

Ocena możliwości zastosowania wybranych technik przetwarzania sygnałów do badań parametrów detektorów promieniowania optycznego

Streszczenie. W układach detekcji promieniowania optycznego jednym z ważniejszych parametrów zarazem sporadycznie podawanym przez producentów jest zakres liniowej pracy detektora. W pracy przeprowadzono analizę możliwości zastosowania w tych badaniach wybranych technik przetwarzania i analizy sygnału. Przedstawiono wyniki symulacji komputerowych oraz omówiono koncepcję oraz wstępne testy stanowiska laboratoryjnego do pomiaru nieliniowości odpowiedzi detektorów promieniowania optycznego.

Abstract. In optical detection systems, one of the most important features and rarely given by the manufacturers is detector non-linearity. The paper presents analysis of some signal processing and signal analysis to determine this parameter. The results of computer simulations and preliminary operation of non-linearity test lab-setup are also discussed. **Analysis of the possibility to application of selected techniques of signal processing to investigation of optical detectors**

Słowa kluczowe: nieliniowość detektorów promieniowania optycznego, przetwarzanie sygnałów, czułość detektora

Keywords: photodetector non-linearity, signal processing, detector responsivity

Wprowadzenie

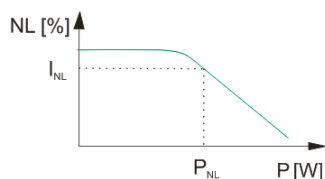
Detekcja promieniowania optycznego jest istotnym zagadnieniem w wielu dziedzinach nauki i techniki. Głównymi bodźcami dla rozwoju technologii detektorów są osiągnięcia technologii półprzewodnikowych oraz nowe kierunki ich zastosowań. Równocześnie wymagane są coraz lepsze ich parametry, niższe koszty produkcji, mniejsze wymiary i pobór mocy oraz łatwiejsze użycie. Obecnie wśród najczęściej wymienianych obszarów zastosowań detektorów są telekomunikacja, robotyka i automatyka przemysłowa, systemy obrony i bezpieczeństwa oraz obrazowanie i diagnostyka medyczna.

Szczególny postępowanie w rozwoju układów detekcji promieniowania optycznego jest zauważalny w optoelektronicznych technikach wykrywania gazów, w laserowych systemach łączności w wolnej przestrzeni a także w systemach teledetekcyjnych. W układach tych, jednym z ważniejszych parametrów i rzadko podawanym przez producentów jest zakres liniowej pracy detektora [1-4].

Odpowiedź detektora jest rozważana jako liniowa, gdy generowany fotoprąd wzrasta liniowo w stosunku do zwiększanej mocy padającego promieniowania. W klasycznym ujęciu, nieliniowość określa się poprzez analizę stosunku zmian fotoprądu do zmian mocy. W najprostszej postaci analizę taką umożliwia obserwacja zmian czułości prądowej detektora od mocy padającego promieniowania

$$(1) \quad NL = \frac{R_i}{R_0} - 1,$$

gdzie R_i jest czułością prądową testowanego detektora, a R_0 jest jego czułością prądową w przyjętym zakresie liniowym. Na podstawie zależności parametru NL od mocy padającego promieniowania określa się wartość graniczną mocy P_{NL} , dla której zakłada się że detektor pracuje nieliniowo - rys. 1.



Rys. 1. Zależność NL od mocy padającej na detektor (I_{NL} – prąd nasycenia, P_{NL} – moc graniczna)

Istnieją także inne metody, które umożliwiają wyznaczenie nieliniowości detektora uwzględniając bardziej rozbudowane układy pomiarowe i zależności matematyczne. Przykładowo Atte Haapalinna opracowała układ [5], w którym nieliniowość wyznaczana jest na podstawie wzoru

$$(2) \quad \Delta NL = 1 - \frac{I_A + I_B}{I_{A+B}}$$

gdzie I_A oraz I_B są wartościami fotoprądów wywołanych dwoma wiązkami promieniowania optycznego (poprzez dzielnik wiązki) mierzonych oddzielnie, natomiast I_{A+B} jest fotoprądem wywołanym jednoczesnym oświetleniem detektora tymi dwoma wiązkami.

W pracy przeanalizowano właściwości trzech metod wykorzystujących techniki modulacji promieniowania i analizy widma odpowiedzi detektora w odniesieniu do techniki klasycznej. Dokonano porównania tych metod, wyznaczając graniczną moc P_{NL} .

Wybrane metody analizy nieliniowości

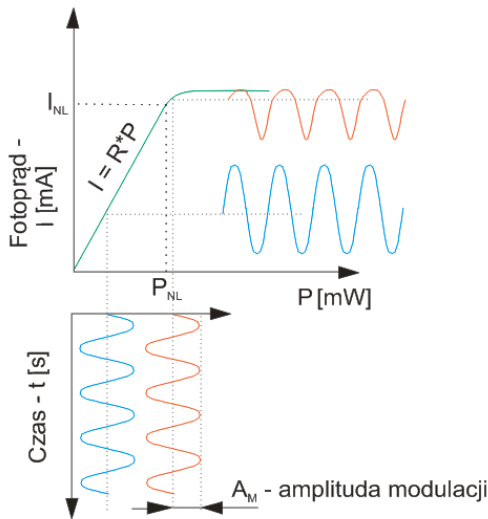
W pracy bezpośrednio odniesiono się do wybranych metod wyznaczania nieliniowości:

- metody klasycznej - analiza zmiany czułości detektora zgodnie ze wzorem [1],
- metody THD – analiza zmiany współczynnika zawartości harmonicznych,
- metody $2f/1f$ – analiza zmiany stosunku drugiej do pierwszej harmonicznej.

W metodzie THD (ang. *Total Harmonic Distortion*) wyznaczany jest współczynnik zawartości harmonicznych. Określa on stosunek wartości skutecznej wyższych harmonicznych sygnału U_k , do wartości skutecznej składowej podstawowej U_1 zgodnie ze wzorem

$$(3) \quad THD[\%] = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n U_k^2}}{U_1} * 100\%.$$

Aby możliwe było wyznaczenie wartości współczynników THD oraz $2f/1f$ należy określić odpowiedź detektora dla zmodulowanego sygnału mocy promieniowania. Sygnał modulujący ma postać fali sinusoidalnej, ze składową stałą określającą punkt pracy detektora. Poprzez zmianę tej składowej stałej następuje „skanowanie” charakterystyki prądowo-mocowej detektora (rys. 2).



Rys. 2. Graficzna interpretacja wpływu nielineowości odpowiedzi detektora

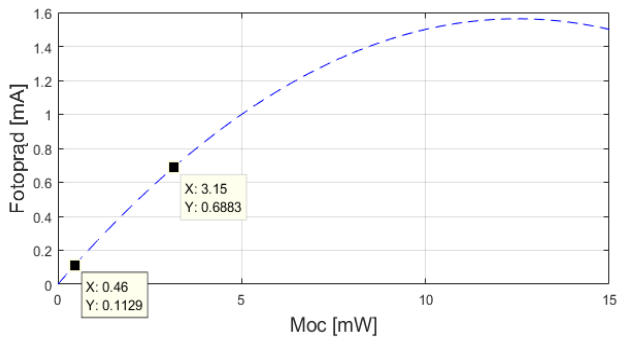
W literaturze dotyczącej badań detektorów trudno jest jednoznacznie wskazać kryterium określające nieliniowy zakres pracy detektora. Najczęściej określa go przedział od 1% do 15% spadku wartości czułości detektora [5, 6].

Porównanie metod wyznaczenia nielineowości detektora

W celu przeprowadzenia analiz poszczególnych metod wyznaczania nielineowości odpowiedzi detektora w środowisku MATLAB R2016b firmy Mathworks wykonano program do wyznaczania fotoprądu detektora z następującej zależności

$$(4) \quad I(P) = -(P - a)^2 + b(P - a) + c,$$

gdzie $I(P)$ [mA] – fotoprąd, P [mW] – moc promieniowania, a - c współczynniki funkcji uwzględniające nielineowość (rys. 3).

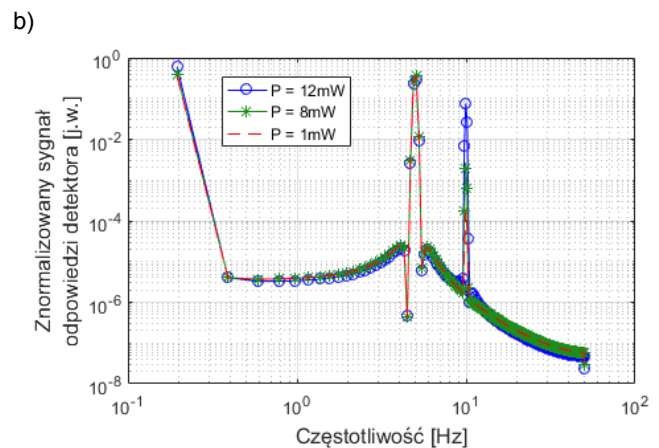
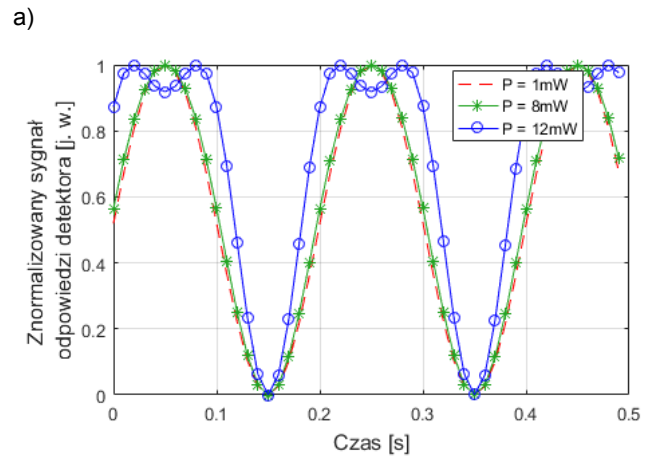


Rys. 3. Przykładowa zależność fotoprądu od mocy padającego promieniowania optycznego z zaznaczonymi punktami dla 10% kryterium nielineowości

Opracowany program umożliwia wykreślenie znormalizowanych odpowiedzi detektora (rys. 4a) oraz ich widma częstotliwościowe (rys. 4b) dla różnych punktów jego pracy. Punkt pracy jest także determinowany przez wartość składowej stałej mocy promieniowania padającego na detektor. W analizach do zdefiniowania poziomu modulacji wprowadzono tzw. współczynnik głębokości modulacji – m , wyznaczony ze wzoru

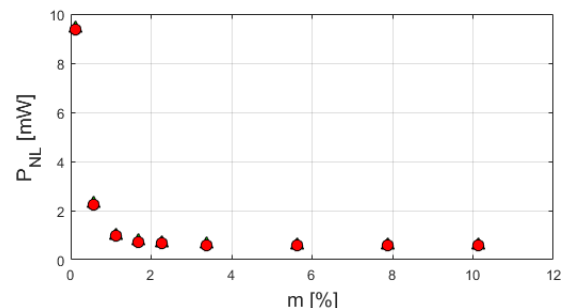
$$(5) \quad m = 2 \cdot \frac{A_M}{FWHM} \cdot 100\%.$$

gdzie A_M jest amplitudą sinusoidy modulującej, a FWHM jest szerokością paraboli zastosowanej w symulacji na połowie jej wysokości.



Rys. 4. Znormalizowane odpowiedzi detektora dla różnych punktów jego pracy (a) oraz ich widma częstotliwościowe (b)

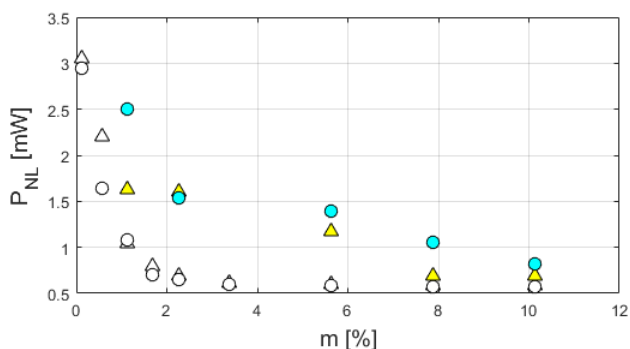
Obserwując w dziedzinie czasu odpowiedzi detektora na promieniowanie optyczne modulowane częstotliwością 5 Hz o mocy średniej 1 mW i 8 mW w zasadzie nie widać znacznych różnic. Jednak porównując ich widma można zauważyć pojawienie się wyższych harmonicznych już dla mocy 1 mW. Zjawisko to wynika z dużego współczynnika głębokości modulacji $m = 10\%$. Oznacza to, że istotnym aspektem stosowania metod wykorzystujących modulację mocy promieniowania jest określenie optymalnej amplitudy modulacji sygnału. Przeprowadzono analizę wpływu tego efektu na wartość P_{NL} metodą THD – rys. 5. Należy zaznaczyć, że wartość P_{NL} dla metody klasycznej wyniosła 3,15 mW.



Rys. 5. Moc graniczna P_{NL} w zależności od głębokości modulacji m w metodzie THD wyznaczona metodą THD

Zwiększenie wartości m w praktyce powoduje wcześniejsze wystąpienia zjawiska nasycenia detektora przy zmianie jego punktu pracy. Należy jednak zaznaczyć, że dobór tego parametru zależy również od funkcji $I(P)$. Analizując to zagadnienie w obszarze modulacji

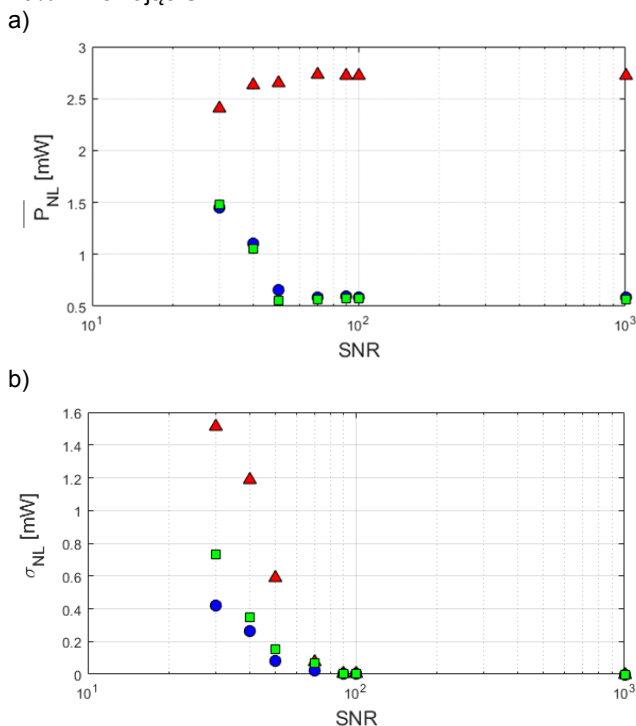
i przetwarzania sygnałów można stwierdzić, że dla funkcji o wyraźnym maksimum lokalnym, wartość m powinna być zmniejszona. W przeciwnym razie wzrośnie wpływ zniekształcenia sygnału wyjściowego detektora. Na rysunku 6 przedstawiono zależność mocy P_{NL} od głębokości modulacji m dla różnych wartości stosunku mocy sygnału do mocy szumu (SNR).



Rys. 6. Moc graniczna w zależności od współczynnika głębokości modulacji m (znak: pełny – $SNR=50$, znak pusty – $SNR=100$, trójkąt THD, kółko $2f/1f$)

Można zauważyć, że wraz ze wzrostem głębokości modulacji wartość P_{NL} maleje. Ponadto wyniki uzyskane wybranymi metodami są zbliżone.

Na wykresie (rys. 7) przedstawiono wyniki obliczeń wartości średniej mocy - $\overline{P_{NL}}$ oraz odchylenia standardowego (σ_{NL}) dla współczynnika m wynoszącego 10% zmieniając SNR .



Rys. 7. Średnia moc graniczna wyznaczona trzema metodami (a) oraz odchylenie standardowe otrzymanych wyników (b) (trójkąt – metoda klasyczna, kwadrat – metoda $2f/1f$, kółko – metoda THD)

Wartości średnie uzyskane metodami THD oraz $2f/1f$ są zbliżone. Bazują one na pomiarze harmonicznych. Wraz ze wzrostem szumu $2f/1f$ i THD zmniejszały swoją amplitudę, co miało przełożenie na większe wartości P_{NL} . Jednocześnie metody modulacyjne wskazują mniejsze wartości P_{NL} , przez co potwierdza się ich dużą czułość w porównaniu do techniki klasycznej. Można także zauważyć, że dla małych wartości SNR uzyskują one

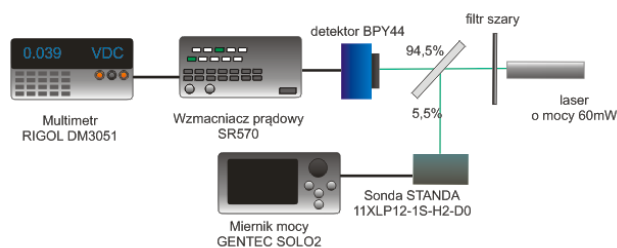
jednak większe rozbieżności w stosunku do założonej wartości. Można zatem stwierdzić, że ich duża czułość może stanowić istotną zaletę w wypadku sygnałów o dużym stosunku SNR i jednocześnie wadę dla sygnałów bardzo zaszumionych.

Dla wszystkich metod odchylenie standardowe wyznaczenia P_{NL} malało wraz ze wzrostem wartości SNR . Jednak dla metod THD i $2f/1f$ te wartości były mniejsze.

Przeprowadzone analizy dały możliwość określenia istotnych aspektów wyznaczania zakresu liniowej pracy detektorów, różnymi metodami. Dały one podstawę do przeprowadzenia badań eksperymentalnych.

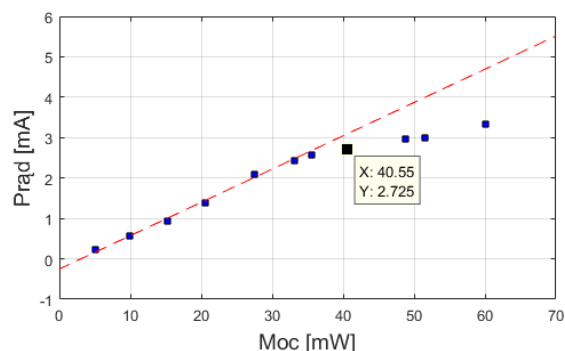
Badanie nieliniowości detektora

Procedurę badania nieliniowości detektora rozpoczęto od zastosowania metody klasycznej. Polegała ona na pomiarach zmian czułości detektora na stanowisku przedstawionym na rys. 8. W układzie tym, jako źródło promieniowania zastosowano laser o długości fali 553 nm i mocy 60 mW. W celu pomiaru zmian mocy promieniowania padającego na detektor, jego wiązkę rozdzielono płytką światłodzielącą w stosunku $\frac{94,5}{5,5}$. Regulację mocy osiągnięto poprzez zmianę filtra szarego w torze wiązki. Jako element badany zastosowano krzemową fotodiodę BPY44. Generowany fotoprąd był podawany na konwerter prąd-napięcie. Napięcie wyjściowe konwertera było mierzone multimetrem RIGOL DM3051.



Rys. 8. Schemat blokowy układu do badania nieliniowości

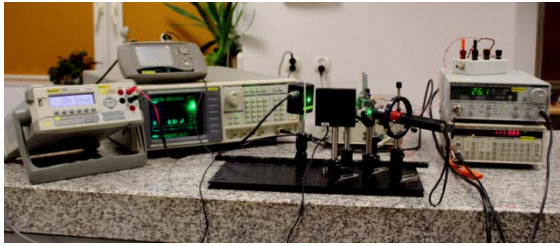
W pierwszym etapie badań detektora przeprowadzono pomiar charakterystyki $I = f(P)$ - rys.9.



Rys. 9. Zależność fotoprądu generowanego przez detektor w funkcji mocy promieniowania padającego na jego powierzchnię

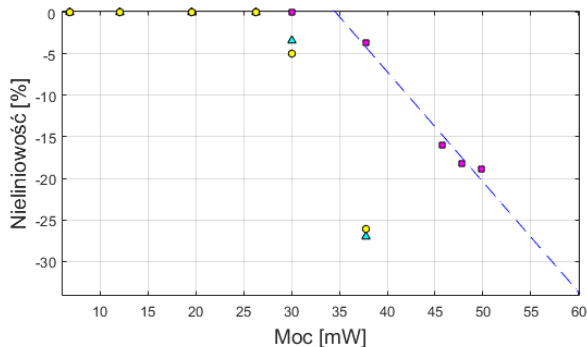
Graniczna wartość mocy lasera wyznaczona metodą klasyczną wyniosła $P_{NL}=40,55$ mW, a odpowiadająca jej wartość fotoprądu $I_{NL}=2,725$ mA.

Następnie stanowisko zostało zmodyfikowane w celu wyznaczenia nieliniowości detektora metodami THD i $2f/1f$. Zastosowano w nim dodatkowo modulowane źródło promieniowania składające się ze sterownika prądowego ILX 3232, diody laserowej ($\lambda=650$ nm) oraz wzmacniacza fazoczułego typu SR850 – rys. 10. Wzmacniacz ten umożliwił wąskopasmowy pomiar wartości skutecznych poszczególnych harmonicznych sygnału wyjściowego z detektora.



Rys. 10. Fotografia zaproponowanego układu

Badanie detektora obejmowało m.in. pomiar trzech pierwszych harmonicznych fotoprądu dla różnych mocy padającego promieniowania. Na podstawie otrzymanych wartości wyznaczono zakresy liniowej pracy metodami THD oraz $2f/1f$ (rys. 11).



Rys.11. Charakterystyka nieliniowości detektora BPYP44 wyznaczona różnymi technikami (kwadrat – metoda klasyczna, trójkąt – $2f/1f$, kółko – THD)

Stosując metodę interpolacji między węzłowej, dla 10% kryterium, oszacowano wartość mocy granicznej dla metody THD $P_{NL} = 32\text{mW}$, dla metody $2f/1f$ $P_{NL} = 32.5\text{mW}$ oraz metody klasycznej $P_{NL} = 42\text{mW}$. Wyniki pokazały, że charakterystyki nieliniowości detektora wyznaczone metodą klasyczną i modulacji różnią się w głównej mierze wartością P_{NL} , jak również i dynamiką.

Warto jednak zaznaczyć, że metoda THD jest najbardziej czuła na zakłócenia i szumy, które dodatkowo zwiększają liczbę harmonicznych powodując fluktuacje wyników. Jednak, gdy występuje maksimum lokalne charakterystyki $I(P)$, współczynnik THD staje się jednoznaczny wskaźnikiem wejścia detektora w stan nieliniowej pracy. Dla techniki analizy stosunku $2f/1f$ otrzymuje się zbliżone wyniki, jednak tutaj uzyskuje się większą dynamikę. Biorąc pod uwagę dodatkowo praktyczne zastosowanie tych obu technik wydaje się, że bardziej efektywnym narzędziem mogłaby się stać technika $2f/1f$ ze względu na możliwość prostszej a zarazem tańszej sprzętowej jej realizacji.

Wnioski i podsumowanie

W artykule przedstawiono trzy najczęściej stosowane metody do pomiaru zakresu liniowej pracy detektorów. Opierają się one na technice modulacji promieniowania padającego na powierzchnię detektora i analizie sygnału na jego wyjściu. Przeprowadzono ich analizę teoretyczną oraz badania eksperymentalne. Wyniki obliczeń w środowisku MATLAB pozwoliły na określenie zalet i ograniczeń wybranych metod. Z praktycznego punktu widzenia bardzo efektywnym narzędziem wyznaczenia nieliniowości pracy detektora może stać się metoda analizy stosunku harmonicznych $2f/1f$ ze względu na prostszą implementację. Metoda THD również mogłaby się stać użytecznym narzędziem, jednak aby zachować dużą dokładność wymaga ona pomiaru przynajmniej trzech harmonicznych co może utrudnić w przyszłości zastąpienie dedykowanego sprzętu układem mikrokontrolera.

Uzyskane wyniki metodą $2f/1f$ wskazują, że umożliwiają one szybkie i dokładne wyznaczanie zakresu liniowej pracy detektorów. Zatem kierunkiem dalszych prac powinna być implementacja techniki analizy stosunku $2f/1f$ w zakresie podczerwieni, co zwiększyło by jej użyteczność.

Praca została zrealizowana w ramach projektu nr. DOB-BIO8/01/01/2016 pn. „Hybrydowe łącze otwartej przestrzeni” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Autorzy: mgr inż. Małgorzata Panek, E-mail: malgorzata.panek@wat.edu.pl, mgr inż. Sylwester Chojnowski, E-mail: sylwester.chojnowski@wat.edu.pl, ppłk dr inż. Janusz Mikołajczyk, E-mail: janusz.mikolajczyk@wat.edu.pl, ppłk dr hab. inż. Jacek Wojtas, E-mail: jacek.wojtas@wat.edu.pl, Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Optoelektroniki, ul. Gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 46

LITERATURA

- [1] Lin L. Y., Wu M. C., Itoh T., Vang T. A., Mullr R. E., Sivco D. L., Cho A. Y., *Velocity-Matched Distributed Photodetectors with High-Saturation Power and Large Bandwidth*, IEEE Photonics Technology Letters, Vo. 8, No. 10, October 1996
- [2] Liu P., Williams K. J., Frankel M. Y., Esman R. D., *Saturation characteristics of fast photodetectors*, IEEE Transaction on microwave theory and techniques, Vol. 47, No. 7, July 1999
- [3] Norma Polska PN-EN ISO 11554
- [4] *Optical Detector Nonlinearity: Simulation*, Shao Yanh i in., NIST Technical Note 1376, 1995
- [5] A.Haapalinna, T.Kubarsepp, P.Karha, E.Ikonen, Meas. Sci. Technol.10(1999), Nonlinearity measurments of silicon photodetectors, 1075–1078.
- [6] S. Yang, I. Vayshenker, X. Li, T. R. Scott, M Zander, *optical Detector Nonlinearity: Simulation*, NIST Technical Note 1376