

WZORCOWANIE FUNKCJI POMIARU CZASU EKSPOZYCJI W MIERNIKACH PROMIENIOWANIA RENTGENOWSKIEGO

Arkadiusz URBAN¹, Albin CZUBLA¹, Adrian KNYZIAK²

1. Główny Urząd Miar, Samodzielne Laboratorium Czasu i Częstotliwości
tel.: 22 581 94 18 e-mail: arkadiusz.urban@gum.gov.pl; albin.czubla@gum.gov.pl
2. Główny Urząd Miar, Samodzielne Laboratorium Promieniowania Jonizującego
tel.: 22 581 93 58 e-mail: adrian.knyziak@gum.gov.pl

Streszczenie: 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 wielkość błędu.

Słowa kluczowe: wzorcowanie miernika promieniowania X, pomiar czasu ekspozycji, promieniowanie X, aparat rentgenowski.

1. PROBLEM CZASU EKSPOZYCJI PROMIENIOWANIA RENTGENOWSKIEGO

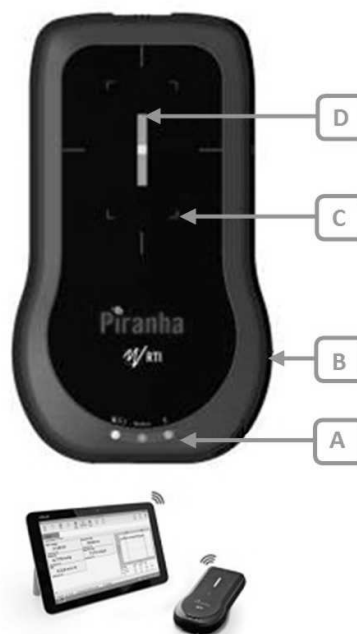
Właściwe i precyzyjne dawkowanie promieniowania X ma istotne znaczenie w wielu jego zastosowaniach dla człowieka i innych organizmów żywych. Zdjęcia rentgenowskie użyte w diagnostyce medycznej takie jak złamania kończyn, wykrywanie chorób płuc czy tomografia komputerowa oraz radioterapia wymagają precyzyjnego 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 promieniowania X. Wśród dostępnych na rynku mierników promieniowania X, część z nich pozwala określić różne wielkości charakterystyczne dawki promieniowania wysyłanego 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 półchlonna HVL.

W niniejszym artykule skupiono się na funkcji pomiaru przedziału czasu równego czasowi ekspozycji, oferowanej przez te urządzenia. Aby jednak urządzenia do pomiaru czasu naświetlenia mogły właściwie spełnić swoje funkcje, użytkownik musi mieć pewność, że ich wskazania są odniesione, z zachowaniem spójności pomiarowej, do odpowiedniego wzorca czasu, czyli powinny być regularnie wzorcowane.

2. KRÓTKI OPIS I SPECYFIKACJA MIERNIKA

Mierniki używane do pomiarów czasu ekspozycji (np. typu Piranha 255 – Rys. 1.) zwykle nie posiadają



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

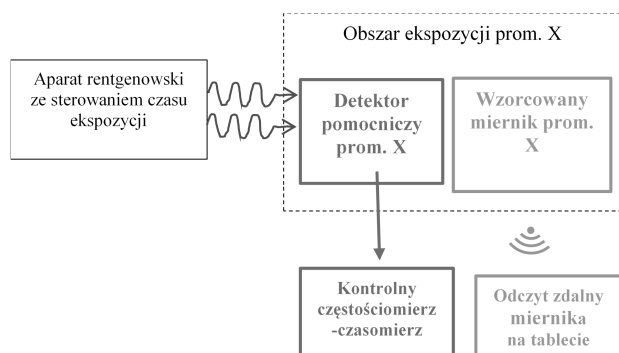
wyprowadzeń (w postaci gniazda BNC czy innych złączy) pomocniczych sygnałów elektrycznych poddawanych właściwej analizie, a do komunikacji używają portów: miniUSB, WiFi, Bluetooth. [2]. Użyty w pomiarach model miał wbudowaną komunikację przez interfejs Bluetooth, która odpowiadała za przesyłanie danych do tabletu.

Wiązka promieniowania rentgenowskiego poddawana pomiarom powinna pokrywać przynajmniej cały obszar aktywny detektora (w przypadku miernika Piranha 255 – o rozmiarach 3 mm x 21 mm (D, rysunek 1)), natomiast zalecane jest, aby również pokrywała cały zewnętrzny obszar pola detektora (w przypadku miernika Piranha 255 – o rozmiarach ok. 20 mm x 40 mm (grot strzałki C, rysunek 1)).

3. ZAŁOŻENIA I WYMAGANIA UŻYTEJ 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 udostępniło dla potrzeb wzorcowania specjalnie skonstruowany pomocniczy detektor promieniowania X, z wyprowadzonym sygnałem elektrycznym, 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 pomocniczego detektora i częstotliwościomierza-czasomierza kontrolnego umieszczonych w tej samej wiązce promieniowania X, w układzie przedstawionym na rysunku 2, a następnie na



Rys. 2. Schemat blokowy układu pomiarowego

porównaniu uzyskanych wyników mierzonych przedziałów czasu przez oba urządzenia (źródłem promieniowania jest aparat rentgenowski, mierzone czasy ekspozycji są zadawane przez urządzenie sterujące aparatem rentgenowskim, pole detektora miernika oraz detektora pomocniczego umieszczone są w wiązce promieniowania X). Wyniki pomiarów sygnału zmierzonego przez przyrząd wzorcowany są porównywane do odpowiadających im wyników pomiarów przedziału czasu uzyskanych z przyrządu kontrolnego, którym jest częstotściomierz-czasomierz, mierzący przedział czasu równy czasowi

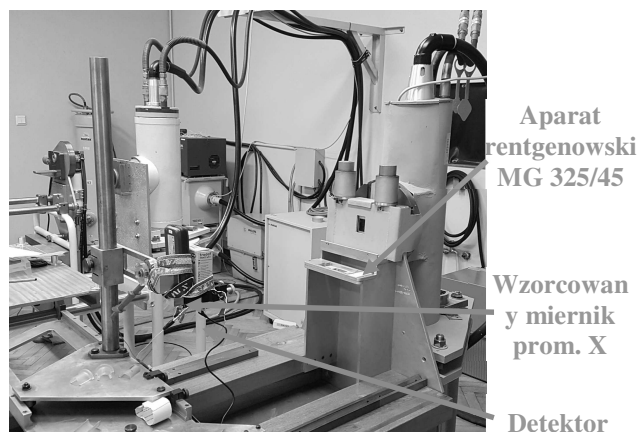
trwania sygnału generowanego przez pomocniczy detektor promieniowania.

4. 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. Aparat ten działa w trybie ciągłym, a szczelinowa emisja wiązki promieni X na tor pomiarowy odbywa się przez otwieranie i zamykanie pionowej przysłony ołowianej realizowane ruchem poziomym.

Detektor promieniowania X stanowi czujnik fotodiodowy z warstwą scyntylatora (CsI). Pomiaru 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



Rys. 3. Układ pomiarowy przy użyciu aparatu rentgenowskiego XYLON MG 325/45

podający sygnał na wejścia START i STOP częstotściomierza-czasomierza kontrolnego. Ze względu na ograniczoną rozdzielczość wskazań wzorcowanego miernika (wynikającą z wewnętrznej realizacji pomiaru opartej na próbkowaniu mierzonego sygnału i analizie jego kształtu i parametrów), stabilność częstotliwości generatora podstawy czasu przyrządu kontrolnego na poziomie nie przekraczającym $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ 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 rysunek 4):

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

Przy czym, czas otwierania t_{op} składa się (jest sumą) z poszczególnych etapów czasowych (Rys. 4):

$t_1 \geq 0$ s – przedział czasu od rozpoczęcia odsłaniania światła otworu aparatu RTG do momentu pojawienia się wiązki

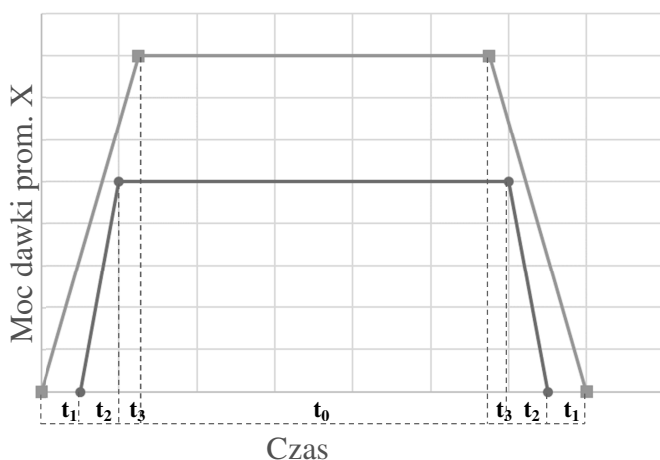
promieniowania X na krawędzi obszaru aktywnego detektora/miernika

$t_2 > 0$ 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).

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:

$$t = t_0 + 2(t_1 + t_2 + t_3)$$



Rys. 4. Przebieg czasowy od rozpoczęcia odsłaniania wiązki promieniowania X z aparatu RTG, przez pełne otwarcia do pełnego zasłonięcia wiązki promieniowania X przystony (zewnątrzny 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)

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

$$t_{eks} = t_0 + t_2 + 2t_3.$$

Powyższy wzór prowadzi do tych samych wartości nominalnych czasów ekspozycji mierzonych za pomocą wzorcowanego miernika oraz detektora pomocniczego pod warunkiem, że obszary aktywne detektora we wzorcowanym mierniku oraz detektora pomocniczego są ustawione są idealnie centralnie względem siebie w wiązce promieniowania X, i takie też założenie.

5. RÓWNANIE POMIARU I ANALIZA NIEPEWNOŚCI

Błąd pomiaru jest różnicą wartości wskazanej przez przyrząd wzorcowany τ_p i zmierzonej τ_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]:

$$\Delta \tau_w = \tau_p - \tau_k + \delta \tau_p - \delta \tau_k + \delta \tau_o$$

Poszczególne składniki równania oznaczają:

τ_p – wskazanie przyrządu wzorcowanego (miernika);

τ_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.

Ponieważ mierzone są niewzorcowe przedziały czasu, tzn. każdy kolejny mierzony przedział czasu w serii może mieć zbliżoną, ale jednak inną wartość, 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.

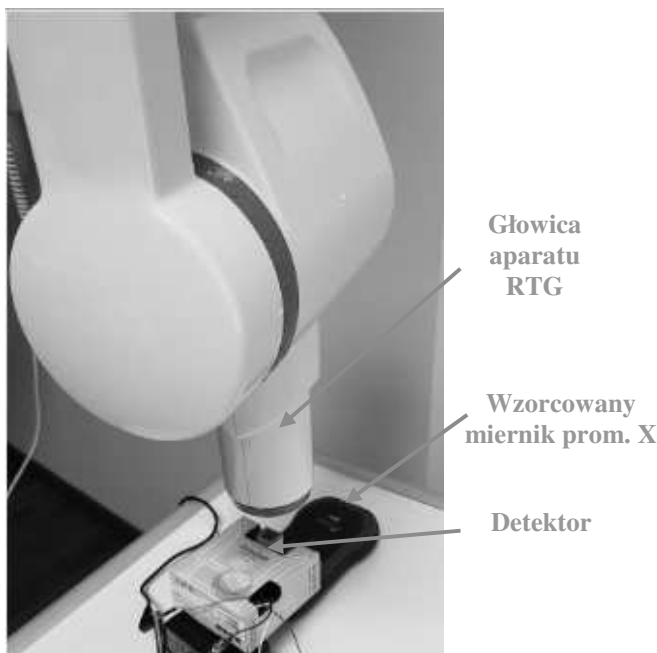
Przy wyznaczaniu wartości estymat i niepewności standardowych pozostałych składowych równania pomiaru, należy wziąć pod uwagę, że rozdzielczość miernika może być zmienna, w zależności od zakresu pomiarowego, i powinna podlegać kontroli podczas pomiarów, a błąd metody pomiaru zależy od precyzji centralnego ustawienia obszaru aktywnego detektora wzorcowanego miernika i obszaru aktywnego detektora pomocniczego oraz dynamiki przesuwu przystony, który należy 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). Istotne jest, że, przy niezmiennym ustawieniu detektorów w wiązce promieniowania X, błąd metody pomiaru ma charakter systematyczny – ma wartość stałą, ale nieznaną i, przy zmianie konfiguracji, przypadkową.

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

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 uzyskanie 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 i wówczas główny udział w niepewności wyników wzorcowania miernika w zakresie pomiarów czasu ekspozycji będzie wnoszony przez wzorcowany miernik (jego rozdzielczość i stabilność).



Rys. 5. Układ pomiarowy przy użyciu aparatu rentgenowskiego o impulsowym trybie pracy

6. 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 X. 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.

7. BIBLIOGRAFIA

1. strona internetowa (<https://automatykab2b.pl/temat-miesiaca/41748-kontrola-jakosci-z-wykorzystaniem-inspekcji-rentgenowskiej>)
2. Instrukcja użytkownika, Piranha Reference Manual English v5, RTI Electronics AB s. 8, 27
3. Czubla A.: Instrukcja wzorcowania sekundomierzy, Główny Urząd Miar 2015
4. Grupa robocza Komitetu EA ds. Laboratoriów, European co-operation for Accreditation EA-4/02 M: 2013 Wyznaczanie niepewności pomiaru przy wzorcowaniu Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration

CALIBRATION OF EXPOSURE DURATION IN THE X-RAY ANALYSER

Main idea of the article is a description of problems of X-ray exposure time measurement. 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 article discusses differences between mode of operation of different X-ray sources and its impact on uncertainty of measurement of exposure time. It also discusses impact of different resolution settings of device under calibration on uncertainty measurement.

Keywords: calibration, exposure time measurement, X-ray, X-ray machine, X-ray multimeter.