

Przegląd badań i wyzwań w zakresie taboru kolejowego

Krzysztof BRACHA¹, Andrzej CHOJNACKI², Zbigniew CICHOCKI³, Witold GROLL⁴,
Zbigniew JELEŚNIAŃSKI⁵, Jacek KUKULSKI⁶, Henryk SANECKI⁷, Ryszard SKÓRA⁸, Andrzej STRUK⁹,
Piotr TOKAJ¹⁰, Paweł URBAŃCZYK¹¹, Sławomir WALCZAK¹², Grzegorz WYSOCKI¹³, Andrzej ZBIEĆ¹⁴

Streszczenie

Od połowy XX wieku obserwuje się ciągły rozwój zapotrzebowania społeczeństwa na transport pasażerski oraz towarowy. Jedną z ciągle rozwijających się gałęzi transportu jest transport kolejowy. Rozwój transportu szynowego, potrzeba jego optymalizacji oraz zapewnienie najwyższego poziomu bezpieczeństwa stymulował potrzebę ciągłego unowocześniania metod badawczych. Od początku swojego istnienia Instytut Kolejnictwa prowadzi szeroko zakrojone badania taboru. W artykule dokonano przeglądu podstawowych metod badawczych realizowanych przez Laboratorium Badań Taboru. Opisano sposoby realizacji badań dynamicznych pojazdów, badań hamulca, badań bezpieczeństwa jazdy po torze zwichrowanym, badań hałasu oraz badań wytrzymałościowych.

Słowa kluczowe: pojazdy szynowe, badania pojazdów szynowych, badania dynamiki pojazdów, badania hamulca, badania bezpieczeństwa, badania hałasu, badania wytrzymałościowe

1. Wprowadzenie

Zmiany gospodarcze i wynikający z nich wzrost wymiany towarowej oraz mobilności społeczeństw powoduje coraz większe zapotrzebowanie na wydajne, efektywne, a także dostosowane do aktualnych potrzeb środki transportu zarówno pasażerskiego, jak i towarowego. Od połowy XX wieku daje się zaobserwować intensywny rozwój transportu kolejowego wyrażający się zwiększaniem udziału tego transportu w całkowitym wolumenie transportu lądowego. Przeciążenie sieci drogowej i wynikające z niego wydłużenie czasu przejazdu na różnych trasach, wysokie koszty transportu drogowego zarówno pasażerskiego,

jak i towarowego, a także względy ochrony środowiska wskazywały na możliwość podjęcia przez transport kolejowy konkurencji z transportem drogowym. Warunkiem skuteczności tej konkurencji było dostosowanie możliwości transportu kolejowego do rosnących wymagań użytkowników, co stało się podstawowym czynnikiem wymuszającym organizacyjny i techniczny postęp w dziedzinie transportu kolejowego. Postęp dotyczy wszystkich dziedzin techniki składających się na całość systemu kolejowego, a więc również w bardzo istotnym stopniu w obszarze techniki taboru kolejowego. Rozwój techniki taborowej przebiegał i nadal przebiega w kierunku realizacji określonych celów:

¹ Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Taboru; e-mail: kbracha@ikolej.pl.

² Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Taboru; e-mail: achojnacki@ikolej.pl.

³ Dr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Taboru; e-mail: zcichocki@ikolej.pl.

⁴ Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Taboru; e-mail: wgroll@ikolej.pl.

⁵ Inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Taboru; e-mail: zjelesnanski@ikolej.pl.

⁶ Dr hab. inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Taboru; e-mail: jkukulski@ikolej.pl.

⁷ Dr hab. inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Taboru; e-mail: hsanecki@ikolej.pl.

⁸ Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Taboru; e-mail: rskora@ikolej.pl.

⁹ Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Taboru; e-mail: astruk@ikolej.pl.

¹⁰ Dr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Taboru; e-mail: ptokaj@ikolej.pl.

¹¹ Dr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Taboru; e-mail: purbanczyk@ikolej.pl.

¹² Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Taboru; e-mail: swalczak@ikolej.pl.

¹³ Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Taboru; e-mail: gwysocki@ikolej.pl.

¹⁴ Mgr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Taboru; e-mail: azbiec@ikolej.pl.

- zwiększenie prędkości przewozów i wynikające z niego skrócenie czasu przejazdu zarówno w ruchu pasażerskim, jak i towarowym;
- zwiększenie liczby pasażerów oraz masy i rodzajów przewożonych towarów;
- optymalizacja oddziaływania pojazdu na tor i dynamicznego zachowania pojazdu w torze w aspekcie bezpieczeństwa jazdy, szeroko pojętego zużycia toru i układu jezdni taboru, a także komfortu pasażerów;
- minimalizacji oddziaływania taboru na środowisko zarówno pod względem hałasu, jak i oddziaływania drgań na mieszkańców;
- wykorzystania zielonych źródeł energii w transporcie kolejowym;
- ochrona pasażerów i obsługi pociągu (głównie maszynistów) w przypadku zderzenia, czyli zapewnienie w możliwie największym stopniu tzw. bezpieczeństwa biernego;
- obniżenie kosztów eksploatacji w całym cyklu życia taboru;
- zapewnienie możliwości kursowania wszelkiego rodzaju taboru (trakcyjnego i wagonowego) na całej sieci kolei europejskich, czyli tzw. interoperacyjności, zgodnie z odpowiednimi regulacjami prawnymi Unii Europejskiej.

Realizacja tych celów wymaga stałego doskonalenia istniejących, a także wprowadzania nowych rozwiązań konstrukcyjnych w taborze kolejowym. Rozwój technik komputerowych w znacznym stopniu ułatwia i przyspiesza opracowania konstrukcyjne, jednakże podstawową rolę w ocenie prawidłowości przyjętych rozwiązań spełniają badania rzeczywistych obiektów.

Rozwój techniki taborowej w przytoczonych kierunkach wymusza rozwój i doskonalenie technik badawczych zarówno w zakresie badań o charakterze rozwojowym, jak i badań mających na celu weryfikację prawidłowości przyjętych rozwiązań oraz ich zgodności z dokumentami normatywnymi obowiązującymi w Polsce i Unii Europejskiej. Te ostatnie wymagają stosowania ściśle określonych procedur badawczych realizowanych przez akredytowane laboratoria. W artykule opisano wybrane rodzaje badań na podstawie działalności i osiągnięć Laboratorium Badań Taboru Instytutu Kolejnictwa (IK).

2. Badania dynamiki taboru i komfortu podróżowania

Jednym z podstawowych zagadnień, nieodłącznie związanym z ruchem pojazdu szynowego, jest dynamika taboru. Zagadnienia te były już wielokrotnie opisywane, np. w pracach [3, 8, 23]. Pierwszym

sposobem oceny dynamicznego zachowania taboru był współczynnik spokojności biegu W_z , inaczej wskaźnik Sperlinga. Polegał on na pomiarze amplitudy i częstotliwości przyspieszeń na podłodze pojazdu szynowego i przeprowadzeniu obliczeń według wzoru:

$$W_z = 0,896 \cdot c(f) \sqrt[10]{a^3 \cdot f^{-1}} \quad (1)$$

gdzie:

- a – amplituda przemieszczenia, [cm],
- f – częstotliwość drgań, [Hz],
- $c(f)$ – współczynnik wpływu częstotliwości drgań na samopoczucie pasażera.

Następnie, obliczone wartości W_z poddawano ocenie:

- do 1 – drgania ledwo zauważalne,
- do 2 – drgania wyraźnie odczuwalne,
- do 2,5 – drgania silne, ale wciąż komfortowe,
- do 3,25 – drgania silne, nieprzyjemne, ale wciąż tolerowane,
- do 3,5 – drgania wyjątkowo nieprzyjemne, dokuczliwe, nietolerowane przy dłuższym oddziaływaniu,
- do 4 – drgania bardzo dokuczliwe, przy dłuższym oddziaływaniu szkodliwe.

Wraz z rozwojem taboru i stawianych mu wymagań, związanych ze zwiększeniem prędkości podróży, następował rozwój metod badawczych i techniki pomiarowej. Badanie za pomocą wskaźnika W_z stało się niewystarczające. Oprócz pomiarów odzwierciedlających odczucia pasażerów, konieczna stała się ocena zachowania dynamicznego taboru związana z bezpieczeństwem jego ruchu oraz oddziaływania na tor. Z czasem z badania spokojności biegu ewoluowano dwa różne badania:

- badanie komfortu jazdy pasażerów, wykonywane początkowo według karty UIC 513 [5], a później już według normy EN 12299 [10],
- badanie bezpieczeństwa jazdy, właściwości dynamicznych i oddziaływania na tor wykonywane początkowo według karty UIC 518 [6], a później już według normy EN 14363 [12].

Badanie komfortu jazdy według karty UIC 513 [5] można było wykonywać dwiema metodami:

- uproszczoną (wskaźnik N_{MV}) – pomiar przyspieszeń w trzech kierunkach X, Y i Z na podłodze pojazdu;
- pełną, z uwzględnieniem na: pasażera siedzącego (wskaźnik N_{VA}) – pomiar przyspieszeń w kierunku Z na podłodze pojazdu, w kierunku X na oparciu fotela oraz w kierunkach Y i Z na siedzisku fotela oraz na pasażera stojącego (wskaźnik N_{VD}) – pomiar przyspieszeń w trzech kierunkach X, Y

i Z na podłodze pojazdu (w tym przypadku różnica w stosunku do metody uproszczonej wynika z późniejszego sposobu obróbki zarejestrowanych danych).

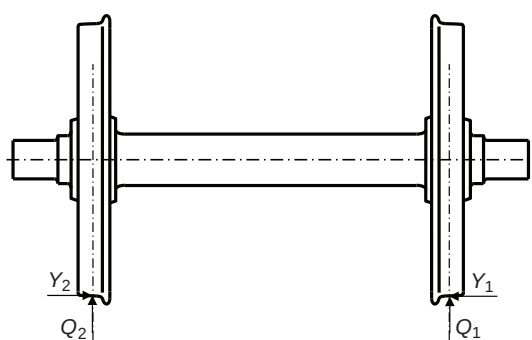
Karta UIC 513 [5] proponuje następującą skalę ocen:

- $N < 1$ – komfort bardzo dobry;
- $1 < N < 2$ – komfort dobry;
- $2 < N < 4$ – komfort umiarkowany;
- $4 < N < 5$ – komfort słaby;
- $5 < N$ – komfort bardzo słaby.

W normie EN 12299 [10] dla komfortu średniego (N_{MV}) przyjęto następującą skalę ocen:

- $N_{MV} < 1,5$ – bardzo komfortowo;
- $1,5 \leq N_{MV} < 2,5$ – komfortowo;
- $2,5 \leq N_{MV} < 3,5$ – średnio;
- $3,5 \leq N_{MV} < 4,5$ – niekomfortowo;
- $N_{MV} \geq 4,5$ – bardzo niekomfortowo.

Drugie z wymienionych badań, powstało na bazie współczynnika spokojności biegu i służy do oceny dynamicznego zachowania taboru związanego z bezpieczeństwem jazdy, właściwościami dynamicznymi i oddziaływaniem na tor. Początkowo było wykonywane według karty UIC 518 [6], a później według normy PN-EN 14363 [12]. W tym celu różne ośrodki badawcze opracowywały metodę ciągłego pomiaru sił w strefie kontaktu koła z szyną podczas jazdy. Chodzi tu o siłę pionową Q oraz siłę poprzeczną Y , nazywaną też siłą prowadzącą (rys. 1).



Rys. 1. Siły oddziaływania QY pomiędzy zestawem kołowym a szyną [fot. A. Zbieć]

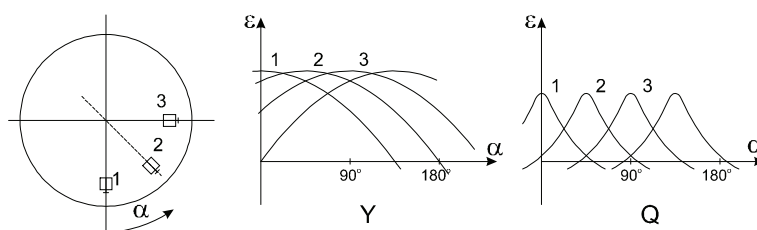
Ówczesne CNTK (Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa), we współpracy z niemieckim ośrodkiem kolejowym w DB Minden, opracowało i wdrożyło metodę opartą na pomiarze momentów gnących na osi zestawu kołowego. W tym celu, w zależności od tego czy jest to oś toczna czy napędna, w pobliżu koła naklejane są na osi odpowiednio trzy lub cztery przekroje specjalnego układu tensometrów (rys. 2 i 3).

W wyniku pomiaru odkształceń oraz zastosowania specjalnych wzorów obliczeniowych możliwe jest określenie sił QY oddziałujących pomiędzy kołem a szyną w dowolnym położeniu kątowym (dowolnym momencie obrotu) zestawu kołowego.



Rys. 3. Zestaw kołowy podczas przygotowywania instalacji do pomiaru sił QY [fot. A. Zbieć]

W Laboratorium Badań Taboru powstało specjalne oprzyrządowanie elektroniczne do automatycznego oraz bieżącego wyznaczenia i odczytu tych sił. Równocześnie, wysyłane są sygnały do aparatury rejestrującej, która zapisuje jednoczesne sygnały pomiarowe ze wszystkich czujników pomiarowych (w tym także czujników przyspieszeń i prędkości, żyroskopowych). Kolejnym etapem jest późniejsza obróbka zarejestrowanych danych. W ramach tej obróbki następuje statystyczne przetworzenie danych pomiarowych z uwzględnieniem założeń wskazanych normą PN-EN 14363 [12]. W zależności od zastosowanych filtrów z tych samych zarejestrowanych danych,



Rys. 2. Zasada pomiaru sił QY za pomocą tensometrów rozmieszczonych na tarczy koła [9]

otrzymuje się dane podzielone na trzy grupy: bezpieczeństwo jazdy (z indeksem „s”), spokojność biegu (z indeksem „q”) oraz oddziaływania na tor (z indeksem „qst” lub „max”). Prezentowane przykładowe dane pochodzą z połączenia wyników jazd na odcinku prostym i na łuku. Oprócz danych związanych bezpośrednio z zachowaniem badanego pojazdu, w sprawozdaniu z badań prezentowane są podstawowe dane, takie jak: prędkość jazdy, niedobór przechyłki w łuku, promienie łuków, szerokość toru, nierówności pionowe i poprzeczne.

Wdrożona przez Laboratorium Badań metoda badawcza, oprócz standardowo prowadzonych badań dopuszczeniowych taboru, została wykorzystana do następujących zadań:

- badania pociągu szybkiego ED250 (Pendolino);
- badania rozjazdów na linii nr 9 Warszawa – Gdańsk i na linii nr 4 CMK;
- badania nowej rodziny EZT.

Zastosowana technika pomiarowa podczas badań pociągu ED250, umożliwiła bezpieczną jazdę z wymaganą prędkością $V_{\max} + 10\%$, czyli 275 km/h. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że w tamtym okresie maksymalna dopuszczalna prędkość na sieci PKP wynosiła 160 km/h. Zatem do przebadania pojazdu zgodnie z założeniami normy PN-EN 14363 [12] wymagano przekroczenia prędkości maksymalnej na linii kolejowej o 115 km/h. W tym celu opracowano specjalny „Tryb postępowania (procedura) jazd pomiarowych z dochodzeniem do prędkości 275 km/h”. Spełnienie zawartych w nim wymagań umożliwiło zwiększenie prędkości jazdy w kolejnym przejeździe o 5, 10 lub 20 km/h w zależności od uzyskanych na bieżąco wyników. Należy także wspomnieć o dodatkowym, szczególnym zaangażowaniu instytucji odpowiedzialnych za przygotowanie torów kolejowych i sieci trakcyjnej. Przy okazji, na linii CMK został ustanowiony nowy rekord prędkości w Polsce wynoszący 293 km/h [1, 2]. Cały proces badań wzbudzał nie tylko duże zainteresowanie medialne, ale także społeczne. Praktycznie wszędzie gromadzili się miłośnicy kolei ze swoimi aparatami fotograficznymi, a stacje na trasach przejazdu były pełne osób chcących zobaczyć z bliska nowoczesny pociąg dużych prędkości (rys. 4).

Ta sama technika pomiarowa (pomiarowe zestawy kołowe oraz specjalna aparatura elektroniczna przetwarzająco-rejestrująca) umożliwiła niestandardowe jej wykorzystanie podczas dopuszczeniowych badań nowych rozjazdów kolejowych skonstruowanych na prędkości 200 km/h na linii Gdańskiej oraz 200 i 250 km/h na Centralnej Magistrali Kolejowej.

W tym celu posłużono się pojazdem o znanej dynamice oraz zamontowano w nim pomiarowe zestawy kołowe. Następnie wykonano wiele próbnych

jazd ze wzrastającą prędkością, aż do osiągnięcia powiększonej o 10% prędkości maksymalnej, tak jak do badań taboru. Następnie, dzięki specjalnemu oprogramowaniu oceniono zachowanie się taboru na wyseparowanym wąskim odcinku toru obejmującym sam rozjazd. W ten sposób metoda badawcza, stosowana zwykle do badań taboru, została z powodzeniem wykorzystana do oceny oraz ostatecznie do dopuszczenia rozjazdów kolejowych.



Rys. 4. Zgromadzone na stacji osoby podczas przejazdu próbnego ED250 (Pendolino) [fot. A. Zbieć]

Równolegle z udoskonalaniem normalnej metody pomiarowej (tj. z użyciem pomiarowych zestawów kołowych i przyspieszeniomierzy) była modyfikowana również uproszczona metoda pomiarowa, polegająca na pomiarze samych przyspieszeń drgań wybranych elementów konstrukcji pojazdu. Uproszczona metoda pomiarowa znajduje swoje zastosowanie szczególnie przy badaniu zespołów trakcyjnych. W ostatnich latach IK przebadło wiele zespołów trakcyjnych, głównie elektrycznych, o prędkościach maksymalnych nieprzekraczających 160 km/h. Pojazdy te są praktycznie wykorzystywane na wszystkich rodzajach tras – od aglomeracyjnych (szybka kolej miejska), po dalekobieżne.

3. Badania hamulcowe

3.1. Historia badań hamulca pojazdów trakcyjnych prowadzonych przez pracowników hamulców IK w Krakowie

Obecna Pracownia Hamulców Instytutu Kolejnictwa, działająca w ramach Laboratorium Badań Taboru, powstała jako Pracownia Hamulców COBiRTK (Centralny Ośrodek Badań i Rozwoju Techniki Kolejnictwa) przy Instytucie Pojazdów Szynowych Politechniki Krakowskiej i początkowo miała siedzibę na ul. św. Filipa w Krakowie.

Pod koniec lat 80. XX wieku, już jako Pracownia Hamulców CNTK (Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa) zmieniła lokalizację i do dziś mieści się przy ul. Półnaki 1 w Krakowie.

Oprócz badań hamulcowych samych pojazdów prowadzone były badania związane z podwyższaniem prędkości pociągów na sieci PKP, np. do 140 km/h (1984 rok), a następnie 160 km/h (1988 rok) na linii CMK i ostatecznie 200 km/h (2014 rok).

Przykładem modernizacji istniejących pojazdów był elektryczny zespół trakcyjny ED73 wyprodukowany w 1997 r. przez ówczesny PaFaWag we Wrocławiu. Także przykładem zakupu nowoczesnych pojazdów była lokomotywa elektryczna E412 (rys. 5) produkowana przez ADtranz. Była ona w pełni nowoczesnym pojazdem zaprojektowanym i produkowanym dla włoskich kolei FS. Ze względu na możliwość zasilania prądem stałym 3 kV, lokomotywa była przewidziana jako baza dla oferowanych polskim kolejom lokomotyw EU43 oraz EU11. Lokomotywy te były badane w latach 1997–2001, niestety wskutek załamania się sytuacji finansowej PKP nie doszło do ich zakupu. Badania tych lokomotyw były jednak przełomem, ponieważ po raz pierwszy dotyczyły całkowicie nowej i nowoczesnej konstrukcji, a badania lokomotywy E412 w 1998 roku były pierwszymi badaniami hamulca prowadzonymi przez Pracownię Hamulców na terenie Toru Doświadczalnego CNTK w Żmigrodzie.



Rys. 5. Lokomotywa elektryczna typu E412 dla włoskich kolei Ferrovie dello Stato Italiane (FS) podczas badań hamulca prowadzonych przez Pracownię Hamulców z Krakowa – Tor Doświadczalny CNTK, 1998 [fot. P. Urbańczyk]

W ramach rozwoju kolei na rynkach regionalnych zaprojektowano i wyprodukowano w polskich firmach lekkie spalinowe pasażerskie pojazdy trakcyjne (nazywane również autobusami szynowymi). Były to pojazdy typu 214M, 218M (prod. PESA) oraz 213M i 215M (prod. ZNTK Poznań).

Następnym krokiem w nowym etapie rozwoju było opracowanie pierwszego, całkowicie nowego polskiego elektrycznego zespołu trakcyjnego ezt ED74 (rys. 6) produkcji PESA Bydgoszcz.



Rys. 6. Elektryczny zespół trakcyjny ED74 podczas przygotowań do badań ruchowych hamulca – stacja Włoszczowa Północ na linii CMK, 2007 [fot. P. Urbańczyk]

Od chwili wstąpienia Polski do Unii Europejskiej nastąpił intensywny rozwój firm produkujących i modernizujących pojazdy szynowe. Zwiększyła się liczba przewoźników kolejowych, którzy nabywali zarówno nowe pojazdy trakcyjne, jak również używane, często pochodzące z zagranicy, więc wymagające dostosowania do współpracy z polską infrastrukturą kolejową – wszystkie te pojazdy przed dopuszczeniem ich do eksploatacji wymagały przeprowadzenia badań, w tym badań hamulca. W pierwszej grupie, nowych pojazdów, znalazły się m.in. ezt Impuls produkcji Newag oraz ezt ELF prod. PESA. W drugiej grupie – wiele m.in. modernizowanych lokomotyw serii SM42, SM48 (TEM2), ST44 (M62) oraz zespołów trakcyjnych EN57, EN71, ED72.

Po nabraniu doświadczenia, polscy producenci z sukcesem rozpoczęli sprzedaż swoich pojazdów dla wymagających klientów europejskich. Oczywiście również te pojazdy wymagały przeprowadzenia badań. Pracownia Hamulców IK prowadziła takie badania również poza granicami Polski, np. spalinowy zespół trakcyjny ATR 220 zakupiony w firmie PESA przez włoskiego przewoźnika, był badany we Włoszech w regionie Lombardia i Emilia-Romania.

Następnym przełomowym okresem były lata 2013–2015, kiedy po raz pierwszy do eksploatacji zostały wprowadzone nowe elektryczne zespoły trakcyjne przeznaczone do ruchu dalekobieżnego – DART prod. PESA oraz FLIRT 3 prod. Stadler, a także pierwszy pociąg dużych prędkości w Polsce – ED 250 Pendolino. Badania tego ostatniego były szczególnym wyzwaniem ze względu na maksymalną prędkość pojazdu wynoszącą 250 km/h.

3.2. Metodyka badań hamulca pojazdów trakcyjnych

Celem badań hamulca każdego pojazdu kolejowego są przede wszystkim:

- sprawdzenie poprawności działania elementów i systemów związanych z hamulcem,
- wyznaczenie skuteczności hamulca.

Dodatkowo, tylko dla pojazdów trakcyjnych, celami badań są:

- sprawdzenie poprawności sterowania hamulcem pociągu,
- sprawdzenie poprawności współpracy z innymi pojazdami połączonymi w trakcji wielokrotnej.

Zakres badań hamulca można podzielić na:

- badania stacjonarne, wykonywane na postoju, których pozytywny wynik pozwala rozpocząć następny etap, czyli:
- badania ruchowe, wykonywane podczas jazdy.

Do prawidłowej oceny poprawności pracy układu hamulcowego pojazdu kolejowego, konieczny jest pomiar:

- ciśnienia sprężonego powietrza (m.in. w cylindrach hamulcowych, przewodzie głównym, zbiornikach pomocniczych, zbiornikach głównych),
- czasów (m.in. napełniania i opróżniania cylindrów hamulcowych, napełniania zbiorników w układzie pneumatycznym),
- sił w parach ciernych (siły nacisku klocków hamulcowych na koła oraz okładzin ciernych na tarce hamulcowe),
- prędkości pojazdu,
- drogi przebytej przez pojazd, w szczególności drogi hamowania,
- opóźnień pojazdu podczas hamowania,
- temperatury elementów par ciernych hamulca.

W trakcie badań stacjonarnych oceniana jest szczelność układu pneumatycznego, poprawność jego działania, prawidłowość sterowania hamulcem i realizacji procesu hamowania i odhamowania oraz sposób informowania maszynisty i personelu pokładowego o stanie hamulca.

Pozytywna ocena wyników badań stacjonarnych jest warunkiem niezbędnym do rozpoczęcia kolejnego etapu – badań ruchowych. Celem badań ruchowych jest sprawdzenie podczas jazdy poprawności działania układu hamulcowego i wszystkich związanych z nim systemów zarówno podczas normalnej pracy, jak też w sytuacjach awaryjnych, w których symulowane są awarie, które mogą zdarzyć się podczas eksploatacji pojazdu. Sprawdzane jest działanie systemów bezpieczeństwa (hamulec bezpieczeństwa

pasażera i maszynisty, czuwak aktywny, SHP – samoczynne hamowanie pociągu, Radio-STOP, ETCS) oraz systemu przeciwpoślizgowego.

Jednym z najważniejszych celów badań ruchowych jest wyznaczenie skuteczności hamulca, która dla europejskich pojazdów kolejowych jest opisywana przez następujące parametry:

- masę hamującą,
- procent masy hamującej,
- opóźnienie hamowania,
- drogę hamowania.

Miejsce badań

Badania stacjonarne hamulca są najczęściej wykonywane w siedzibie Pracowni Hamulców w Krakowie, choć nie jest to obowiązującą regułą. W początkowym okresie istnienia Pracowni, badania ruchowe hamulca pojazdów trakcyjnych były prowadzone na odcinkach jednego z torów normalnie czynnych linii kolejowych, wyłączanych z ruchu na czas badań, na:

- linii kolejowej Kraków – Medyka (m.in. odcinek Podłęże – Kłaj);
- linii kolejowej Warszawa – Kunowice (m.in. odcinek Kutno – Łowicz);
- Centralnej Magistrali Kolejowej.

Natomiast, od 1998 roku miejscem badań ruchowych stawał się coraz częściej Tor Doświadczalny CNTK (obecnie IK). Jazdy badawcze z prędkościami wyższymi niż 160 km/h wykonywane są najczęściej na Centralnej Magistrali Kolejowej.

3.3. Wybrane pojazdy trakcyjne badane przez pracownię hamulców IK w Krakowie

Badaniom hamulca poddawano wszystkie rodzaje pojazdów: zespoły trakcyjne, lokomotywy, tzw. autobusy szynowe, pociągi metra, pojazdy specjalne (m.in. szlifierki do szyn, drezyny pomiarowe), pojazdy dwudrogowe (szynowo-drogowe).

W tablicy 1 przykładowo wymieniono pojazdy, które z perspektywy czasu można uznać za przełomowe i wnoszące nową jakość. Każde z badań hamulca pojazdów wymienionych w tej tablicy zasługuje na nazwę „kamienia milowego” w historii badań hamulca. Niektóre z nich, ponieważ sam pojazd stanowił przełom dla polskich kolei (np. EU43, Pendolino), inne ponieważ zastosowano w nich innowacyjne rozwiązania w układzie hamulcowym (np. ED73, 36WEa-DCC).

Elektryczny zespół trakcyjny dużych prędkości ED 250 Pendolino dla PKP InterCity

Przygotowania do badań rozpoczęły się na długo przed dostarczeniem pojazdu do Polski i obejmowały wiele spotkań technicznych z przedstawicielami

Tablica 1

Wybrane pojazdy trakcyjne badane w Pracowni Hamulców IK w Krakowie

Rok badań	Typ pojazdu	Uwagi
1997	ezt ED73	pierwszy w Polsce zespół trakcyjny z hamulcem tarczowym i pneumatycznym drugim stopniem usprężynowania
1998	lokomotywa E412	pierwsza badana w Polsce lokomotywa z hamulcem tarczowym i elektrodynamicznym, wielosystemowa, do prędkości 200 km/h, przeznaczona dla włoskich kolei FS; pierwszy pojazd badany przez Pracownię Hamulców na torze doświadczalnym w Żmigrodzie
1999 – 2001	lokomotywy EU43 I EU11	pierwsze nowoczesne lokomotywy dla PKP, oparte na konstrukcji lokomotywy E412
2001–2002	214M	pierwszy nowoczesny pojazd skonstruowany w Polsce po upadku komunizmu, tzw. autobus szynowy z hamulcem tarczowym
2007	ezt ED74	pierwszy polski seryjnie produkowany po upadku komunizmu nowoczesny zespół trakcyjny, hamulec tarczowy i elektrodynamiczny, $V_{\max} = 160$ km/h
2011	ATR220	spalinowy zespół trakcyjny – pierwszy pojazd trakcyjny badany przez Pracownię Hamulców poza granicami Polski, we Włoszech
2013	ezt ED250 Pendolino	pierwszy pociąg wysokiej prędkości przeznaczony do eksploatacji w Polsce, $V_{\max} = 250$ km/h
2014	ezt ED160	pierwszy wyprodukowany w Polsce dalekobieżny elektryczny zespół trakcyjny, $V_{\max} = 160$ km/h
2015	Sundeck	pierwszy skonstruowany i wyprodukowany w Polsce pociąg typu Push-Pull, wagony piętrowe, $V_{\max} = 160$ km/h
2018	ezt 36WEa-DCC	pierwszy na świecie elektryczny zespół trakcyjny z układem hamulcowym samoczynnie utrzymującym stałe opóźnienie hamowania, $V_{\max} = 160$ km/h
2020	ezt ER160	pierwszy wyprodukowany w Polsce zespół trakcyjny badany w trakcji potrójnej, $V_{\max} = 160$ km/h

Opracowanie własne.

producenta pojazdu – Alstom Ferroviaria S.p.A., jak również wizytę podczas montażu pojazdu w siedzibie producenta w Savigliano we Włoszech.

Podczas badań napotkano na wiele wyzwań technicznych, pierwsze wyzwanie wynikało z długości pociągu (7 wagonów, długość całkowita ezt wynosiła 187 m) i liczby zastosowanych przetworników pomiarowych, czego skutkiem była łączna długość przewodów pomiarowych wynosząca około 3,5 kilometra. Drugim wyzwaniem była prędkość maksymalna wynosząca 250 km/h, gdzie należało dołożyć szczególnej staranności do zapewnienia bezpieczeństwa jazdy i zabezpieczenia aparatury pomiarowej oraz przewodów zainstalowanych na zewnątrz pojazdu.

Pierwszym etapem były badania stacjonarne, które we wrześniu 2013 r. przeprowadzono na Torze Doświadczalnym IK w Żmigrodzie, a po ich zakończeniu na tym Torze wykonano badania ruchowe. Badania obejmowały próby od prędkości początkowych do 140 km/h.

Trzecim, ostatnim etapem były badania ruchowe hamulca wykonane dla prędkości 160, 250 km/h (rys. 7) przeprowadzone na Centralnej Magistrali Kolejowej, na zamkniętym odcinku linii kolejowej zgodnie ze specjalnie opracowanym regulaminem i metodyką badań. Badania wykonano w listopadzie oraz grudniu 2013 roku.



Rys. 7. Ekipa pomiarowa Pracowni Hamulców z Krakowa podczas badań ezt ED250 Pendolino – Tor Doświadczalny IK, 2013 [fot. P. Urbańczyk]

Elektryczny zespół trakcyjny typu 36WEa z systemem DCC

W trakcie procesu hamowania najważniejszymi elementami, od których zależy nie tylko skuteczność hamulca, ale również stabilność i powtarzalność jego pracy, są elementy par ciernych – w przypadku hamulca tarczowego okładziny cierne i trzecie hamulcowe.

Idealną byłaby sytuacja, w której współczynnik tarcia materiałów par ciernych ma stałą wartość niezależnie od prędkości jazdy, temperatury, siły docisku tych elementów do siebie, i stopnia ich zużycia. Przy

stałej wartości ciśnienia w cylindrach hamulcowych zapewniałoby to również stałą wartość siły hamującej, w tym również opóźnienia hamowania.

Jednakże w rzeczywistości tak nie jest i wskutek zauważalnej, a dla niektórych materiałów (np. żeliwo) bardzo silnej zależności wartości współczynnika tarcia od wymienionych czynników, przy stałym ciśnieniu w cylindrach zachodzi wyraźna zmienność wartości siły hamującej podczas hamowania.

Celem badań w zakresie hamulców kolejowych było skonstruowanie takiego systemu hamulcowego, który w sposób aktywny oraz podczas hamowania zmieniałby parametry pracy układu hamulcowego w taki sposób, aby opóźnienie hamowania było bardzo bliskie wartości stałej. Obecnie stało się to możliwe dzięki wykorzystaniu szybkich procesorów w modułach elektronicznych sterujących hamulcem pojazdu.

Knorr-Bremse opracował innowacyjny system hamulcowy DCC realizujący opisany cel. Jako obiekt badań wybrany został elektryczny zespół trakcyjny typu 36WEa (rys. 8), skonstruowany i produkowany przez firmę Newag z Nowego Sącza. Badania podzielono na następujące etapy:

- badania stacyjne, w celu sprawdzenia zgodności z wymaganiami opracowanymi przez konstruktorów;
- badania ruchowe z wyłączonym systemem DCC w celu sprawdzenia czy parametry hamulca spełniają wymagania stawiane pojazdowi w stanie oryginalnym (czyli bez systemu DCC);
- badania ruchowe z działającym systemem DCC, weryfikujące czy udało się zrealizować założenie dotyczące utrzymywania w przybliżeniu stałego opóźnienia hamowania przy jednoczesnym spełnieniu wymagań obowiązujących pojazd, w zakresie skuteczności hamulca;
- sprawdzenie zachowania się pojazdu w sytuacjach awaryjnych – sprawdzono różne scenariusze możliwych awarii systemu.



Rys. 8. Krakowscy specjaliści podczas badań ezt 36WEa wyposażonego w innowacyjny system aktywnej regulacji opóźnienia hamowania (DCC) – Tor Doświadczalny IK, 2018 [fot. P. Urbańczyk]

O znacznym nakładzie pracy i szerokim zakresie badań, obejmującym wszystkie możliwe tryby i warunki hamowania, świadczy fakt, że podczas samych tylko badań ruchowych wykonano ponad 1000 prób!

3.4. Badania aparatury układów hamulcowych

Na początku drugiego tysiąclecia, Międzynarodowy Związek Kolei (UIC) przeprowadził proces weryfikacji starszych typów zaworów rozrządczych, które uzyskały homologację według niegdyś obowiązujących wymagań. W międzyczasie te wymagania w pewnym stopniu rozszerzono bądź zastrzeczono. Istotą weryfikacji, nazwanej „Badaniem identyczności”, było sprawdzenie czy zawory spełniają również aktualne (wówczas) wymagania UIC. Jeśli zostało to potwierdzone w badaniach, dopuszczenie zaworu do stosowania w nowych i modernizowanych pojazdach było przez UIC przedłużane. W ramach prac związku UIC sporządzono wykaz prób, którym dany zawór rozrządczy należy poddać badaniu identyczności. W uzgodnieniu z producentem (firmą Bumar-Fablok), PKP zgłosiły do UIC, powszechnie stosowany wówczas w Polsce zawór rozrządczy ESt3f produkowany przez Bumar-Fablok na licencji firmy Oerlikon. Zawór ten mógł spełnić niezbędne wymagania tylko z dołączonym zewnętrznym przekładnikiem ciśnienia. Badania takiego układu przeprowadzono w Instytucie Kolejnictwa (wówczas: CNTK) w latach 2000–2001. Na podstawie pozytywnych wyników, UIC dopuścił zawór ESt3f do dalszego stosowania w nowym i modernizowanym taborze.

Laboratorium Badań Taboru dwukrotnie uzyskało zlecenia producenta aparatury hamulcowej na przeprowadzenie badań potrzebnych do uzyskania znaku UIC:

1. Badania modułów hamulcowych (zaworu rozrządczego wraz z połączonym z nim przekładnikiem ciśnienia) MBF-01A, MBF-01B oraz MBF-02. Moduły hamulcowe skonstruowane w Bumar-Fablok były rozwinięciem i udoskonaleniem licencyjnej aparatury hamulcowej firmy Oerlikon z wykorzystaniem koncepcji zaworu rozrządczego ESt3f oraz przekładników ciśnienia tej firmy. Instytut Kolejnictwa (wówczas CNTK) przeprowadził w latach 2006–2008 badanie tych modułów na stanowisku prób pojedynczego zaworu rozrządczego oraz na wagonie towarowym, według ówczesnych wymagań zawartych w Kartach UIC 540, 547 i 541-04, z rozszerzeniem o próby niewyczerpalności według przygotowywanego wówczas pierwszego wydania normy EN 15355.
2. W latach 2010–2011 Instytut prowadził badania elektronicznego zaworu rozrządczego EDS 300 firmy KES z Niemiec. Zawór rozrządczy EDS 300 jest pierwszym zaworem wykorzystującym elektronikę do przetwarzania wejściowego pneumatycznego

sygnału hamowania i odhamowania (ciśnienia w przewodzie głównym) na pneumatyczny sygnał wyjściowy w postaci odpowiedniego ciśnienia sprężonego powietrza w cylindrach hamulcowych. Zawór umożliwia również dopasowanie ciśnienia w cylindrach do stanu obciążenia pojazdu. Proceduralny program prób wymagany przy nadawaniu znaku UIC dla typowego zaworu rozrządczego był rozszerzony o próby zachowania się aparatu w przypadku zwiększenia lub obniżenia (również całkowitego zaniku) napięcia zasilającego układ elektroniczny. W Krakowie przeprowadzono próby pojedynczego zaworu EDS 300, a także próby sześciu zaworów tego typu włączonych do stanowiska do badań hamulca pociągu (tzw. stanowiska całopociągowego). Nowa aparatura hamulcowa zarówno z Bumar-Fablok, jak i z firmy KES, uzyskiwała znak UIC na podstawie wyników badań wykonanych w Instytucie Kolejnictwa.

3.5. Stanowiskowe badania elementów ciernych układów hamulcowych

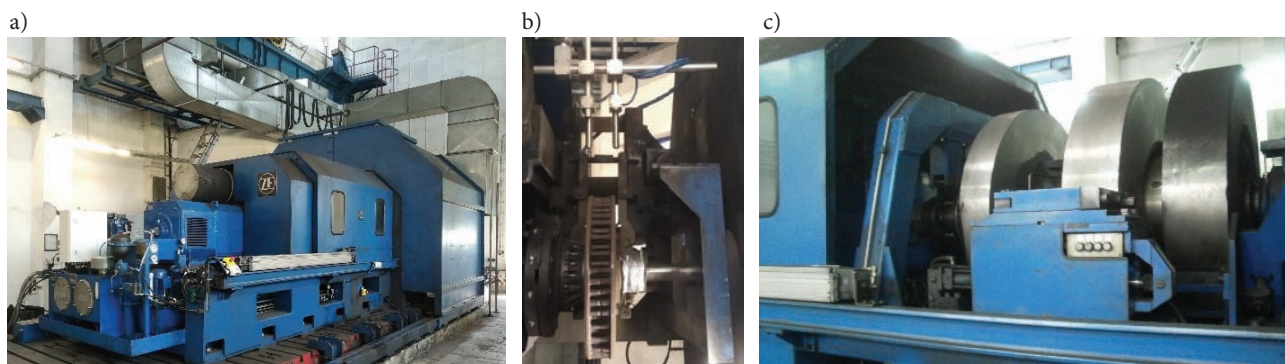
Historia stanowiska badawczego par ciernych hamulca kolejowego w Instytucie Kolejnictwa sięga lat 90. XX wieku. W ówczesnych latach takie stanowiska posiadały nieliczne instytucje takie, jak koleje niemieckie DB, francuskie SNCF, producenci par ciernych takich jak Becorit, BSI (Bergische Stahl Industrie), Textar.

W połowie lat dziewięćdziesiątych XX wieku w CNTK podjęto decyzję o budowie nowoczesnego stanowiska hamulcowego. Wykonawcą stanowiska na potrzeby CNTK została niemiecka firma ZFP (Zahnradfabrik Passau GmbH). Budowa stanowiska dynamometrycznego została ukończona w 1997 roku, a w 2001 roku po wieloletnich badaniach sprawdzających i weryfikacyjnych stanowisko otrzymało pierwszą homologację UIC (kategorii D do $V_{\max} = 420$ km/h). W 2023 roku w ramach Projektu RPMA.01.01.00-14-E210/20 zrealizowanego

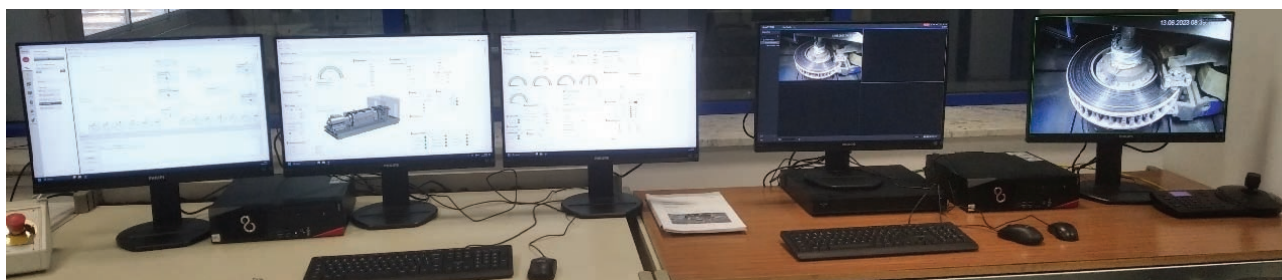
w Laboratorium Badań Taboru IK, wykonano kompleksową modernizację stanowiska badawczego przeprowadzoną przez niemiecką firmę RENK. Zakres modernizacji obejmował wymianę przestarzałej aparatury elektronicznej oraz automatyki wykazującej znaczne zużycie eksploatacyjne, niedostosowane do nowoczesnego rozwiązania sterowania i kontroli stanowiska, systemu rejestracji i obróbki wyników, jak też systemu monitoringu oraz diagnostyki elementów wyposażenia stanowiska dynamometrycznego. Zastosowano również nowy system zraszania par ciernych hamulca wykorzystywany do symulacji warunków mokrych podczas hamowania.

Konstrukcja stanowiska badawczego umożliwia badanie par ciernych hamulców pneumatycznych kolejowych do pociągów zespołonych dużych prędkości, zespołów trakcyjnych, lokomotyw i autobusów szynowych w naturalnej wielkości odpowiadającej warunkom rzeczywistym (rys. 9–11). Wyposażenie pomiarowe oraz parametry stanowiska umożliwiają wykonywanie badań homologacyjnych i certyfikacyjnych materiałów ciernych m.in. według:

- Programów badawczych materiałów ciernych określonych w obowiązujących Kartach UIC 541-3, UIC 541-4, a także norm PN-EN 16452:2015-08, PN-EN 15328.
- Programów badawczych dla kół kolejowych według UIC 510-5 oraz normy PN-EN 13979-1+A2:2011 obejmujących m.in.: badanie ich odporności na obciążenia termiczne.
- Programów badawczych zawartych w Technicznych Specyfikacjach Interoperacyjności (Lok & Pas oraz TSI Wag.).
- Programów badawczych dla tarcz hamulcowych według normy PN-EN 14535-3:2016-02.
- Programów badawczych według ERA/TD/2013-02/INT ver. 3.0 (Agencji Kolejowej Unii Europejskiej).
- Specyfikacji badawczych Zleceniodawcy symulujących rzeczywiste warunki eksploatacji pary cierniej.



Rys. 9. Stacjonarne stanowisko badawcze: (a) widok ogólny, (b) kabina badawcza, (c) masy mechaniczne [zbiory archiwalne IK]



Rys. 10. Pulpit sterowania stanowiskiem badawczym [zbiory archiwalne IK]

a)



b)



Rys. 11. Widok pierścieni ciepłych podczas badań sprawdzających odporność na obciążenia termiczne: (a) tarczy montowanej na osi; (b) koła monoblokowego [zbiory archiwalne IK]

4. Badania bezpieczeństwa przeciw wykolejeniu

4.1. Badania bezpieczeństwa jazdy pojazdów po wchrowatym torze

Jednym z podstawowych badań pojazdów jest weryfikacja bezpieczeństwa jazdy po wchrowatym torze. Sposób oceny podano zarówno w TSI Wag [19], jak również w TSI Lok&Pas [18] przywołując normę EN 14363:2016, w Polsce PN-EN 14363 [12]. Norma PN-EN 14363 [12] podaje 3 metody badania pojazdów szynowych podczas ich przejazdu przez tory wchrowate. Dwie metody dotyczą wszystkich pojazdów szynowych, trzecia natomiast może być stosowana tylko do pojazdów, których człon spoczywa na dwóch dwuosioowych wózkach.

Metoda nr 1

W metodzie nr 1 badania prowadzi się na torze o promieniu $R = 150$ m. Długość toru pomiarowego tak jest dobrana, że w trakcie przejazdu człon pojazdu (pojazd) w całości znajduje się w łuku. Dodatkowo

tor jest wyposażony w odcinek o wchrowatości 3‰. W przypadku, gdy podczas badań wymagana jest większa wchrowatość toru, norma [12] zaleca wprowadzenie wchrowatości „w pojazd” przez np. umieszczenie odpowiedniej grubości podkładek stalowych pod usprężynowanie I stopnia pojazdu. Podczas badań mierzone są siły prowadzące Y na kole zewnętrznym (Y_a) i kole wewnętrznym (Y_i), jak również siły pionowych nacisków kół Q_a i Q_i oraz uniesienie koła zewnętrznego (Δz) zestawu prowadzącego. Podczas badań należy zachować duży współczynnik tarcia. W tym celu mierzony jest kąt nabiegania koła na szynę. Wartość podlegająca ocenie to współczynnik $(Y/Q)_a$. W przypadku pojazdów wyposażonych w koła o kącie pochylenia obrzeża 70° i współczynniku tarcia suchego $\mu = 0,36$ współczynnik $(Y/Q)_{lim}$ powinien wynosić 1,2. W przypadku przekroczenia wartości kryterialnej $(Y/Q)_{lim}$ ocenie poddaje się wielkość wspinania koła na szynę. Podczas każdego przejazdu, uniesienie koła zewnętrznego (Δz) zestawu prowadzącego na całym łuku pomiarowym nie może przekroczyć 5 mm. Kryterium to traktuje się jako ostateczny dowód bezpieczeństwa jazdy pojazdu po wchrowatym torze. Na rysunku 12 pokazano łuk pomiarowy Instytutu Kolejnictwa.



Rys. 12. Łuk pomiarowy zbudowany zgodnie z normą PN-EN 14363 [12] metoda 1 [fot. A. Chojnacki]

Metoda nr 2

Do przeprowadzenia oceny bezpieczeństwa jazdy pojazdów szynowych po wichrowatych torach, w metodzie nr 2 należy wykorzystać parametry zmierzone na dwóch stanowiskach.

Siła prowadząca Y_a jest wyznaczana na łuku pomiarowym o promieniu $R = 150$ m. W tej metodzie łuk nie posiada przechyłki. Na całej jego długości, szyny znajdują się na jednym poziomie. Podobnie jak w metodzie nr 1, również w metodzie nr 2, podczas badań mierzone są siły prowadzące Y na kole zewnętrznym (Y_e) i kole wewnętrznym (Y_i), jak również siła pionowego nacisku na kole wewnętrznym Q_i . Mierzony jest również kąt nabiegania koła na szynę. Wyznaczony podczas pomiarów współczynnik $(Y/Q)_i$ oraz kąt nabiegania koła na szynę służą określeniu współczynnika tarcia koła o szynę.



Rys. 13. Stanowisko PKP IC wykorzystywane przez Instytut Kolejnictwa [fot. A. Chojnacki]

Do wyznaczania pionowych nacisków kół na szyny pojazdów szynowych Instytut Kolejnictwa wykorzystuje stanowisko TENSAN PLW należące do PKP Inter City (rys. 13). Pomiary nacisków kół pojazdów szynowych są realizowane podczas ich przemieszczania w górę i w dół z poziomu toru – zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 14363 [12]. Otrzymane dane służą do sporządzenia tzw. wykresów wichrowania, z których wyznaczane są

minimalne naciski kół $Q_{a \min}$ podczas symulacji przejazdu pojazdu przez tor wichrowaty. Siły $Y_{a \max}$ i $Q_{a \min}$ służą następnie do wyznaczenia współczynnika $Y_{a \max}/Q_{a \min}$, który to, podobnie jak w metodzie nr 1, ma być mniejszy lub równy wartości kryterialnej:

$$(Y/Q)_{\lim} = 1,2 \quad (2)$$

Metoda nr 3

Zgodnie z metodą nr 3, pojazd szynowy wyposażony w dwa dwuosiowe wózki może pokonywać wichrowate tory bezpiecznie, jeżeli są spełnione następujące warunki:

- odciążenia

$$\Delta Q/Q_0 \quad (3)$$

- i oporu obrotu wózka

$$X = \frac{M_{z,Rmin}}{2a^+ P_0} \quad (4)$$

gdzie:

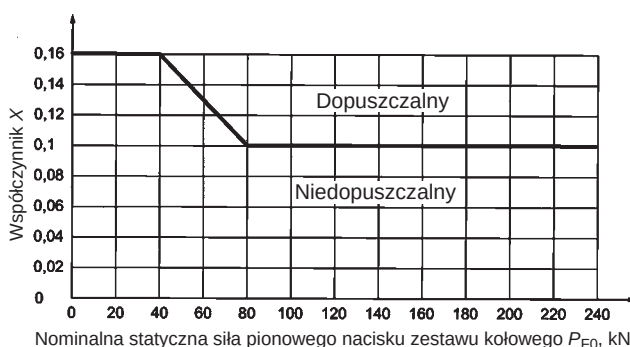
- Q_0 – średnia siła pionowego nacisku koła badanego zestawu na poziomym torze (wichrowatość $g^0 = 0$),
- ΔQ – odchyłka od Q_0 w warunkach maksymalnej wichrowatości,
- $M_{z,Rmin}$ – moment potrzebny do obrotu wózka względem nadwozia pojazdu podczas jego przejazdu przez łuk o minimalnym promieniu,
- $2a^+$ – rozstaw zestawów kołowych w wózku (baza wózka),
- P_0 – średni nacisk zestawu kołowego w wózku.

Wartości kryterialne poszczególnych współczynników są następujące:

$$\Delta Q/Q_0 \leq 0,6 \quad (5)$$

$$X \leq 0,1 \quad (6)$$

dla pojazdów pasażerskich i lokomotyw (rys. 14),



Rys. 14. Maksymalna dopuszczalna wartość współczynnika X dla wagonów towarowych według normy PN-EN 14363 [12] metoda nr 3

Do wyznaczenia współczynnika odciążenia, Instytut Kolejnictwa używa stanowiska TENSAN PLW. Otrzymane dane służą do sporządzenia tzw. wykresów wichrowania, z których to wyznaczany jest nacisk koła badanego na poziomym torze Q_0 oraz odchyłka ΔQ nacisku spowodowana odciążeniem koła wskutek jego przejazdu przez tor o maksymalnej wichrowatości. Współczynnik wyznaczony dla każdego koła musi spełniać wartość kryterialną podaną w normie [12]. Na podstawie wyników pomiarów podczas próby wichrowania wyznacza się również średni nacisk zestawu kołowego w wózku P_0 .

W celu wyznaczenia współczynnika oporu obrotu wózka niezbędne jest przeprowadzenie pomiarów na stanowisku do pomiaru momentu oporowego wózków względem nadwozia. Takie stanowisko znajduje się w Instytucie Kolejnictwa w Warszawie, pokazano je na rysunku 15.



Rys. 15. Stanowisko IK do pomiaru momentu oporowego wózków względem nadwozia [fot. A. Chojnacki]

Na stanowisku mierzony jest moment niezbędny do obrotu wózka względem nadwozia pojazdu oraz kąt obrotu stanowiska. Przy użyciu wskaźnika kąтового można stwierdzić, przy jakim kącie obrotu stanowiska nastąpiła kolizja wózka z nadwoziem pojazdu. Kąt obrotu łoża stanowiska wynosi $\pm 10^\circ$. Prędkość obrotu stanowiska realizowana jest w sposób ciągły w zakresie $0-1^\circ/\text{s}$.

Po zakończeniu pomiarów sporządzane są wykresy momentu oporowego wózka w funkcji kąta obrotu wózka (stanowiska) i dla różnych prędkości obrotowych stanowiska. Z wykresów są odczytywane wartości momentu, który odpowiada minimalnemu

promieniowi łuku przez jaki pojazd może bezpiecznie przejeżdżać. W Polsce, w warunkach eksploatacyjnych, jest to promień $R = 150 \text{ m}$. Do oceny należy przyjąć wartość momentu oporowego wyznaczoną podczas obrotu wózka względem nadwozia z prędkością $1^\circ/\text{s}$.

Współczynnik oporu obrotu wózka X jest wyznaczany na podstawie wartości momentu oporowego wózka względem nadwozia $M_{z,Rmin}$, średniego nacisku zestawu kołowego w wózku P_0 i parametru konstrukcyjnego wózka jakim jest rozstaw zestawów kołowych w wózku $2a^+$ i wyznaczony zostaje.

Według metody nr 3 normy PN-EN 14363, pojazd szynowy wyposażony w dwa dwuosiowe wózki może bezpiecznie pokonywać tory wichrowate, jeżeli spełnia jednocześnie wartości kryterialne podane dla współczynnika odciążenia – $\Delta Q/Q_0$ i współczynnika oporu obrotu wózka X .

5. Oddziaływanie taboru kolejowego na środowisko

5.1. Badania hałasu

Tabor szynowy oddziałuje na zewnętrzne środowisko na różne sposoby, np. w zakresie emisji hałasu, emisji spalin i emisji elektromagnetycznych. Problem emisji hałasu jest istotny, ponieważ tabor szynowy zarówno pasażerski, jak i towarowy stanowi znaczną część całego sektora transportu w Europie. Linie kolejowe przebiegają przez tereny zabudowane, wkraczają bardzo często do centrów miejskich, niektóre rodzaje taboru szynowego np. tramwaje, metro czy różne formy naziemnych kolei miejskich są wręcz z miastami związane. Przy obecnym stopniu zurbanizowania oznacza to, że duża liczba ludności jest narażona na emisję hałasu właśnie od taboru szynowego.

Hałas kolejowy jest czynnikiem, który wywiera niekorzystne oddziaływanie na życie populacji ludzkich zamieszkujących okolice obszarów kolejowych. W Europie, szczególnie odczuwalny wpływ hałasu kolejowego jest obserwowany w krajach gdzie występuje największa gęstość zaludnienia, czyli: Holandia, Belgia i Niemcy. Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) na podstawie prowadzonych badań określiła dolegliwości, na które najczęściej skarżą się ludzie narażeni na hałas kolejowy, są to m.in. choroby układu krążenia, zaburzenia snu, upośledzenie słuchu i szum w uszach czy ciągle rozdrażnienie.

W związku z tym zarówno na poziomie ogólnoeuropejskim, jak i krajowym poświęca się dużo uwagi zagadnieniom redukcji emisji hałasu, co ma swoje odzwierciedlenie w przepisach związanych z homologacją oraz dopuszczeniami nowych typów taboru

szynowego, a to z kolei przekłada się na zakres badań nowego taboru.

W ciągu ostatniego 20-lecia generalnie występuje tendencja do rozszerzania zakresu badań hałasu, pojawiają się nowe dyrektywy unijne, rozporządzenia krajowe, normy, a w nich nowe rodzaje badań i metody badawcze. W efekcie jest to dynamiczny proces, w którym poziom badawczo-pomiarowy jest skorelowany i wprost wynika z poziomu prawnego, który wymusza ciągły rozwój potencjału badawczego. Taki proces przebiegał i przebiega także w Laboratorium Badań Taboru Instytutu Kolejnictwa.

Na początku drugiego tysiąclecia, Laboratorium prowadziło badania hałasu, ale w zakresie limitowanym stosowanymi normami, czyli przede wszystkim w odniesieniu do taboru pasażerskiego (z naciskiem na pomiary wewnątrz pojazdów) oraz do lokomotyw (przede wszystkim badania w kabinach maszynisty i badania syren). Pomiary hałasu w środowisku zewnętrznym były prowadzone w dość ograniczonym zakresie. Nie badano także wagonów towarowych, gdyż brakowało stosownych regulacji krajowych. W tamtym okresie nie istniały jeszcze akredytowane procedury pomiarowe, stosowana aparatura opierała się na rejestratorach magnetycznych, a wyposażenie pomocnicze z dzisiejszej perspektywy wygląda wręcz archaicznie.

Główną przyczyną zmian tego stanu były prowadzone przez Unię Europejską prace nad interoperacyjnością transeuropejskiego systemu kolei konwencjonalnych. W ramach tych prac pojawiły się przepisy TSI. Wprowadzone przepisy nakazywały przeprowadzić badania według normy prEN ISO 3095:2001, natomiast podawały kryteria oceny wyników. Zakończeniem tego etapu od strony prawnej było wprowadzenie w 2006 r. decyzji TSI Hałas. Oznaczało to, że badania hałasu w zakresie zależnym od klasy taboru stały się obligatoryjne. Możliwości badawcze Laboratorium Badań Taboru obejmują następujące pomiary hałasu:

- Pomiary emisji hałasu stacjonarnego (na postoju) od całego pojazdu;
- Pomiary emisji hałasu stacjonarnego (na postoju) od sprzężarek pojazdu;
- Pomiary hałasu przejazdu – badania ruchowe, jazdy z prędkościami ustalonymi;
- Pomiary hałasu rozruchu – badania ruchowe, rozruch pojazdu;
- Pomiary hałasu w kabinach maszynisty w warunkach stacjonarnych (postój) bez działania dźwiękowych sygnałów ostrzegawczych (syren pojazdu);
- Pomiary hałasu w kabinach maszynisty w warunkach stacjonarnych (postój) przy działaniu dźwiękowych sygnałów ostrzegawczych (syren pojazdu);

- Pomiary hałasu w kabinach maszynisty podczas jazdy – badania ruchowe, jazdy z prędkościami ustalonymi;
- Pomiary hałasu wewnętrznego, tj. w pomieszczeniach dla pasażerów i obsługi pojazdu – w warunkach stacjonarnych (postój) i ruchowych (jazdy z prędkościami ustalonymi);
- Badania dźwiękowych sygnałów ostrzegawczych (syren pojazdu) w zakresie poziomu dźwięku i częstotliwości tonu podstawowego;
- Sprawdzenie poziomu dźwięku informacji akustycznych generowanych przez wyposażenie pokładowe w kabinie maszynisty;
- Określenie poziomu dźwięku i częstotliwości sygnalizacji ostrzegawczej drzwi dla pasażerów;
- Określenie wartości wskaźnika transmisji mowy STIPA dla systemu nagłośnienia badanego pojazdu – w warunkach stacjonarnych (postój) i ruchowych (jazdy z prędkościami ustalonymi).

5.2. Sposoby redukcji hałasu komunikacyjnego w Europie

W kontekście oddziaływania emisji hałasu na środowisko zewnętrzne i takich właśnie niestandardowych pomiarów realizowanych w celach badawczych, dobrym przykładem będą badania hałasu przejazdu wagonów węglarek realizowane w okresie, gdy trwała ogólnoeuropejska dyskusja dotycząca wad i zalet wstawek hamulcowych żeliwnych i kompozytowych. Badania opisane poniżej można potraktować jako wkład Laboratorium w tę dyskusję, gdyż te badania nie były badaniami homologacyjnymi i uzyskane wyniki nie mogły posłużyć do uzyskania dopuszczenia typu wagonu. Zasadniczym celem tych badań było określenie poziomu hałasu emitowanego do środowiska zewnętrznego podczas jazdy wagonów węglarek w symulowanych warunkach normalnej eksploatacji oraz porównanie tak pomierzonych poziomów hałasu przejazdu dla identycznych wagonów wyposażonych w kompozytowe oraz żeliwne wstawki hamulcowe.

Zgodnie z postanowieniami TSI Hałas, dla prędkości 120 km/h, otrzymane wyniki $L_{pAeq,Tp}$ należy znormalizować do prędkości 80 km/h, zgodnie z podanym wzorem przeliczeniowym:

$$L_{pAeq,Tp}(80 \text{ km/h}) = L_{pAeq,Tp}(V) - 30 \log(v/80 \text{ km/h}) \quad (7)$$

Uzyskane wyniki $L_{pAeq,Tp}$ (wartości średnie z 3 lub 5 pomiarów zgodnie z opisem przebiegu tury pomiarowej, wartości dla 120 km/h podano w tablicy 2 (M1, M2 – oznaczenia mikrofonów), 120norm oznacza wartość dla 120 km/h po znormalizowaniu, kierunki A i B według opisu tury pomiarowej. Pociąg wykorzystany do badań pokazano na rysunku 16.

Tablica 2

Wyniki badań dla pomiarów końcowych

Kierunek jazdy	Prędkość jazdy [km/h]	Wartość $L_{pAeq,Tp}$ w dB _A			
		Żeliwo		Kompozyt	
		M1	M2	M1	M2
A	80	88,9	88,8	86,7	87,0
	120	93,7	93,4	90,2	91,7
	120norm	88,4	88,1	84,9	86,4
B	80	89,1	88,8	87,6	87,9
	120	94,4	94,4	89,6	90,1
	120norm	89,1	89,1	84,3	84,8

Opracowanie własne IK.



Rys. 16. Pociąg do badania emisji hałasu; Tor Doświadczalny IK w Żmigrodzie [fot. P. Tokaj]

Podsumowując można stwierdzić, że było to jedno z wielu różnorodnych badań przeprowadzonych zarówno w naszym kraju, jak i w innych krajach Unii Europejskiej, które łącznie wykazały, że wagony wyposażone w kompozytowe wstawki hamulcowe mają

zdecydowanie niższy poziom emisji hałasu od wagonów ze wstawkami żeliwnymi. W ślad za stwierdzeniem tego faktu, podjęto konkretne decyzje (na poziomie politycznym i prawnym) mające na celu odejście od żeliwa jako materiału na wstawki hamulcowe. Zastosowanie kompozytowych wstawek hamulcowych ma zmniejszyć chropowatość powierzchni tocznej kół. Stan kół po współpracy z kompozytowymi i żeliwnymi wstawkami pokazano na rysunku 17.

W celu zmniejszenia chropowatości, szyny kolejowe poddawane są cyklicznym obróbkom szlifierskim, które pozwalają na obniżenie hałasu do 5 dB. W celu zmniejszenia hałasu toczenia wystarczające jest zastosowanie ekranów akustycznych do wysokości 1 m (rys. 18).

Rys. 17. (a) Powierzchnia toczna koła współpracującego z wstawką żeliwną ($R_a = 2,11 \mu\text{m}$), b) powierzchnia koła współpracującego z wstawką kompozytową typu K ($R_a = 0,47 \mu\text{m}$) [fot. P. Tokaj]



Rys. 18. Niski ekran akustyczny zabezpieczający emisję hałasu toczenia [źródło: UIC]

6. Badania wytrzymałościowe

6.1. Badania nabiegania

W ramach badań wytrzymałościowych oferowanych przez Laboratorium Badań Taboru Instytutu Kolejnictwa warto podkreślić możliwości Badawczej Górki Rozbiegowej wykorzystywanej do testów związanych z zachowaniem się pojazdu szynowego w chwili zderzenia, nazywanych nabieganiami [6]. Idea budowy stanowiska powstała w latach 60. XX wieku. Początkowo stanowisko badawcze miało umożliwić realizację dwóch podstawowych programów badań:

- sprzęgów,
- hamulców torowych.

Wraz z budową głównego budynku, a następnie z tworzeniem nowych obiektów, powstawał układ torowy. Na obecnej górze usypano nową ziemną estakadę wzmacniając ją konstrukcją betonowo-żelazną. Z czasem uzupełniono ją w urządzenia stosowane w kopalniach, które po odpowiedniej adaptacji służą do wciągania wagonów na pochylnię. Napęd został zakupiony w kopalni węgla Mortimer-Porąbka w Zagórz. Obecny budynek z systemem sterowania

oddano do użytku na przełomie lat 1974–1975. Zastosowany układ mechaniczny po licznych modernizacjach pracuje do dziś.

W Laboratorium wykonywane są badania wytrzymałościowe struktury wagonów towarowych i osobowych oraz ich podzespołów podczas zderzeń z określoną prędkością, zgodnie z zaleceniami normy EN 12663 [4]. Wyniki takich eksperymentów stanowią wartościowe informacje o odporności ostoi na przeciążenia występujące w trakcie eksploatacji danego pojazdu. Badania umożliwiają wykrywanie także różnych błędów wykonawczych, w tym np. asymetrii ostoi pojazdu. Na stanowisku można rozpędzić wagony do prędkości 40 km/h. Na rysunku 19 przedstawiono ogólny widok badawczej górki rozbiegowej.

Badawcza Górka Rozbiegowa jest wyposażona w pochylnię (estakadę) oraz urządzenia sterujące, które umożliwiają rozpędzanie jednego z wagonów do zadanych z góry, ściśle określonych i kontrolowanych prędkości. W celu ułatwienia przygotowania i prowadzenia zderzeń, stanowisko jest wyposażone w urządzenia umożliwiające ustawianie i hamowanie zderzanych wagonów. Badania i pomiary są przeprowadzane zarówno na prototypowych, jak i na modernizowanych wagonach oraz na prototypowych urządzeniach amortyzujących. Dzięki użyciu aparatury pomiarowej, będącej w posiadaniu Laboratorium Badań Taboru, można przeprowadzać kompleksowe badania wytrzymałościowe konstrukcji wagonów towarowych i osobowych oraz ich podzespołów podczas nabiegania z określoną prędkością, które obejmują:

- pomiary naprężeń i odkształceń w elementach taboru kolejowego;
- pomiary przemieszczeń, sił, przyspieszeń i charakterystyk dynamicznych zderzaków oraz sprzęgów samoczynnych;



Rys. 19. (a, b) Badawcza góra rozbiegowa widok ogólny [zbiory archiwalne IK]

- badania trwałościowe urządzeń ciągnowo-zderznych;
- badania hamulców torowych.

Jednym z badań objętych zakresem akredytacji (Nr AB 742), jest wykonanie prób nabiegania na wagon, które symulują zachowanie się wagonu (po 16-letnim okresie jego eksploatacji), w trakcie formowania składu na górkach rozrządowych. Testy zderzeniowe bardzo często ujawniają słabe punkty konstrukcji głównie w przedniej części wagonu, co jest bardzo pomocne w opracowaniu jego ostatecznej wersji konstrukcyjnej. Realizacja badań odbywa się zgodnie z normą EN 12663-2 [4] oraz innymi dokumentami normatywnymi [7, 14, 15, 19].

Na niezahamowany wagon, stojący na poziomym, prostym torze zarówno w stanie próżnym, jak i załadowanym nabiega wagon-taran załadowany do masy brutto 80 t i wyposażony w zderzaki o zdolności pochłaniania energii ≥ 30 kJ. Po wykonaniu nabiegów wagon podlega ocenie wytrzymałościowej. Z punktu widzenia zapewnienia bezpieczeństwa eksploatacji wagonu uwzględnia się następujące kryteria:

- w żadnym miejscu nie mogą wystąpić widoczne trwałe deformacje konstrukcji;
- skumulowane odkształcenia resztkowe z prób wstępnych i 40 zderzeń zasadniczych muszą mieć wartość poniżej 2‰ i muszą ustabilizować się przed 30. uderzeniem;
- zmiany podstawowych wymiarów wagonu nie powinny obniżać jego funkcjonalności.

Badaniom zderzeniowym zwykle towarzyszą statyczne badania eksperymentalne pojazdów lub ich podzespołów. Odbywają się one przed i po załadowaniu wagonu balastem zastępującym rzeczywisty ładunek. Wcześniej, w ustalonych miejscach ostoi i nadwozia naklejane są tensometry, które pokazują stan odkształceń, na podstawie którego są obliczane naprężenia. Wyniki służą do oceny, czy w miejscach pomiarowych nie doszło do przekroczenia naprężeń dopuszczalnych wytrzymałości zmęczeniowej, zgodnie z wytycznymi normy [4]. Metoda polecana przez normę zakłada, że naprężenie zmienia się w czasie od wartości $\sigma_{\min}$ do wartości $\sigma_{\max}$, przy czym $\sigma_{\min} = \sigma_m(1 - K)$ a $\sigma_{\max} = \sigma_m(1 + K)$, gdzie dla wagonów towarowych $K = 0,3$. Wynika stąd, że dla oceny wytrzymałości zmęczeniowej wystarczy zmierzyć wartość średnią naprężeń, czyli wartość naprężeń wywołanych nominalnym obciążeniem od ładunku i od ciężaru własnego. Zatem po pomiarach sprawdzany jest warunek:

$$\sigma_m = \sigma_{m1} + \sigma_{m3} \leq \sigma_{mlim} \quad (8)$$

gdzie:

σ_{m1} – oznacza wartość naprężeń pochodzących od ciężaru własnego wagonu,

σ_{m3} – oznacza zmierzoną tensometrycznie wartość naprężeń od ładunku,

σ_{mlim} – oznacza graniczną (dopuszczalną) średnią wartość zmierzonych naprężeń, według [4] zależną od kategorii karbu (A, B, C, D lub E).

Wymienionym badaniom towarzyszy czasem odczyt linii ugięcia ostoi. Maksymalna wartość ugięcia (tzw. strzałka ugięcia) f powinna spełniać warunek $f \leq 0,003L_b$, gdzie L_b – jest tzw. bazą wagonu, czyli odległością pomiędzy osiami czopów skrzętu wózków.

6.2. Badania podczas jazdy po sieci kolejowej

W przypadku prototypowych wagonów bardzo cenne są wyniki otrzymane z eksperymentalnych badań ruchowych po trasach kolejowych. Jazdy wykonuje się na odcinkach pomiarowych o dobrym i przeciętnym stanie utrzymania. Linie muszą zawierać odcinki proste, łuki i rozjazdy. Na części odcinków pomiarowych stan utrzymania toru musi umożliwiać wykonanie jazd z maksymalną prędkością przewidzianą w dokumentacji konstrukcyjnej badanego pojazdu. Długość trasy pomiarowej powinna wynosić około 1000 km. Podczas jazd pomiarowych należy prowadzić rejestrację naprężeń, prędkości jazdy, a także danych dotyczących konfiguracji trasy. Najważniejsze wytyczne dotyczące tych badań zawarto w [7, 15].

Jako kryterium oceny wyników tych badań przyjmuje się wymagania Raportu ERRI [15]. Po zakończeniu badań należy przeprowadzić statystyczną obróbkę sygnałów dynamicznych naprężeń zarejestrowanych podczas jazdy w celu wyznaczenia tzw. nadwyżek ekwiwalentnych. W badanych punktach konstrukcyjnych suma naprężeń zarejestrowanych podczas statycznych obciążeń pionowych oraz ekwiwalentnych dynamicznych nadwyżek naprężeń nie może przekraczać wartości dopuszczalnych określonych w [15]. Wartości ekwiwalentnych naprężeń dynamicznych otrzymanych po obróbce statystycznej odwzorowuje się na wykresach Goodmana-Smitha w postaci równoległoboku wpisanego w te wykresy osobno dla każdego punktu tensometrycznego. Wykresy zawierają linie graniczne odpowiednie do zastosowanych stali oraz właściwe dla położenia danego tensometru. Wytrzymałość zmęczeniową danego węzła uznaje się za wystarczającą, o ile równoległobok naprężeń zastępczych leży wewnątrz odpowiednich linii granicznych wykresu Goodmana-Smitha [21].

7. Podsumowanie

Tabor kolejowy jest bardzo złożonym rozwiązaniem technicznym. Badania opisane w artykule są weryfikacją klasycznych charakterystyk, bezwzględnie

koniecznych, choć dalece niewystarczających. Badania te są podstawą, gdyż wiele dodatkowych sprawdzeń wykonuje się w ramach procesów dopuszczeniowych. Stawiane i weryfikowane są na przykład wymagania dotyczące ogrzewania, wentylacji, klimatyzacji, oświetlenia, nagłośnienia, informacji pasażerskiej, czy widzialności i słyszalności pociągów. Prowadzono także specjalistyczne badania pojazdów dwudrogowych oraz maszyn roboczych. Taboru dotyczą także charakterystyki trakcyjne, zakłócenia elektromagnetyczne, pokładowe systemy łączności, czy pokładowe systemy bezpiecznej kontroli jazdy.

Literatura

1. 293 kilometry na godzinę Pendolino w Polsce, <https://www.intercity.pl/pl/site/o-nas/dzial-prasowy/aktualnosci/293-kilometry-na-godzinie-pendolino-w-polsce.html> [dostęp 20.02.2025].
2. Badania Pendolino, Większe drgania mogą wpływać na budynki przy torach, <https://www.money.pl/gospodarka/wiadomosci/artykul/badania-pendolino-wieksze-drgania-moga-wplywac-na-budynki-przy-torach,193,0,1617089.html> [dostęp: 20.02.2025].
3. Cichocki Z. et.al.: *Rozwój metod badawczych własności mechanicznych taboru w sześćdziesięcioletniej historii Instytutu Kolejnictwa*, Problemy Kolejnictwa 2011, zeszyt 153, s. 93–116.
4. EN 12663-2:2010 (PN-EN 12663-2:2010): Kolejnictwo – Wymagania konstrukcyjno-wytrzymałościowe dotyczące pudeł kolejowych pojazdów szynowych – Część 2: Wagony towarowe.
5. Karta UIC 513: Guidelines for evaluating passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles, Wydanie I, 1.07.1994.
6. Karta UIC 518: Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour – Safety – Track fatigue – Running behavior, Wydanie IV, September 2009.
7. Karta UIC 577: Wagony towarowe – Obciążenia, Wydanie V z 01.2012 r.
8. Massel A. et.al.: *Rola Okręgu Doświadczalnego Instytutu Kolejnictwa w badaniach taboru i infrastruktury kolejowej*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Kolejnictwa, Warszawa, Żmigród, 2021.
9. Opis metod pomiaru sił na styku koło szyna stosowanych w CNTK, Laboratorium Badań Taboru CNTK, Warszawa, marzec 2003.
10. PN-EN 12299:2009: Kolejnictwo – Komfort jazdy pasażerów – Pomiary i ocena.
11. PN-EN 14363:2007 [EN 14363:2005 – IDT]: Kolejnictwo. Badania właściwości dynamicznych pojazdów szynowych przed dopuszczeniem do ruchu. Badania właściwości biegowych i próby stacjonarne.
12. PN-EN 14363+A1:2019-02: Kolejnictwo – Badania i symulacje modelowe właściwości dynamicznych pojazdów szynowych przed dopuszczeniem do ruchu – Badania właściwości biegowych i próby stacjonarne.
13. PN-EN ISO 3095:2013-12: Akustyka – Kolejnictwo – Pomiar hałasu emitowanego przez pojazdy szynowe.
14. Procedura badawcza PB-LW-S01: Pomiar poziomu naprężeń i odkształceń konstrukcji wagonu towarowego podczas zderzeń na Badawczej Górcie Rozbiegowej.
15. Raport ERRI B 12/RP 17: Wagony towarowe. Program badań wagonów towarowych z pudłem ze stali oraz program badań stalowych ram wózków. Wyd. 8 z 01.04.1997 r.
16. Raport ORE B 55 Rp. 8 (Final Report): Prevention of derailment of goods wagons on distorted tracks. Conditions for negotiating track twists – Recommended values for track twist and cant; - Calculation and measurement of the relevant vehicle parameters, Vehicle testing, Utrecht, April, 1983.
17. Raport ORE B 55/RP 1/E: Prevention of derailment of goods wagons on distorted tracks. Wheel load measurements as a means for testing 2-axled goods wagons. Utrecht, October 1964.
18. Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1302/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. z późn. zmianami w sprawie technicznej interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu „Tabor – lokomotywy i tabor pasażerski” systemu kolei w Unii Europejskiej.
19. Rozporządzenie Komisji (UE) nr 321/2013 z dnia 13 marca 2013 r. z późn. zmianami dotyczące technicznej specyfikacji interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu „Tabor – wagony towarowe” systemu kolei w Unii Europejskiej i uchylające decyzję 2006/861/WE.
20. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 13 maja 2014 r. w sprawie dopuszczania do eksploatacji określonych rodzajów budowli, urządzeń i pojazdów kolejowych (Dz.U. z dnia 30 maja 2014 r. poz. 720).
21. Sanecki H.: *Badania wytrzymałości zmęczeniowej w pojazdach szynowych*, Seminarium Instytutu Kolejnictwa, Warszawa, 09.02.2016, <http://www.ikolej.pl/seminaria-instytutu-kolejnictwa/> [dostęp: 20.02.2025].
22. Skóra R., Kukulski J.: *Możliwości badawcze górci rozbiegowej Instytutu Kolejnictwa*, Prace Instytutu Kolejnictwa, 2018, z. 158.
23. Wysocki G., Zbieć A.: *Badania dynamiczne taboru kolejowego*, Przegląd komunikacyjny, 2017, nr 9, s. 2–6.