

Sławomir Mackiewicz  
IPPT PAN

## ISTOTA, ZNACZENIE ORAZ METODYKA WYZNACZANIA PARAMETRU SNR W RADIOGRAFII CYFROWEJ

### 1. Wstęp

Radiografia cyfrowa nieodwołalnie wchodzi do praktyki przemysłowej w naszym kraju. Dotyczy to zarówno starszej techniki CR wykorzystującej pamięciowe płyty luminoforowe jak też nowszej radiografii cyfrowej na panelach płaskich określanej skrótowo DR. Podstawy fizyczne oraz zasady stosowania obu technik w badaniach nieniszczących były szeroko omawiane na poprzednich konferencjach KKBR [1-4]. Istnieje także szereg norm definiujących parametry cyfrowych systemów radiograficznych oraz zasady ich stosowania w badaniach nieniszczących [5-8]. Jednym z podstawowych uregulowań zawartych w tych normach jest sposób oceny jakości obrazu radiograficznego uzyskanego w wyniku badania czyli radiogramu cyfrowego. Niezależnie od stosowanej techniki, tj. zarówno dla radiografii CR jak i DR, sposób oceny radiogramu jest praktycznie taki sam i sprowadza się do wyznaczenia dwóch podstawowych parametrów: wykrywalności wskaźnikowej IQI oraz znormalizowanej wartości stosunku sygnału do szumu  $SNR_N$ . Zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 17636-2 wymienione parametry powinny być kontrolowane obowiązkowo na każdym radiogramie produkcyjnym. Dodatkowo, na specjalnym radiogramie referencyjnym reprezentatywnym dla stosowanej techniki badania, powinien zostać wyznaczony parametr  $SR_b$  zwany podstawową rozdzielczością przestrzenną detektora.

W praktyce, największą zmianą i trudnością dla specjalistów badań radiograficznych przyzwyczajonych do oceny konwencjonalnych radiogramów błonowych jest wprowadzenie nowego parametru  $SNR_N$  w miejsce dotychczasowego pomiaru gęstości optycznej radiogramu. Pomimo faktu, że oba parametry służą w istocie do kontroli tego samego aspektu techniki radiograficznej czyli dawki promieniowania zarejestrowanej przez detektor, zarówno ich definicje jak i sposoby pomiaru są na tyle odmienne, że może to stanowić problem dla specjalistów RT przechodzących z techniki błonowej do cyfrowej.

Celem niniejszego artykułu jest kompleksowe omówienie istoty, roli i znaczenia parametru  $SNR_N$  jak również praktycznych aspektów jego stosowania w przemysłowych badaniach radiograficznych. Jest to problem o tyle istotny, że uregulowania normowe w tym zakresie są czasem dość ogólnikowe i nieprecyzyjne co może prowadzić do różnic w ocenie poprawności wykonania radiogramów przez zainteresowane strony i w konsekwencji powodować problemy przy odbiorze wyników badań. Dogłębne zrozumienie istoty i

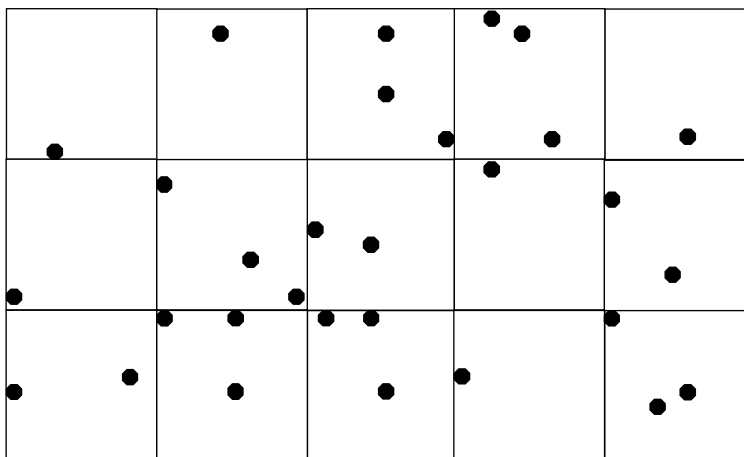
znaczenia parametru  $SNR_N$  umożliwi także lepszą kontrolę nad wieloma innymi aspektami techniki radiograficznej takimi jak optymalny dobór czasu ekspozycji, minimalizacja „efektu duchów” czy poprawność przeprowadzenia procedur kalibracyjnych.

## 2. Podstawowa idea i definicja parametru SNR

Rozważmy na początek wyidealizowaną ekspozycję radiograficzną, w której idealny detektor naświetlany jest idealnie jednorodną wiązką promieniowania. Załóżmy, że wszystkie piksele takiego detektora są jednakowej wielkości i wykazują identyczną czułość na promieniowanie. Załóżmy dalej, że wartości sygnału (GV) odczytywane z każdego piksela są wprost proporcjonalne do liczby fotonów promieniowania, które padły na dany piksel podczas ekspozycji. Zakładamy także, że detektor posiada idealną elektronikę, która nie wnosi żadnych szumów czy zakłóceń do tworzonego obrazu radiograficznego. Pytanie brzmi jaki będzie obraz radiograficzny uzyskany przez taki idealny układ źródło-detektor.

Okazuje się, że nawet w takim idealnym układzie uzyskany radiogram cyfrowy wcale nie będzie idealnie jednorodny, a wartości GV odczytywane z poszczególnych pikseli będą różnić się między sobą. Przyczyną tego zjawiska są fundamentalne prawa fizyki związane z kwantową naturą promieniowania elektromagnetycznego. W uproszczeniu można powiedzieć że promieniowanie rozchodzi się i podlega detekcji jedynie w małych ale skończonych porcjach energii zwanych kwantami lub fotonami.

Proces rejestracji promieniowania przez idealny detektor można wyobrazić sobie jako deszcz fotonów padających na płaszczyznę podzieloną na kwadratowe piksele (patrz rys. 1). Załóżmy dla przykładu, że natężenie wiązki promieniowania jest takie, że w czasie ekspozycji na powierzchnię jednego piksela przypada średnio dwa fotony. Nie oznacza to jednak, że na każdym pikselu faktycznie zostaną zarejestrowane dwa fotony. Komputerowa symulacja takiego stochastycznego (całkowicie przypadkowego) procesu pokazuje, że tylko niektóre z pikseli dostaną po 2 fotony wiele innych dostanie po 1 lub 3 fotony, a niektóre mogą nie zarejestrować żadnego.

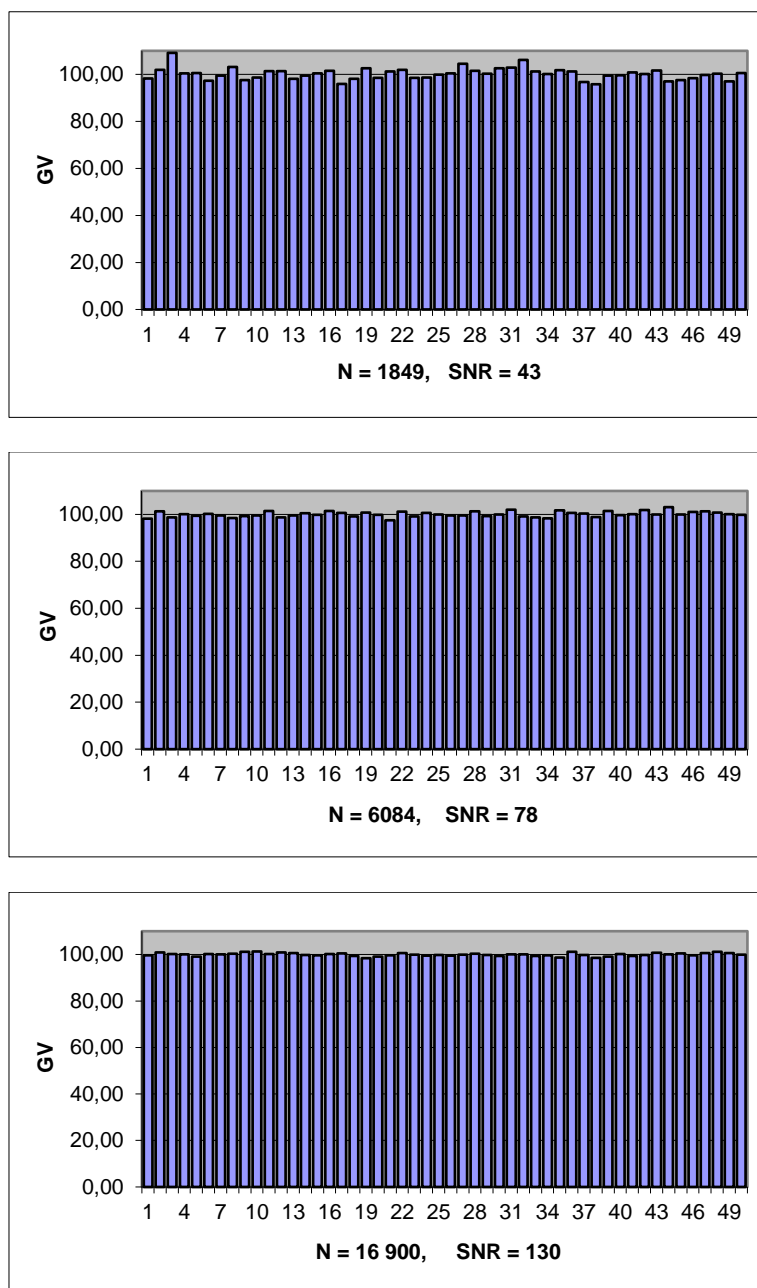


Rys. 1. Statystyczny rozkład detekcji „deszczu fotonów” na idealnym detektorze przy średniej liczbie 2 fotonów przypadających na jeden piksel detektora

Oczywiście w praktyce natężenia wiązek promieniowania są znacznie większe i na każdy piksel detektora przypadają tysiące padających fotonów, jednak istota problemu pozostaje bez zmian – liczba fotonów rejestrowanych przez poszczególne piksele podlega

będzie fluktuacjom statystycznym a uzyskiwany obraz radiograficzny nie będzie idealnie jednorodny.

Przykładowe rozkłady wartości GV uzyskane na idealnym detektorze przy znacznie większej i bardziej realistycznej liczbie fotonów  $N$  przypadającej na pojedynczy piksel pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Rozkłady wartości pikseli GV uzyskane na idealnym detektorze dla różnych ekspozycji wyrażonych średnią liczbą fotonów padających na powierzchnię pojedynczego piksela -  $N$ .

Jak wynika z pokazanych symulacji relatywna wielkość fluktuacji wartości GV na przykładowej linii pikseli maleje wraz ze wzrostem ekspozycji określonym średnią liczbą fotonów przypadających na jeden piksel.

Wartość tego typu fluktuacji obserwowanych na jednorodnie naświetlonych radiogramach cyfrowych można opisać matematycznie przez wprowadzenie parametru SNR zdefiniowanego jako stosunek wartości średniej sygnału pikseli -  $GV$  do jego odchylenia standardowego -  $\sigma_{GV}$ , czyli w skrócie jako stosunku sygnału do szumu:

$$SNR = \frac{\overline{GV}}{\sigma_{GV}} \quad (1)$$

Wartości SNR obliczone dla symulowanych rozkładów wartości  $GV$  pokazanych na rys. 2 wynoszą odpowiednio 43, 78 i 130.

W przypadku diskutowanego przez nas idealnego detektora wartość parametru SNR radiogramu można obliczyć teoretycznie wychodząc z rozkładu Poissona opisującego statystyczny rozkład liczby fotonów rejestrowanych na pojedynczym pikselu [9]. Odpowiedni wzór końcowy ma postać:

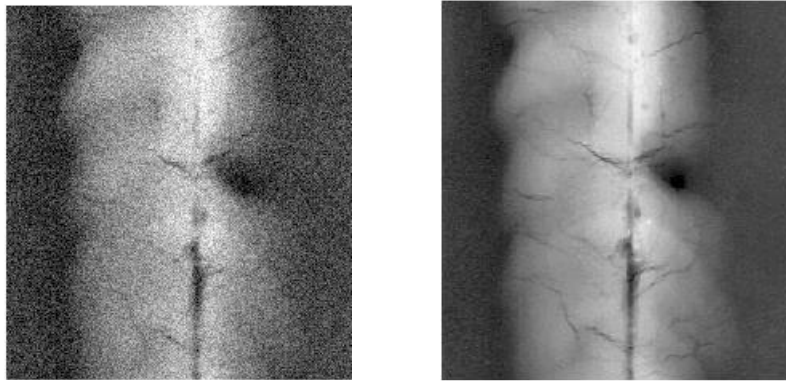
$$SNR = \sqrt{N} \quad (2)$$

gdzie  $N$  oznacza średnią liczbę fotonów padających na powierzchnię pojedynczego piksela.

Ze wzoru (2) wynika bardzo ważny wniosek, w dużym stopniu prawdziwy również dla rzeczywistych detektorów, że stosunek sygnał-szum SNR radiogramu cyfrowego jest wprost proporcjonalny do pierwiastka kwadratowego z ekspozycji. Oczywiście w przypadku rzeczywistych detektorów, oprócz rozważanego tutaj szumu kwantowego, dochodzą inne źródła szumów związane z detekcją i przetwarzaniem elektronicznym rejestrowanych sygnałów oraz niejednorodnością pikseli detektora. Z reguły jednak szумы te są znacznie mniejsze niż rozważany tutaj szum kwantowy.

Wzór (2) wiążący SNR obrazu cyfrowego z liczbą fotonów promieniowania padających podczas ekspozycji na pojedynczy piksel detektora został wyprowadzony przy założeniu detektora idealnego rejestrującego wszystkie padające fotony. W przypadku rzeczywistych detektorów, takich jak płyty obrazowe czy panele płaskie, jedynie pewna, czasem niewielka część padających fotonów zostaje zaabsorbowana przez detektor i zamieniona na sygnał piksela. Ta kluczowa właściwość detektora dotycząca efektywności zamiany „padających fotonów” na „rejestrowane fotony” nazywa się kwantową efektywnością detekcji i oznaczana symbolem DQE (od *Detective Quantum Efficiency*). Wartości DQE najlepszych produkowanych obecnie detektorów promieniowania rentgenowskiego dochodzą do 0,7 przy optymalnie dobranej energii promieniowania. Oznacza to, że ok. 70% fotonów padających na detektor zostaje w nim zarejestrowanych i efektywnie zamienionych na sygnały pikseli.

Praktyczny wpływ parametru SNR na obraz radiograficzny pokazano na przykładzie odcinka spoiny prześwietlonego tym samym systemem radiograficznym przy dwóch różnych czasach ekspozycji. Radiogram po lewej stronie wykonany został przy krótkim czasie ekspozycji i charakteryzuje się niskim SNR, natomiast radiogram po prawej był naświetlany wielokrotnie dłużej i wykazuje wysoki SNR. Oprócz efektu czysto estetycznego na radiogramie o wysokim SNR widoczna jest znacznie większa liczba szczegółów (np. drobnych pęknięć i porów) niż na radiogramie silnie zaszumionym.



Rys. 3. Dwa radiogramy cyfrowe tego samego odcinka sploty różniące się wartościami stosunku sygnał-szum SNR.

### 3. Normalizacja SNR

Zdefiniowany powyżej parametr SNR prawidłowo opisuje „zaszumienie” obrazu radiograficznego obserwowane przez oceniającego. Dlaczego więc normy dotyczące radiografii cyfrowej wprowadzają tzw. znormalizowany SNR i dopiero ten parametr traktują jako podstawowy wyznacznik jakości radiogramu? Aby odpowiedzieć na to pytanie przeanalizujemy dokładniej definicję znormalizowanego stosunku sygnał-szum -  $SNR_N$ , która ma postać:

$$SNR_N = SNR \frac{88,6}{SR_b} \quad (3)$$

gdzie  $SR_b$  oznacza podstawową rozdzielczość przestrzenną detektora wyznaczoną zgodnie z normą za pomocą wskaźnika pręcikowego typu *Duplex*.

Normalizacja SNR oznacza pomnożenie tego parametru przez stosunek referencyjnej rozdzielczości przestrzennej - 88,6  $\mu\text{m}$  do podstawowej rozdzielczości przestrzennej  $SR_b$  wyznaczonej dla stosowanego detektora. Wartość 88,6  $\mu\text{m}$  wynika z uwarunkowań czysto historycznych polegających na tym, że w radiografii błonowej pomiaru ziarnistości dokonywano za pomocą densytometru z okrągłą aperturą o średnicy 100  $\mu\text{m}$ , której powierzchnia dokładnie odpowiada kwadratowemu pikselowi o długości boku 88,6  $\mu\text{m}$ . Istotne znaczenie ma tutaj jednak fakt, że wartość SNR dzielimy przez rzeczywistą rozdzielczość przestrzenną detektora  $SR_b$ . Oznacza to, że znormalizowany  $SNR_N$  radiogramu zależy nie tylko od stosunku sygnał-szum bezpośrednio obserwowanego na jego obrazie lecz również od rozdzielczości przestrzennej detektora, który został użyty do jego wykonania.

Istota problemu tkwi w tym, że  $SNR_N$  ma być miarą wykrywalności wskazań drobnych wad nie zaś jedynie prostą metryką zaszumienia obrazu radiograficznego. Chodzi o to, że systemy o słabej rozdzielczości przestrzennej (o dużym  $SR_b$ ) pokazują małe wady (np. drobne pęknięcia) jako bardziej rozmyte i mniej kontrastowe niż systemy o wysokiej rozdzielczości. Tym samym, aby zapewnić porównywalną wykrywalność takich wskazań muszą one zapewnić obraz o odpowiednio wyższym stosunku sygnału do szumu niż systemy wysokorozdzielcze. Poprzez normalizację kompensowana jest utrata kontrastu drobnych wskazań związana z gorszą rozdzielczością systemu.

Należy podkreślić, że podstawowa rozdzielczość przestrzenna  $SR_b$  występująca we wzorze (3) jest charakterystyką detektora i powinna być wyznaczona na specjalnym

radiogramie referencyjnym wykonanym ściśle według wymagań zawartych w załączniku C normy PN-EN ISO 17636-2. Oznacza to w szczególności, że (o ile tylko nie stosujemy techniki z powiększeniem geometrycznym) wskaźnik typu *Duplex* powinien być umieszczony bezpośrednio na powierzchni detektora pod kątem 2° do 5° względem wierszy lub kolumn matrycy detektora.

Radiogram referencyjny wykonuje się bez umieszczania jakiegokolwiek obiektu pomiędzy źródłem a detektorem. Odległość źródło-detektor powinna wynosić  $100 \pm 5$  cm zaś parametry źródła promieniowania należy dobrać odpowiednio do rodzaju techniki oraz obiektów, które mają być przedmiotem badań. Przykładowo, jeśli przy użyciu lampy rentgenowskiej mają być badane elementy stalowe o grubości penetracji mniejszej lub równej od 20 mm należy zastosować napięcie lampy równe 160 kV oraz filtr Cu o grubości 1 mm. Dla analogicznych badań elementów stalowych o grubości penetracji powyżej 20 mm należy zastosować napięcie lampy 220 kV oraz filtr Cu o grubości 2 mm. W przypadku badań prowadzonych przy użyciu źródeł izotopowych należy zastosować ten sam typ źródła oraz filtr dobrany zgodnie z wymaganiami normy.

Uzyskany radiogram referencyjny ze wskaźnikiem typu *Duplex* powinien charakteryzować się średnią wartością GV przewyższającą 50% zakresu detektora, tj. dla detektorów 16-bitowych średnia wartość GV powinna być wyższa niż 32 768, zaś dla detektorów 14 bitowych wyższa niż 8 192. Dodatkowo, SNR (nieznormalizowany) takiego radiogramu powinien być wyższy od 100 dla systemów o wielkości piksela większej lub równej od 80  $\mu\text{m}$  lub wyższy od 70 dla systemów o wielkości piksela poniżej 80  $\mu\text{m}$ .

Jak widać warunki wykonania radiogramu referencyjnego są bardzo szczegółowo określone i muszą być dokładnie przestrzegane aby zapewnić prawidłowe, zgodne z normą, wyznaczenie wartości parametru  $SR_b$ . Największą trudność stanowi w praktyce jednoczesne osiągnięcie wymaganej wartości GV oraz SNR (nieznormalizowanego). Dla mniej doświadczonych operatorów wykonanie prawidłowego radiogramu referencyjnego może wymagać wykonania wielu ekspozycji metodą prób i błędów. Znacznie efektywniejszym rozwiązaniem jest zastosowanie profesjonalnego kalkulatora ekspozycji do radiografii cyfrowej jak np. *Rentex DR* (dla badań prowadzonych przy użyciu lamp rentgenowskich) lub *Gamex DR* (dla badań prowadzonych przy użyciu źródeł izotopowych) [10]. Ponieważ kalkulatory takie przewidują standardowo stosowanie znormalizowanego parametru  $SNR_N$ , w przypadku planowania ekspozycji radiogramu referencyjnego (który wyjątkowo wymaga posługiwania się nieznormalizowanym SNR) należy zastosować pewien trik polegający na wpisaniu do tabeli parametrów detektora wartości  $SR_b$  równej 88,6  $\mu\text{m}$ . Spowoduje to, że parametr wprowadzany do programu w polu  $SNR_N$  będzie w istocie zwykłym nieznormalizowanym SNR. Oczywiście należy pamiętać aby po wykonaniu radiogramu referencyjnego wprowadzić do programu prawidłową wartość  $SR_b$  detektora wyznaczoną z tego właśnie radiogramu.

Należy podkreślić kluczowe znaczenie prawidłowego wykonania radiogramu referencyjnego dla całego systemu nadzoru nad jakością badań radiograficznych prowadzonych na określonym projekcie. W przypadku nieprawidłowego, niezgodnego z normą, wyznaczenia wartości  $SR_b$  błędny będzie nie tylko sam ten parametr ale także wszystkie wartości znormalizowanego  $SNR_N$  wyznaczone dla radiogramów produkcyjnych. W skrajnym przypadku może to oznaczać unieważnienie wyników wszystkich badań radiograficznych ocenionych przy użyciu błędnie wyznaczonego  $SR_b$ .

#### 4. Metodyka wyznaczania parametru $SNR_N$ radiogramów produkcyjnych

Jak wspomniano zgodnie z wymaganiami aktualnych norm parametr  $SNR_N$  powinien być mierzony i porównywany z wymaganiami odnośnie wartości minimalnej na każdym radiogramie produkcyjnym. W praktyce pojawia się tutaj problem dotyczący sposobu w jaki należy wyznaczać ten parametr tak aby uniezależnić wyznaczaną wartość od niejednorodności radiogramu związanych z niejednorodnością prześwietlanego elementu. Gdyby do praktycznego wyznaczania SNR zastosować jego podstawową definicję daną wzorem (1) to wyznaczana wartość SNR byłaby z reguły znacząco zaniżona wskutek wpływu niejednorodności prześwietlanego obiektu. Wynikają one z nieuchronnej obecności w nim drobnych wad, wtrąceń, wżerów korozyjnych a nawet rys na powierzchni. W praktyce rzadko udaje się znaleźć na radiogramie produkcyjnym obszar na tyle jednorodny, że można wyznaczyć na nim „rzeczywisty” SNR niezakłócony wpływem prześwietlanego obiektu.

Twórcy norm uwzględnili ten problem wprowadzając w celu wyznaczania SNR radiogramów produkcyjnych specjalną procedurę statystyczną eliminującą w znacznym stopniu (choć nie całkowicie) wpływ niejednorodności prześwietlanego materiału. Procedura ta została szczegółowo opisana zarówno w normach europejskich [5] jak i amerykańskich [8]. Powinna ona zostać starannie zaimplementowana przez producentów oprogramowania służącego do oceny radiogramów cyfrowych. Poniżej przedstawiono podstawowe założenia tej procedury ze szczególnym uwzględnieniem aspektów ważnych dla końcowego użytkownika.

W pierwszym rzędzie oceniający powinien wybrać na radiogramie tzw. obszar ROI (*Region Of Interest*) o szerokości dokładnie 20 i długości co najmniej 55 pikseli, na którym wykonana zostanie analiza statystyczna. Ważne jest aby wyznaczyć obszar ROI w możliwie jednorodnie naświetlonym miejscu radiogramu. Należy pilnować aby zdefiniowana szerokość obszaru ROI wynosiła dokładnie 20 pikseli podczas gdy jego długość może być równa lub większa od 55 pikseli. W przypadku radiogramów złączy spawanych zaleca się wybieranie obszaru ROI w obszarze materiału rodzimego w pobliżu wskaźnika jakości obrazu IQI. Chociaż jest to formalnie dopuszczalne zaleca się unikać definiowania obszaru ROI na licu spoiny.

Moduł statystyczny programu służącego do oceny radiogramów wylicza  $SNR_N$  w następujący sposób:

- Obszar ROI dzieli na zespół 55 (lub więcej) linii o długości 20 pikseli każda. Dla każdej linii z osobna obliczana jest wartość średnia pikseli  $GV_i$  oraz jej odchylenie standardowe  $\sigma_i$  gdzie indeks „i” oznacza kolejny numer linii.
- Wartość odchylenia standardowego każdej linii mnożona jest przez współczynnik 1,0179 w celu korekcji statystycznej związanej ze stosowaniem procedury medianowej. Wartość tego współczynnika zależy od liczby pikseli w linii, dlatego właśnie szerokość obszaru ROI musi wynosić dokładnie 20 pikseli.
- Program oblicza wynikową wartość sygnału pikseli obszaru ROI jako medianę wartości średnich  $GV_i$  obliczonych dla 55 linii.
- Program oblicza wynikową wartość odchylenia standardowego dla obszaru ROI jako medianę skorygowanych odchyleń standardowych  $\sigma_{i-corr}$  obliczonych dla 55 linii.
- Na podstawie wynikowych wartości sygnału piksela oraz odchylenia standardowego wyliczana jest wartość stosunku sygnału do szumu czyli nieznormalizowany SNR dla obszaru ROI.

- Ze wzoru (3) wyliczana jest wartość znormalizowanego  $SNR_N$  przy czym użytkownik musi wprowadzić do programu wyznaczoną na radiogramie referencyjnym prawidłową wartość parametru  $SR_b$

Dzięki podziałowi obszaru ROI na szereg linii oraz wyznaczaniu wartości medianowych zamiast wartości średnich opisana procedura statystyczna eliminuje wpływ skrajnych wartości  $GV_i$  oraz odchyłeń standardowych  $\sigma_i$  na ostateczny wynik pomiaru SNR. Zakłada się tutaj, że takie skrajne wartości są spowodowane bardziej niejednorodnością prześwietlanego obiektu niż naturalnymi fluktuacjami statystycznymi w liczbie absorbowanych fotonów. Praktyczną stosowanie opisanej procedury przeanalizujemy w następnym rozdziale.

## **5. Aspekty praktyczne pomiarów $SNR_N$**

Podstawowym warunkiem prawidłowego wyznaczenia parametru  $SNR_N$  ocenianego radiogramu jest uprzednie, zgodne z normą, wyznaczenie podstawowej rozdzielczości przestrzennej  $SR_b$  stosowanego detektora. Często spotykanym błędem jest wyznaczanie  $SR_b$  bezpośrednio na zwykłym radiogramie produkcyjnym przy wykorzystaniu uwidocznionego na nim wskaźnika typu Duplex. Postępowanie takie stanowi nie tylko formalną niezgodność z normami lecz faktycznie może prowadzić do wyznaczenia nieprawidłowej wartości  $SR_b$  stosowanego detektora. Wynika to z faktu, że obecność prześwietlanego obiektu, i to niezależnie od tego czy wskaźnik Duplex umieścimy od strony źródła czy też od strony detektora, prowadzi do powstania silnego promieniowania rozproszonego, które obniża kontrast i ostrość obrazu wskaźnika na radiogramie i w konsekwencji do zmniejszenia liczby par pręcików ocenianych jako rozdzielone 20% dołkiem intensywności. W rezultacie uzyskamy wyższą wartość  $SR_b$  niż gdyby była ona wyznaczona na prawidłowo wykonanym radiogramie referencyjnym.

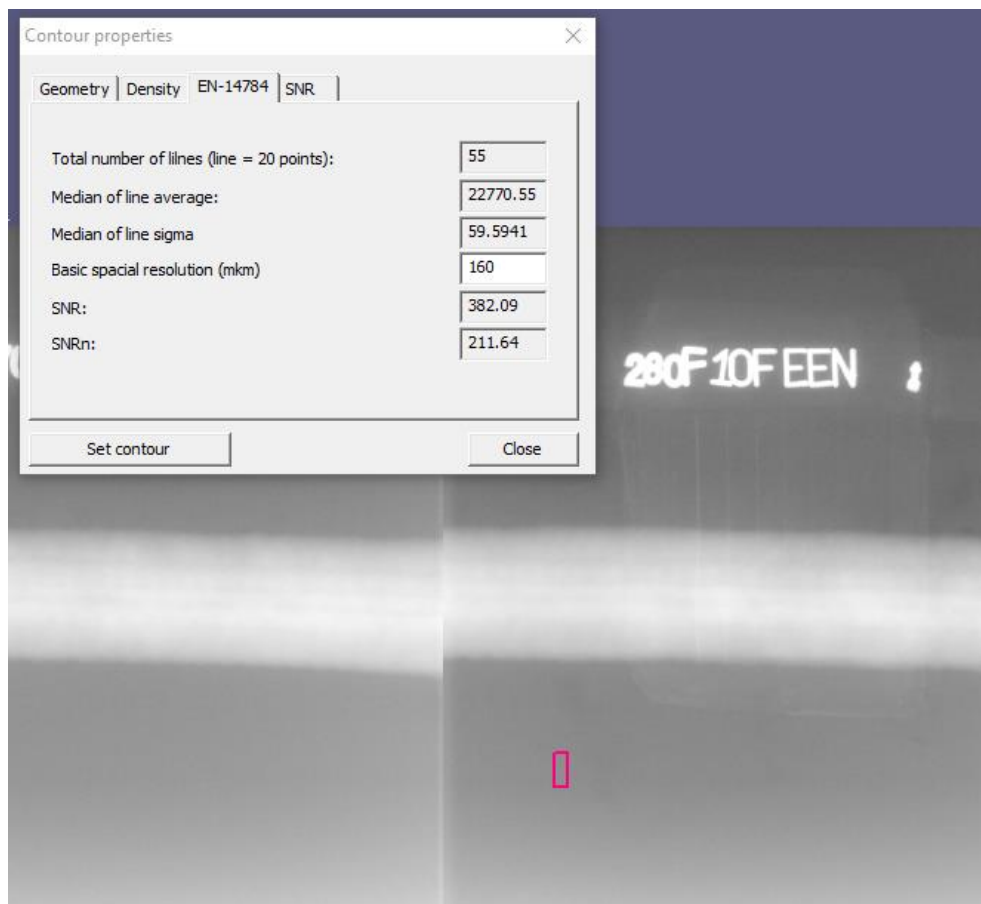
Zawyżona wartość  $SR_b$ , po wprowadzeniu do modułu statystycznego programu, prowadzi do konsekwentnego zaniżania wartości  $SNR_N$  dla wszystkich ocenianych radiogramów produkcyjnych. W konsekwencji operatorzy będą niepotrzebnie przedłużać czasy ekspozycji (czyli dawki promieniowania pochłaniane przez panel) co z czasem przełoży się na szybsze zużycie panelu.

Jeśli chodzi o sam sposób pomiaru  $SNR_N$  radiogramów produkcyjnych to uregulowania zawarte w normach nie są do końca jednoznaczne i w praktyce wymagają pewnego doprecyzowania. Norma PN-EN ISO 17636-2 dotycząca badań złączy spawanych stanowi w pkt. 7.3.1, że pomiaru  $SNR_N$  należy dokonywać obok spoiny, w pobliżu miejsca gdzie umieszczony jest wskaźnik IQI oraz po stronie grubszego materiału rodzimego. W praktyce ostatni warunek oznacza, że pomiarów należy dokonywać po jaśniejszej (o mniejszym  $GV$ ) stronie spoiny nawet w przypadkach, gdy elementy badanego złącza mają nominalnie jednakowe grubości. Norma mówi również, że obszar ROI do pomiaru  $SNR_N$  należy wybrać w strefie o jednorodnej grubości ścianki i jednorodnym rozkładzie  $GV$ . Warunek ten jest sformułowany dość ogólnikowo i w praktyce będzie zależał od subiektywnego wyboru oceniającego. W tym względzie można zalecić procedurę polegającą na pomiarze  $SNR_N$  w kilku (5-7) subiektywnie wybranych obszarach ROI i przyjęciu wartości maksymalnej spośród wyznaczonych wartości. Przyjęcie wartości maksymalnej jest uzasadnione przez fakt, że wszelkie niejednorodności materiału będą zawsze prowadzić do zwiększenia poziomu szumów i obniżenia wyznaczonej wartości  $SNR_N$  względem wartości „prawdziwej” odnoszącej się do materiału idealnie jednorodnego.

Zobaczmy jak wygląda w praktyce pomiar  $SNR_N$  na przykładzie radiogramu złącza spawanego DN 1000 o grubości ścianki 14,2 mm prześwietlonej za pomocą panoramicznej



lampy rentgenowskiej i panelu płaskiego typu *PaxScan 1515DXT*. Do oceny radiogramu wykorzystano oprogramowanie *XVu* firmy *Xpress Digital*.



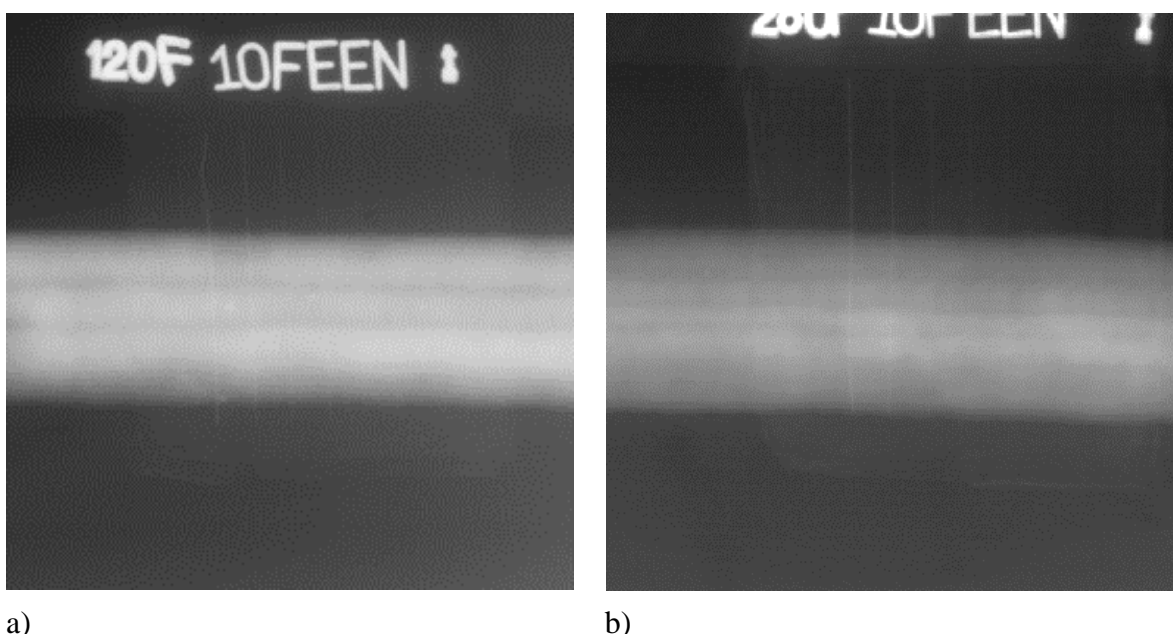
Rys. 4. Pomiar  $SNR_N$  radiogramu cyfrowego za pomocą modułu statystycznego programu *XVu* firmy *Xpress Digital*.

Jak wynika z rys. 4 do pomiaru wybrano obszar ROI (różowy prostokąt) złożony z 55 linii o długości 20 pikseli każda. Obszar ROI został prawidłowo wybrany w strefie materiału rodzimego, w pobliżu wskaźnika IQI, po jaśniejszej stronie spoiny.

Widać, że moduł statystyczny programu działa zgodnie z procedurami statystycznymi opisanymi w normie EN 14784-1, ponieważ oblicza i pokazuje zarówno medianę wartości średnich jak i medianę odchyłeń standardowych dla 55 linii. Oceniający wprowadził w polu *Basic spatial resolution* wartość  $SR_b$  równą  $160 \mu\text{m}$  wyznaczoną wcześniej na podstawie radiogramu referencyjnego. Po wprowadzeniu powyższych danych program wyliczył, że dla wybranego obszaru ROI wartość  $SNR_N = 211,6$  co spełnia wymagania klasy B ( $SNR_N > 140$ ) normy PN-EN ISO 17636-2 dla badanego złącza spawanego. Dodatkowo należy zauważyć, że mediana wartości GV w wybranym obszarze ROI wynosi 22270, co dla 16-bitowego panelu o 65536 poziomach szarości, stanowi ok. 34% pełnego zakresu skali szarości.

W tym miejscu warto przedstawić kilka uwag odnoszących się do średnich poziomów wartości GV, jakimi powinny charakteryzować się radiogramy cyfrowe. Normy nie definiują w tym zakresie żadnych wymagań odnoszących się do radiogramów produkcyjnych, chociaż dla radiogramu referencyjnego wartość ta, zgodnie z PN-EN ISO 17636-2, powinna być wyższa od 50% zakresu skali GV. Wymaganie to może stanowić pewną wytyczną (choć

nie obowiązkowe wymaganie) również dla radiogramów produkcyjnych. Wynika ono z faktu, że poziomy szarości radiogramów cyfrowych są „skwantowane” czyli mogą przybierać jedynie pewne ściśle określone wartości GV. W przypadku kiedy liczba poziomów szarości użyta do zobrazowania pewnego detalu jest niezbyt duża jego obraz radiograficzny może wykazywać nieprzyjemną dla oka właściwość zwaną *pikselizacją* lub mniej elegancko *pikselozą*. Efekt ten będzie tym silniejszy im mniejsza jest średnia wartość GV dla danego radiogramu. Jednak w dobie systemów cyfrowych o 16-bitowej rozdzielczości efekt ten będzie widoczny dopiero przy obniżeniu średnich wartości GV radiogramu do poziomu kilku procent skali szarości. W celu sprawdzenia tego wniosku wykonano tym samym systemem 16-bitowym dwa radiogramy cyfrowe tego samego złącza spawanego tak aby znacząco różniły się średnimi poziomami GV w obszarze materiału rodzimego.



Rys. 5. Fragmenty dwóch radiogramów spiny wykonanych tym samym systemem 16-bitowym przy dwóch różnych poziomach GV: a) 50 000, b) 6 000.

Na rys. 5a pokazano radiogram o średnim poziomie GV wynoszącym ok. 50000 (76% skali GV), natomiast na rys. 5b radiogram o średnim poziomie GV wynoszącym ok. 6000 (9% skali GV). Widać, że po odpowiednim ustawieniu parametrów wyświetlania obrazu w programie do oceny radiogramów (parametry *Level* i *Window*), oba obrazy są bardzo dobre i nie wykazują widocznych objawów pikselozy. Biorąc pod uwagę powyższe wyniki, potwierdzone także w praktyce produkcyjnej, można stwierdzić, że warunek aby  $GV > 50\%$  skali szarości nie jest uzasadniony w przypadku nowoczesnych systemów cyfrowych o dużej skali szarości (tj. 16-bitowych). Prawdopodobnie został on wprowadzony w czasach gdy powszechnie stosowano systemy o rozdzielczości 12-bitowej. Na podstawie bardziej aktualnych doświadczeń można jednak sformułować zalecenie, aby radiogramy produkcyjne wykonywane za pomocą systemów 16-bitowych charakteryzowały się średnimi poziomami GV powyżej 10% skali szarości. W przypadku systemów 14-bitowych równoważny warunek powinien być 4-krotnie zwiększony i mieć postać  $GV > 40\%$  skali szarości.

## 6. Interpretacja wyników pomiaru $SNR_N$

Najważniejszym aspektem interpretacji wyniku pomiaru  $SNR_N$  danego radiogramu jest porównanie jego wartości z wymaganiami stosownych norm. Normy, z zasady, definiują jedynie wartości minimalne, które muszą zostać osiągnięte na radiogramie w zależności od prześwietlanego materiału, jego grubości, stosowanego źródła promieniowania oraz klasy badania. W przypadku badań złączy spawanych wg PN-EN ISO 17636-2 wymagania takie są określone w Tablicy 3 (dla stali, oraz stopów miedzi i niklu) oraz w Tablicy 4 (dla aluminium oraz tytanu). Porównanie zmierzonych wartości  $SNR_N$  z wymaganiami norm stanowi jednak zaledwie pierwszy, elementarny aspekt interpretacji tego parametru. Kompetentny specjalista radiografii cyfrowej powinien umieć wykorzystać cały szereg innych informacji dotyczących badania radiograficznego, które wynikają z pomiarów  $SNR_N$ .

W pierwszym rzędzie wartość  $SNR_N$  informuje o tym czy ekspozycja radiogramu została dobrana prawidłowa. Określona wartość minimalna musi zostać osiągnięta ze względu na wymagania norm, jeśli tak się nie stało należy podwyższyć ekspozycję posługując się następującym przybliżonym wzorem:

$$t_{kor} = t_0 \left( \frac{SNR_{N\_norm}}{SNR_{N\_uzysk}} \right)^2$$

(4)

gdzie:  $SNR_{N\_norm}$  – wartość  $SNR_N$  wymagana przez normę,  
 $SNR_{N\_uzysk}$  – wartość  $SNR_N$  wyznaczona na ocenionym radiogramie,  
 $t_0$  – czas ekspozycji zastosowany do naświetlenia ocenionego radiogramu,  
 $t_{kor}$  – skorygowany czas ekspozycji, który powinien zostać zastosowany w celu uzyskania wymaganego  $SNR_N$ ,

Powyższy wzór może być zastosowany do stosunkowo niewielkich korekcji ekspozycji, które wymagają jedynie zmiany czasu ramki bez zmiany liczby ramek. W przypadku poważniejszych rozbieżności konieczne jest zastosowanie profesjonalnego kalkulatora ekspozycji.

Nieco odmienny problem stanowi znaczne (np. 2 – 3 krotne) przekroczenie minimalnego  $SNR_N$  wymaganego przez normę. Sytuacja taka nie stanowi niezgodności z wymaganiami jakościowymi jednak prowadzi do szeregu innych niekorzystnych efektów:

- Po pierwsze oznacza, że stosowane czasy ekspozycji są zdecydowanie za długie co prowadzi do istotnego spadku wydajności pracy ekip radiograficznych.
- Po drugie zwiększona ekspozycja oznacza nieproporcjonalnie wyższą dawkę promieniowania absorbowaną przez panel i prowadzi do skrócenia jego żywotności. Przykładowo, jeśli uzyskiwany  $SNR_N$  jest 2-krotnie wyższy niż wymagany przez normę pochłonięta dawka promieniowania jest 4-krotnie wyższa niż powinna. W dłuższej perspektywie sytuacja taka doprowadzi do 4-krotnego skrócenia czasu eksploatacji panelu.

- Po trzecie wreszcie, zwiększone dawki promieniowania pochłaniane przez panel lub płytę obrazową prowadzą do nasilenia się „efektu duchów”, czyli pojawiania się na ostatnio rejestrowanym obrazie radiograficznym fragmentów obrazu poprzednich radiogramów wykonanych za pomocą danego detektora.

Oznacza to, że należy bezwzględnie ograniczać zbyt duży  $SNR_N$  radiogramów redukując czasy ekspozycji. Z dotychczasowych doświadczeń wynika, że przy zastosowaniu profesjonalnych kalkulatorów ekspozycji, możliwe jest systematyczne utrzymywanie  $SNR_N$  w granicach 15% powyżej minimum normowego.

Kolejna możliwość wykorzystania pomiarów  $SNR_N$  dotyczy analizy sytuacji problemowych kiedy stosowany system radiografii cyfrowej przestaje dawać odpowiednio wysokie wartości  $SNR_N$  dla tych samych grubości materiału przy stosowaniu tych samych czasów ekspozycji. Przyczyną tego rodzaju problemów może być zarówno niekontrolowane obniżenie wydajności stosowanego źródła promieniowania jak też problemy z detektorem. Pomiar  $SNR_N$  daje możliwość zdiagnozowania źródła problemu poprzez pomiar i analizę zależności  $SNR_N$  od czasu ekspozycji. Jeśli dwukrotne zwiększenie czasu ekspozycji (przy zachowaniu tych samych wartości innych parametrów badania) prowadzi do podwyższenia wartości  $SNR_N$  o ok. 40% przyczyną problemów jest najprawdopodobniej zmniejszenie rzeczywistej wydajności źródła promieniowania (np. wskutek starzenia się lampy rentgenowskiej lub przypadkowego założenia na niej dodatkowego filtra). Jeśli natomiast zwiększanie czasu ekspozycji nie wpływa na  $SNR_N$  to przyczyną problemu, w radiografii DR, jest najprawdopodobniej nieprawidłowa kalibracja panelu lub jego „wypalenie” natomiast w radiografii CR jest to najczęściej stosowanie płyt obrazowych o zbyt dużym szumie strukturalnym.

## **7. Podsumowanie**

W artykule opisano istotę, rolę i znaczenie oraz zasady praktycznego stosowania nowego parametru  $SNR_N$  wprowadzonego w radiografii cyfrowej do oceny jakości wykonania radiogramów. Zarówno definicja jak i sposób wyznaczaniu tego parametru są zasadniczo odmienne od analogicznych parametrów stosowanych w radiografii błonowej. Właściwe zrozumienie oraz prawidłowe stosowanie tego parametru ma kluczowe znaczenie przy wdrażaniu radiografii cyfrowej. Pomimo tego, że parametr ten pełni w radiografii cyfrowej podobną rolę co gęstość optyczna w radiografii konwencjonalnej jest zdefiniowany na poziomie bardziej podstawowym i znacznie głębiej wchodzi w istotę tworzenia obrazu radiograficznego. Dotyczy to w szczególności aspektu statystycznego związanego z kwantową naturą promieniowania i statystyką rozkładu absorbowanych fotonów na elementach detektora.

Oprócz zagadnień podstawowych w artykule opisano także zasady praktycznego wykonywania pomiarów  $SNR_N$  radiogramów cyfrowych. Zwrócono uwagę na główne trudności i źródła błędów jakie mogą wystąpić podczas wyznaczania  $SNR_N$  radiogramów produkcyjnych. Opisano także podstawowe zasady interpretacji wyników pomiarów tego parametru zarówno w odniesieniu do wymagań normowych jak też aspektów metodologicznych i ekonomicznych.

## **Literatura**

1. S. Mackiewicz, Panele płaskie z przemianą pośrednią oraz możliwości ich wykorzystania w badaniach nieniszczących., Krajowa Konferencja Badań Radiograficznych – Stary Młyn 2016
2. U. Ewert, Progres in Digital Industrial Radiology, Part I: Radiographic Techniques – Film Replacement and Backscatter Imaging., Badania Nieniszczące i Diagnostyka, 1-2/2016, str. 37 – 43.
3. S. Mackiewicz, Badania złączy spawanych technikami radiografii cyfrowej w świetle wymagań normy EN ISO 17636-2, Krajowa Konferencja Badań Radiograficznych – Popów 2013.
4. S. Mackiewicz, Radiografia cyfrowa na panelach płaskich. Zasady wdrożenia do badań nieniszczących. Materiały XXIII Seminarium Badania Materiałów, Zakopane 2017.
5. PN-EN 14784-1 Badania nieniszczące – Radiografia przemysłowa z użyciem pamięciowych luminoforowych płyt obrazowych. Część 1: Klasyfikacja systemów.
6. PN-EN ISO 16371-2 Badania nieniszczące – Radiografia przemysłowa z użyciem pamięciowych luminoforowych płyt obrazowych. Część 2: Ogólne zasady radiograficznych badań materiałów metalowych za pomocą promieniowania X i gamma.
7. PN-EN ISO 17636-2 Badania nieniszczące spoin – Badanie radiograficzne. Część 2: Techniki promieniowania X i gamma z detektorami cyfrowymi.
8. ASTM E 2446 Standard Practice for Classification of Computed Radiology Systems.
9. S. Mackiewicz, Ocena jakości radiogramów komputerowych – aspekty praktyczne i metodologiczne, Krajowa Konferencja Badań Radiograficznych – Stary Młyn 2012
10. <https://www.ndtsoft.pl>