

Łukasz Litwiniuk*, Dorota Sobótko, Grzegorz Szajna, Joanna Szewczul
Główny Urząd Miar, Samodzielne Laboratorium Fotometrii i Radiometrii, Warszawa

Wzorcowanie mierników nadfioletu stosowanych w NDT

Calibration of NDT UV-A meters

ABSTRACT

The paper presents an implemented at GUM calibration procedure for UV-A meters used in NDT for checking the inspection lamps. The problems related to the various types of available light sources and a way of unified approach to the testing of meters with different sensitivity curve within UV-A range is discussed. The procedure of estimation of measurement uncertainty is described and components contributing to uncertainty budget are indicated.

Keywords: irradiance, UV-A

STRESZCZENIE

W artykule omówiono opracowaną w Głównym Urzędzie Miar procedurę wzorcowania mierników UV-A stosowanych do kontrolowania lamp inspekcyjnych wykorzystywanych w badaniach nieniszczących. Przedstawiono problemy związane z różnymi rodzajami spotykanych na rynku promienników oraz metodykę pozwalającą na ujednoczone podejście do sprawdzania mierników o różnych charakterystykach czułości widmowej w obszarze UV-A. Zaprezentowano przyjętą w GUM procedurę szacowania niepewności pomiaru przy wzorcowaniu i wskazano na czynniki wnoszące swój wkład do budżetu niepewności.

Słowa kluczowe: natężenie napromienienia, promieniowanie UV-A

1. Wstęp

Wśród wielu metod detekcji wad strukturalnych w detalach wykonywanych ze stali i metali lekkich (ale również z ceramiki, tworzyw sztucznych i szkła) dla potrzeb różnych gałęzi przemysłu znajdują się i takie, które opierają się na wykorzystaniu zjawiska fluorescencji cząsteczek odpowiedniego penetranta osadzającego się w najmniejszych zagłębieniach (skazach) na powierzchni badanego elementu. Inne metody wykorzystują zjawisko fluorescencji cząsteczek specjalnych preparatów, którymi napełnia się instalacje przemysłowe poddawane w czasie badania ich szczelności. Miejsce, w którym doszło do wycieku zaczyna świecić, gdy oświetli się je lampą emitującą bezpieczne promieniowanie nadfioletowe zwane skrótowo UV-A. Definicje podawane w różnych źródłach rozmaicie ustalają granice zakresu widmowego tego promieniowania. W Polskich Normach [1,2] jest to 315 do 380 nm lub 315 do 400 nm, w publikacjach Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej [3,4] – 315 do 400 nm, w normach amerykańskich [5,6] „black light” – odpowiednik UV-A – zawiera się w przedziale 320 do 380 nm.

Wymagania zamieszczone w latach 70-tych i 80-tych ubiegłego wieku w różnych normach amerykańskich poświęconych problematyce badań nieniszczących [6, 7, 8, 9, 10], zastąpionych z czasem innymi normatywnymi publikacjami [11, 12, 13, 14], posłużyły producentom jako materiał wyjściowy do konstrukcji specjalizowanych mierników tzw. światła czarnego, czyli zakresu widmowego odpowiadającego promieniowaniu UV-A, jak też, używanych równolegle w tych samych procedurach kontroli, mierników „światła białego”, aspirujących czasem do miana luksomierzy.

Wychodząc naprzeciw potrzebom krajowych użytkowników mierników UV-A oraz mierników światła białego,

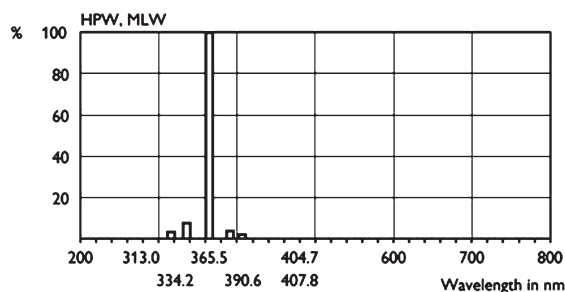
z końcem lat 90-tych ubiegłego wieku w Głównym Urzędzie Miar uruchomiono stanowisko pomiarowe do wzorcowania takich przyrządów.

2. Kalibracja mierników - teoria i praktyka

Sprawdzenie, czy miernik nadfioletu stosowany w badaniach nieniszczących spełnia swoją ważną, choć pomocniczą funkcję, wymaga przyjęcia co najmniej dwóch upraszczających założeń:

- wszystkie lampy kontrolowane przez dany miernik mają jednakową charakterystykę widmową (ten sam względny rozkład widmowy mocy promienistej);
- charakterystyka widmowa czułości detektora nadfioletu ma wyraźne maksimum w punkcie odpowiadającym prążkowi rtęci (365-366 nm) i opada do zera w okolicy punktów 320 nm i 400 nm uznawanych za granice przedziału widmowego UVA.

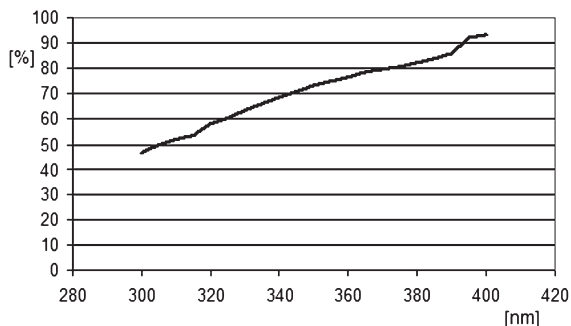
Żadne z tych założeń nie jest w praktyce spełniane. Jeśli chodzi o lampy, to używane są zarówno rtęciowe, jak i specjalnie filtrowane promienniki ksenonowe, a w ostatnich latach również lampy ledowe.



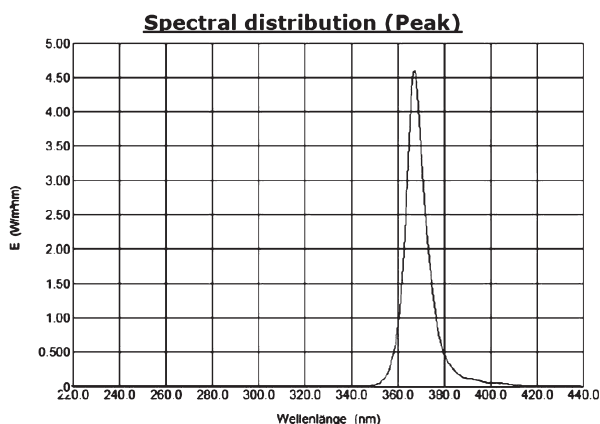
Rys. 1. Dane katalogowe lampy rtęciowej wysokoprężnej typu „blacklight”

Fig. 1. Specification of the mercury lamp „blacklight”

*Autor korespondencyjny. E-mail: radiation@gum.gov.pl

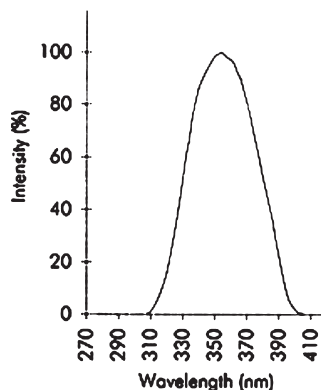


Rys. 2. Względny rozkład mocy promieniowania lampy ksenonowej krótkołukowej wysokoprężnej [7] (bez filtra)
Fig. 2. Relative spectra l power distribution of short-arc high-pressure Xenon lamp [7] without filter



Rys. 3. Względny rozkład mocy promieniowania lampy ledowej [15]
Fig. 3. Relative spectra l power distribution of LED-based lamp [15]

Również w przypadku mierników realizowane przez producentów charakterystyki czułości widmowej detektorów też potrafią się różnić znacznie między sobą (rys. 4-6).

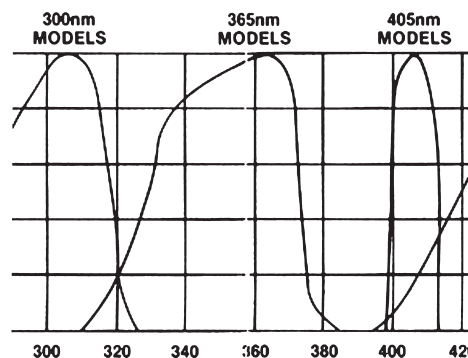


Rys. 4. Względna czułość widmowa detektora przykładowego miernika nadfioletu stosowego w badaniach nieniszczących
Fig. 4. Relative spectra l sensitivity of a detector of a NDT UV-A meter

3. Przyjęta metoda wzorcowania

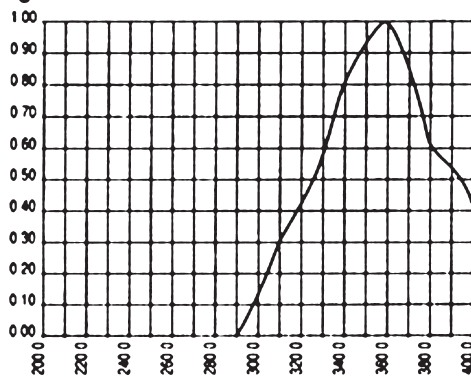
Wzorcowania mierników nadfioletu dokonuje się w GUM metodą podstawienia, wykorzystując wzorcowy miernik promieniowania (radiometr piroelektryczny), którego wskazania zostały odniesione do wzorca czułości widmowej dla

zakresu widmowego (350 – 900) nm. Schemat blokowy stanowiska do sprawdzania mierników nadfioletu stosowanych w badaniach nieniszczących przedstawiony jest na rys. 7.

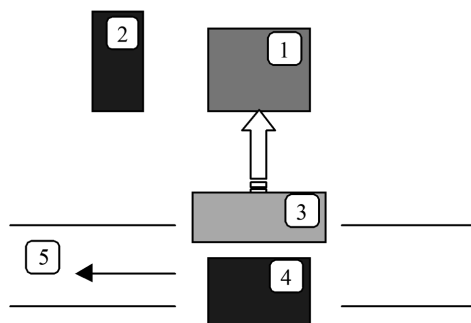


Rys. 5. Względna czułość widmowa detektora przykładowego miernika nadfioletu stosowego w badaniach nieniszczących
Fig. 5. Relative spectra l sensitivity of a detector of a NDT UV-A meter

Die typische Ansprechkurve der Sonde ist folgende:



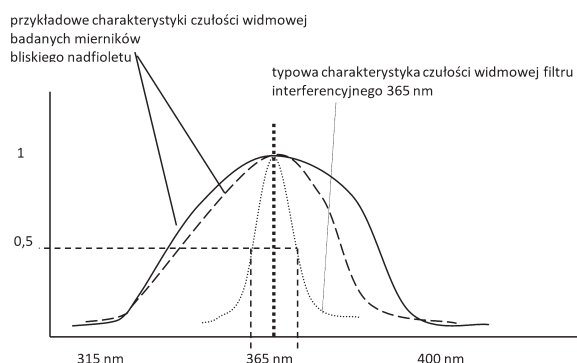
Rys. 6. Względna czułość widmowa detektora przykładowego miernika nadfioletu stosowego w badaniach nieniszczących
Fig. 6. Relative spectra l sensitivity of a detector of a NDT UV-A meter



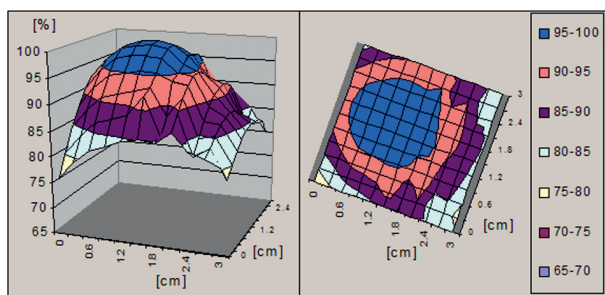
Rys. 7. Schemat blokowy stanowiska do sprawdzania mierników UVA (1 - radiometr odniesieniowy, 2 - miernik sprawdzany, 3 – optyka pomocnicza, 4 – źródło promieniowania nadfioletowego, 5 – przesuw poziomy)
Fig. 7. Block diagram of UVA calibration facility (1 – reference radiometer, 2 – meter under test, 3 – auxillary optics, 4 – UV source, 5 – tranlation stage)

Ze względu na przyjętą powszechnie tradycję stosowania lamp rtęciowych wysokoprężnych wypromieniowujących

większość energii w linii 365 nm i starań producentów do dopasowania do tej długości fali maksimum charakterystyki mierników nadfioletu stosowanych w NDT, wzorcowanie tych mierników sprowadza się do oceny dokładności wskazań badanego miernika przy oświetleniu go wiązką promieniowania o długości fali odpowiadającej temu właśnie maksimum czułości (365 nm). Zastosowane źródło promieniowania charakteryzuje się dominującym udziałem tej właśnie długości fali, ale dodatkowo wykorzystuje się filtry mające za zadanie wycięcie z widma promieniowania lampy wycinka odpowiadającego maksimum czułości widmowej badanego miernika, tak jak to pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Zasada doboru wiązki promieniowania
Fig. 8. The principle of the selection of the radiation beam



Rys. 9. Względny rozkład natężenia napromienienia na płaszczyźnie, w której umieszczone są kolejno głowice detektora badanego i odniesieniowego

Fig. 9. Relative irradiance distribution at the plane where the reference detector and detector under test are placed consecutively

Przy wzorcowaniu dokonywanym w GUM jako promienniki bliskiego nadfioletu używane są takiego samego rodzaju lampy inspekcyjne, jak te stosowane na stanowiskach NDT. Zapewnia to z jednej strony większą spójność warunków wzorcowania z warunkami panującymi w czasie eksploatacji mierników na stanowiskach pracy, ale też powoduje konieczność uwzględnienia wpływu kształtu wiązki wypromieniowywanej przez taką lampę na wartość natężenia napromienienia przyjmowanego w laboratorium za wartość odniesienia. Rozkład natężenia napromienienia w płaszczyźnie powierzchni światłoczułych detektorów jest cyklicznie monitorowany (jako zmieniający się z upływem czasu lub na skutek modyfikacji wprowadzanych w ustawieniu pomocniczego układu optycznego). Przykładowy rozkład natężenia napromienienia pokazany jest na rys. 9. Zastosowanie pomocniczej optyki pozwala na „spłaszczenie” wiązki promieniowania, a poprawka uwzględniana

w czasie porównywania wskazań mierników o różnych polach powierzchni czynnych ich detektorów nie przekracza na ogół 10% wartości sygnału notowanego na mierniku odniesienia.

4. Szacowanie niepewności pomiaru

Wzorcowanie miernika nadfioletu opiera się na porównaniu jego wskazań ze wskazaniami miernika odniesienia przy zachowaniu niezmiennych warunków naświetlania głowic obu mierników.

Rozszerzone równanie pomiaru ma postać:

$$\hat{e} = \bar{E}_w - \bar{E}_b + \mu_w + \mu_{Rw} + \mu_{Rb} + \mu_{Uw} + \mu_{Ub} + \mu_p \quad (1)$$

gdzie:

\hat{e} – estymata wartości prawdziwej błędu wskazania miernika badanego,

\bar{E}_w – średnia arytmetyczna serii pomiarów dokonanych miernikiem wzorcowym,

\bar{E}_b – średnia arytmetyczna serii pomiarów dokonanych miernikiem badanym,

μ_w – poprawka uwzględniająca niepewność pomiaru miernika wzorcowego,

μ_{Rw} – poprawka uwzględniająca rozdzielczość wskazań miernika wzorcowego,

μ_{Rb} – poprawka uwzględniająca rozdzielczość wskazań miernika badanego,

μ_{Uw} – poprawka uwzględniająca powtarzalność ustawienia miernika wzorcowego,

μ_{Ub} – poprawka uwzględniająca powtarzalność ustawienia miernika badanego,

μ_p – poprawka uwzględniająca zróżnicowanie powierzchni światłoczułych głowic obu mierników.

Równanie niepewności pomiaru ma postać:

$$u_c^2(\hat{e}) = c_1^2 u^2(\bar{E}_w) + c_2^2 u^2(\bar{E}_b) + c_3^2 u^2(\mu_w) + c_4^2 u^2(\mu_{Rw}) + c_5^2 u^2(\mu_{Rb}) + c_6^2 u^2(\mu_{Uw}) + c_7^2 u^2(\mu_{Ub}) + c_8^2 u^2(\mu_p) \quad (2)$$

gdzie:

$uc(\hat{e})$ – złożona niepewność standardowa błędu wskazania miernika badanego,

$u(\bar{E}_w)$ – niepewność standardowa pomiaru miernikiem wzorcowym,

$u(\bar{E}_b)$ – niepewność standardowa pomiaru miernikiem badanym,

$u(\mu_w)$ – niepewność standardowa wyznaczenia poprawki uwzględniającej dokładność pomiarów miernikiem wzorcowym,

$u(\mu_{Rw})$ – niepewność standardowa wyznaczenia poprawki uwzględniającej rozdzielczość wskazań miernika wzorcowego,

$u(\mu_{Rb})$ – niepewność standardowa wyznaczenia poprawki uwzględniającej rozdzielczość wskazań miernika badanego,

$u(\mu_{Uw})$ – niepewność standardowa wyznaczenia poprawki uwzględniającej powtarzalność ustawienia miernika wzorcowego,

$u(\mu_{Ub})$ – niepewność standardowa wyznaczenia poprawki uwzględniającej powtarzalność ustawienia miernika badanego,

$u(\mu_o)$ – poprawka uwzględniająca niedokładność odtworzenia jednakowej odległości głowic od źródła promieniowania

$u(\mu_p)$ – niepewność standardowa wyznaczenia poprawki uwzględniającej zróżnicowanie powierzchni światłoczułych głowic obu mierników,

c_1, \dots, c_7 – współczynniki wrażliwości

$$c_1 = \frac{\delta \tilde{e}}{\tilde{E}_w} = 1, \quad c_2 = \frac{\delta \tilde{e}}{\tilde{E}_b} = -1, \dots, \quad c_8 = \frac{\delta \tilde{e}}{\mu_p} = 1$$

Wielkości wejściowe użyte w równaniu pomiaru są charakteryzowane pod kątem ich wkładu do budżetu niepewności w sposób następujący:

E_w (E_b) - natężenie napromienienia zmierzone miernikiem wzorcowym (badanym):

po 15 minutach od włączenia miernika wzorcowego i źródła promieniowania można przystąpić do odczytywania wartości natężenia napromienienia rejestrowanego przez naprzemian oświetlane głowice miernika wzorcowego i badanego dla wybranego aktualnie wariantu osłabienia wiązki oświetlającej; dokonuje się w ten sposób n krotnego porównania wskazań. Z otrzymanych wyników pomiarów $E_{w,i}$ ($E_{b,i}$) wyznacza się wartość średnią natężenia napromienienia \bar{E}_w (\bar{E}_b). Przyjmując normalny rozkład prawdopodobieństwa oblicza się odchylenie standardowe eksperymentalne średniej $s(\bar{E}_w)$ oraz $s(\bar{E}_b)$, które przyjmuje się za estymatę niepewności standardowej średniej arytmetycznej pomiaru obu natężeń, zatem

$$s(\bar{E}_w) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{w,i} - \bar{E}_w)^2}{n(n-1)}} = u(\bar{E}_w) \quad (3)$$

oraz

$$s(\bar{E}_b) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{b,i} - \bar{E}_b)^2}{n(n-1)}} = u(\bar{E}_b) \quad (4)$$

μ_W – poprawka uwzględniająca dokładność wzorcowania miernika wzorcowego:

miernik wzorcowy ma w swoim świadectwie wzorcowania podaną względną niepewność rozszerzoną wzorcowania U_{wzgl} , którą należy wziąć pod uwagę przy konstruowaniu budżetu niepewności pomiarów dokonywanych tym miernikiem. Niepewność ta jest podawana dla współczynnika rozszerzenia $k = 2$, więc niepewność standardowa tej poprawki o wartości zerowej i rozkładzie normalnym prawdopodobieństwa może być wyliczona jako:

$$u(\mu_W) = U_{wzgl} \cdot \bar{E}_w \cdot 2 \quad (5)$$

μ_{Rw} (μ_{Rb}) – poprawka uwzględniająca rozdzielczość wskazań miernika wzorcowego (badanego):

większość obecnie produkowanych mierników UVA ma wskazanie cyfrowe wartości mierzonej. Z każdym wskazaniem związana jest poprawka wynikająca z określonej rozdzielczości wskazań. Jeżeli rozdzielczość wskazania

natężenia napromienienia odpowiada wartości A , to poprawkę tę można oszacować przy wartościach granicznych odchyień odpowiadających połowie wartości rozdzielczości, zatem równych $a = \pm A/2$. Niepewność standardowa poprawki jest obliczana metodą typu B. Przyjmując, że rozkład prawdopodobieństwa randomizowanej poprawki jest rozkładem prostokątnym oblicza się niepewność standardową poprawki korzystając z zależności:

$$u(\mu_{Rw}) = a_w / \sqrt{3} \quad (6)$$

oraz

$$u(\mu_{Rb}) = a_b / \sqrt{3} \quad (7)$$

μ_{Uw} (μ_{Ub}) – poprawka uwzględniająca powtarzalność ustawienia głowic mierników wzorcowego (badanego) względem osi wiązki promieniowania:

ustawianie głowic porównywanych mierników w osi optycznej wiązki promieniowania jest realizowane za pomocą przesuwania źródła przed ustawionymi w jednej płaszczyźnie głowicami. Zapewnienie jednakowych położeń głowic mierników jest możliwe dzięki kontrolowaniu położenia płamek laserów oświetlających głowice od przodu i z góry. Ocenia się, że ze względu na luzy mechaniczne ławy ze źródłem nadfioletu oraz grubość płamki lasera poziomego i pionowego odtwarza się to samo położenie środka każdej z głowic z tolerancją $\pm 0,5$ mm (środky głowic znajdują się wewnątrz okręgu o promieniu 0,5 mm). Z badań własnych rozkładu natężenia napromienienia w płaszczyźnie ustawienia obu głowic wynika, że odpowiada to powstawaniu różnic w rejestrowanym przez nie natężeniu mieszczących się w granicach od $\pm 0,5$ % do ± 5 % wartości aktualnie wskazywanej (każda z kilku konfiguracji osłabiania wiązki charakteryzuje się innym rozkładem powierzchniowym, a więc posiada własne granice zmienności mierzonego sygnału). Niepewność standardową poprawki można zatem obliczać również metodą typu B, przyjmując, że jej rozkład prawdopodobieństwa jest rozkładem prostokątnym i skorzystać z zależności:

$$u(\mu_{Uw}) = (0,005 \div 0,05)E_w / \sqrt{3} \quad (8)$$

oraz

$$u(\mu_{Ub}) = (0,005 \div 0,05)E_b / \sqrt{3} \quad (9)$$

μ_o - poprawka uwzględniająca niedokładność odtworzenia odległości głowic od źródła promieniowania.

Szacuje się, że niedokładność ustawienia w tej samej odległości od źródła promieniowania obu porównywanych głowic nie przekracza $\pm 0,5$ mm i chociaż w praktyce nie udało się zaobserwować zmiany sygnału, przy teoretycznym podejściu wykorzystującym prawo zmniejszania się sygnału z kwadratem odległości, przy założeniu, że odległość zmieni się z 450 mm na 450,5 mm, sygnał zmaleje o 0,2 %.

Niepewność standardową poprawki można zatem obliczać również metodą typu B, przyjmując, że jej rozkład prawdopodobieństwa jest rozkładem prostokątnym i skorzystać z zależności:

$$u(\mu_o) = 0,002E_w / \sqrt{3} \quad (10)$$

μ_p - poprawka uwzględniająca zróżnicowanie powierzchni światłoczułych głowic obu mierników. Nawet jeśli przyjąć, że idealnie odtworzy się to samo ustawienie obu głowic względem źródła promieniowania, nie można się ustrzec przed zróżnicowaniem ich wielkości (rozmiarów powierzchni światłoczułych odbiorników). Z badań własnych rozkładu natężenia napromienia w płaszczyźnie ustawienia obu głowic wynika, że można skorygować odpowiednimi współczynnikami wartość sygnału z głowicy o większej powierzchni, tak aby odpowiadał on sygnałowi rejestrowanemu przez mniejszą powierzchnię drugiej głowicy. Korekcja ta jest źródłem dodatkowego błędu mieszczącego się w granicach $\pm 2,5\%$ sygnału. Niepewność standardową poprawki można obliczać również metodą typu B, przyjmując, że jej rozkład prawdopodobieństwa jest rozkładem prostokątnym, korzystając z zależności:

$$u(\mu_p) = 0,025E_w / \sqrt{3} \quad (11)$$

5. Budżet niepewności

W tabeli 1 przedstawiono przykładowo budżet niepewności wzorcowania miernika nadfioletu stosowanego w badaniach nieniszczących (NDT) w wybranym punkcie zakresu wskazań tego miernika. Podobne obliczenia i budżety wykonuje się dla kilku punktów skali, uwzględniając zmieniające się wartości niepewności poprawek związanych z niedopasowaniem wielkości powierzchni światłoczułych porównywanych mierników i różnymi rozkładami powierzchniowymi natężenia napromienia na głowicach w zależności od wariantu osłabiania wiązki.

Tab. 1. Przykładowy budżet niepewności wzorcowania miernika
Tab. 1. Sample of calibration uncertainty budget of the meter

Symbol wielkości X_i	Estymata wielkości x_i	Niepewność standardowa, mW/cm ²	Rozkład prawdopodobieństwa	Wsp. wrażliwości c_i	Udział w niepewności złożonej $u_i(y)$, mW/cm ²
\bar{E}_w	0,612	0,0007	normalny	1	0,0007
\bar{E}_b	0,66	0,0036	normalny	-1	-0,0036
μ_w	0	0,0092	normalny	1	0,0092
μ_{Rw}	0	0,0003	prostokątny	1	0,0003
μ_{Rb}	0	0,0029	prostokątny	1	0,0029
μ_{Uw}	0	0,0018	prostokątny	1	0,0018
μ_{Ub}	0	0,0019	prostokątny	1	0,0019
μ_o	0	0,0007	prostokątny	1	0,0007
μ_p	0	0,0088	prostokątny	1	0,0088
\hat{e}	-0,048				0,0138

6. Podsumowanie

Samodzielne Laboratorium Fotometrii i Radiometrii w Głównym Urzędzie Miar od ponad 20 lat oferuje krajowym podmiotom wykorzystującym u siebie technikę NDT wzorcowanie mierników bliskiego nadfioletu (jak również "światła białego"). Przedstawione powyżej informacje stanowią podsumowanie zebranych w tym okresie doświadczeń i pokazują "od kuchni" metody służące zapewnieniu rzetelności wystawianych świadectw wzorcowania. Laboratorium GUM bierze udział w porównaniach międzynarodowych europejskiej organizacji EURAMET (Europejskie Stowarzyszenie Krajowych Instytutów Metrologicznych) poświęconych właśnie wzorcowaniu mierników UV-A. Porównania zorganizowano ze względu na rozpoznane na arenie międzynarodowej problemy z jednorodnością ocen tych mierników, dokonywanych przez różne laboratoria wzorcujące. Wyniki porównań pozwolą na skonfrontowanie polskich doświadczeń z doświadczeniami renomowanych laboratoriów europejskich i na dalsze udoskonalanie dotychczasowej procedury wzorcowania i szacowania niepewności przy wzorcowaniu mierników UV-A stosowanych w badaniach nieniszczących w Samodzielnym Laboratorium Fotometrii i Radiometrii w Głównym Urzędzie Miar.

7. Literatura/References

- [1] PN-79/T-06588, Ochrona przed promieniowaniem optycznym. Promieniowanie nadfioletowe. Nazwy, określenia, jednostki.
- [2] PN-91/E-001005, Technika świetlna. Terminologia.
- [3] CIE 17.4-1987, International Lighting Vocabulary, 4th ed.
- [4] CIE S 017/E:2011 ILV, International Lighting Vocabulary
- [5] ASTM E1209-99, Standard Test Method for Fluorescent Liquid Penetrant Examination Using the Water-Washable Process
- [6] MIL-STD-1949A, Inspection, Magnetic Particle
- [7] MIL-STD-45662A, Calibration Systems Requirements
- [8] MIL-STD-6866, Inspection, Liquid Penetrant
- [9] MIL-I-6868E, Inspection Process, Magnetic Particle
- [10] MIL-STD-271F (SH), Requirements for Nondestructive Testing Methods
- [11] ISO 10012:2003, Requirements for Measurement Processes and Measuring Equipment
- [12] NAVSEA T9074-AS-GIB-010/271, Requirements for Nondestructive Testing Methods
- [13] ASTM E1417, Standard Practice for Liquid Penetrant Testing
- [14] ASTM E1444, Standard Practice for Magnetic Particle Testing
- [15] PN-91/E-04042/02, Pomiary promieniowania optycznego. Pomiary kolorymetryczne. Iluminaty i źródła normalne.