

Metoda oceny komfortu jazdy w łukach i krzywych przejściowych

Niniejszy referat zawiera opis pomiarów i metodyki obliczeń komfortu podróżowania taborem konwencjonalnym po torze o znacznej liczbie łuków

1. WSTĘP

Komfort jazdy pasażerów jest kompleksowym odczuciem, wywieranym na pasażera przez ruchy pudła pojazdu szynowego, transmitowane na cały organizm człowieka poprzez podłogę, siedzisko i oparcie fotela. Odczucie to może być klasyfikowane jako:

- odczucie średnie: bazujące na drganiach o ciągłej ekspozycji występujących w dłuższym okresie czasu (przynajmniej kilka minut),
- odczucie chwilowe: nagła zmiana średniego odczucia, wynikająca z krótkotrwałych impulsów przyspieszenia (zmiana wartości średniego przyspieszenia poprzecznego, kołysanie przy znacznej prędkości, poprzeczne szarpnięcia z możliwymi oscylacjami).

Oba typy odczuć, pierwsze i drugie brane są pod uwagę w obliczeniach komfortu średniego. Drugi typ odczuć jest brany pod uwagę w przypadku komfortu chwilowego w krzywych przejściowych i łukach.

Dla określenia komfortu podróżowania niezwykle istotną sprawą jest uwzględnienie wrażliwości pasażerów na wielkość sygnału wymuszającego oraz jego częstotliwość. Drgania mechaniczne występujące w wagonach pasażerskich, elektrycznych zespołach trakcyjnych bądź nowoczesnych składach całopociągowych typu TGV bądź ICE różnią się od tych obserwowanych w innych dziedzinach transportu. Sprawia to, że określenie komfortu podróżowania dla warunków kolejowych musi być inne niż to o którym jest mowa w normie ISO 2631.

2. CHARAKTERYSTYCZNE CECHY DRGAŃ MECHANICZNYCH WYSTĘPUJĄCYCH W PASAŻERSKIM TABORZE KOLEJOWYM

Podstawowymi cechami drgań występujących na kolei, które wyróżniają je od innych dziedzin transportu są:

- rozkład częstotliwości sygnałów przyspieszeń - podstawowa energia drgań zawarta jest w niskim zakresie częstotliwości
- ogólny niski poziom energii drgań
- słaba stacjonarność sygnału przyspieszeń drgań rejestrowanych w trakcie całej podróży

2.1 Częstotliwość drgań

W zakresie częstotliwości 0.5 - 2 Hz, największa energia drgań przenoszona jest dla kierunku pionowego i poprzecznego do osi toru. Związane jest to z charakterystykami sprężystymi pierwszego i drugiego stopnia usprężynowania. Rozpatrując uproszczony dwumasowy model pojazdu szynowego o następujących parametrach:

M_1 - masa wózka

M_2 - masa pudła

K_1 - pionowa sztywność pierwszego stopnia usprężynowania

K_2 - pionowa sztywność drugiego stopnia usprężynowania

otrzymamy dwie częstotliwości drgań własnych związane z charakterystykami usprężynowania w kierunku pionowym zgodnie z wzorem 1

$$f_{1,2} = 1/2\pi \sqrt{\frac{M_1 K_2 + M_2 (K_1 + K_2) \pm \sqrt{M_1^2 K_2^2 + M_2^2 (K_1 + K_2)^2 + 2M_1 M_2 K_2 (K_2 - K_1)}}{2M_1 M_2}} \quad (1)$$

Ogólnie dla wagonów pasażerskich można stwierdzić, że niższa częstotliwość drgań własnych bliska jest wartości ok. 1 [Hz], natomiast wyższa częstotliwość wynosi ok. 8 Hz. Dla przykładu można podać, że dla wagonów TGV częstotliwości te wynoszą odpowiednio ok. 0.7 Hz i 6.7 Hz.

Wagon pasażerski z uwagi na jego długość może ponadto rozpatrywany być jako belka podparta na dwóch elementach sprężystych. Pierwsza częstota własna tak rozpatrywanego modelu wyraża się wzorem:

$$f_1 = 1/2\pi \sqrt{\frac{31.43 * E * I}{mL^3}} \quad (2)$$

gdzie:

E - moduł Younga

m - masa belki

L - długość belki

Dla nowoczesnych wagonów o stalowej konstrukcji (wagony TGV) częstotliwość drgań giętych pudła wynosi ok. 8 Hz. Dla starszych konstrukcji zgodnie z wymogami karty UIC częstotliwość ta jest wyższa od 10 Hz. Wymagania dotyczące tej częstotliwości związane były z faktem, że według badań przeprowadzonych dla określenia szkodliwego oddziaływania drgań na organizm człowieka zakres częstotliwości od 4 do 8 Hz był zakresem najsilniej wpływającym na organizm człowieka w przypadku drgań pionowych. Późniejsze prace dotyczące zagadnień komfortu częstotliwości odczuwalnej przez człowieka kształtuje się w zakresie od 6 do 16 Hz. Oczywiście stało się, że przy ogólnym zmniejszeniu poziomu drgań dzięki zastosowaniu nowoczesnych rozwiązań wózków i usprężynowania drugiego stopnia konstruowanie pudeł o częstotliwości drgań giętych powyżej 16 Hz jest technicznie nieuzasadnione.

Również w Polsce ostatnie konstrukcje (zwłaszcza wagonów bezprzedziałowych) posiadają częstotliwość drgań giętych pudła ok. 8 Hz. W przypadku drgań poprzecznych do osi toru dla określonych sztywności pierwszego i drugiego stopnia usprężynowania, częstość drgań własnych jest zdeterminowana głównie przez poprzeczną sztywność drugiego stopnia usprężynowania, która jest niższa od sztywności usprężynowania pierwszego stopnia. Dla przykładu częstotliwości drgań poprzecznych wagonów TGV wynoszą odpowiednio $f_1=0.35$ Hz i $f_2=1.4$ Hz.

2.2 Poziom drgań występujący w wagonach pasażerskich

Poziom przyspieszenia drgań występujący w wagonach pasażerskich jest na ogół niski. Dla taboru projektowanego w ostatnich latach wartość rms sygnałów przyspieszeń drgań mierzonych pomiędzy 0 a 25 Hz jest na ogół mniejsza od 0.4 m/s^2 .

W tabeli 1 przedstawiono górne wartości funkcji dystrybuanty rms sygnałów przyspieszeń dla kwantyli 50% zmierzone podczas badań opisanych w rozdziale 3.

Tab.1 Maksymalne wartości kwantyli 50% rms sygnałów przyspieszeń

Sygnały pomiarowe	górna granica rozkładu rms 50%
Drgania wzdłużne na podłodze	0.06 m/s^2
Drgania pionowe na podłodze	0.2 m/s^2
Drgania poprzeczne na podłodze	0.4 m/s^2
Drgania wzdłużne na siedzisku fotela	0.13 m/s^2
Drgania poprzeczne na siedzisku fotela	0.2 m/s^2
Drgania wzdłużne na oparciu fotela	0.17 m/s^2

Jak z tego wynika można generalnie stwierdzić że sygnały przyspieszenia drgań mierzone w pudle wagonów pasażerskich:

- posiadają ogólny niski poziom wartości rms
- dla kierunku pionowego i poprzecznego podstawowa energia drgań przenoszona jest w paśmie do 1 Hz.

2.3 Stacjonarność sygnałów

Sygnały przyspieszeń mierzone na pudle zmieniają się w trakcie jazdy wagonu z uwagi na zmianę takich parametrów jak prędkość pociągu i zmienne parametry geometryczne toru. Pionowe wymuszenia od toru mają charakter losowy i tylko w przybliżeniu mogą być zaliczone do klasy procesów gaussowskich. Ze zwiększaniem prędkości jazdy i poszerzeniem zakresu rozpatrywanych częstotliwości, gęstości prawdopodobieństwa tych wymuszeń stają się w porównaniu z rozkładem normalnym bardziej asymetryczne i mają ostrzej zarysowane maksimum. Pionowe dynamiczne nierówności toru nie mogą być zaliczone do nierówności typu szumu białego, a także nie mogą być uznane za okresowe.

W związku z powyższym wykresy gęstości widmowej mocy np. pionowego przyspieszenia pudła wagonu mierzone na torach o różnych stanach utrzymania wykazują istotne

różnice zarówno co do wartości sygnału jak i charakterystycznych pików rezonansowych. Przeprowadzone pomiary wskazują również, że wartość rms sygnałów przyspieszeń obliczana dla odcinków 5-cio sekundowych zmienia się np. dla okresu 300 sekund w sposób istotny (nie stanowiąc rozkładu normalnego).

Powyższe wyniki i rezultaty badań sugerują, że dla właściwego opisanie drgań mechanicznych oddziaływających na pasażera w trakcie podróży potrzebne są odpowiednie wskaźniki bazujące nie na wartości średniej, ale z uwagi na słabą stacjonarność sygnałów przyspieszeń, na statystycznych metodach obróbki danych bazujących na rozkładach prawdopodobieństwa sygnałów przyspieszeń.

3. FILTRY KOREKCYJNE

Do roku 1980 przeprowadzono dużą ilość badań mających ustalić wrażliwość człowieka na oddziaływające nań drgania. Filtry korekcyjne budowane były poprzez porównanie odczucia komfortu przez określoną populację ludzi poddawanych oddziaływaniu sygnałem wzorcowym o stałej amplitudzie i stałej częstotliwości a sygnałami sinusoidalnymi o zmiennej częstotliwości i amplitudzie.

W tabeli 2 przedstawiono podstawowe szczegóły przeprowadzonych badań

Tabela 2 Badania mające na celu określenie filtrów korekcyjnych

Autor	Data	Zakres częstotliwości [Hz]	Ilość osób poddanych badaniom	Amplituda sygnału odniesienia [m/s^2]	Częstotliwość sygnału odniesienia [Hz]
Miwa	1967	0.5-300	10 mężczyzn	1	20
Schoenberg i Harris	1971	4 - 20	10 mężczyzn	0.56	9
Jones i Sanders	1972	4 - 80	30 mężczyzn 30 kobiet	1.4	20
Griffin	1976	3 - 20	10 mężczyzn	0.75	10

Późniejsze badania wykazały że różnice w otrzymanych wynikach rosną w miarę wzrostu różnicy pomiędzy częstotliwością sygnału odniesienia a sygnału testowego. Ponadto okazało się że dla amplitud z zakresu $0.25 \text{ m/s}^2 - 0.75 \text{ m/s}^2$ odczucie komfortu jest niezależne od amplitudy sygnału odniesienia. Dlatego też amplituda sygnału odniesienia winna być wybrana możliwie blisko do amplitud występujących w rzeczywistych warunków kolejowych. W oparciu o te doświadczenia opracowano na Uniwersytecie Southhampton specjalne filtry korekcyjne dla warunków kolejowych

4. KOMFORT JAZDY

Metody służące do określenia wskaźnika komfortu podróżowania składają się z kilku faz:

- pomiarów przyspieszeń w wybranych punktach pojazdów
- filtrowania sygnału optymalnymi filtrami korekcyjnymi
- stworzeniu odpowiedniego modelu stochastycznego w którym sygnałami wejściowymi będą wybrane sygnały przyspieszeń a sygnałem wyjściowym wskaźnik komfortu
- stworzeniu odpowiedniego modelu psychotechnicznego (opartego na odczuciu ludzi) dla którego sygnałem wyjściowym będzie wskaźnik komfortu
- porównaniu danych wyjściowych z obu modeli i optymalizacja modelu stochastycznego

Prace związane z metodami określenia średniego komfortu były prowadzone wspólnie przez koleje europejskie od wielu lat [3]. Na podstawie tych prac przygotowano Kartę UIC 513 w której znaleźć można metody obliczeń wskaźników komfortu jazdy (N_{MV}, N_{VA}) na podstawie pomiaru odpowiednich przyspieszeń. Prace dotyczące komfortu chwilowego prowadzone były tylko przez koleje brytyjskie [2], a więc można stwierdzić, że w chwili obecnej brak jest doświadczeń większości kolei europejskich w metodach obliczania wskaźników komfortu chwilowego.

W roku 1997 wprowadzono normę europejską [3] dotyczącą oceny komfortu podróżowania. W części nieobowiązkowej tej normy określono metody oceny komfortu jazdy w krzywych przejściowych. Jako ocenę procentowej ilości osób niezadowolonych przyjęto wskaźnik P_{CT} definiowany jako:

$$P_{CT} = (A \ddot{y} + B \ddot{\ddot{y}} - C) + D \vartheta^E \quad (3)$$

gdzie:

\ddot{y} — maksymalna wielkość przyspieszenia poprzecznego pudła pojazdu uśredniana dla 1 sekundy (z przesunięciem $1/10$ sekundy), w odstępach czasu pomiędzy początkiem krzywej przejściowej i jej końcem — +1,6 sekundy,

$\ddot{\ddot{y}}$ — maksymalna pochodna przyspieszenia poprzecznego, pomiędzy dwoma punktami oddalonymi od siebie o 1 sekundę,

ϑ — maksymalna bezwzględna prędkość kołysania pudła, uśredniona dla 1 sekundy z przesunięciem $1/10$ sekundy.

A, B, C, D, E — odpowiednie stałe

Z uwagi na specyficzną metodykę badań przyjętych dla określenia wskaźnika P_{CT} (jazdy z przyspieszeniami odśrodkowymi w płaszczyźnie toru a_{rt} — do $1,8 \text{ m/s}^2$) w CNTK przeprowadzono badania komfortu jazdy w łukach i krzywych przejściowych [4] mające na celu:

- weryfikację metody podanej w ww. normie do warunków PKP (jazdy z przyspieszeniami odśrodkowymi w płaszczyźnie toru a_{rt} — do $1,0 \text{ m/s}^2$),
- określenie innych parametrów wpływających na odczucie komfortu.

5. METODYKA BADAŃ

Oszacowanie ilościowe komfortu jazdy pasażerów może odbywać się za pomocą pomiarów pośrednich, np. pomiary i obróbka odpowiednich wielkości przyspieszeń i prędkości kołysania. Metoda ta może być jednak stosowana w przypadku wcześniejszego określenia wskaźnika komfortu. Można również zastosować inny rodzaj badań i obliczeń, tzw. badania bezpośrednie, bazujące na bezpośrednim oszacowaniu percepcji badanych pasażerów. Dla realizacji tych badań wybrano kombinowaną metodę badań włączającą obie metody, pośrednią i bezpośrednią. Oznacza to, że podczas długotrwałych pomiarów w odpowiednich chwilach czasowych pasażerowie byli pytani o ocenę komfortu podróżowania, a rejestracja wybranych sygnałów pomiarowych odbywała się w sposób ciągły. Przyjęty sposób oceny komfortu podróżowania przez pasażerów był zgodny z wcześniejszymi pracami Komitetu ERRI B153, różnił się jednak w sposób zasadniczy od metody zastosowanej przez koleje brytyjskie. W przypadku kolei brytyjskich pasażerowie nie oceniali stopnia komfortu, a jedynie zgłaszali odczucie dyskomfortu (poprzez naciśnięcie odpowiedniego przycisku) w momencie jego wystąpienia.

5.1. Ogólne zasady wyboru i rozmieszczenia pasażerów podczas badań

Przy ustalaniu zasad wyboru i rozmieszczenia pasażerów w wagonie przyjęto następujące założenia:

- badaniom zostanie poddanych dwunastu pasażerów
- pasażerowie zostaną podzieleni na dwie grupy (numerowane A i B)
- skład grupy pozostanie niezmienny podczas pomiarów
- obie grupy składać się będą z pasażerów o różnej płci i różnym wieku
- pierwsza grupa pasażerów zajmować będzie przedział nad wózkiem natomiast druga w środku wagonu
- w każdej jeździe pomiarowej połowa pasażerów będzie zwrócona twarzą do kierunku ruchu, a druga połowa w kierunku przeciwnym
- pasażerowie pozostaną nad tym samym wózkiem (wózek prowadzący w jeździe do przodu i tylny w jeździe powrotnej).

5.2. Oszacowanie komfortu

Podczas badań pasażerowie byli odpytywani o dwa typy odczucia komfortu:

- chwilowy komfort w znaczących punktach linii kolejowej
- średni komfort (co 5 minut).

Punkty na linii do oceny komfortu chwilowego zostały wybrane wg. następujących kryteriów:

- początek krzywej przejściowej na bardziej znaczących łukach
- na krzywej przejściowej łączącej dwa łuki
- na pełnych łukach przy ustalonym przyspieszeniu odśrodkowym
- na prostych odcinkach toru.