zadań pomiarowych z zakresu optoelektroniki, w tym między innymi dla realizacji badań nad przetwornikami obrazowymi CCD i fotodetektorami do pomiaru mocy i energii promieniowania.

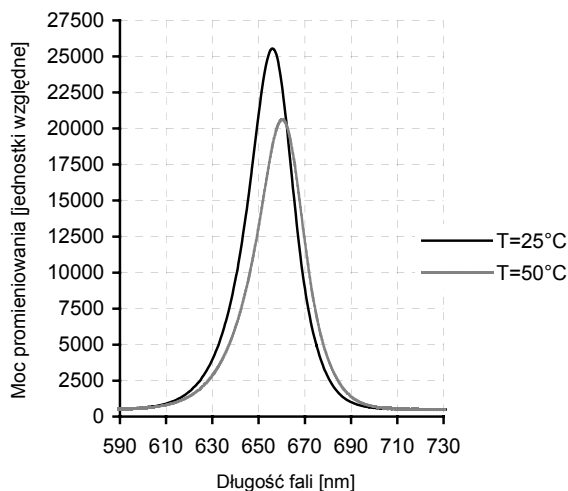
W niniejszej pracy przedstawiono jedną z wykonanych wersji technicznych głowicy źródła światła z matrycą diod elektroluminescencyjnych o wysokiej emisyjności. oraz zaprezentowano zasadę działania i rozwiązanie układowe sterownika z układem stabilizacji temperatury i mocy promieniowania diod elektroluminescencyjnych.

### 2. Sposoby eliminacji niekorzystnych właściwości diod elektroluminescencyjnych

Dla niektórych rodzajów badań o małych wymaganiach zwłaszcza odnośnie stabilności wartości mocy emitowanego promieniowania lub wykonywanych w warunkach praktycznie niezmienniej temperaturze otoczenia można wykorzystać tanie źródła światła z pojedynczą diodą elektroluminescencyjną z prądową regulacją mocy promieniowania. Zwiększenie mocy promieniowania można łatwo uzyskać przez zamontowanie większej ilości diod w formie matrycy we wspólnej obudowie i połączenie diod elektroluminescencyjnych równolegle lub

szeregowo. Połączenie równoległe upraszcza realizację napięciowego stopnia sterującego, ale istotnymi wadami są nierównomierne świecenie poszczególnych diod w matrycy spowodowane rozrzutem kształtów charakterystyk prądowo-napięciowych diod oraz pogorszenie czasów narastania i opadania zbroczy impulsów promieniowania na skutek istnienia pojemności własnych, a zatem takie rozwiązanie jest wykluczone dla bardziej odpowiedzialnych zadań. Znacznie korzystniejsze efekty dotyczące równomierności świecenia oraz czasów propagacji impulsu promieniowania uzyskuje się dla połączenia szeregowego diod elektroluminescencyjnych sterowanych ze źródła prądowego.

W większości badań niezbędne jest rygorystyczne zapewnienie stałości emitowanej mocy i charakterystyki widmowej źródła promieniowania. Najważniejszą przyczyną niestałości tych dwóch parametrów są zmiany temperatury złącza diody elektroluminescencyjnej, która może być wywołana zarówno przez wpływ otoczenia, jak i efekt nagrzewania własnego wywołanego przepływem prądu przez złącze diody. Moc emisyjna promieniowania diody elektroluminescencyjnej zmniejsza się w miarę wzrostu temperatury, przy czym można szacować, że współczynnik temperaturowy mieści się w przedziale wartości:  $-0,5\%/K$   $-1\%/K$ . Jednocześnie ze wzrostem temperatury złącza maksimum charakterystyki spektralnej przesuwa się w stronę dłuższych fal – w praktyce można przyjąć, że współczynnik zmiany długości fali wynosi około  $1\text{nm}/K$ . Na rys.1 pokazano uzyskane eksperymentalnie przykładowe charakterystyki spektralne wykonanego źródła światła opartego na diodach SLED typu W793SRC-F, dla dwóch różniących się znacznie wartości temperatur otoczenia. Bardziej szczegółowy opis konstrukcji wykonanego źródła światła zaprezentowano w rozdziale 2 niniejszego artykułu.

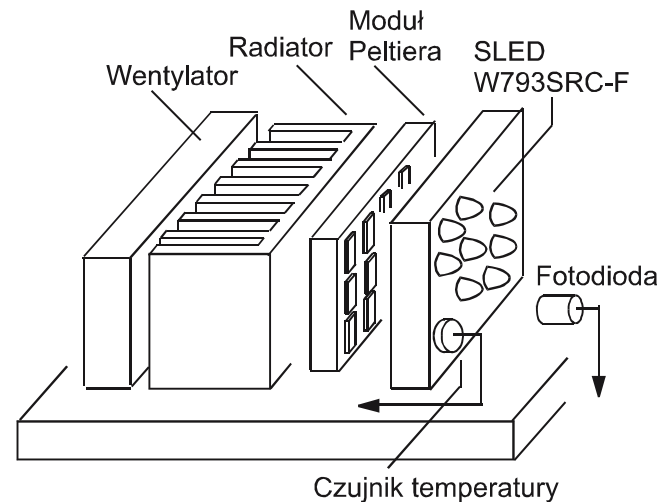


Rys.1. Wpływ temperatury na charakterystyki spektralne wykonanego źródła światła na diodach superelektroluminescencyjnych typu W793SR-F prod. Kingbright  
Fig.1. Temperature influence on spectral characteristics of constructed source of light based on SLED W793SR-F produced by Kingbright

Zastosowanie sterowania ze źródła prądowego i stabilizacji temperaturowej diody elektroluminescencyjnej w bardzo znacznym stopniu minimalizuje niepożądany wpływ temperatury na parametry emisyjne diod. W niektórych rozwiązaniach pomiarowych źródeł światła stosuje się optyczne sprzężenie zwrotne, które zapewnia stabilizację mocy promieniowania eliminując w ten sposób wpływ również innych czynników na przykład spadek emisyjności na wskutek starzenia diod. Jak się wydaje, najlepsze efekty można osiągnąć stosując jednocześnie obydwie sposoby stabilizacji pracy diody, gdyż stabilizowana będzie zarówno moc promieniowania, jak i zapewniona stabilna charakterystyka widmowa.

## 2. Opis konstrukcji głowicy źródła światła

Zaprojektowana i wykonana głowica z matrycą diod elektroluminescencyjnych stanowi element wykonawczy źródła światła. Jej rozwiązanie konstrukcyjne [6], umożliwia niezbędną stabilizację temperaturową dziesięciu szeregowo połączonych diod superelektroluminescencyjnych. Na rys. 2 pokazano budowę głowicy, a na rys.3 widok wykonanego źródła światła. Diody elektroluminescencyjne zamontowane są w otworach aluminiowej



Rys.2. Konstrukcja mechaniczna głowicy SLED  
Fig. 2. Mechanical construction of SLED head

plyty, której tylna ściana styka się z powierzchnią modułu termoelektrycznego Peltiera zapewniając w ten sposób dobre przewodnictwo ciepła. Wymianę ciepła z otoczeniem zapewnia radiator wspomagany za pomocą wentylatora. W głowicy zastosowano dziesięć połączonych szeregowo diod superelektroluminescencyjnych typu W793SRCF produkcji firmy Kingbright. Typowa wartość światłości deklarowana przez producenta dla tego typu diod wynosi  $3,8\text{cd}$  przy zasilaniu prądem o wartości  $20\text{mA}$ ., a długość fali, przy której występuje maksimum charakterystyki spektralnej wynosi  $660\text{nm}$ .



Rys.3. Widok wykonanego źródła światła z matrycą diod SLED  
Fig.3. View of designed light source with SLED array

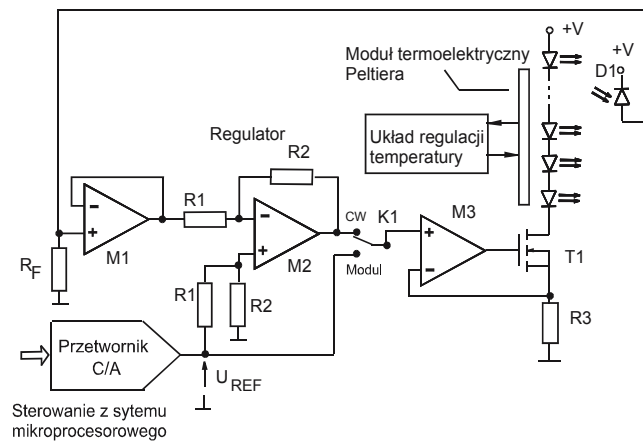
Dla celów stabilizacji temperatury wykonano moduł regulatora współpracujący z czujnikiem temperatury i sterującego pracą ogniwa Peltiera tak, aby temperatura bloku aluminiowego utrzymywała się w zadanych przez operatora granicach.

Wykonane źródło światła przeznaczone jest do współpracy ze sterownikiem o wyjściu prądowym o stałej lub modulowanej wartości sygnału prądowego. Emitowane promieniowanie diod SLED jest monitorowane za pomocą fotodiody.

### 3. Sterownik matrycy SLED z optycznym sprzężeniem zwrotnym do stabilizacji mocy promieniowania niemodulowanego

Na rys.4. pokazano uproszczony schemat blokowy sterownika głowicy z diodami elektroluminescencyjnymi.

Diody elektroluminescencyjne są sterowane ze źródła prądowego z ujemną pętlą sprzężenia zwrotnego wykonanego za pomocą wzmacniacza operacyjnego  $M3$  i wzmacniacza mocy na tranzystorze unipolarnym  $T1$ . Wartość żądanej mocy optycznej diod elektroluminescencyjnych można łatwo regulować przez zmianę wartości prądu. Źródło prądowe pracuje w konfiguracji przetwornika prąd-napięcie i sterowane jest sygnałem napięciowym z przetwornika C/A.



Rys.4 Schemat blokowy układu sterownika diod elektroluminescencyjnych  
Fig.4. The block diagram of LEDs driver

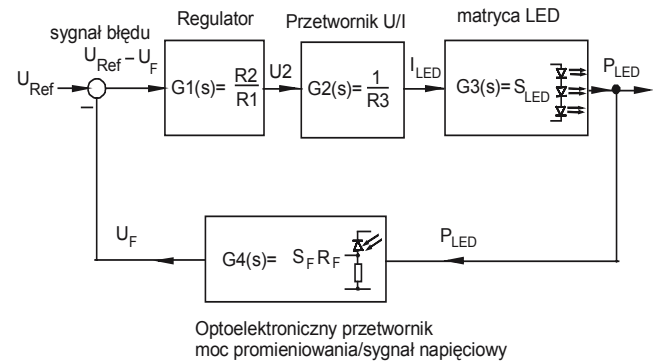
Sterownik umożliwia realizację dwóch trybów pracy – emisję modulowanego impulsowo lub niemodulowanego promieniowania diod elektroluminescencyjnych. W przypadku wyboru trybu pracy umożliwiającego emisję modulowanego promieniowania przełącznik  $K1$  jest przełączony w pozycji „modul”, w której przetwornik napięcie-prąd jest sterowany bezpośrednio z wyjścia przetwornika cyfrowo-analogowego. Do stabilizacji mocy promieniowania wykorzystuje się stabilizację termiczną, a ewentualna kontrola mocy promieniowania może być przeprowadzona za pomocą oscyloskopu przez pomiar napięcia na rezystorze  $R_F$ . Należy zauważyć, że na obecnym etapie prac problem realizacji technicznej układu sterownika umożliwiającej emisję promieniowania modulowanego traktowano w sposób drugorzędny, raczej jako dodatkową opcję pomiarową. Zasadniczym celem przeprowadzonych prac badawczych było opracowanie optymalnego rozwiązania układowego dla uzyskania dobrych jakościowo parametrów promieniowania niemodulowanego lub wolnozmiennego.

W przypadku stosowania trybu pracy niemodulowanej inicjowanej przez przełączenie przełącznika  $K1$  w pozycję „CW”, oprócz stabilizacji termicznej zastosowano optyczne ujemne sprzężenie zwrotne [7], [8] w układzie regulacji zapewniającym stabilizację wartości mocy promieniowania, którego schemat pokazano na rys.4. Moc optyczna diod elektroluminescencyjnych jest kontrolowana przez fotodiode monitorującą  $D1$ . Prąd fotoelektryczny proporcjonalny do mocy optycznej wywołuje spadek napięcia na rezystorze  $R_F$ . Napięcie to poprzez wtórnik  $M1$  podawane jest jako sygnał zwrotny do regulatora proporcjonalnego wykonanego na wzmacniaczu  $M2$ . Regulator ten porównuje napięciowy sygnał zwrotny z zadaniem napięciem referencyjnym  $U_{REF}$  i wytwarza odpowiedni sygnał sterujący źródło prądowe tak, aby wartość uchybu sprowadzić do wartości bliskiej zera. Zaletą takiego rozwiązania jest bardzo szybki efekt stabilizacji bezpośrednio po zadaniu nowej wartości prądu sterującego diody elektroluminescencyjne, a dodatkowym

walorem jest uzyskanie bardzo dobrej liniowości zależności mocy promieniowania od prądu sterującego.

W celu odprowadzenia ciepła wywołanego poborem mocy przez diody elektroluminescencyjne głowica z diodami jest stabilizowana termicznie za pomocą modułów Peltiera. Zastosowanie stabilizacji temperatury diod elektroluminescencyjnych gwarantuje uzyskanie stałej charakterystyki widmowej.

W celu wyznaczenia precyzyjnej zależności opisującej charakterystykę przetwarzania rozważany układ sterownika przedstawiono na rys.5 w postaci schematu blokowego układu regulacji z zamkniętą pętlą ujemnego sprzężenia zwrotnego.



Rys.5. Schemat blokowy sterownika diod SLED przedstawiony jako układ regulacji ze sprzężeniem zwrotnym

Fig.5. The Block diagram of SLEDs driver as a closed loop control system

Wszystkie podzespoły schematu blokowego pokazanego na rys. 5 dla zakresu częstotliwości sygnałów nie przekraczającego zbyt dużych wartości można traktować jako liniowe elementy bezinercyjne. Poszczególne transmitancje tych elementów opisane są zależnościami:

- transmitancja  $G1(s)$  układu regulatora:

$$G1(s) = R2 \cdot R1^{-1} \quad (1)$$

- transmitancja  $G2(s)$  przetwornika prąd-napięcie:

$$G2(s) = R3^{-1} \quad (2)$$

- transmitancja  $G3(s)$  obiektu regulacji:

$$G3(s) = S_{LED} \quad (3)$$

- transmitancja  $G4(s)$  układu przetwornika mocy promieniowania na sygnał napięciowy w torze sprzężenia zwrotnego z fotodiody:

$$G4(s) = S_F \cdot R_F \quad (4)$$

Symbole  $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$ ,  $R_F$  w zależnościach (1), (2), (3) i (4) oznaczają odpowiednie rezystory pokazane na schemacie przedstawionym na rys. 4,  $S_{LED}$  - współczynnik charakteryzujący czułość diod elektroluminescencyjnych,  $S_F$  - współczynnik charakteryzujący czułość fotodiody  $D1$ .

Zgodnie z zasadami przekształcania schematów blokowych transmitancja zastępcza  $G(s)$  opisana jest zależnością:

$$G(s) = \frac{G1(s) \cdot G2(s) \cdot G3(s)}{1 + G1(s) \cdot G2(s) \cdot G3(s) \cdot G4(s)} \quad (5)$$

Po podstawieniu odpowiednich zależności na transmitancję  $G1(s)$ ,  $G2(s)$ ,  $G3(s)$ ,  $G4(s)$ , transmitancja zastępcza  $G(s)$  określona jest jako:

$$G(s) = \frac{\frac{R2}{R1} \cdot \frac{1}{R3} \cdot S_{LED}}{1 + \frac{R2}{R1} \cdot \frac{1}{R3} \cdot S_{LED} \cdot S_F \cdot R_F} \quad (6)$$

Pomiędzy sygnałem wyjściowym układu, jaki stanowi moc promieniowania  $P_{LED}$  i sygnałem wejściowym, jaki stanowi napięcie referencyjne  $U_{REF}$  istnieje związek opisany zależnością:

$$P_{LED}(s) = G(s) \cdot U_{REF}(s) \quad (7)$$

W rezultacie po wstawieniu zależności (6) do zależności (7) i dokonaniu operacji odwrotnego przekształcenia Laplace'a otrzymujemy algebraiczne równanie statycznej charakterystyki przetwarzania układu opisujące zależność między sygnałem wyjściowym mocy promieniowania  $P_{LED}$  i sygnałem wejściowym napięcia referencyjnego  $U_{REF}$ :

$$P_{LED} = \frac{\frac{R2}{R1} \cdot \frac{1}{R3} \cdot S_{LED}}{1 + \frac{R2}{R1} \cdot \frac{1}{R3} \cdot S_{LED} \cdot S_F \cdot R_F} \cdot U_{REF} \quad (8)$$

Jeżeli wzmacnienie regulatora  $K$  określone z zależności –  $K = R2/R1$  ma wartość dostatecznie dużą, tak, aby spełniona była nierówność:

$$\frac{R2}{R1} \cdot \frac{1}{R3} \cdot S_{LED} \cdot S_F \cdot R_F \gg 1, \quad (9)$$

to wówczas otrzymujemy przybliżoną postać równania przetwarzania układu opisującego zależność pomiędzy mocą promieniowania diod  $P_{LED}$  i wartością zadanego napięcia referencyjnego  $U_{REF}$ :

$$P_{LED} \approx \frac{U_{REF}}{S_F \cdot R_F} \quad (10)$$

Na podstawie analizy zależności (10) można sformułować wniosek, że dla analizowanego układu z zamkniętą pętlą ujemnego sprzężenia zwrotnego o stałości wartości mocy promieniowania decyduje stabilność wartości sygnału wejściowego  $U_{REF}$  i wartości parametrów elementów sprzężenia zwrotnego to znaczy - czułości fotodiody  $S_F$  oraz rezystora  $R_F$ . Właściwości te są zgodne z ogólnie znanymi wynikami analizy układów z ujemnym sprzężeniem zwrotnym.

W przypadku wystąpienia niestabilności parametrów  $U_{REF}$ ,  $S_F$  i  $R_F$  wyrażonych w jednostkach względnych odpowiednio jako  $\delta U_{REF}$ ,  $\delta S_F$  i  $\delta R_F$  bezpośrednią konsekwencją będzie ujawnienie się niestabilności wartości mocy promieniowania  $P_{LED}$  wyrażonej jako względny błąd  $\delta P_{LED}$  zgodnie z zależnością:

$$\delta P_{LED} = \delta U_{REF} + \delta S_F + \delta R_F \quad (11)$$

Warto zwrócić uwagę, że stosowanie dużej wartości wzmacnienia regulatora może wywołać niekorzystne efekty procesu regulacji, które w skrajnym przypadku mogą doprowadzić do utraty stabilności układu regulacji. W praktyce

wzmocnienia regulatora mogą zatem osiągać wartości, które nie zapewniają spełnienia nierówności (9) i w rezultacie dla przeprowadzenia szczegółowej analizy metrologicznej pożądane jest wtedy korzystanie z dokładnej postaci równania przetwarzania opisanej za pomocą zależności (8).

#### 4. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych prac badawczych został zaprojektowany i wykonany model stabilnego źródła promieniowania optycznego emitowanego przez matrycę dziesięciu szeregowo połączonych diod superelektroluminescencyjnych (SLED) charakteryzujących się dużą wartością mocy emitowanego promieniowania. Zaprezentowano rozwiązanie konstrukcyjne głowicy zapewniające stabilizację temperaturą diod i monitorowanie emitowanego promieniowania za pomocą fotodiody. W dotychczas realizowanych pracach w szczególności skoncentrowano się na problemie optymalnego rozwiązania układowego dla uzyskania dobrych jakościowo parametrów promieniowania niemodulowanego lub wolnozmiennego o precyzyjnie regulowanej wartości. Zasadniczym celem prac było zaprojektowanie i przeprowadzenie analizy analogowego układu sterownika pracującego jako układ regulacji z optyczną pętlą sprzężenia zwrotnego w celu uzyskania efektu stabilizacji wartości mocy promieniowania diod elektroluminescencyjnych. Przeprowadzono analizę pracy układu sterownika wykorzystując elementarne metody teorii sterowania stosowane dla analizy układów regulacji i wyznaczono równanie przetwarzania układu, dzięki czemu możliwe było wytypowanie parametrów, których niestalość może mieć istotny wpływ na jakość stabilizacji emitowanej mocy promieniowania. Przeprowadzone dotychczasowe badania wykazały, że zaproponowane rozwiązanie analogowego zamkniętego układu sterowania z optyczną pętlą sprzężenia zwrotnego zapewnia uzyskanie dobrej jakości stabilizacji mocy promieniowania matrycy wykonanej z diod superelektroluminescencyjnych, a także precyzyjną i liniową regulację poziomu mocy emitowanego promieniowania. Szczegółowe wyniki tych badań i ich analiza są przedmiotem dalszych prac i stanowią osobny wątek tematyczny wykraczający poza zakres niniejszego artykułu.

#### 5. Literatura

- [1] Moreno I, Avendano-Alejo, Tzonchev RI, Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance. Appl. Opt. Apr 1, vol. 45(10) 2006, str. 2265-2272.
- [2] Gamma Sciencetech Catalogue, RS-5 Digital Light Source System. <http://www.gamma-sci.com/products/rs5.html>
- [3] Mirosław Kwaśny, Niekoherentne źródła światła w fotodynamicznej metodzie leczenia nowotworów. Elektronika (XLIV) 2-3, 2003, str. 13-17.
- [4] General Photonics Corp., Highly Stable SLED Sources. <http://www.generalphotonics.com/SLD-101-5.htm>
- [5] Andrzej Odon, Zbigniew Krawiecki, Mikroprocesorowy sterownik do impulsowej modulacji światła matrycy diod elektroluminescencyjnych. mat. konf. Optoelektronika 2006, Poznań 19-20 czerwca 2006, str. 83 – 85.
- [6] Gawroński Krzysztof, Programowane, półprzewodnikowe źródło światła z optycznym sprzężeniem zwrotnym. praca dyplomowa. Politechnika Poznańska Wydział Elektryczny, 2004.
- [7] Watanabe T, Mori N, Nakamura F., A new superbright LED simulator: photodiode-feedback design for linearizing and stabilizing emitted light. Vision Res 1992, 32, str. 953-961.
- [8] Gian Carlo Demontis, Andrea Sbrana, Claudia Gargini, Luigi Cervetto, A simple and inexpensive light source for research in visual neuroscience. Journal of Neuroscience Methods 146, 2005, str. 13-21.