

**Ilona PIRÓG, Andrzej DŁUGASZEK**  
CENTRALNY WOJSKOWY OŚRODEK METROLOGII,  
ul. Radiowa2, 00-908 Warszawa

## Wzorzec roboczy energii promieniowania laserowego na bazie dostępnych urządzeń i podzespołów

Por. mgr inż. Ilona PIRÓG

Ukończyła studia na kierunku elektronika i telekomunikacja w zakresie optoelektroniki na Wydziale Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w 2006 r. Obecnie pełni funkcję starszego inżyniera zajmując się głównie pomiarami w zakresie techniki światłowodowej, laserowej oraz podczerwieni w Centralnym Wojskowym Ośrodku Metrologii w Zakładzie Kalibracji Przyrządów Pomiarowych Wielkości Fizycznych. Główne zainteresowania naukowe: metrologia w zakresie optoelektroniki oraz przyrządów geodezyjnych.

e-mail: [optol@o2.pl](mailto:optol@o2.pl)



### Streszczenie

W artykule przedstawiono propozycję mobilnego wzorca roboczego energii impulsowego promieniowania laserowego na bazie dostępnych urządzeń i podzespołów. Zaprezentowano schemat blokowy urządzenia oraz kolejne etapy doboru elementów wchodzących w skład przyszłego wzorca. Przedstawiono również wstępne badania metrologiczne jego elementów oraz analizę głównych źródeł niepewności.

**Słowa kluczowe:** wzorzec roboczy, laser impulsowy, pomiar energii laserowej.

### A working standard of laser radiation energy based on commercial devices and components

#### Abstract

This paper deals with an idea of a mobile working standard of impulse laser energy based on commercial components. The schematic diagram of a measuring system and subsequent stages of selecting standard components are presented. Evaluation of the final specification of the standard and preliminary analysis of the main sources of uncertainty have been performed. The main purpose of the designed standard is replacement of the currently used working standard of laser energy (OPTOCAL) with implementation of all functionality and maintaining technical specification. Finally, as a consequence of the performed analysis and research it has been found that there is the possibility of construction of a measuring system which meets the standards and covers all functionality provided by the current standard (OPTOCAL) working in CMCL.

**Keywords:** working standard, impulse laser, laser energy measurement.

### 1. Wstęp

W Centralnym Wojskowym Ośrodku Metrologii (CWOM) dokonuje się pomiarów metrologicznych sprzętu wojskowego wykorzystującego technikę laserową. Kalibracji podlegają między innymi: mierniki mocy i energii laserowej, dalmierze laserowe, oślepiacze, oświetlacze celu, testery dalmierzy laserowych, itp. Sprawdza się parametry sygnałów na wejściu i wyjściu urządzeń: czas trwania impulsów, amplitudę, moc i energię oraz czułość urządzenia i ich zakresy pomiarowe. Specyfika tych przyrządów wymusza zastosowanie wzorców mocy i energii laserowej o konkretnych parametrach.

Ze względu na naturalny proces starzenia się Wzorca Roboczego Energii (WRE), będącego na wyposażeniu CWOM, zaistniała potrzeba zaprojektowania i zbudowania nowego WRE, którego parametry byłyby nie gorsze niż parametry wcześniejszego wzorca, tab. 1.

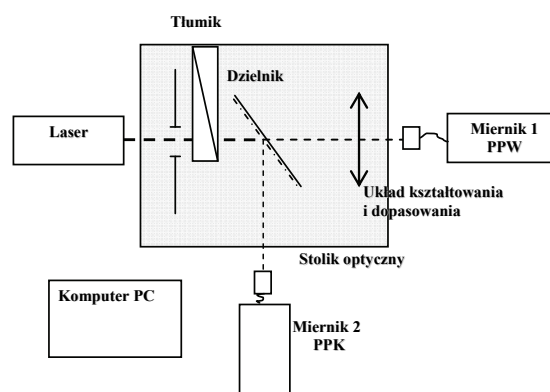
Tab. 1. Parametry techniczne WRE  
Tab. 1. Specification of the standard

Parametr	Wartość
Długość fali wzorca	(0,532; 1,064; 1,54) $\mu\text{m}$
Czas trwania generowanych impulsów: dla $\lambda = (0,532 \text{ i } 1,064) \mu\text{m}$ dla $\lambda = 1,54 \mu\text{m}$	$(6 \div 10) \cdot 10^{-9} \text{ s}$ $(1 \div 3) \cdot 10^{-3} \text{ s}$
Zakres energetyczny: - średnie poziomy: dla $\lambda = 0,532 \mu\text{m}$ dla $\lambda = (1,064 \text{ oraz } 1,54) \mu\text{m}$ - małe poziomy: dla $\lambda = 0,532; 1,064 \text{ i } 1,54 \mu\text{m}$	$\approx 5 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-2} \text{ J}$ $\approx 5 \cdot 10^{-3} \div 1,5 \cdot 10^{-1} \text{ J}$ $\approx 5 \cdot 10^{-5} \div 5 \cdot 10^{-3} \text{ J}$
Sumaryczna niepewność standardowa: - dla średnich poziomów - dla małych poziomów	$\leq 2,0 \%$ $\leq 5,0 \%$
Niepewność standardowa odtworzenia jednostki energii promieniowania	$\leq \pm 1,0 \%$
Dodatkowa niepewność standardowa temperaturowa dla WRE przy zmianach temperatury w zakresie od 283 K do 308 K	$\leq 0,1 \%$ na 1 K
Czas przygotowania wzorca	$\leq 30 \text{ min}$

Dodatkowym wymaganiem jest to aby nowy wzorzec był układem mobilnym z autonomicznym zasilaniem.

### 2. Analiza możliwości budowy wzorca z wykorzystaniem komercyjnych układów i przyrządów pomiarowych energii laserowej

Koncepcje budowy wzorca oparto na bazie komercyjnych układów i przyrządów pomiarowych. Schemat budowanego wzorca oparty jest na trzech podstawowych funkcjonalnych układach, rys. 1:



Rys. 1. Schemat budowanego wzorca  
Fig. 1. Idea of the standard - block diagram

- źródła promieniowania optycznego - lasery impulsowe,
- przetworniki pomiarowe energii promieniowania laserowego - mierniki pomiaru energii laserowej,
- układy kształtowania i dopasowania optycznego wiązki laserowej - elementy optyczne i optoelektroniczne,

Przeprowadzono analizę koncepcji budowanego wzorca na podstawie, której wybrano potrzebne komponenty.

## Lasery

W technice wojskowej wykorzystywane są przede wszystkim lasery na ciele stałym, głównie na szkle domieszkowanym neodymem. Do ich budowy wykorzystuje się kryształy granatów itrowoaluminiumowych (YAG).

W celu sprostania wymaganiom kontroli metrologicznej sprzętu zawierającego w sobie elementy techniki laserowej podjęto decyzję o budowie wzorca energii laserowej w oparciu o komercyjne lasery na ciele stałym.

Po przeanalizowaniu oferowanych produktów na rynku pod kontem ich parametrów techniczno-eksploatacyjnych oraz ekonomicznych podjęto w CWOM decyzję zakupu lasera z aktywną modulacją dobroci rezonatora Nd:YAG, model NL303HT-10-AW.

Składa się on z:

- głowicy laserowej,
- monolitycznej komory pompującej ze stopu aluminium,
- modułu zasilacza,
- wymiennika ciepła woda-powietrze.

Laser może pracować z wyzwaniem wewnętrznym oraz zewnętrznym. Posiada możliwość sterowania parametrami czasowymi lampy pompującej i Q-switch'a. Zawiera układ regulacji repetycji impulsów z częstotliwością od 10 Hz do pojedynczego impulsu. Możliwa jest również rozbudowa lasera o moduł tłumików oraz moduły przetworników na kolejne harmoniczne podstawowej długości fali promieniowania lasera. W tab. 2 podano jego specyfikację techniczną.

Tab. 2. Specyfikacja techniczna lasera NL303HT-10-AW

Tab. 2. Specification of NL303HT-10-AW laser

Parametr	Wartość
Energia impulsu	≥ 800 mJ 1064 nm ≥ 360 mJ 532 nm
Czas trwania impulsu	3-6 ns 1064 nm
Stabilność energii	< 1,0% 1064 nm < 1,5% 532 nm
Długoczasowa stabilność energii	< 1,5% 1064 nm
Szerokość linii	< 1 cm <sup>-1</sup> 1064 nm
Profil wiązki	„Top Hat” w polu bliskim, prawie Gaussowski w polu dalekim
Rozbieżność wiązki	< 0,5 mrad
Stabilność przestrzenna	± 50 μrad 1064 nm
Max. częstość repetycji	10 Hz
Średnica wiązki	~ 8 mm
Polaryzacja	Polaryzacja, > 90% 1064 nm
„Jitter” wzgl. impulsu synchronizującego	0,5 ns
Zasilanie	230 V, 50/60 Hz
Pobór mocy	< 1,8 kVA
Temp. pracy	18 – 28° C
Wilgotność	5 – 80%

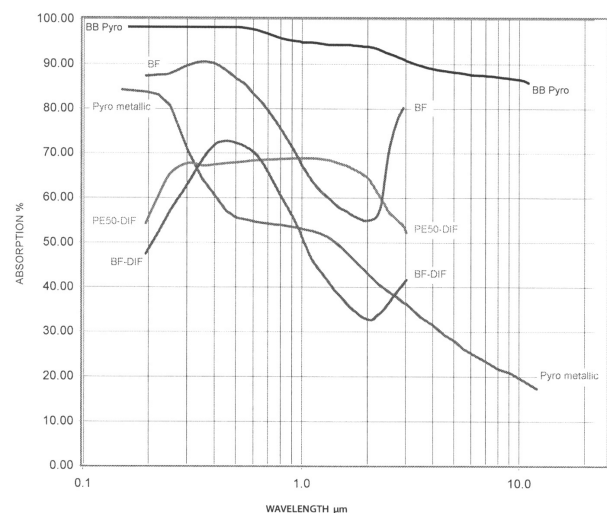
## Mierniki pomiaru energii promieniowania laserowego

Głównym elementem budowanego wzorca WRE jest przetwornik pomiarowy energii promieniowania laserowego. Funkcję tą będzie spełniał wysokiej klasy miernik mocy i energii laserowej. Jego zadaniem będzie przekazywanie jednostki energii laserowej

od wzorca jednostki energii w PTB – Niemcy do budowanego wzorca w CWOM. Miernik ten będzie również wykorzystywany do kalibracji metrologicznej pozostałych elementów wchodzących w skład WRE przed przystąpieniem do sprawdzania metrologicznego innych przyrządów pomiarowych. W procesie kalibracji wskazuje on poprawną wartość przekazywanej energii laserowej wzorca do kalibrowanego lub sprawdzanego miernika. Drugi miernik jest przyrządem pomocniczym wykorzystywanym w procesie wstępnej kalibracji WRE oraz kontrolnym w procesie kalibracji innych przyrządów.

Zastosowanie obu mierników w procesie kalibracji pozwoli na kontrolę wpływu niestabilności źródła promieniowania na wielkość błędów wartości końcowej wyniku kalibracji oraz błędów wprowadzanych przez elementy optyczne takie jak płytki światłodzielące, tłumiki i filtry optyczne. Pozwoli określić również wpływ otoczenia na wyniki pomiarów co w konsekwencji spowoduje zmniejszenie niepewności pomiarowych całego układu.

Po analizie techniczno – ekonomicznej w Centralnym Wojskowym Ośrodku Metrologii zapadła decyzja o budowie przyszłego wzorca energii laserowej w oparciu o mierniki: Laserstar dwukanałowy z dwiema głowicami pomiarowymi: 3A i 12A-P, ich charakterystykę prezentuje rys. 2, jak również 11SOLO2 z głowicą 11QE25-LP-S-MB.



Rys. 2. Charakterystyki czułości głowic stosowanych w mierniku Laserstar w zależności od długości fali promieniowania laserowego

Fig. 2. Laserstar sensor sensitivity as a function of the wavelength

Tab. 3. Parametry głowic 3A i 12A-P

Tab. 3. Specification of 3A and 12A-P power and energy sensors

Parametry	3A	12A-P
Długość fali, μm:	0.19 – 20	0.15 - 6
Średnica powierzchni czynnej φ, mm:	9,5	16
Zakres energii, J:	20μ - 2	1m - 30
Zakres mocy, W:	2μ - 3	50μ - 12
Max. średnia gęstość mocy, W/cm <sup>2</sup> :	200	50
Dokładność pomiaru:	±3%	±3%
Max. gęstość mocy, J/cm <sup>2</sup> :		
- pojedynczy impuls	0,3	10
- 10-30 Hz		1
Błąd liniowości dla pomiaru mocy:	±1,5%	±1,5%
Błąd liniowości dla pomiaru energii:	±2% ±2 μJ	±1,5% ±50 μJ

Tab. 4. Parametry głowicy 11QE25-LP-S-MB  
Tab. 4. Specification of 11QE25-LP-S-MB sensor

Długość fali, $\mu\text{m}$ :	0,19 – 20
Powierzchnia czynna, mm:	25 x 25
Zakres energii, J:	$4\mu - 3,8$
Maksymalna moc średnia, W:	5
Max. gęstość energii, $\text{J}/\text{cm}^2$ :	0,6
Max. liczba impulsów na sekundę:	300
Czułość, $\text{V}/\text{J}$ :	10
Błąd kalibracji:	$\pm 3\%$
Maksymalna szerokość impulsu, $\mu\text{s}$ :	400

Na podstawie analizy parametrów metrologicznych zdecydowano, że jako wzorcowy przetwornik pomiarowy energii promieniowania laserowego będzie użyty miernik mocy i energii laserowej Laserstar firmy OPHIR z jedną z głowic pomiarowych. Wybór głowicy uzależniają warunki zapewniające prawidłową kontrolę metrologiczną kalibrowanego miernika. Parametry głowic mierników przedstawiają tab. 3 i 4.

#### Układ kształtowania i dopasowania optycznego wiązki

Podstawowymi elementami optycznymi stanowisk laserowych wykorzystywanymi do kształtowania oraz zmiany kierunku biegu wiązki laserowej, jak również dopasowywania czoła fali do apertury wejściowej głowic pomiarowych, są:

- zwierciadła,
- soczewki,
- płytki światłodzielnice/ pryzmaty,
- tłumiki i filtry,
- diafragmy.

Elementy te powinny być selektywne, przeznaczone do pracy na długościach fali  $\lambda \approx 1,06 \mu\text{m}$  oraz  $\lambda \approx 0,9 \mu\text{m}$ . Dzięki temu nie tylko uzyskuje się optymalne dopasowanie do źródła laserowego, ale też eliminuje się zakłócenia pochodzące od tła, czy pompy laserowej.

W zależności od kalibrowanego przyrządu, pomiar jest przeprowadzany w wyznaczonych odległościach od wzorca roboczego. Odległości te nie zawsze się mieszczą w strefie bliskiej lasera WRE. Poza tą strefą wiązka jest rozbieżna o charakterze gaussowskim. W strefie dalekiej dopasowuje się czoło fali wiązki do apertury wejściowej badanego przyrządu za pomocą diafragm oraz warstwowo napyłanych zwierciadeł płaskich, wklęsłych oraz soczewek typu wklęsło – wklęsłych, płasko – wklęsłych oraz płasko-wypukłych.

Płytki światłodzielnice oraz pryzmaty wykorzystuje się do podziału wiązki promieniowania lasera na dwie lub więcej wiązek, które są kierowane na miernik kontrolny oraz kalibrowany. Wiązka może być dzielona w różnych stosunkach mocy na wyjściu. W laboratorium CWOM będą wykorzystywane najbardziej powszechne dzielniki optyczne o stałym jak również zmiennym stosunku podziału wiązki. Będzie je można łatwo zastąpić nowymi, przez co stanowisko staje się nie tylko bardziej uniwersalne, lecz również łatwe w dalszej modernizacji.

Chcąc zbudować bardziej uniwersalny wzorzec, podjęto decyzję zakupu filtrów, które umożliwiłyby kalibrację przyrządów pomiarowych nawet o zakresach pomiaru energii promieniowania laserowego rzędu  $\mu\text{J}$ . W CWOM zakupiono trzy regulowane filtry szare wraz z układem manipulacji, które będą podlegać kalibracji w ośrodku.

Kolejnymi elementami niezbędnymi w rozbudowie są mechaniczne uchwyty mocujące elementy optyczne. Ze względu na wielość standardów mocowań optyki laserowej, podjęto decyzję o ich ujednoczeniu w CWOM, dlatego też ośrodek ograniczył się

do zakupu produktów firmy STANDA w ramach dokompletowania laboratorium.

### 3. Wstępne badanie wzorca

Kolejnym etapem projektowania oraz budowy wzorca roboczego energii promieniowania laserowego na bazie dostępnych materiałów i podzespołów był pomiar parametrów metrologicznych poszczególnych elementów wchodzących w skład wzorca.

Miernik wzorcowy został poddany wzorcowaniu w PTB w Niemczech. Jako wynik kalibracji uzyskano wartość poprawną współczynnika korekcji  $f_k$  wyznaczonego dla długości fali 1064 nm, dla pojedynczego impulsu. Współczynnik korekcji  $f_k$  został określony jako stosunek zarejestrowanej mocy strumienia wiązki przez miernik wzorcowy do wartości wskazywanej przez przyrząd kalibrowany.

$$f_k = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

gdzie:  $Q$  - wartość energii odczytana ze wzorca PTB,  $A$  - wartość energii odczytana z miernika Laserstar.

Głowica 3A została wywzorcowana dla energii o wartościach 180mJ i 18 mJ, natomiast głowica 12A-P dla energii 240 mJ i 23 mJ.

W trakcie wzorcowania wiązka laserowa była skierowana na powierzchnię pomiarową głowicy badanej pod kątem prostym i skupiana na średnicy 8 mm poprzez soczewki z powłoką antyrefleksyjną.

Wartości uzyskanych współczynników korekcji  $f_k$  przedstawia tab. 5.

Niepewność rozszerzona została wyznaczona przy poziomie ufności 95% i współczynniku rozszerzenia  $k = 2$ .

Tab. 5. Wartości współczynników korekcji  $f_k$  głowic pomiarowych: 12A-P oraz 3A  
Tab. 5. Cal factors for 12A-P and 3A sensors

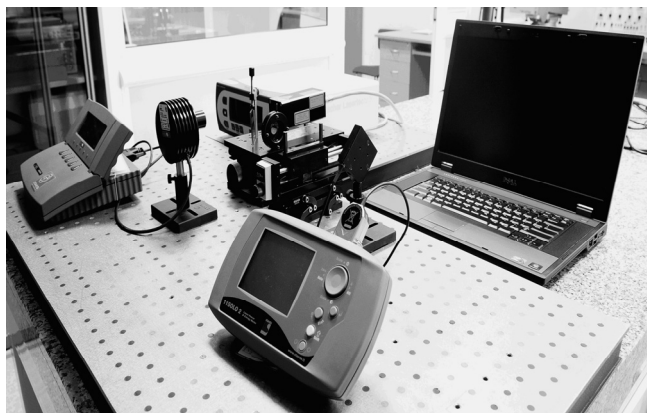
Dł. fali lasera 1064nm	Wartość energii odczytana ze wzorca	Wartość energii odczytana z miernika kalibrowanego	Współczynnik korekcji $f_k$	Niepewność rozszerzona $U(f_k), \pm$
	Q, mJ	A, mJ		
12A-P	23,0	30	0,817	0,005
	239,0	300	0,818	0,005
3A	18,5	20	1,018	0,006
	183,0	200	1,020	0,006

Wykorzystując miernik wzorcowy w laboratorium optoelektronicznym w Centralnym Wojskowym Ośrodku Metrologii przeprowadzono kalibrację miernika 11SOLO2, w trakcie której wyznaczono współczynnik poprawkowy  $CF$ , jego niepewność oraz błąd pomiaru miernika.

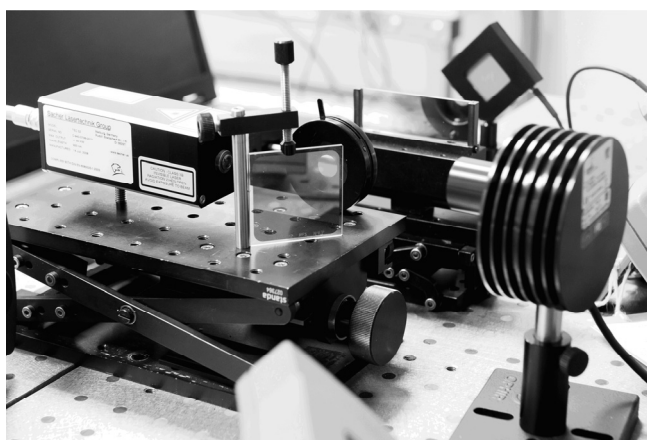
$$CF = \frac{E_{CF}}{E_M} \quad (2)$$

gdzie:  $E_{CF}$  – wartość energii odczytana ze wzorca (Laserstar) pomnożona przez współczynnik kalibracji PTB;  $E_M$  – wartość energii odczytana z miernika kalibrowanego. Niepewność rozszerzona została wyznaczona przy poziomie ufności 95% i współczynnika rozszerzenia  $k = 2$ .

Ostatnim przedsięwzięciem było badanie źródła laserowego przy pomocy wcześniej skalibrowanych ww. mierników w proponowanym wzorcu roboczym energii promieniowania laserowego, rys. 3 i rys. 4.



Rys. 3. Proponowany wzorec roboczy energii promieniowania laserowego  
Fig. 3. The proposed working standard of laser energy



Rys. 4. Elementy optyczno – mechaniczne wchodzące w skład wzorca roboczego  
Fig. 4. Optical and mechanical components of the standard

Kalibrację również przeprowadzono w laboratorium optoelektronicznym, w Centralnym Wojskowym Ośrodku Metrologii, wyznaczając współczynnik poprawkowy CF, jego niepewność oraz błąd pomiaru dla wzorca.

Idea pracy budowanego wzorca opiera się na metodzie bezpośredniego porównania przyrządu kalibrowanego z miernikiem wzorcowym. Promieniowanie laserowe przechodzi (rys.1) kolejno przez diafragmę, regulowany tłumik optyczny i pada na dzielnik optyczny, który może być regulowany bądź też mieć stały współczynnik podziału. Następnie jest rozdzielany na dwie wiązki, które są kierowane do toru pomiarowego i toru kontrolnego zakończonego sondą pomiarową miernika wzorcowego. Tuż przed głowicą pomiarową przyrządu badanego może być umieszczony jeszcze układ optyczny do kształtowania wiązki. Wszystkie ww. elementy występujące na drodze biegu wiązki laserowej są stabilnie zamocowane do przenośnej montażowej płyty sztywnej (stolik optyczny), która może być ustawiana na aktywnych elementach antywibracyjnych. Dzięki temu otrzymujemy stabilny układ wzorca, który możemy umieścić na każdej stabilnej płaszczyźnie celem przeprowadzenia kalibracji.

Sama kalibracja składa się z następujących etapów:

- wyznaczenia stosunku podziału wartości energii, emitowanej przez laser, na wartość energii padającej na głowicę pomiarową, ustawioną w torze głównym pomiaru do wartości energii padającej na głowicę pomiarową, ustawioną w torze kontrolnym;
- wyznaczenia niepewności układu znajdującego się na stoliku optycznym, gdzie głównymi źródłami wprowadzającymi nie-

pełność są: regulowany, kalibrowany tłumik optyczny oraz dzielnik optyczny;

- wyznaczenie błędu współczynnika podziału promieniowania;
- umieszczenie w torze głównym przyrządu badanego, a w torze kontrolnym miernika wzorcowego i dokonanie serii pomiarowej;
- wyznaczenie współczynnika kalibracji badanego miernika;
- wyznaczenie niepewności współczynnika kalibracji uwzględniając niepewność obu mierników, wchodzących w skład WRE, stabilność źródła oraz wpływ warunków otoczenia na przeprowadzone pomiary;
- wyznaczenie błędu pomiaru dla przyrządu kalibrowanego.

Ogólnie równanie niepewności kalibracji przy pomocy WRE przybiera postać:

$$S = \sqrt{S_z^2 + S_{MW}^2 + S_{MP}^2 + S_S^2 + S_O^2 + \delta_{PK}^2 + S_{PK}^2} \quad (3)$$

gdzie:  $S_z$  – niepewność od źródła promieniowania,  $S_{MW}$  – niepewność od miernika wzorcowego,  $S_{MP}$  – niepewność od miernika pomocniczego,  $S_O$  – niepewność od warunków otoczenia,  $\delta_{PK}$  – niepewność wynikająca z serii pomiarowej,  $S_{PK}$  – niepewność od przyrządu kalibrowanego oraz  $S_S$  – niepewność od elementów stolika optycznego:

$$S_S = \sqrt{S_T^2 + S_D^2 + S_{UK}^2 + \delta_{PS}^2} \quad (4)$$

gdzie:  $S_T$  – niepewność od regulowanego tłumika,  $S_D$  – niepewność od dzielnika optycznego,  $S_{UK}$  – niepewność od zastosowanego układu kształtowania wiązki,  $\delta_{PS}$  – niepewność wynikająca z serii pomiarowej układu zamontowanego na stoliku pomiarowym.

#### 4. Wnioski i podsumowanie

Celem niniejszej pracy była analiza możliwości budowy oraz wstępne badania wybranych elementów wzorca energii laserowej z wykorzystaniem komercyjnych układów i przyrządów pomiarowych energii laserowej w Centralnym Wojskowym Ośrodku Metrologii. W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono, że istnieje możliwość zaprojektowania, skonstruowania oraz budowy wzorca spełniającego założenia początkowe.

Wynik przeglądu oferty rynku techniki laserowej wskazał możliwość wykorzystania części wyposażenia pomiarowego Centralnego Wojskowego Ośrodka Metrologii. Umożliwi to znaczne obniżenie kosztów budowy nowego wzorca.

Kolejnym etapem prac będzie zbudowanie wzorca roboczego mocy laserowej w celu całkowitego zastąpienia obecnego WRMiEL OPTOCAL.

W chwili obecnej spójność pomiarowa jest odnoszona do PTB w Niemczech i zostanie zachowana po zakończeniu budowy i wdrożeniu nowego wzorca.

#### 5. Literatura

- [1] Piróg I.: Wzorec roboczy energii promieniowania laserowego na bazie dostępnych materiałów i podzespołów, praca końcowa studiów podyplomowych.
- [2] Dokumentacja eksploatacyjna. Opis urządzenia WRE.

otrzymano / received: 06.06.2014

przyjęto do druku / accepted: 01.08.2014

artykuł recenzowany / revised paper