

# Pomiar czasu ekspozycji w miernikach promieniowania rentgenowskiego

## Measurement of exposure duration in the X-ray analyser

Arkadiusz Urban, Albin Czubla, Adrian Knyziak (Główny Urząd Miar)

W artykule opisano problematykę pomiarów przedziałów czasu równych czasowi ekspozycji promieniowania X. Pokazano zależność niepewności pomiaru od metody pomiarowej oraz od sposobu działania źródła promieniowania rentgenowskiego. Przedstawiono wpływ zakresu przedziału czasu mierzonego przez miernik na błąd pomiaru.

The main idea of the article is a description of problems of X-ray exposure time measurement. The content describes two types of X-ray machines. Among the two X-ray machine types, continuous type with shutter is more suitable for long time measurement, and pulse type is better for short time measurements. The differences between mode of operation of different X-ray sources and its impact on uncertainty of measurement of exposure time are presented. It also discusses the impact of different resolution settings of device under calibration on uncertainty measurement.

**Słowa kluczowe:** pomiar czasu ekspozycji, promieniowanie X, aparat rentgenowski

**Keywords:** exposure time measurement, X-ray, X-ray machine, X-ray multimeter

### Problem czasu ekspozycji promieniowania rentgenowskiego

Właściwe i precyzyjne dawkowanie promieniowania X ma istotne znaczenie w wielu jego zastosowaniach dla człowieka i innych organizmów żywych. Używane w diagnostyce medycznej zdjęcia rentgenowskie, takie jak obrazy złamanych kończyn, wykrywanie chorób płuc czy tomografia komputerowa oraz radioterapia, wymagają precyzyjnego sterowania czasem trwania naświetlenia, od którego zależy wielkość pochłoniętej dawki. Zastosowanie promieniowania rentgenowskiego występuje również w przemyśle podczas różnych inspekcji, w których najważniejsza jest jakość obrazu badanego przedmiotu. Powszechne są systemy wykrywające zanieczyszczenia w produktach na taśmociągu linii produkcyjnej w branży kosmetycznej lub farmaceutycznej. Użycie promieni X, w specjalnych kabinach, do kontroli jakości, pozwala wykryć defekty na etapie produkcji lub zbadać stan konstrukcji w czasie eksploatacji (nieniszczący charakter badań, np. poszycia samolotów, połączenia spawane rurociągów) [1]. Ustalony czas oddziaływania promieni X, podczas takich inspekcji przedmiotów, pozwala zoptymalizować czas i koszty cyklu produkcyjnego oraz określić czas badania i poprawić bezpieczeństwo. Aby określić zgodność pomiędzy nastawionym i faktycznie

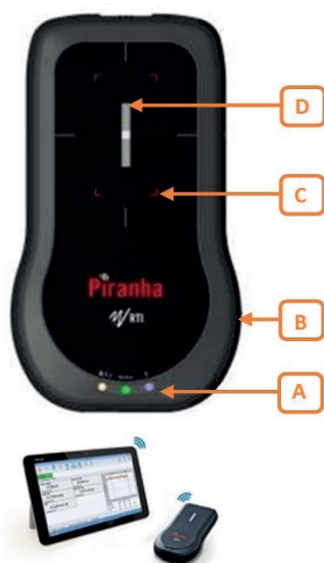
realizowanym czasem ekspozycji (naświetlenia) wiązką promieniowania X danego aparatu rentgenowskiego, należy zastosować specjalny miernik umieszczony w wiązce tego promieniowania. Wśród dostępnych na rynku mierników promieniowania X, część z nich pozwala określić różne wielkości charakterystyczne dawki promieniowania, wysłanego przez aparat podczas ekspozycji. Przyrząd taki w szybki i przejrzysty sposób jest w stanie podać podstawowe parametry dawki promieniowania rentgenowskiego, takie jak: dawka, moc dawki, czas ekspozycji, napięcie przyłożone do lampy rentgenowskiej (kVp), warstwa półchłonna HVL.

W artykule skupiono się na pomiarze przedziału czasu, równego czasowi ekspozycji, realizowanego przez te urządzenia. Aby urządzenia do pomiaru czasu naświetlenia mogły właściwie spełnić swoje funkcje, należy zapewnić im spójność pomiarową. Użytkownik musi mieć pewność, że ich wskazania są odnoszone do odpowiedniego wzorca czasu, czyli powinny być regularnie wzorcowane.

### Krótki opis i specyfikacja miernika

Mierniki używane do pomiarów czasu ekspozycji, np. typu Piranha 255 (rys. 1), zwykle nie posiadają wyprowadzeń, w postaci gniazda BNC czy innych złączy pomocniczych sygnałów elektrycznych, poddawanych

właściwej analizie, a do komunikacji używają portów: mini USB, WiFi, Bluetooth [2]. Użyty w pomiarach model miał wbudowaną komunikację przez interfejs Bluetooth, która odpowiadała za przesyłanie danych do tabletu. Wiązka promieniowania rentgenowskiego, poddawana pomiarom, powinna pokrywać przynajmniej cały obszar aktywny detektora – w przypadku miernika Piranha 255 obszar o rozmiarach 3 mm na 2 mm (segment D na rys. 1). Zalecane jest, aby wiązka ta również pokrywała cały zewnętrzny obszar pola detektora. W przypadku miernika Piranha 255 jest to obszar o rozmiarach ok. 20 mm na 40 mm (grot strzałki C, rys. 1).

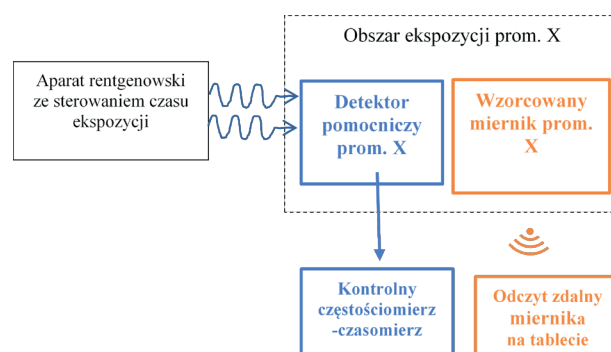


Rys. 1. Wygląd i komunikacja miernika Piranha 255 (A – wskaźniki stanu pracy, B – przyciski, C – granica zewnętrznego obszaru detektora, D – aktywny obszar detektora), w dolnej części rysunku: moduł główny i tablet sterujący

### Założenia i wymagania metody pomiarowej

Z uwagi na brak możliwości podania na miernik wzorcowego przedziału czasu, w postaci pomocniczego sygnału elektrycznego o ustalonym kształcie i czasie trwania z generatora funkcyjnego, konieczne jest wykonanie wzorcowania w rzeczywistym środowisku pracy miernika, czyli w obszarze promieniowania rentgenowskiego.

Zaproponowany układ pomiarowy został opracowany wspólnie z Samodzielnym Laboratorium Promieniowania Jonizującego GUM, które dla potrzeb wzorcowania udostępniło specjalnie skonstruowany pomocniczy detektor promieniowania X, z wyprowadzonym sygnałem elektrycznym. Laboratorium zapewniło właściwą lokalizację przestrzenną miernika i pomocniczego detektora w wiązce promieniowania X oraz zapewniło bezpieczeństwo i obsługę aparatu rentgenowskiego. Wzorcowanie polega na równoczesnym pomiarze czasu ekspozycji promieniowania X za pomocą wzorcowanego miernika oraz



Rys. 2. Schemat blokowy układu pomiarowego

pomocniczego detektora i częstościomierza-czasomierza kontrolnego, umieszczonych w tej samej wiązce promieniowania rentgenowskiego, w układzie przedstawionym na rys. 2, a następnie na porównaniu uzyskanych wyników mierzonych przedziałów czasu przez oba urządzenia. Źródłem promieniowania jest aparat rentgenowski. Mierzone czasy ekspozycji są zadawane przez urządzenie sterujące aparatem rentgenowskim, a pola detektora miernika oraz detektora pomocniczego umieszczone są w wiązce promieniowania X. Wyniki pomiaru sygnału zmierzonego przez przyrząd wzorcowany są odnoszone do odpowiadających im wyników pomiaru przedziału czasu uzyskanych z przyrządu kontrolnego, którym jest częstościomierz-czasomierz, mierzący przedział czasu równy czasowi trwania sygnału generowanego przez pomocniczy detektor promieniowania.

### Konfiguracja i właściwości stanowiska pomiarowego

W pomiarach w Samodzielnym Laboratorium Promieniowania Jonizującego w Głównym Urzędzie Miar wykorzystano aparat rentgenowski firmy YXLON (typu MG 325/45) z zewnętrznym sterowaniem czasem otwarcia przysłony (rys. 3). Aparat ten działa w trybie ciągłym, a szczelinowa emisja wiązki promieni X na tor pomiarowy



Rys. 3. Układ pomiarowy z aparatem rentgenowskim YXLON MG 325/45

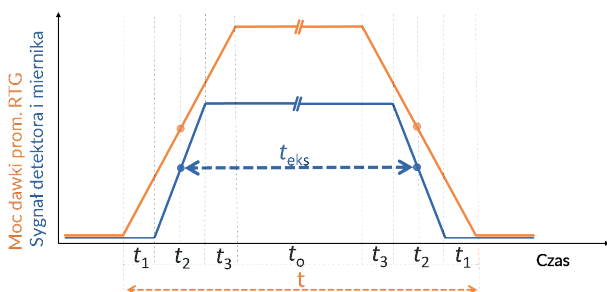
odbywa się przez otwieranie i zamykanie pionowej przysłony ołowianej, co jest realizowane ruchem poziomym.

Detektor promieniowania X stanowi czujnik fotodiodowy z warstwą scyntylatora (CsI). Pomiary wykonywane są przy centrycznym ustawieniu (w poziomie) środka pola pomiarowego wzorcowanego miernika i czujnika fotodiodowego.

Wzorcowany miernik zamontowano na ławie w odległości ok. 1 m na osi kierunku promieniowania z aparatu rentgenowskiego. W tej samej odległości przed miernikiem został umieszczony pomocniczy detektor promieniowania podający sygnał na wejścia START i STOP częstotliwościomierza-czasomierza kontrolnego.

Ze względu na ograniczoną rozdzielczość wskazań wzorcowanego miernika, wynikającą z wewnętrznej realizacji pomiaru, opartej na próbkowaniu mierzonego sygnału (analizie jego kształtu i parametrów), stabilność częstotliwości generatora podstawy czasu przyrządu kontrolnego na poziomie nie przekraczającym  $\pm 10^{-6}$  Hz/Hz, jest zwykle wystarczająca do przeprowadzenia pomiarów, bez konieczności użycia dodatkowego sygnału synchronizacji zewnętrznej. Na całkowity czas otwarcia  $t$  przysłony aparatu MG 325/45 składa się (rys. 4):

- a) czas otwierania  $t_{op}$  (ruch przysłony odsłaniający światło otworu aparatu RTG),
- b) czas pełnego otwarcia  $t_o$  (pełna ekspozycja),
- c) czas zamykania  $t_{zp}$  (w założeniu równy czasowi otwierania).



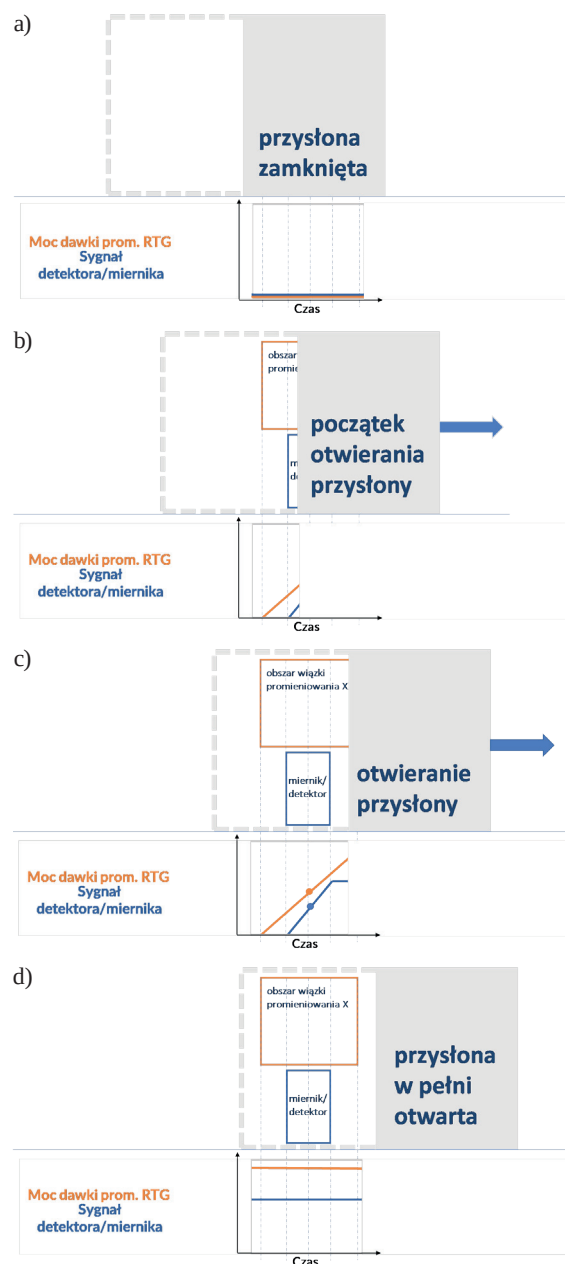
Rys. 4. Przebieg czasowy od rozpoczęcia odsłaniania wiązki promieniowania X z aparatu RTG, przez pełne otwarcia do pełnego zasłonięcia wiązki promieniowania X przysłony (zewnętrzny trapez – dynamika zmian całkowitego strumienia promieniowania X w wiązce wychodzącej z aparatu RTG, wewnętrzny trapez – dynamika zmian całkowitego strumienia promieniowania X w wiązce przechodzącej przez detektor/miernik)

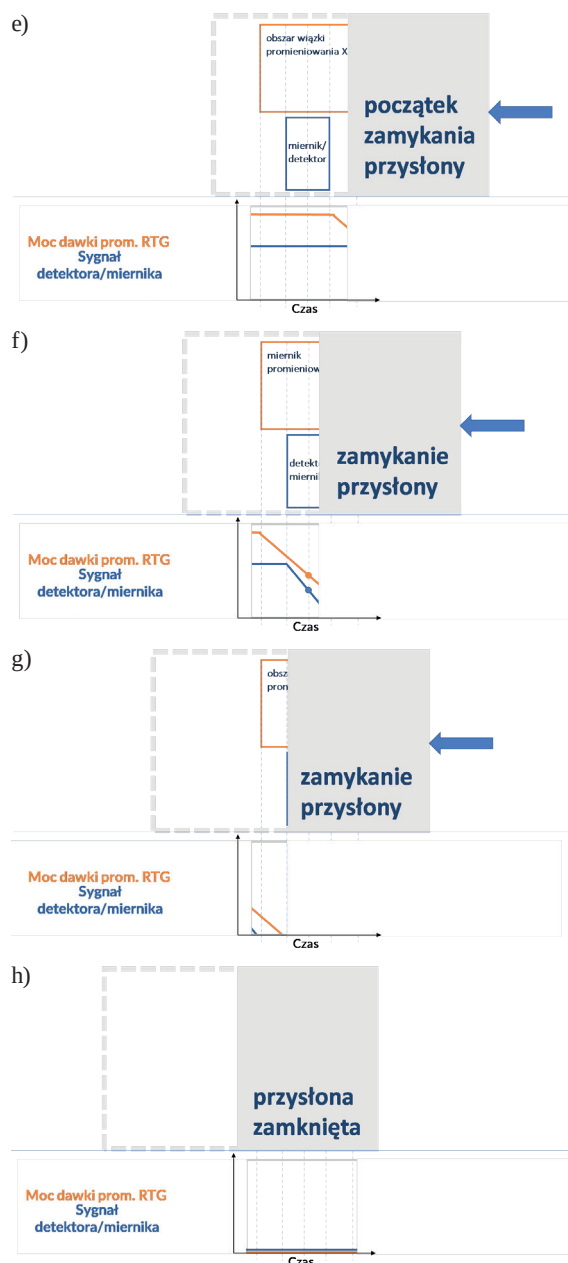
Przy czym, czas otwierania  $t_{op}$  składa się (jest sumą) z poszczególnych etapów czasowych:

- $t_1 \geq 0$  s – przedział czasu od rozpoczęcia odsłaniania światła otworu aparatu RTG do momentu pojawienia się wiązki promieniowania X na krawędzi obszaru aktywnego detektora/miernika,
- $t_2 > 0$  s – czas narastania sygnału na detektorze/mierniku (wiązka promieniowania X pokrywa coraz

większą powierzchnię obszaru aktywnego detektora/miernika),

$t_3 \geq 0$  s – przedział czasu, upływający od początku maksimum sygnału na detektorze/mierniku do momentu pełnego odsłonięcia otwarcia aparatu RTG (wiązka promieniowania X pokrywa coraz większy obszar poza obszarem aktywnym detektora/miernika). Całkowity ruch przysłony składa się z wielu etapów. Ich charakterystyczne fazy przedstawia rys. 5, od a) do h). U góry tych rysunków przedstawiono ruch przysłony w poszczególnych etapach, a na ich dole pokazano przebieg czasowy sygnału – mocy dawki promieniowania RTG (kolor pomarańczowy) oraz sygnał detektora/miernika (kolor niebieski).





Rys. 5. Wykres sygnału podczas ruchu przysłony

Uwzględniając symetrię przeciwnych działań, czyli otwieranie/zamykanie i narastanie/opadanie, dające w wyniku symetrię lustrzaną sygnałów, całkowity czas od rozpoczęcia odsłaniania otworu z wiązką promieniowania X, wychodzącą z aparatu RTG do jego pełnego zasłonięcia, można zapisać wzorem:

$$t = t_0 + 2(t_1 + t_2 + t_3) \quad (1)$$

Czas ekspozycji mierzony jest nominalnie od połowy wysokości zbocza narastającego do połowy wysokości zbocza opadającego sygnału, odbieranego przez detektor/miernik, czyli:

$$t_{\text{eks}} = t_0 + t_2 + 2t_3 \quad (2)$$

Przyjęto założenie, że obszary aktywne detektora we wzorcowanym mierniku oraz detektora pomocniczego były ustawione idealnie centralnie względem siebie w wiązce promieniowania X.

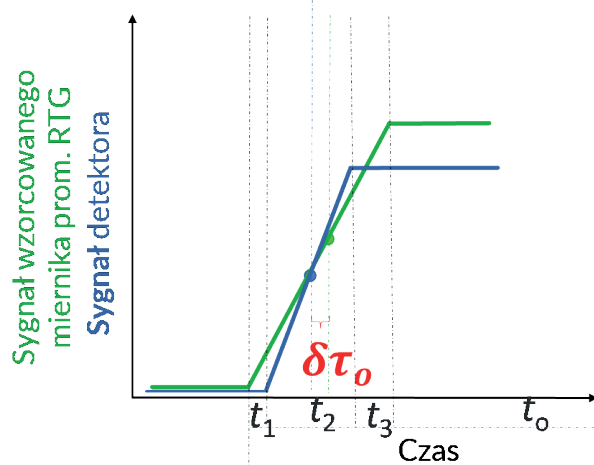
### Równanie pomiaru i analiza niepewności

Błąd pomiaru jest różnicą wartości wskazanej przez przyrząd wzorcowany  $\tau_p$  i zmierzonej  $\tau_k$  przez przyrząd kontrolny, z uwzględnieniem poprawek wynikających z ograniczonej rozdzielczości przyrządu wzorcowanego, niedoskonałości przyrządu kontrolnego i metody pomiarowej. Równanie błędu pomiaru przedstawia się następująco [3]:

$$e_\tau = \tau_p - \tau_k + \delta\tau_p - \delta\tau_k + \delta\tau_o \quad (3)$$

gdzie:

- $\tau_p$  – wskazanie przyrządu wzorcowanego (miernika),
- $\tau_k$  – wskazanie przyrządu kontrolnego (częstościomierza-czasomierza cyfrowego),
- $\delta\tau_p$  – poprawka na rozdzielczość przyrządu wzorcowanego,
- $\delta\tau_k$  – poprawka przyrządu kontrolnego,
- $\delta\tau_o$  – poprawka związana z błędem metody pomiaru.



Rys. 6. Wykres wyjaśniający składową błąd metody, związaną z występowaniem niecentryczności ustawienia miernika i detektora w polu wiązki aparatu RTG z ruchomą przysłoną

Ponieważ mierzone są niewzorcowe przedziały czasu, tzn. każdy kolejny mierzony przedział czasu w serii może mieć zbliżoną, ale jednak inną wartość, to analizie statystycznej powinny podlegać różnice cząstkowych wyników pomiaru ( $\tau_p - \tau_k$ ). Wówczas odchylenie standardowe eksperymentalne wartości średniej różnic cząstkowych wyników pomiaru jest najlepszą estymatą niepewności standardowej związanej z rozrzutem wyników pomiaru.

Przy wyznaczaniu wartości estymat i niepewności standardowych pozostałych składowych równania pomiaru należy wziąć pod uwagę, że rozdzielczość miernika może być zmienna, w zależności od zakresu pomiarowego, i powinna podlegać kontroli podczas pomiarów. Natomiast błąd metody pomiaru zależy od precyzji centralnego ustawienia obszaru aktywnego detektora wzorcowanego miernika i obszaru aktywnego detektora pomocniczego oraz dynamiki przesuwu przysłony. Należy go oszacować w oparciu o pomiary i założenia dodatkowe, np. przez pomiar czasu narastania sygnału, przy znanej szerokości obszaru aktywnego detektora pomocniczego i ocenę zakresu wartości błędu położenia (niecentryczności ustawienia) obszarów aktywnych obu detektorów. Poprawkę, związaną z błędem metody pomiaru – niecentrycznością, przedstawiono na rys. 6. Uwzględniając różne wartości przedziałów czasowych, możemy określić znak poprawki w postaci zależności:

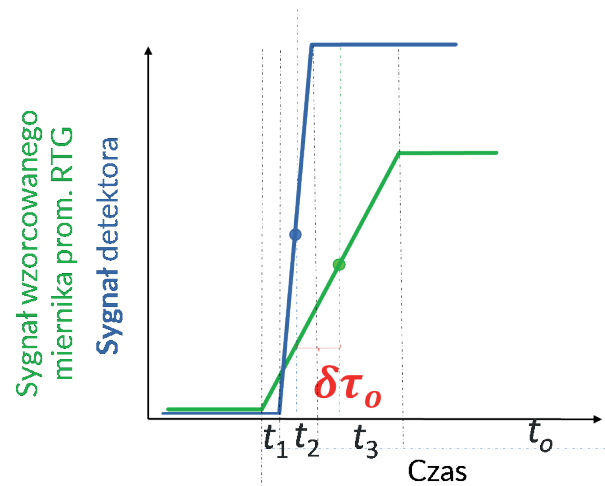
$$t_1 = t_3 \Rightarrow \delta\tau_0 \rightarrow 0 \text{ s} \quad (4)$$

$$t_1 > t_3 \Rightarrow \delta\tau_0 > 0 \text{ s} \quad (5)$$

$$t_1 < t_3 \Rightarrow \delta\tau_0 < 0 \text{ s} \quad (6)$$

Niecentryczność ustawienia obszaru aktywnego miernika i detektora powoduje wyzwalenie pomiarów przesunięte w czasie. Na podstawie szerokości przysłony i czasu narastania sygnału oszacowano średnią prędkość ruchu przysłony  $v = 3,125 \text{ m/s}$ , a niecentryczność  $\Delta x = 2 \text{ mm}$ . Stąd  $t = 2 \Delta x/v = 2 \times 0,64 \text{ ms} = 1,28 \text{ ms}$  – podwojenie czasu wyniku z cyklu otwierania i zamykania.

Kontrolny czasomierz ustawiono w ten sposób, aby poziom wyzwiania wynosił około 50 % amplitudy sygnału, przy czym wzmocnienie sygnału z detektora nie może być zbyt duże. Na rys. 7 pokazano przykład zbyt



Rys. 7. Wykres wyjaśniający składową błędności metody, związaną z wahaniami amplitudy poziomu wyzwiania detektora przy obu typach aparatu RTG (zbyt słabe lub zbyt duże wzmocnienie sygnału detektora)

dużego wzmocnienia, gdy sygnał wzrośnie do maksimum, zanim sygnał miernika oraz moc dawki osiągną stan maksymalny.

Moc dawki promieniowania w maksimum powinna być taka sama w kolejnych pomiarach. Istotne jest, że przy niezmiennym ustawieniu detektorów w wiązce promieniowania X błąd metody pomiaru ma charakter systematyczny (ma wartość stałą, ale nieznaną, a przy zmianie konfiguracji przypadkową).

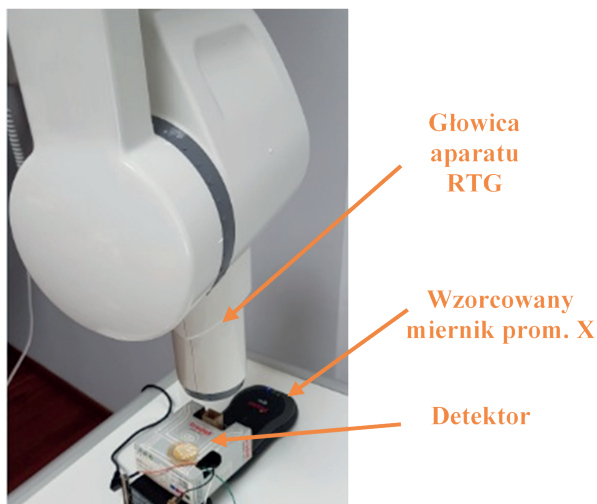
W wyniku eksperymentalnych pomiarów dla posiadanego przez GUM aparatu RTG MG325/45, w przypadku braku stosowania dodatkowych przysłon czy filtrów zmniejszających rozmiary wiązki promieniowania X, przyjęto wartość niepewności standardowej związanej z błędem metody pomiaru: 1,15 ms. W tym przypadku błąd metody pomiaru dominuje przy rozdzielczościach zmian wskazania miernika nie przekraczających 2 ms.

Tab. 1. Przykładowe zestawienie wyników pomiarów miernika dla różnych aparatów promieniowania RTG

Mierzony przedział czasu	Błąd pomiaru (ms)	Rozdzielczość przyrządu wzorcowanego (ms)	Dominujący składnik niepewności	Typ aparatu
ok. 50 ms	0,21 ± 0,25	0,01	błąd metody	CS2200
ok. 100 ms	1,28 ± 0,23	0,01	błąd metody	CS2200
ok. 1 s	-0,18 ± 0,39	0,5	rozdzielczość	CS2200
ok. 1 s	-0,08 ± 1,21	0,5	błąd metody	MG325/45
ok. 10 s	-3,53 ± 0,63	1	rozdzielczość	MG325/45
ok. 100 s	32 ± 6	10	rozdzielczość	MG325/45

MG325/45 aparat z przysłoną, błąd metody pomiarowej: 1,3 ms (niepewność standardowa)

CS2200 aparat impulsowy, błąd metody pomiarowej: 0,1 ms (niepewność standardowa)



Rys. 8. Układ pomiarowy z aparatem rentgenowskim o impulsowym trybie pracy

W celu zmniejszenia niepewności powyższego składnika, jedną z możliwości jest zastosowanie aparatu rentgenowskiego o impulsowym trybie pracy, w którym promieniowanie X pojawia się jednocześnie w całym przekroju docelowej wiązki promieniowania. Wówczas wystarczy, aby aktywne obszary obu detektorów, tj. wzorcowanego miernika i detektora pomocniczego, umieścić możliwie najbliżej w osi wiązki promieniowania, w celu zapewnienia uzyskania prawidłowych sygnałów z obu detektorów. Ograniczeniem zastosowania aparatu rentgenowskiego o impulsowym trybie pracy jest czas ekspozycji promieniowania X, zwykle do 2 s.

Łącząc obydwa rozwiązania, tzn. wykonując część pomiarów przy użyciu aparatu impulsowego, a pozostałą część pomiarów za pomocą aparatu z ruchomą przysłoną, można zmniejszyć niepewność metody pomiaru, poprzez porównanie wyników pomiaru we wspólnym obszarze pracy. Wówczas główny udział w niepewności wyników

wzorcowania miernika w zakresie pomiarów czasu ekspozycji będzie wnoszony przez wzorcowany miernik (jego rozdzielczość i stabilność).

### Wnioski końcowe

Przy wzorcowaniu urządzeń do pomiaru przedziału czasu równego czasowi ekspozycji promieniowania X należy wstępnie zapoznać się ze sposobem działania przyrządu wzorcowanego. Jeśli nie możemy podać bezpośrednio sygnałów wzorcowych odstępów czasu, należy przeprowadzić pomiary w obszarze wiązki promieniowania rentgenowskiego. W zależności od wartości mierzonego przedziału czasu należy zaprojektować układ pomiarowy z zastosowaniem odpowiedniego aparatu promieniowania X, dla czasów krótkich, wykorzystując aparat impulsowy, a dla dłuższych – aparat rentgenowski z ruchomą przysłoną.

### Literatura

- [1] Strona internetowa (<https://automatykab2b.pl/temat-miesiaca/41748-kontrola-jakosci-z-wykorzystaniem-inspekcji-rentgenowskiej>).
- [2] Piranha Reference Manual English v5, RTI Electronics AB, s. 8, 27.
- [3] Czubla A., Instrukcja wzorcowania sekundomierzy. Główny Urząd Miar 2015.
- [4] Wyznaczanie niepewności pomiaru przy wzorcowaniu. Dokument European co-operation for Accreditation EA-4/02 M:2013

Artykuł jest tekstem referatu, z poszerzoną treścią i ze zmianami redakcyjnymi, przygotowanego na LI Międzynarodową Konferencję Metrologów MKM'2019 i opublikowanego w Zeszytach Naukowych Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 66.