

PROBLEMY BADAŃ ULTRADŹWIEKOWYCH Z DUŻYMI PRĘDKOŚCIAMI SKANOWANIA

Sławomir MACKIEWICZ
IPPT PAN, Warszawa
smackiew@ippt.gov.pl

1. WSTĘP

W zdecydowanej większości badań ultradźwiękowych prędkość przesuwania głowicy po powierzchni obiektu badania (prędkość skanowania) nie stanowi istotnego problemu. Wynika to z prostego faktu, że powszechnie stosowane prędkości skanowania są na tyle małe, że proces badania ultradźwiękowego można traktować jako quasi-statyczny. Oznacza to, że cykl nadawczo-odbiorczy systemu badawczego, składający się z wysłania impulsu ultradźwiękowego przez głowicę, jego przejścia od głowicy do wady i z powrotem oraz jego detekcji przez głowicę rozpatrujemy tak, jakby przez cały ten czas głowica stała w miejscu. W większości przypadków jest to założenie całkowicie uzasadnione ponieważ przy prędkościach skanowania rzędu kilku czy kilkunastu centymetrów na sekundę głowica przesunie się w tym czasie zaledwie o drobny ułamek milimetra. Biorąc pod uwagę, że długość stosowanych w badaniach nieniszczących fal ultradźwiękowych jest rzędu milimetra przesunięcie takie nie spowoduje zauważalnej różnicy w amplitudzie odebranego impulsu ultradźwiękowego w porównaniu z przypadkiem gdyby głowica rzeczywiście stała przez cały ten czas w miejscu.

Jednak w pewnych zastosowaniach badań ultradźwiękowych prędkość skanowania musi być bardzo wysoka z uwagi na określone wymagania dotyczące wydajności badań lub dostępności obiektu. W niniejszym artykule skoncentrujemy się na jednym z takich zastosowań, tj. na zautomatyzowanych badaniach szyn w torze prowadzonych przy użyciu wagonów defektoskopowych. Badania takie z natury rzeczy wykonywane są na eksploatowanych torach w odstępach czasu pomiędzy kolejnymi przejazdami pociągów. Ponieważ prędkość pociągów oraz częstotliwość ich kursowania na głównych szlakach kolejowych cały czas wzrasta, efektywne prowadzenie badań nieniszczących torów przy pomocy konwencjonalnych środków staje się coraz trudniejsze. Stosowanie eksploatowanych obecnie drezyn lub wagonów defektoskopowych poruszających się podczas badań z prędkością 30-50 km/h jest już obecnie bardzo utrudnione z uwagi na konieczność częstego zwalniania torów dla pociągów ekspresowych poruszających się z prędkościami 120 – 200 km/h. Problem ten będzie tylko narastał wraz z dalszym zwiększaniem prędkości kursowania pociągów. Wynika to także z faktu, że zwiększona prędkość pociągów powoduje wzrost obciążeń dynamicznych szyn wskutek czego procesy powstawania i rozwoju wad ulegają intensyfikacji a przez to szyny będą wymagać coraz częstszych i dokładniejszych kontroli [1-2].

Narzucającym się rozwiązaniem przedstawionego problemu wydaje się być wzrost prędkości prowadzenia badań defektoskopowych szyn do wartości porównywalnych z prędkościami pociągów ekspresowych tj. do wartości rzędu 100 km/h i więcej. Oznacza to wzrost prędkości skanowania szyn przez głowice ultradźwiękowe zamontowane w wagonach defektoskopowych. Okazuje się jednak, że rozwiązanie to nie jest tak proste jak mogłoby się

wydawać i nie sprowadza się jedynie do ulepszenia/wzmocnienia mechaniki prowadzenia głowic po powierzchni szyny.

Pierwszym, fundamentalnym problemem jaki może się pojawić przy zwiększaniu prędkości skanowania jest to, czy impuls ultradźwiękowy odbity od wady znajdującej się w szynie, zdąży być odebrany przez głowicę ultradźwiękową, która przecież porusza się wzdłuż szyny ze znaczną prędkością. Przy dużych prędkościach skanowania impuls ultradźwiękowy odbity od odległej wady, znajdującej się np. w stopce szyny, może powrócić na powierzchnię skanowania w momencie gdy głowica ultradźwiękowa odjechała już z tego miejsca. W celu bliższego przeanalizowania tej kwestii należy dokładnie rozpatrzyć cykl nadawczo odbiorczy badania ultradźwiękowego z uwzględnieniem relacji pomiędzy prędkością propagacji impulsu ultradźwiękowego w materiale a prędkością przesuwania się głowicy po obiekcie. Problem ten zostanie szczegółowo opisany w następnym rozdziale.

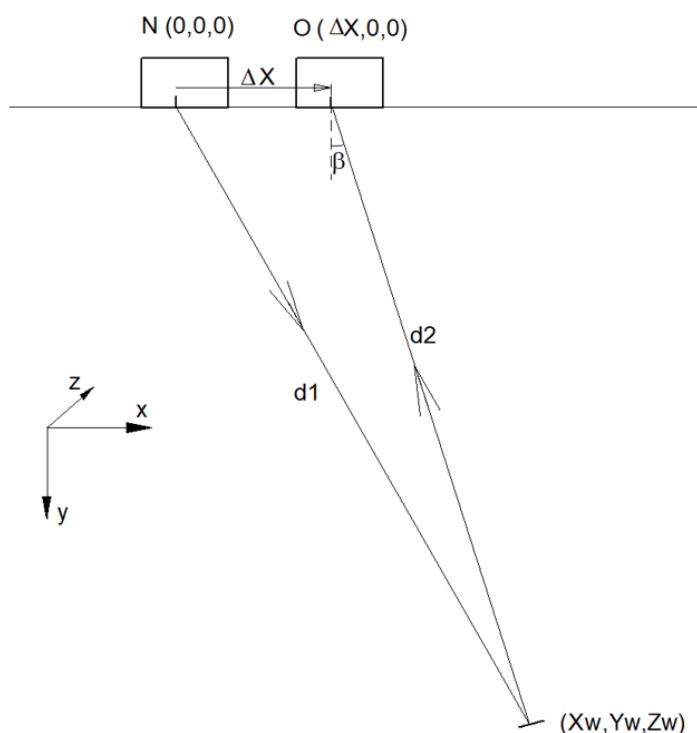
Drugi podstawowy problem badań ultradźwiękowych z dużą prędkością skanowania wynika z samej istoty impulsowej metody echa stosowanej w ultradźwiękowych badaniach nieniszczących. Impuls ultradźwiękowy wprowadzony do badanego materiału propaguje się w nim do napotkania wady lub innego reflektora i po odbiciu wraca do głowicy gdzie jest zamieniany na impuls elektryczny obrazujący echo wady. W tym czasie głowica ultradźwiękowa nie może wysłać kolejnego impulsu ultradźwiękowego ponieważ „jest zajęta” czekaniem na ewentualne echa od wad. Ten czas czekania jest ściśle związany z zakresem obserwacji ustalonym dla danej głowicy. Przykładowo dla typowej głowicy katowej fal poprzecznych T45° stosowanej w badaniach szyn kolejowych zakres obserwacji wynosi ok. 250 mm. Przekłada się to na czas oczekiwania $T_p = 2 \cdot 250 / 3,25 = 153,8 \mu s$. Przez ten czas system ultradźwiękowy nie może wygenerować kolejnego impulsu nadawczego, innymi słowy częstotliwość powtarzania systemu musi być mniejsza niż $1/T_p = 1/153,8 \mu s = 6,5 \text{ kHz}$. Takie górne ograniczenie częstotliwości powtarzania, zupełnie niegroźne w konwencjonalnych badaniach ultradźwiękowych, ma poważne konsekwencje przy badaniach z dużymi prędkościami skanowania. Przykładowo, przy badaniu szyn z prędkością 100 km/h (27,8 m/s) z częstotliwością powtarzania $f_p = 6,5 \text{ kHz}$ przestrzenna rozdzielczość skanowania szyny wyniesie $\Delta x = 4,3 \text{ mm}$. Przy prędkości badania 150 km/h krok skanowania wzrośnie do 6,4 mm. Są to wartości znacząco większe niż w typowych zautomatyzowanych badaniach ultradźwiękowych gdzie krok skanowania ustala się zazwyczaj na nie więcej niż 1-2 mm. Odpowiedź na pytanie czy tak ograniczona rozdzielczość skanowania spowoduje znaczące obniżenie możliwości wykrywania potencjalnych wad jest skomplikowana i uzależniona od wielu czynników. W szczególności są to wielkość, położenie oraz orientacja wady a także rozkład pola ultradźwiękowego głowicy. Problem ten można zbadać i przeanalizować jedynie przy użyciu zaawansowanych symulacji komputerowych co opisano w punkcie 3 niniejszego artykułu.

W punkcie 4 omówiono kilka innych problemów związanych z badaniami ultradźwiękowymi przy dużych prędkościach skanowania, które nie mają jednak charakteru podstawowego i mogą być rozwiązane poprzez udoskonalenie dotychczas stosowanych rozwiązań.

2. DYNAMICZNY MODEL BADANIA ULTRADŹWIĘKOWEGO

Jak już wspomniano standardowy model badania ultradźwiękowego ma charakter quasi-statyczny czyli zakłada, że w trakcie trwania cyklu nadawczo odbiorczego systemu badawczego głowica ultradźwiękowa pozostaje w tym samym miejscu. Ewentualny przesuw głowicy związany ze skanowaniem odbywa się pomiędzy kolejnymi cyklami nadawczo odbiorczymi aparatu i nie wpływa na amplitudę rejestrowanych ech ultradźwiękowych. W takim ujęciu teoretycznym badanie odbywa się swego rodzaju wirtualnymi skokami od jednego punktu wprowadzenia fali do drugiego, przy czym w każdym z tych punktów głowica nadawczo-odbiorcza teoretycznie stoi w miejscu.

W przypadku badań prowadzonych z dużymi prędkościami skanowania musimy odejść od tego uproszczonego schematu i wprowadzić dynamiczny model badania ultradźwiękowego uwzględniający jednoczesny ruch głowicy i impulsu ultradźwiękowego. Schemat badania ultradźwiękowego w ramach modelu dynamicznego pokazano na rys.1.



Rys. 1. Schemat badania ultradźwiękowego w ujęciu modelu dynamicznego.

Zobrazowany na rysunku cykl nadawczo-odbiorczy głowicy ultradźwiękowej pracującej metodą echa można opisać w następujący sposób. Głowica wprowadza do obiektu badania impuls ultradźwiękowy znajdując się w położeniu nadawczym - N, które możemy opisać za pomocą współrzędnych (x,y,z) o wartościach początkowych równych $(0,0,0)$. Impuls wyemitowany przez głowicę propaguje się w materiale szyny z prędkością fali ultradźwiękowej V_u i ewentualnie dochodzi do wady materiałowej, która znajduje się w punkcie szyny o współrzędnych (X_w, Y_w, Z_w) . Odległość d_1 jaką przebywa w tym czasie impuls ultradźwiękowy można obliczyć z geometrii problemu pokazanej na rysunku, pamiętając jednak że problem ten jest istotnie trójwymiarowy, tj pokazana wada nie musi znajdować się w płaszczyźnie rysunku.

$$d_1 = \sqrt{X_w^2 + Y_w^2 + Z_w^2} \quad (1)$$

Czas t_1 w jakim impuls ultradźwiękowy pokonuje drogę od punktu wprowadzenia do wady obliczyć można ze wzoru:

$$t_1 = d_1/V_u \quad (2)$$

W czasie gdy impuls ultradźwiękowy propaguje się od punktu wprowadzenia do wady i z powrotem głowica przesuwana wzdłuż szyny z prędkością skanowania V_g pokonując w tym czasie dystans $\Delta X = V_g(t_1 + t_2)$. Odległości ΔX nie można jednak łatwo obliczyć ponieważ nie znamy czasu t_2 w jakim impuls pokonuje drogę powrotną d_2 od wady do głowicy.

Problem sprowadza się zatem do tego w jaki sposób obliczyć nieznaną czas t_2 . Patrząc na rys. 1 można zauważyć, że dwa boki pokazanego tam trójkąta, ΔX oraz d_2 są zależne od czasu t_2 w następujący sposób:

$$\Delta X = V_g(t_1 + t_2) \quad \text{oraz} \quad d_2 = V_u t_2 \quad (3)$$

Jednak wszystkie boki pokazanego trójkąta związane są twierdzeniem cosinusów dając równanie, z którego można wyliczyć nieznaną wartość t_2 :

$$d_1^2 = \Delta X^2 + d_2^2 - 2\Delta X d_2 \cos(90^\circ + \beta) \quad (4)$$

Należy przy tym pamiętać, że kąt $(90^\circ + \beta)$ leży w płaszczyźnie trójkąta, nie zaś w płaszczyźnie rysunku. Wykorzystując znane tożsamości trygonometryczne wzór (4) można przekształcić do postaci:

$$d_1^2 = \Delta X^2 + d_2^2 + 2\Delta X d_2 \sin \beta \quad (5)$$

Z kolei nieznaną wartość $\sin \beta$ możemy wyrazić za pomocą wzoru:

$$\sin \beta = (X_w - \Delta X)/d_2 \quad (6)$$

Podstawiając tę wartość do wzoru (5) dostajemy równanie:

$$d_1^2 = \Delta X^2 + d_2^2 + 2\Delta X X_w - 2\Delta X^2 \quad (7)$$

Podstawiając do niego wartości ΔX oraz d_2 wyrażone przez (3) otrzymujemy ostatecznie równanie kwadratowe na nieznaną czas przejścia od wady do głowicy t_2 ,

$$\left[V_u^2 - V_g^2 \right] t_2^2 + \left[2V_g X_w - \frac{2V_g^2 d_1}{V_u} \right] t_2 + \left[\frac{2V_g d_1 X_w}{V_u} - d_1^2 - \frac{V_g^2 d_1^2}{V_u^2} \right] = 0 \quad (8)$$

Wyznaczając dodatni pierwiastek kwadratowy tego równania otrzymujemy czas przejścia t_2 od wady do głowicy znajdującej się w położeniu odbiorczym. Znając oba czasy t_1 i t_2 możemy ze wzoru (3) obliczyć poszukiwaną wartość przesunięcia głowicy ΔX pomiędzy punktem nadania i odbioru impulsu ultradźwiękowego.

Należy podkreślić, że przesunięcie to będzie zależało zarówno od prędkości skanowania V_g jak też od położenia wady w szynie. Im dalej od głowicy będzie znajdować się wada tym większe będzie przemieszczenie głowicy ΔX pomiędzy punktem nadania i odbioru echa wady.

Powyżej opisane rozwiązanie stanowi podstawę modyfikacji algorytmu obliczeniowego zaimplementowanego w nowej wersji programu *SymUT* rozwijanego w Pracowni Badań Nieniszczących IPPT PAN. Zasadniczą zmianą jest tutaj uwzględnienie przesunięcia pomiędzy punktami nadania i odbioru impulsu ultradźwiękowego przez głowicę skanującą. Wartość przesunięcia ΔX program oblicza z powyżej wyprowadzonych wzorów na podstawie wprowadzonych danych o prędkości skanowania V_g oraz położeniu wady modelowej (X_w, Y_w, Z_w) .

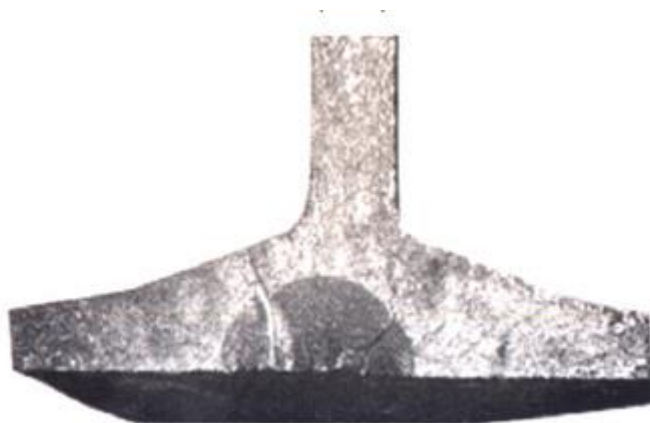
Podstawy teoretyczne programu *SymUT* opisano w pracach [3-7]. Program posiada dwie podstawowe funkcjonalności pozwalające na efektywne modelowanie ultradźwiękowych badań nieniszczących. Jest to, po pierwsze, obliczanie rozkładów pola akustycznego głowic ultradźwiękowych różnych typów w zależności od parametrów konstrukcyjnych głowicy

(częstotliwości, szerokości pasma, kształtu i wymiarów przetwornika, kąta wprowadzania fali do materiału badanego itd.) oraz parametrów akustycznych materiału badanego (prędkości i współczynnika tłumienia fal ultradźwiękowych).

Drugą podstawową funkcjonalnością programu jest obliczanie amplitudy oraz obwiedni echa wad modelowych zaimplementowanych w badanym materiale w zależności od ich wielkości, orientacji oraz położenia. Wady modelowe mogą mieć postać doskonale odbijających płaskich reflektorów w kształcie koła lub prostokąta.

Wspomniana modyfikacja programu *SymUT* pozwala na obliczanie wysokości oraz obwiedni echa wad modelowych także w ramach dynamicznego modelu badania ultradźwiękowego, który uwzględnia możliwość bardzo szybkiego skanowania badanego obiektu.

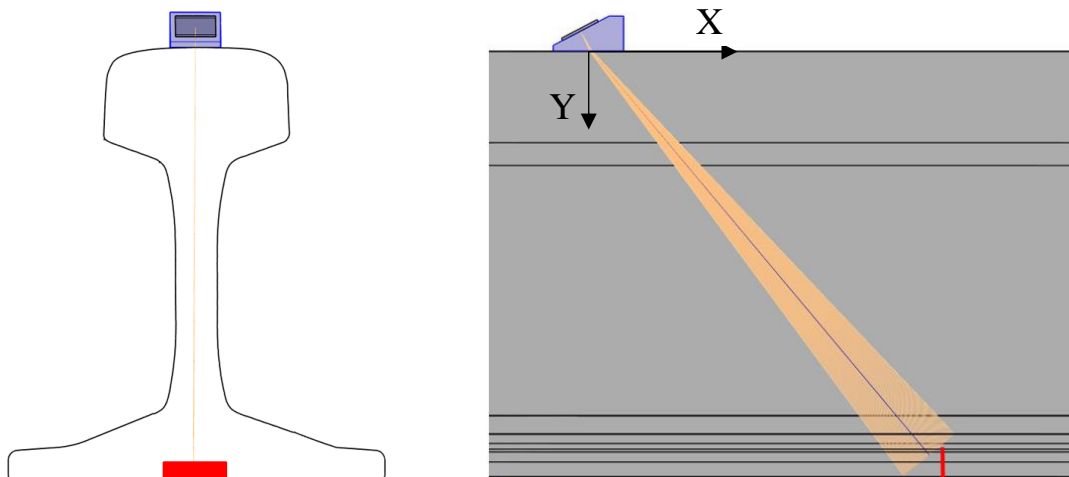
Wpływ prędkości skanowania na kształt i amplitudę obwiedni echa wady przeanalizujemy na przykładzie modelu poprzecznej wady stopki szyny, której rzeczywisty obraz pokazano na rys. 2. Wady tego typu wykrywane są podczas zautomatyzowanych badań szyn za pomocą głowic kątowych $T40^\circ$ prowadzonych po powierzchni główki równoległe do osi szyny i wprowadzających wiązki ultradźwiękowe wzdłuż podłużnej płaszczyzny symetrii szyny.



Rys. 2. Obraz przelomu poprzecznego pęknięcia zmęczeniowego stopki szyny.

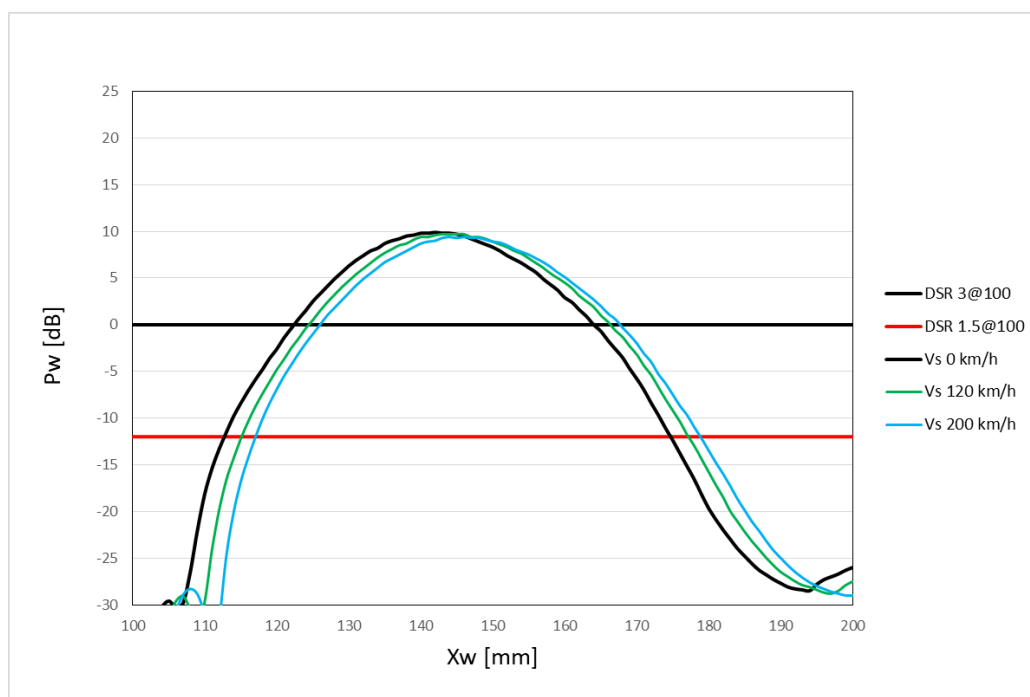
W programie *SymUT* badanie tego typu zamodelowano w sposób pokazany na rys. 3. Wadę poprzeczną stopki zasymulowano za pomocą prostokąta o wysokości $H_w=8$ mm i szerokości $W_w=16$ mm umieszczonego w środku szyny prostopadle do dolnej powierzchni stopki. Do symulowanego wykrywania przedmiotowej wady zastosowano głowicę modelową o symbolu 2T40-A16x16, oznaczającym głowicę kątową fal poprzecznych o częstotliwości $f = 2$ MHz, kącie załamania $\beta = 40^\circ$ i przetworniku o wymiarach 16x16 mm.

Przedmiotem obliczeń w programie *SymUT* były obwiednie echa wady modelowej przy przesuwie głowicy ultradźwiękowej wzdłuż osi szyny w zakresie odległości, w którym głowica ta jest w stanie wykryć przedmiotową wadę. Na osi X będącej osią skanowania zakres ten wynosi w przybliżeniu od 100 do 200 mm (patrz rys. 3). Obwiednie zostały obliczone w ramach dynamicznego modelu badania ultradźwiękowego dla kilku prędkości skanowania szyn w przedziale od 0 do 200 km/h.



Rys. 3. Model badania stopki szyny na wady poprzeczne wychodzące od dolnej powierzchni szyny.

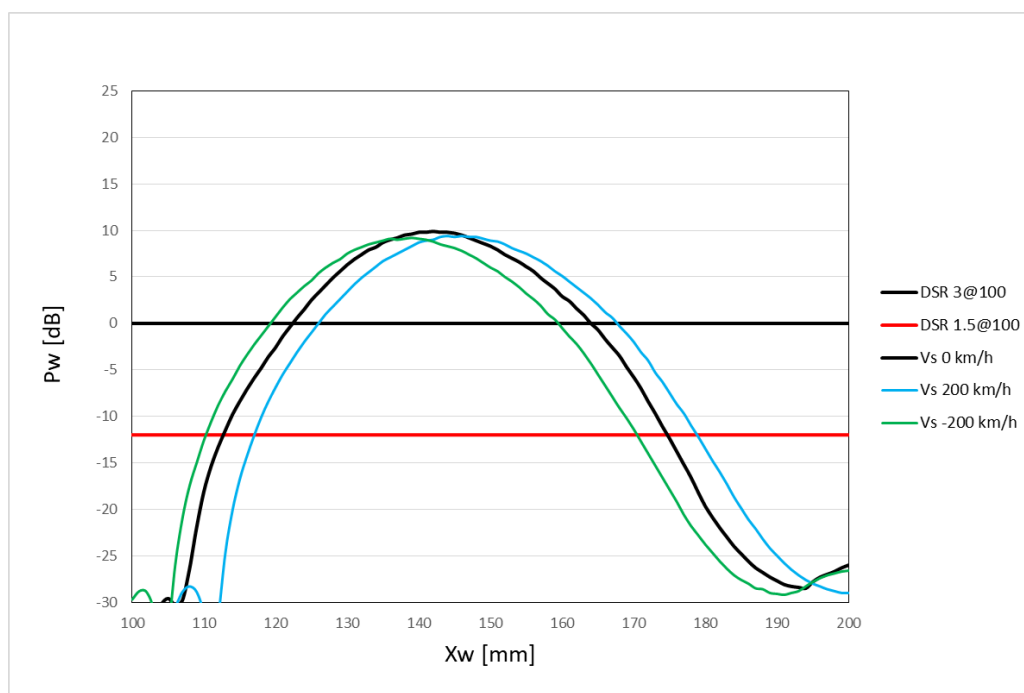
Na rys. 4 przedstawiono obwiednie echa rozpatrywanej wady modelowej obliczone dla prędkości skanowania V_s bliskiej zeru (badanie quasi statyczne) oraz dla dwóch prędkości skanowania porównywalnych do prędkości jazdy pociągów ekspresowych: 120 km/h oraz 200 km/h. Założono przy tym, że wiązka ultradźwiękowa głowicy skierowana jest w kierunku jazdy wagonu defektoskopowego, czyli „patrzy” do przodu.



Rys. 4. Obwiednie echa wady modelowej obliczone dla różnych prędkości skanowania szyn: $V_s \approx 0$ km/h, $V_s = 120$ km/h, $V_s = 200$ km/h .

Czarnym kolorem oznaczono podstawową obwiednię quasi statyczną uzyskiwaną przy prędkości skanowania bliskiej zero. W praktyce odpowiada ona badaniu przy pomocy przesuwanego ręcznie wózka defektoskopowego. Okazuje się, że wzrost prędkości skanowania do 120 i 200 km/h powoduje jedynie niewielkie, kilkumilimetrowe przesunięcia obwiedni na osi skanowania. Spadek amplitudy echa w maksimum obwiedni jest bardzo niewielki i wynosi dla prędkości skanowania $V_s = 200$ km/h zaledwie 0,5 dB. Generalny wniosek jest taki, że przy prędkościach skanowania ultradźwiękowego porównywalnych do prędkości jazdy pociągów ekspresowych spadek amplitudy impulsu wskutek przemieszczenia się głowicy ultradźwiękowej podczas cyklu nadawczo odbiorczego jest na tyle mały, że nie powinien wpłynąć na skuteczność badania.

Dla porządku obliczymy jeszcze obwiednię echa wady modelowej w przypadku, kiedy głowica ultradźwiękowa 2T40-A16x16 „patrzy” do tyłu względem kierunku skanowania. Porównanie obwiedni echa uzyskanych dla prędkości skanowania $V_s = 200$ km/h (głowica skierowana do przodu) oraz $V_s = -200$ km/h (głowica skierowana do tyłu) pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Obwiednie ciągłe echa wady modelowej obliczone dla prędkości skanowania: $V_s \approx 0$ km/h, +200 km/h oraz -200 km/h.

Obwiednia wady modelowej uzyskana za pomocą głowicy skierowanej do tyłu względem kierunku skanowania ($V_s = -200$ km/h) różni się od poprzedniej jedynie kierunkiem przesunięcia wykresu na osi skanowania. W tym przypadku maksimum echa występuje przy mniejszych wartościach współrzędnej X_w . Spadek maksimum echa względem badania quasi statycznego jest nieco większy i wynosi 0,7 dB.

Przedstawione wyżej obliczenia wykonane zostały dla wady modelowej zlokalizowanej w stopce szyny tj. maksymalnie oddalonej od powierzchni skanowania. Dla takiej wady efekt przesunięcia głowicy w trakcie trwania cyklu nadawczo odbiorczego jest największy. Dla wad położonych w głowce i szyjce szyny wpływ tego efektu będzie jeszcze mniejszy z uwagi na to, że czas przejścia fali od głowicy do wady i z powrotem będzie krótszy. Ostatecznie można więc stwierdzić, że rozważany efekt nie powinien stanowić istotnej przeszkody dla prowadzenia badań ultradźwiękowych szyn z prędkościami skanowania porównywalnymi do prędkości jazdy pociągów ekspresowych. Należy jednak podkreślić, że dotychczas rozważaliśmy jedynie czysty wpływ efektu przesunięcia głowicy w trakcie cyklu nadawczo odbiorczego, bez uwzględnienia

drugiego fundamentalnego ograniczenia związanego z ograniczoną częstotliwością powtarzania impulsów ultradźwiękowych. Dopiero te dwa efekty rozpatrywane łącznie pozwolą na pełną ocenę wpływu prędkości skanowania na skuteczność badań ultradźwiękowych.

3. EFEKT OGRANICZONEJ CZĘSTOTLIWOŚCI POWTARZANIA

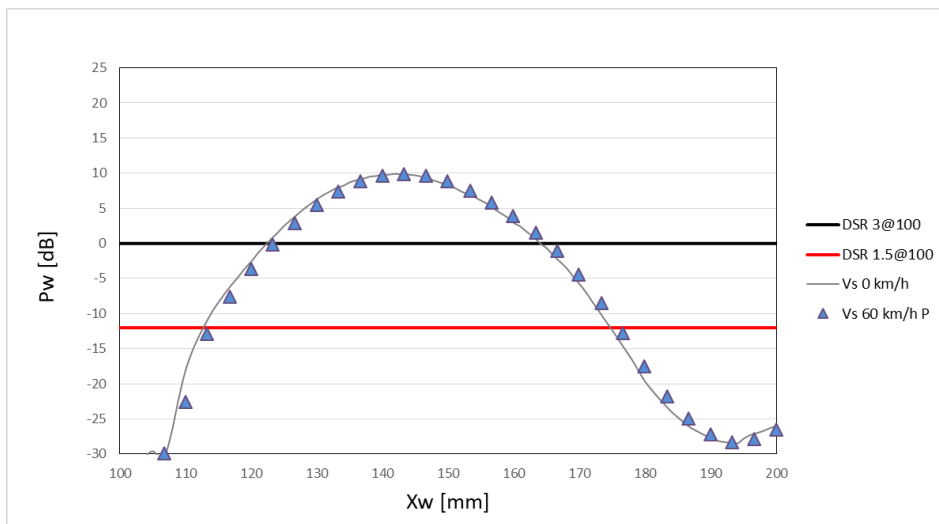
Drugim podstawowym problemem badań ultradźwiękowych z wysokimi prędkościami skanowania jest ograniczenie częstotliwości powtarzania systemu ultradźwiękowego i będące jego konsekwencją ograniczenie rozdzielczości przestrzennej badania. Ograniczenie częstotliwości powtarzania zależy od czasu, w którym impuls ultradźwiękowy dochodzi do najdalszej potencjalnej wady i powraca do głowicy ultradźwiękowej.

Dla wad znajdujących się w stopce szyny wykrywanych głowicą T45° czas ten wynosi ok. 150 us. W trakcie tego interwału czasowego (powiększonego o czasy przejścia fali w klinie załamującym głowicy oraz opóźnienia elektroniczne) nie może być wysłany następny impuls nadawczy bowiem zakłóciłby on odbiór ech wad z poprzedniego cyklu nadawczo-odbiorczego. Oznacza to, że odstęp czasowy pomiędzy cyklami częstotliwości powtarzania przy badaniach szyn musi wynosić co najmniej 150 us. Odpowiada to maksymalnej możliwej do zastosowania częstotliwości powtarzania systemu wynoszącej ok. 6,7 kHz.

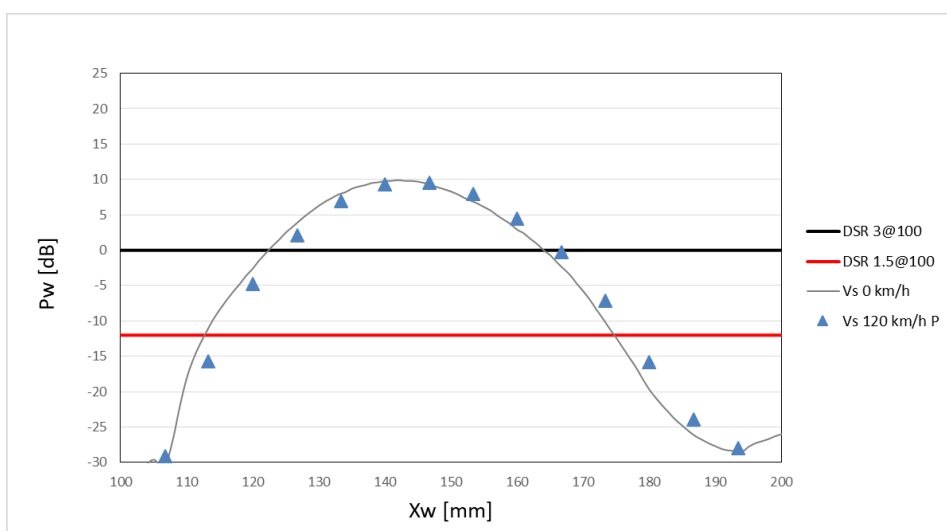
Biorąc pod uwagę dodatkowe ograniczenia (np. dodatkowy czas potrzebny na przejście fali w klinie głowicy czy transfer do pamięci zapisanego w danym cyklu A-skanu) realna wartość częstotliwości powtarzania przy badaniu szyn kolejowych może wynosić ok. 5 kHz. Przy częstotliwości powtarzania 5 kHz rozdzielczość przestrzenna skanowania szyny przy prędkości badania 120 km/h będzie wynosiła 6,7 mm, zaś przy prędkości 200 km/h aż 11,1 mm.

Są to wartości kroku skanowania, na tyle duże, że niektóre mniejsze wady mogą zostać pominięte, zaś inne zarejestrowane ze zmniejszoną amplitudą. Ten ostatni efekt wynika z faktu, że punkt wysłania impulsu ultradźwiękowego nie musi odpowiadać punktowi, w którym echo danej wady jest najwyższe. Może się zdarzyć, że punkt maksimum echa wady znajduje się pomiędzy kolejnymi punktami wysłania impulsu na długości szyny. Jest to drugi fundamentalny czynnik powodujący zmniejszenie amplitudy ech od wad przy badaniach prowadzonych z dużą prędkością skanowania w porównaniu do badań quasi-statycznych. Efekt ten będzie silnie zależał od rozmiarów i położenia wady a także od parametrów głowicy ultradźwiękowej. Aby ocenić go w sposób ilościowy konieczne jest zastosowanie oprogramowania symulacyjnego uwzględniającego zarówno prędkość skanowania jak też częstotliwość powtarzania systemu ultradźwiękowego. W takich symulacjach obwiednie echa wad modelowych powinny być obliczane zarówno w sposób quasi ciągły (dla $V_s=0$) jak też w sposób punktowy z uwzględnieniem faktycznej prędkości skanowania oraz częstotliwości powtarzania. Porównanie tych dwóch rodzajów obwiedni pozwala na wyznaczenie spadku amplitudy maksymalnego echa wady wynikającego zarówno z dużej prędkości skanowania jak i z ograniczonej częstotliwości powtarzania systemu ultradźwiękowego. Drugim ważnym wnioskiem wynikającym z analizy obwiedni punktowej jest liczba punktów obwiedni echa wady, w których echo to przewyższa założony próg wykrywalności systemu badawczego. Liczba kolejnych detekcji wady w trakcie skanowania jest ważna z uwagi na działanie automatycznych algorytmów oceny wskazań, które kwalifikują wskazanie jako istotne wówczas gdy powtarza się w kilku kolejnych cyklach częstotliwości powtarzania.

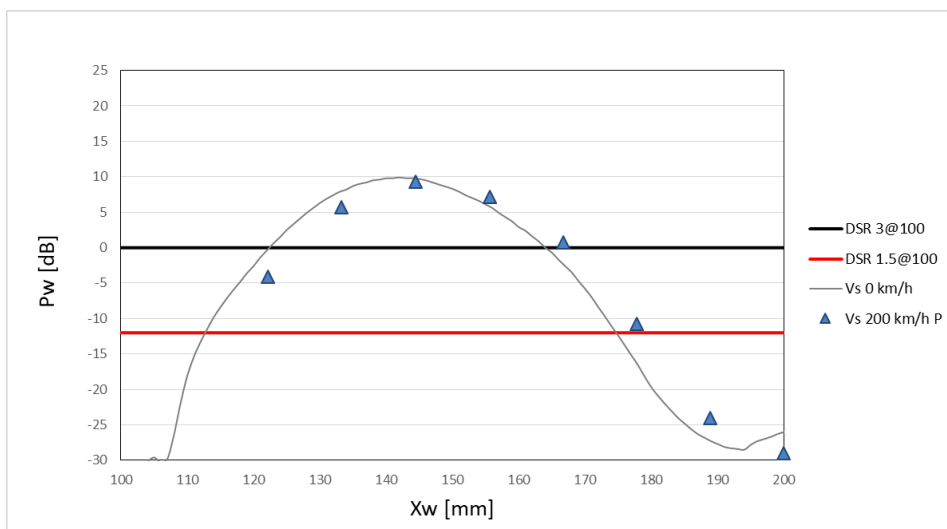
Przykładowe obliczenia obwiedni punktowych dla omawianej wady modelowej stopki uzyskane głowicą 2T40-A16x16 patrzącą w kierunku skanowania pokazano na rys. 6. Obliczenia wykonano dla prędkości skanowania V_s wynoszących odpowiednio 60 km/h, 120 km/h oraz 200 km/h.



a) $V_s = 60$ km/h, $f_p = 5$ kHz



b) $V_s = 120$ km/h, $f_p = 5$ kHz



c) $V_s = 200$ km/h, $f_p = 5$ kHz

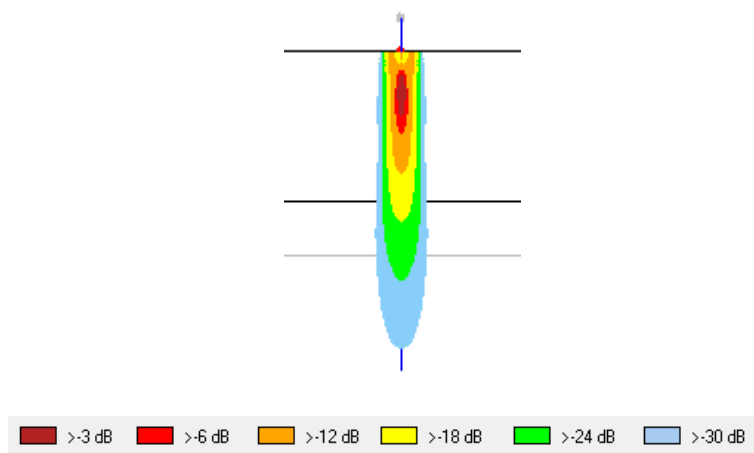
Rys. 6. Obwiednie punktowe echa wady modelowej stopki obliczone dla prędkości skanowania: a) 0 km/h, b) 120 km/h, c) 200 km/h i częstotliwości powtarzania 5 kHz.

Jak wynika z rys. 6 dla rozważanej konfiguracji badania obwiednia wady stopki jest na tyle szeroka, że gęstość punktów detekcji obwiedni punktowych dla prędkości skanowania 60 km/h i 120 km/h jest całkowicie wystarczająca. Liczba punktów obwiedni powyżej progu wykrywalności (czerwona linia na wykresach) wynosi odpowiednio $N_{60} = 18$ oraz $N_{120} = 9$. Dopiero przy prędkości skanowania równej 200 km/h liczba punktów detekcji wady spada do wartości $N_{200} = 6$ zaś maksymalna amplituda echa wady obniża się o ok. 1 dB. Są to jednak ciągle wartości akceptowalne z punktu widzenia jakości badania ultradźwiękowego.

W tym miejscu analizy wydaje się zatem, że oba wspomniane problemy podstawowe nie stanowią istotnej przeszkody do prowadzenia badań ultradźwiękowych szyn nawet z prędkością 200 km/h. Nie jest to jednak do końca prawdziwy wniosek. Zauważmy bowiem, że symulacje obwiedni punktowych przeprowadziliśmy dla wady modelowej zlokalizowanej w stopce szyny, tj. maksymalnie oddalonej od głowicy badawczej. Duża odległość wady od głowicy oznacza, że szerokość wiązki ultradźwiękowej oświetlającej taką wadę jest duża i w konsekwencji jej obwiednia jest na tyle szeroka, że może zniwelować niekorzystny wpływ dużego kroku skanowania ($\Delta X = 11,1$ mm dla $V_s = 200$ km/h). Jednak częstotliwość powtarzania systemu badawczego jest jednakowa dla wszystkich głowic ultradźwiękowych, również takich, które badają objętość szyny w bliskiej odległości od głowicy gdzie szerokość wiązki ultradźwiękowej jest znacznie mniejsza.

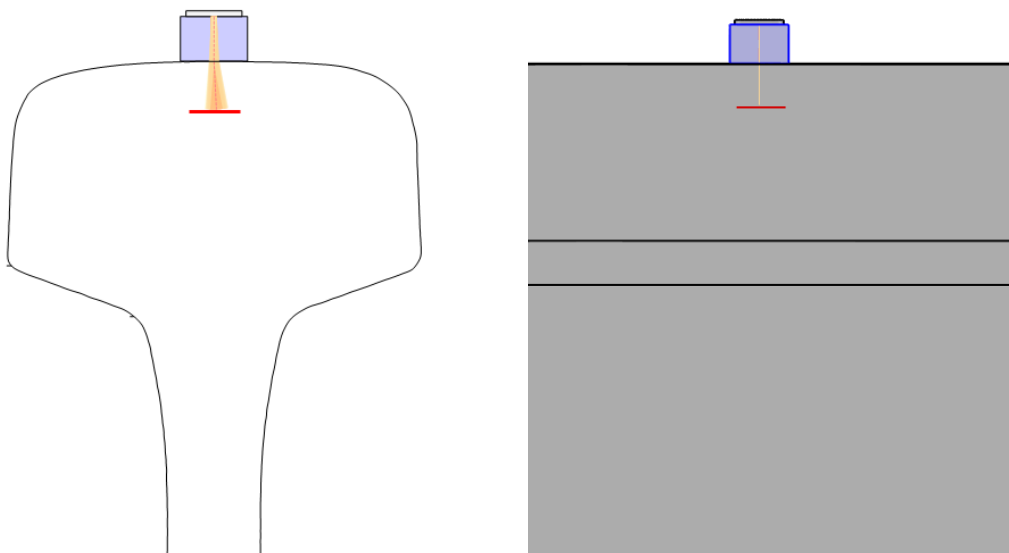
Zamodelujemy zatem obwiednie punktowe wady modelowej położonej w górnej strefie głowki szyny wykrywanej normalną głowicą podwójną o symbolu 3LD0-D10 (częstotliwość nominalna $f = 3$ MHz, średnicy przetwornika $D = 10$ mm). Jest to przykład typowej konfiguracji badawczej służącej do wykrywania wad kontaktowo zmęczeniowych szyn typu *head checking* lub *squat*.

Obliczone pole czułości głowicy 3LD0-D10 pokazano na rys. 7. Jak widać jest ona dobrze zoptymalizowana do wykrywania wad horyzontalnych położonych na głębokości od kilku do kilkunastu mm pod powierzchnią szyny.



Rys. 7. Pole czułości głowicy typu 3LD0-D10 do badania głowki szyny.

Zasymulowaną konfigurację badania głowki szyny pokazano na rys. 8. Wada modelowa ma kształt koła o średnicy 10 mm i położona jest w środku głowki na głębokości 10 mm pod powierzchnią skanowania. W czasie badania głowica ustawiona jest na linii środkowej szyny i przesuwa się wzdłuż tej osi (kierunek X). Częstotliwość powtarzania systemu ultradźwiękowego jest taka sama jak dla poprzednio i wynosi $f_p = 5$ MHz.



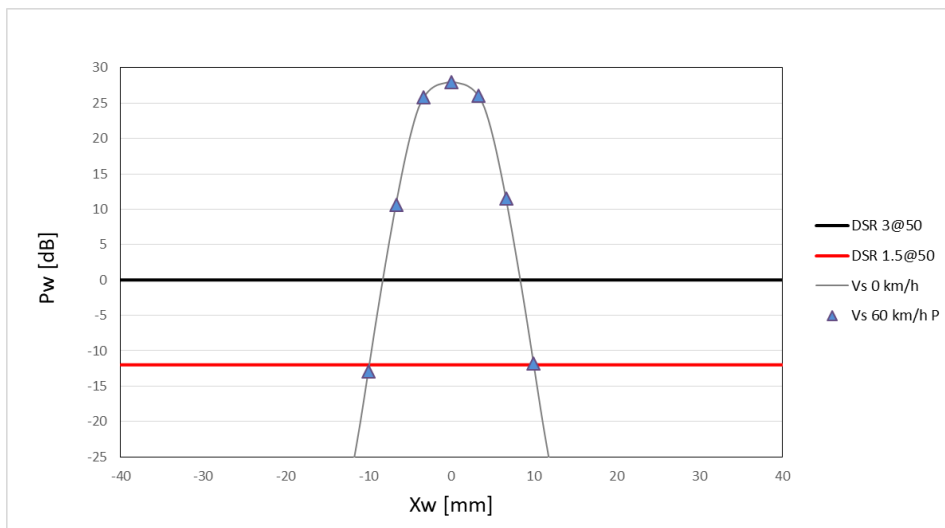
Rys. 8. Model badania głowki szyny na wady horyzontalne za pomocą głowicy normalnej typu 3LD0-D10.

Wyniki obliczeń obwiedni punktowych dla przedmiotowej wady głowki uzyskane głowicą 3LD0-D10 pokazano na rys. 9. Podobnie jak poprzednio obliczenia wykonano dla prędkości skanowania V_s wynoszących odpowiednio 60 km/h, 120 km/h oraz 200 km/h.

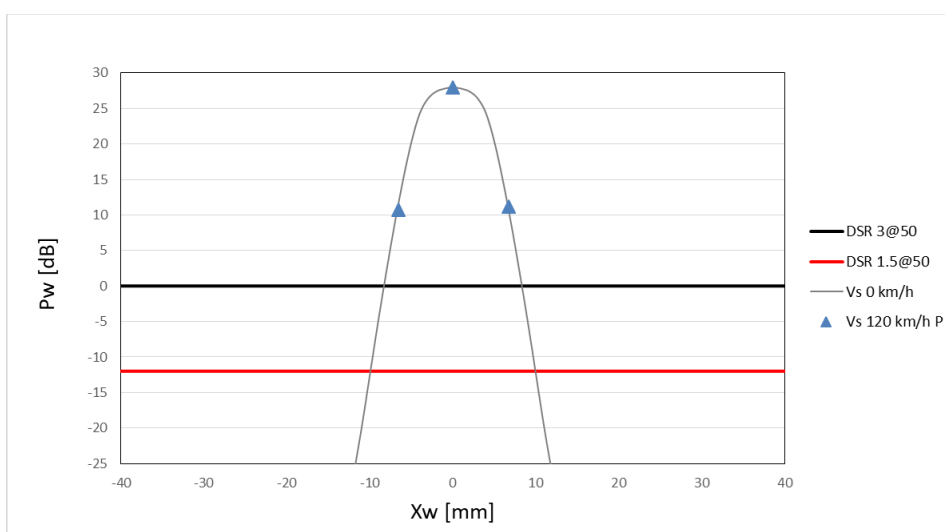
Jak można było oczekiwać, dla wady położonej blisko powierzchni szerokość obwiedni jest znacznie mniejsza i w konsekwencji liczba punktów obwiedni punktowych powyżej progu detekcji znacząco spada. Jedynie dla prędkości skanowania $V_s = 60$ km/h liczba punktów detekcji wady modelowej $N_{60}=5$ jest wystarczająca dla bezproblemowej identyfikacji wskazania jako istotnego. Automatyczne systemy dyskryminacji wskazań stosowane w wagonach defektoskopowych wymagają zazwyczaj detekcji wskazania w co najmniej 5 – 6 kolejnych cyklach częstotliwości powtarzania. W przeciwnym wypadku wskazanie traktowane jest jako nieistotne i odrzucone przez system. Podejście takie wynika z dużej liczby fałszywych wskazań, które nie są związane z rzeczywistymi wadami lecz są wynikiem zaburzeń sprzężenia akustycznego lub szumów elektronicznych.

Obwiednia punktowa uzyskana przy prędkości skanowania $V_s=120$ km/h wykazuje trzy punkty detekcji $N_{120}=3$, natomiast dla prędkości skanowania $V_s=200$ km/h zaledwie dwa. Widać więc, że przy wykrywaniu wady o wielkości 10 mm, łatwo wykrywalnej w badaniu quasi statycznym, przy dużej prędkości skanowania natrafiamy na poważne trudności związane ze zbyt małą rozdzielczością skanowania wzdłuż osi szyny.

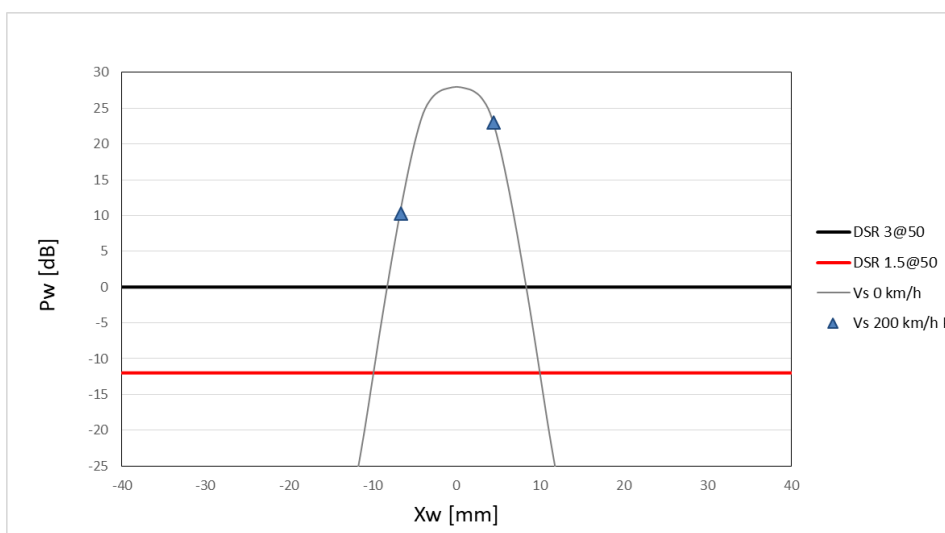
Wydaje się, że w algorytmach dyskryminacji wskazań można nieco obniżyć minimalną liczbę punktów detekcji np. do 3. Oznaczałoby to, że badanie szyn z prędkością skanowania ok. 120 km/h jest prędkością graniczną o ile chce się zachować rozsądną wykrywalność wad leżących blisko powierzchni. Dalsze zwiększanie prędkości badania skutkować będzie ograniczaniem wykrywalności do wad, których długość znacznie przekracza 10 mm lub też, w przypadku obniżenia kryteriów dyskryminacji wskazań, do dużej liczby fałszywych wskazań.



a) $V_s = 60 \text{ km/h}$, $f_p = 5 \text{ kHz}$



b) $V_s = 120 \text{ km/h}$, $f_p = 5 \text{ kHz}$



c) $V_s = 200 \text{ km/h}$, $f_p = 5 \text{ kHz}$

Rys. 9. Obwiednie punktowe echa wady modelowej główki obliczone dla prędkości skanowania: a) 0 km/h, b) 120 km/h, c) 200 km/h i częstotliwości powtarzania 5 kHz.

Przeprowadzone symulacje wskazują, że znaczne zwiększenie prędkości skanowania ultradźwiękowego prowadzi do poważnych problemów o charakterze podstawowym związanych z relacją prędkości skanowania do prędkości fali ultradźwiękowej oraz samą zasadą działania impulsowej metodą echa. Brak zrozumienia i uwzględnienia tych ograniczeń może prowadzić do obniżenia wykrywalności wad i ogólnego spadku jakości badań. Symulacje badań ultradźwiękowych stanowią tutaj ważne narzędzie analizy pozwalające na szczegółową ocenę przedstawionych problemów dla konkretnych konfiguracji badawczych.

4. INNE PROBLEMY ZWIĄZANE Z WYSOKĄ PRĘDKOŚCIĄ SKANOWANIA

Oprócz omówionych powyżej problemów o charakterze podstawowym badania ultradźwiękowe z dużymi prędkościami skanowania nastręczają szereg innych problemów technicznych, które mogą być jednak rozwiązane przez udoskonalenie dotychczas stosowanych systemów.

Jednym z takich problemów jest mechanika prowadzenia głowic ultradźwiękowych po powierzchni obiektu badania. W rozpatrywanym przez nas przypadku zautomatyzowanych badań szyn w torze układ zawieszenia głowic musi zapewnić odpowiednie prowadzenie głowic po powierzchni tocznej głowki szyny. Zwiększenie prędkości skanowania z 50 km/h do 100 - 120 km/h oznacza, że prędkość reakcji układu zawieszenia głowic na nierówności powierzchni szyny (np. falistość średnio i długofalowa) musi być przynajmniej dwukrotnie większa. Oznacza to konieczność zwiększenia docisku sprężyn lub/i zmniejszenia masy bloków głowic. Zwiększenie docisku głowic do powierzchni szyn jest niekorzystne z uwagi na zwiększone tarcie i szybsze zużycie mechaniczne powierzchni czołowych bloków głowic. Preferowaną metodą powinno być zatem zmniejszenie masy bloków głowic. Oznacza to konieczność zmniejszenia rozmiarów obudów bloków oraz optymalizacji sposobu rozmieszczenia głowic w blokach. W tym kontekście korzystne może być zrezygnowanie z bloków trójgłowicowych na rzecz konsekwentnego stosowania bloków dwugłowicowych. Oprócz zmniejszenia masy bloków spowoduje to skrócenie ich długości co z kolei może mieć korzystny wpływ na stabilność sprzężenia akustycznego pomiędzy głowicami i powierzchnią szyny.

Innym problemem mechanicznym, który narasta przy zwiększaniu prędkości skanowania jest narażenie bloków głowic na uszkodzenia mechaniczne w wyniku uderzania w krawędzie wad powierzchniowych czy końcówek szyn w połączeniach łukowych lub na rozjazdach. Wymaga to odpowiedniego wyprofilowania i wzmocnienia krawędzi czołowych bloków głowic.

Jednym z najtrudniejszych problemów jaki pojawia się przy zwiększeniu prędkości skanowania do 100 – 120 km/h jest zapewnienie dobrego i stabilnego sprzężenia akustycznego między przylgami głowic a powierzchnią szyn. Przy tych prędkościach nie wystarcza już zwykle grawitacyjne doprowadzenie wody przez otwór w bloku głowic umieszczony przed głowicami. Z uwagi na większą prędkość przesuwu głowicy po obiekcie konieczne jest zwiększenie ilości wody doprowadzanej pod głowice w jednostce czasu. Z drugiej strony większa prędkość głowic względem powietrza powoduje efektywny wzrost ciśnienia przy wylotach otworów irygacyjnych bloków głowic i w efekcie utrudnia wypływ z nich wody. Dobrym rozwiązaniem tego problemu może być odpowiednie zwiększenie ciśnienia wody doprowadzanej do bloków głowic tak aby pokonać ciśnienie powietrza na wylotach otworów oraz zwiększyć ilość wody dostarczanej pod głowice. Łatwym sposobem zwiększenia ciśnienia wody i poprawy sprzężenia akustycznego jest zastosowanie pompy hydraulicznej sterowanej wydatkiem. Można przewidywać, że konieczne będzie automatyczne dostosowywanie wydajności pompy do aktualnej prędkości jazdy wagonu defektoskopowego.

Nowym problemem jaki może się pojawić w związku ze zwiększeniem prędkości przepływu wody w otworach bloków głowic i pod głowicami może być kawitacja. W celu ograniczenia tego zjawiska należy odpowiednio zaprojektować kanaliki doprowadzające wodę w blokach głowic tak aby uniknąć gwałtownych zmian kierunku strugi i jej przekroju. Wydaje

się też, że jedynym sposobem właściwego zaprojektowania systemu sprzężenia akustycznego dla dużych prędkości skanowania jest wykorzystanie laboratoryjnego stanowiska badawczego umożliwiającego testowanie systemu sprzężenia akustycznego głowic ultradźwiękowych przy prędkościach względnego przesuwu głowicy i obiektu badania odpowiadających docelowej prędkości skanowania szyn.

Osobnym problemem jest zaprojektowanie i zbudowanie systemu aparatury ultradźwiękowej do jednoczesnej obsługi ok. 20 głowic ultradźwiękowych. Nie wchodząc tutaj w szczegóły tego rozległego tematu można jedynie wskazać na jeden specyficzny problem ściśle związany z dużą prędkością skanowania. W większości automatycznych systemów badań ultradźwiękowych impulsy częstotliwości powtarzania generowane są przez enkodery położenia odmierzające drogę przesuwu głowic po powierzchni obiektu. System badawczy konfiguruje się tak aby wysyłał kolejne impulsy nadawcze w określonych interwałach drogi pokonywanej przez głowice, np. co 1 mm. Jest to rozwiązanie bardzo korzystne ponieważ system zapisuje wyniki badania w ściśle określonych położeniach niezależnie od faktycznej prędkości skanowania obiektu. Oznacza to również, że częstotliwość powtarzania systemu jest zmienna i sterowana przez enkoder położenia w oparciu o prędkość ruchu skanera z głowicami.

Niestety tego prostego i efektywnego rozwiązania nie da się bezpośrednio zastosować w wagonach defektoskopowych poruszających się z prędkościami rzędu 100 km/h i powyżej. Przy prędkości skanowania 100 km/h i ustawieniu kroku skanowania na 1 mm częstotliwość powtarzania dyktowana przez enkoder wynosiłaby aż 27,8 kHz czyli wielokrotnie więcej niż dopuszcza fundamentalne ograniczenie opisane w rozdz. 3. Aby przy tej prędkości badania częstotliwość powtarzania mieściła się w dopuszczalnym zakresie do 5 kHz, krok skanowania należałoby ustawić na $\Delta X=6$ mm. Jednak tak rzadkie skanowanie szyn, nieuniknione dla dużych prędkości badania, byłoby niekorzystne na odcinkach torów gdzie wagon inspekcyjny może zwolnić np. do 50 km/h i krok skanowania mógłby wynosić tylko 3 mm. Oznacza to, że w celu uzyskania optymalnych rezultatów badania krok skanowania nie może być ustawiony na sztywno lecz powinien być automatycznie dostosowywany do aktualnej prędkości jazdy wagonu defektoskopowego. Byłaby to pewna komplikacja układu badawczego jednak korzyści z jej implementacji są oczywiste i bardzo istotne dla jakości badań defektoskopowych.

6. PODSUMOWANIE

W artykule omówiono problemy wiążące się z badaniami ultradźwiękowymi prowadzonymi przy dużych prędkościach skanowania. Jednym z przykładów takich badań są badania ultradźwiękowe szyn na eksploatowanych torach kolejowych. Przy dużych prędkościach skanowania ujawniają się fundamentalne ograniczenia metodologii defektoskopowych badań ultradźwiękowych. Są one związane z relacją prędkości skanowania do prędkości propagacji fal ultradźwiękowych oraz z samą ideą impulsowej metody echa. Ograniczeń tego rodzaju nie można pokonać przez zwykłe ulepszenie czy zwiększenie wydajności dotychczas stosowanych rozwiązań sprzętowych. Należy raczej je zrozumieć i dostosować do nich stosowaną metodykę badawczą. Bardzo pomocne w tym zakresie są programy komputerowe do symulacji badań ultradźwiękowych o ile tylko uwzględniają dynamiczny model badania ultradźwiękowego opisany w rozdz. 2.

Oprócz problemów o charakterze podstawowym opisano także kilka innych problemów związanych z prowadzeniem badań ultradźwiękowych z wysoką prędkością skanowania. Dotyczą one w szczególności mechaniki prowadzenia głowic po powierzchni obiektu badania, sprzężenia akustycznego oraz sposobu sterowania częstotliwością powtarzania systemu badawczego. Generalnie są to problemy techniczne, które można rozwiązać przez udoskonalenie istniejących rozwiązań. Niezależnie od tego może to wymagać znacznie głębszego i dokładniejszego przeanalizowania poszczególnych aspektów badania ultradźwiękowego.

LITERATURA

- [1] Z. Popovic, L. Puzavac, L. Lazarevic, Rail defects due to rolling contact fatigue., *Building Materials and Structures* **54** (2011) 2(17-29)
- [2]] Z. Popovic, L. Brajovic, L. Lazarevic, L. Milosavljevic, Rail defects head checking on the Serbian railways., *Technicki vjesnik* 21, 1(2014), 147-153
- [3] N. Gengembre, Pencil method for ultrasonic beam computation., WCU 2003, Paris Sept. 7- 10, 2003.
- [4] L.W. Schmerr, Jr, *Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation. A Modeling Approach. Second Edition*, Springer International Publishing Switzerland 2016.
- [5] S. Mackiewicz, Modelowanie propagacji fal ultradźwiękowych w badaniach nieniszczących., *Materiały XXV Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”*, Zakopane 20-22 marca 2019.
- [6] S. Mackiewicz, Wykorzystanie modelowania propagacji fal ultradźwiękowych do optymalizacji układów głowic stosowanych w technice TOFD, *Materiały XXVI Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”*, Zakopane 23-26 maja 2023.
- [7] T. Katz, S. Mackiewicz, Z. Ranachowski, Z.L. Kowalewski, Ł. Antolik, Ultrasonic detection of transversal cracks in rail heads - theoretical approach, *ENGINEERING TRANSACTIONS*, ISSN: 0867-888X, DOI:10.24423/EngTrans.1695.20211220, Vol.69, No.4, pp.437-456, 2021

