

ODCHYLEKI DOPUSZCZALNE SZEROKOŚCI TORU I ŻŁOBKÓW W ROZJAZDACH W FUNKCJI PRĘDKOŚCI

SPIS TREŚCI

1. Uwagi wstępne
2. Wyniki pomiarów
3. Eksperymenty symulacyjne
4. Projektowane odchyłki dopuszczalne
5. Ocena projektowanych odchyłek
6. Wnioski

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono projekt nowych odchyłek dopuszczalnych szerokości toru i żłobków w rozjazdach, w zależności od maksymalnej prędkości pociągów. Scharakteryzowano przeprowadzone eksperymenty symulacyjne przejazdu wózka wagonu przez rozjazdy, a także oceniono projektowane odchyłki w porównaniu z odchyłkami stosowanymi dotychczas.

1. UWAGI WSTĘPNE

Narastające niedobory w wymianach rozjazdów są przyczyną szybkiej degradacji rozjazdów eksploatowanych na polskich kolejach. Lepsze wykorzystanie ograniczonych nakładów na utrzymanie rozjazdów umożliwi uzależnienie odchyłek dopuszczalnych od maksymalnej prędkości pociągów na rozjazdach, a więc nadanie nowym odchyłkom cechy, której nie mają odchyłki dotychczas obowiązujące.

W projektowaniu odchyłek dopuszczalnych na rozjazdach należy poddać ocenie własności techniczne, użytkowe oraz ekonomiczne.

W ł a s n o ś c i t e c h n i c z n e — to zapewnienie bezpieczeństwa jazdy, które mogłoby zostać zagrożone przy nadmiernie dużych odstępstwach od wymiarów nominalnych odchyłek oraz niezawodność określana czasem, jaki powinien upłynąć od prze-

kazania rozjazdu do eksploatacji lub od zakończenia naprawy do czasu przekroczenia wielkości odchyłek dopuszczalnych i konieczności kolejnej naprawy rozjazdu.

Właśności użytkowe są związane z technologią napraw i utrzymania. Pod tym względem powinny być spełnione dwa warunki:

- wartość odchyłek nie może być mniejsza niż możliwa do uzyskania dokładność robót,
- powinna być dostępna technika diagnozowania, umożliwiająca łatwe i jednoznaczne sprawdzenie, czy odchyłki są zachowane lub przekroczone.

Właśności ekonomiczne dotyczą cykli napraw, które są wymagane z chwilą przekroczenia odchyłek dopuszczalnych. Istnieją tu ograniczenia dwustronne — zbyt małe odchyłki będą wymagały częstych napraw, natomiast nadmiernie duże mogą doprowadzić do takiego stadium degradacji rozjazdu, że jego naprawa będzie wymagała dużego zakresu robót lub nawet wymiany określonej części rozjazdu.

W wymienionych własnościach występują pojęcia rozmyte, jak: *nadmiernie duże odstępstwa*, *zbyt małe odchyłki*, *łatwe sprawdzenie*, *duży zakres robót*. Rozmytość tych pojęć wymaga więc zastosowania w projektowaniu odchyłek dopuszczalnych nie tylko metod matematycznych, lecz w znacznym stopniu również metod heurystycznych. Prace badawcze w CNTK, związane z rozjazdami, wykonane w okresie kilkudziesięciu lat umożliwiły nagromadzenie dużego zasobu wiedzy w tym zakresie.

Analizując wartości odchyłek dopuszczalnych w rozjazdach brano pod uwagę:

- rzeczywiste, tj. spotykane w eksploatacji, wymiary szerokości torów i żłobków,
- pomiary geometryczne wykonywane toromierzami elektronicznymi,
- pomiary sił i przyspieszeń przeprowadzone z użyciem pociągu doświadczalnego.

Jednym z najważniejszych kryteriów, jakie uwzględniano w tych analizach była racjonalizacja utrzymania rozjazdów, sprowadzająca się do wykonywania w nich wszelkich napraw jedynie wówczas, gdy są one bezwzględnie konieczne. Warunek ten można utożsamiać z dążeniem do zachowania możliwie dużych odchyłek dopuszczalnych.

2. WYNIKI POMIARÓW

Dyskretne pomiary szerokości torów i żłobków wykonano na przeszło 200 rozjazdach, podzielonych na grupy zależne od maksymalnej prędkości pociągów. Czterdzieści rozjazdów pomierzono również toromierzami elektronicznymi¹. Znaczna część wyników tych pomiarów, wraz z ich podstawową statystyką, jest przedstawiona w opracowaniu [18]. Maksymalne nierówności, zanotowane na rozjazdach mierzonych toromierzem elektronicznym, są przedstawione w tabelicy 1.

Tabela 1

Maksymalne nierówności na rozjazdach

Prędkość [km/h]	Gradient szerokości [mm/m]	Wichrowatość [mm/5 m]	Nierówności pionowe [mm]	Nierówności poziome [mm]	Przechyłka [mm]
160	8,8	10,0	13,6	8,1	8,6
140	5,2	7,6	9,9	6,7	6,3
120	6,8	13,0	15,9	10,5	25,3
100	8,0	11,2	13,1	12,4	10,4
80	8,4	10,5	16,4	11,8	16,9
40	8,4	15,3	14,8	14,8	11,3

¹ Pomiary wykonywali pracownicy Zakładu Dróg Kolejowych i Przewozów CNTK.

Wyniki pomiarów podane w tablicy 1 wskazują, że najlepszym stanem utrzymania charakteryzują się rozjazdy przeznaczone do prędkości 140 km/h. Rozjazdy, po których ruch odbywa się z prędkością 140 i 160 km/h wyróżniają się, spośród pozostałych grup, najmniejszymi nierównościami poziomymi i najmniejszą przechyłką.

W tablicy 2 przedstawiono maksymalne odchylenia szerokości torów i żłobków od wartości nominalnych w poszczególnych grupach prędkości na rozjazdach, wyznaczone na podstawie wyników pomiarów dyskretnych.

Tablica 2

Maksymalne odchylenia od wymiarów nominalnych

V [km/h]	Odchylenie od nominalnego wymiaru [mm]									
	a	b	c	d	e	g	h	i	f	z
160	+5,1	+9,5	+5,3	+6,2	+3,8	+12,0	+5,0	+2,0	+4,7	+29,0
	-1,9	0,0	-4,4	-5,1	-5,9	-5,0	-3,2	-4,3	-6,2	-3,5
140	+4,5	+2,2	+0,5	+1,6	+1,5	+0,3	+5,4	+2,1	0,0	+5,6
	0,0	-1,4	-2,0	-2,2	-3,3	-3,2	0,0	-3,7	-6,9	0,0
120	+7,4	+10,0	+5,7	+5,3	+3,0	+4,0	+10,3	+4,4	+0,5	+22,8
	-4,6	-7,3	-4,6	-4,2	-5,5	-15,2	-1,4	-5,6	-13,9	-2,7
100	+7,9	+9,0	+8,5	+10,0	+2,2	+6,0	+3,0	+6,0	+2,3	+29,2
	-2,7	-3,9	-4,8	-2,0	-6,2	-3,6	-2,7	-5,9	-5,7	-1,6
80	+7,2	+12,1	+7,7	+6,4	+3,3	+15,3	+4,1	+5,7	+2,6	+34,4
	-7,2	-0,2	-5,0	-3,8	-6,4	-4,0	-1,8	-3,7	-7,6	-7,7
40	+0,8	+7,8	+7,8	+7,8	+5,5	+21,7	+2,8	+3,9	0,0	+36,3
	-7,7	-5,7	-0,5	-2,0	-5,5	-4,0	-5,7	-5,2	-7,6	-9,7

Najmniejszymi odchyleniami od wymiarów nominalnych charakteryzują się rozjazdy przeznaczone do prędkości 140 km/h, przy czym w czterech wymiarach (*e*, *h*, *i* oraz *f*) zostały przekroczone obowiązujące obecnie odchyłki dopuszczalne. W pozostałych grupach rozjazdów zanotowano przekroczenie odchyłek dopuszczalnych wszystkich wymiarów, przy czym na rozjazdach o mniejszych prędkościach jazdy pociągów przekroczenia te są na ogół wyraźnie większe niż w rozjazdach, na których występują prędkości 140 i 160 km/h.

Pracownicy Laboratorium Badań Taboru CNTK wykonali na 23 rozjazdach pomiary sił i przyspieszeń. Szczegółowe wyniki tych pomiarów są przedstawione w sprawozdaniu [19], a analiza tych wyników była przedmiotem opracowania [12].

W tablicy 3 przedstawiono maksymalne wartości zanotowanych sił pionowych Q , poziomych Y oraz maksymalnego stosunku sił Y/Q przy różnych prędkościach jazdy.

Tablica 3

Maksymalne wartości parametrów dynamicznych

Parametr	Prędkość jazdy pomiarowej [km/h]						
	160	140	120	100	80	60	40
Q_{\max} [kN]	90,2	95,3	102,0	117,6	115,4	78,9	104,9
Y_{\max} [kN]	10,7	9,6	9,4	10,0	11,6	9,3	9,7
Max Y/Q	0,15	0,13	0,18	0,22	0,18	0,21	0,18

Przedstawione wyniki dotyczą jazd po torach zasadniczych rozjazdów. W jazdach po torach zwrotnych maksymalną wartość impulsu stosunku sił Y/Q , wynoszącą 0,44, zano-

utowano na rozjeździe o promieniu $R=190$ m przy prędkości 60 km/h. W trzech przypadkach pomierzona maksymalna wartość Y/Q wynosiła 0,42 (na rozjeździe o $R=300$ m przy $V=60$ km/h, $R=190$ m przy $V=40$ km/h i $R=1200$ m przy $V=100$ km/h).

Wszystkie wykonane pomiary i wyniki ich opracowań statystycznych dają nie tylko obraz stanu utrzymania rozjazdów na sieci PKP PLK S.A. i podstawę do rozważań dotyczących rozjazdów, lecz stanowią również cenny materiał empiryczny do innych prac związanych z nawierzchnią kolejową.

Wyniki pomiarów szerokości torów i żłobków w rozjazdach posłużyły do:

- 1) badań symulacyjnych frakcji występowania przypadków niepożądanych i ich skutków w postaci dyssypacji energii kinetycznej w grupie rozjazdów o najmniejkorzystniejszych kombinacjach wymiarów; układ tych wymiarów zależy od rozpatrywanego zjawiska;
- 2) określenia referencyjnych wartości dyssypacji energii kinetycznej przy uderzeniu oraz częstości (frakcji) i rozmiaru skutków przypadków niepożądanych.

3. EKSPERYMENTY SYMULACYJNE

3.1. Cel i zasady symulacji

Eksperymenty symulacyjne prowadzono z użyciem programu SYMRO, którego model przedstawiono w pracach [6, 10]. Celem tych eksperymentów było:

- 1) wyjaśnienie wartości proporcjonalnych do dyssypacji energii kinetycznej przy nabieganiu kół (W) w ustalonych strefach rozjazdów, przy różnych prędkościach jazdy pociągów, różnych wymiarach rozjazdów i wózków wagonów; w pewnych przekrojach rozjazdów zamiast wartości W rozpatrywano wymiary liniowe (p); znajomość wymienionych wartości jest konieczna do oceny wariantów projektowanych odchyłek; wyniki eksperymentów symulacyjnych, w zestawieniu z wynikami oddziaływań dynamicznych, stworzyły podstawę do przyjęcia granicznych wartości W_g , które nie powinny być przekroczone w żadnym wariantcie projektowanych odchyłek;
- 2) stworzenie podstaw wielokryterialnej oceny wariantów odchyłek projektowanych.

Symulację komputerową w analizowaniu wymiarów rozjazdów poprzedziły prace, w których — po raz pierwszy — wprowadzono aparat statystyki matematycznej [1, 2, 4]. W wyniku przeprowadzonych badań z zastosowaniem statystyki matematycznej otrzymano nowy zbiór wymiarów nominalnych i odchyłek dopuszczalnych w rozjazdach oraz optymalny układ geometryczny krzyżownicy [2].

Pierwszą, w pełnym tego słowa znaczeniu, symulację komputerową, mającą na celu określenie odchyłek dopuszczalnych w torze, zawierała praca [3]. Szersze wykorzystanie tej metody, w połączeniu z eksperymentami w warunkach rzeczywistych, znalazło się w pracy [16]. W latach 1994—1996 analizę wymiarów projektowanych krzyżownic wykonano w CNTK, z wykorzystaniem metody przedstawionej w artykule [17]. W 1998 r. metodę symulacji komputerowej, w zastosowaniu do wymiarów rozjazdów, rozwinęła autorka, dzieląc zbiór wyników symulacji na trzy podzbiory i wprowadzając nowe, dwuwymiarowe odwzorowanie wyników uderzeń kół o odchyloną iglicę [9].

W stosunku do wcześniejszych metod, w metodzie zastosowanej do projektowania odchyłek uzależnionych od maksymalnej prędkości pociągów, wprowadzono kilka zmian. I tak losowanie wymiarów zależnie od ich zmienności odbywa się nie tylko —

jak to było dotychczas — według rozkładu równomiernego, lecz również według rozkładu normalnego, przy czym w obu rozkładach można ustalić dowolny przedział losowania. Zastosowanie rozkładów równomiernych przynosi z reguły wyniki ostrzej oceniające przypadki niekorzystne. Rozpatrywane warianty odchyłek dopuszczalnych uzależnia się od ustalonych klas prędkości pociągów. Kryteria oceny dostosowano do charakteru badanego przypadku, odchodząc od jednej wartości kryterialnej. Tak więc przyjmowane dotychczas kryteria geometryczne, w postaci wartości kątów nabiegania i uderzeń, są rozpatrywane w większym, niż do tej pory, związku z prędkością pociągów, poprzez przyjęcie wartości proporcjonalnej do utraty energii kinetycznej przy uderzeniu:

$$W = V^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \quad (1)$$

gdzie α — kąt nabiegania.

Do zbioru wyników zaistniałych przypadków niepożądanych wprowadza się rozkłady przekroczeń kryteriów, a nie tylko ich liczbę.

Symulacja komputerowa przejazdu wózka wagonu przez wybrane strefy rozjazdu powinna odpowiadać zasadom metody reprezentacyjnej. Dokładność tej metody zależy od wielu czynników, m.in. od [20]:

- struktury badanego układu,
- zastosowanego schematu losowania,
- liczebności próby.

Struktura wzajemnego układu wózka i rozjazdu, czyli ich modele, zawiera konieczne uproszczenia. Pomijając w tym modelowaniu wiele szczegółów, uwypuklono znaczenie wymiarów geometrycznych, które decydują o możliwości zastosowania takich odchyłek dopuszczalnych, które z jednej strony zapewniałyby bezpieczeństwo jazdy i możliwie najwolniejszy rozwój degradacji części składowych rozjazdu, z drugiej zaś nie wymagałyby zbyt częstej interwencji, w postaci napraw lub ograniczeń prędkości na rozjazdach.

Liczebność próby rozważano w odniesieniu do: liczby pomierzonych rozjazdów o danym rodzaju, typie, skosie, promieniu itp. oraz w odniesieniu do liczby N — symulowanych przejazdów wózka przez rozjazd. Pomierzona liczba rozjazdów, tj. ponad 200 jednostek oraz duża liczba stacji, na których te pomiary wykonywano, dają podstawę do stwierdzenia, że wybrana próba jest reprezentatywna dla sieci PKP PLK S.A. Warto tu wspomnieć, że szacowanie potrzebnej liczby rozjazdów do analizy wymiarowej, przeprowadzone w pracy [16], wykazało, iż jeden typ rozjazdu wystarczająco reprezentuje 36 jednostek.

Liczbę symulacji N , określoną na podstawie przyjętego błędu i estymatorów wielkości pomierzonych, przyjęto z niewielkim nadmiarem. Z prawdopodobieństwem większym niż 0,997 można stwierdzić, że błąd badań statystycznych ζ nie przekracza wartości:

$$\zeta = \frac{3\sigma}{\sqrt{N}}$$

skąd

$$N = \frac{9\sigma^2}{\zeta^2} \quad (2)$$

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów przyjęto do obliczeń jednakowe odchylenie standardowe wszystkich wymiarów jako $\sigma = 3,3$ mm i założono błąd $\zeta = 0,1$ mm, co po podstawieniu do wzoru (2) daje wartość równą 980. Przyjęto więc, że każdy eks-

peryment symulowany będzie obejmował 1000 przejazdów wózka przez rozpatrywany rozjazd. Liczbę tę zweryfikowano na podstawie równowagi statystycznej, okazało się bowiem, że uzyskiwane estymatory, tj. odchylenie standardowe i frakcje przypadków niekorzystnych, są do siebie zbliżone przy 1000, 5000 i 10000 przejazdów.

Konieczność przyjęcia wartości granicznych i wartości referencyjnych przy doborze odchyłek dopuszczalnych wymagała zbadania wartości proporcjonalnej do dysypacji energii kinetycznej W , jakie spotyka się przy niekorzystnym, lecz realnym, zbiegu wymiarów występujących w rozjazdach. W tym celu przeanalizowano wyniki pomiarów rozjazdów i na podstawie najniekorzystniejszych z nich wyznaczono wartości W_{max} .

Eksperymenty symulacyjne prowadzono z trzema wariantami wymiarów wózków. Wariant pierwszy (W1) charakteryzował zestawy o stosunkowo małym zużyciu i obejmował wymiary przedstawione na rysunku 1.

C:\Symro-prog\kw132-160.syr - [Wymiary wózka]

Plik Wymiary wózka Tor zasadniczy Tor zwrotny

Wymiary wózka [mm]

Grubość obrzeża	g min	29	g max	33	Rysunek obrzeża
Dopuszczalna różnica grubości obrzeża	dg	1			
Rozstaw kół 1. i 2. osi	k min	1357	k max	1363	Rysunek wózka
Dopuszczalna różnica rozstawu kół na 1. i 2. osi	dk	1			
Rozstaw osi	s	2500			
Przesuw poprzeczny osi	yt min	0	yt max	0	
Kąt obrotu pierwszego zestawu [stopnie]	delta min	0	delta max	0	
Odległość między śladami kół w [mm]	w	2834.1	Kopiuj		
Odległość między obrzeżami kół t [mm]	t	1420			

r [mm]	450
h [mm]	30
Oblicz	
w [mm]	2084.1

Rys. 1. Wymiary wózka — wariant W1

Dwa pozostałe warianty charakteryzowały wózki o dużym zużyciu, przy czym w wariantcie drugim (W2) przyjęto teoretyczne parametry zużycia wózka (grubość obrzeża $g = 22$ mm, wysokość obrzeża $h = 36$ mm, odległość między obrzeżami $t = 1410$ mm), a w wariantcie trzecim (W3) — parametry najbardziej zużytego wózka pomierzonego w pracy [15] ($g = 26,5$ mm, $h = 28$ mm i $t = 1413$ mm). Przy takich wymiarach odległość między śladami kół w wynosiła 2867,1 mm dla wózka W2 i 2822,4 mm dla wózka W3.

Do eksperymentów symulacyjnych przy prędkościach 120, 140 i 160 km/h przyjmowano wózki wagonów pasażerskich o rozstawie równym 2500 mm [14]. Natomiast w symulacjach przejazdów z prędkością 100 km/h i z prędkościami mniejszymi brano pod uwagę wózki wagonów towarowych o rozstawie osi 1800 mm. Oddziaływania tych wózków są bardziej niekorzystne ze względu na większe wartości kątów nabiegania koła

na szynę w porównaniu z wózkami o większym rozstawie osi. Jest to spowodowane mniejszą odległością między śladami kół — w .

Do analiz wybierano najmniej korzystne odchyłki wymiarów spośród wszystkich rozjazdów pomierzonych w danej grupie (np. badając wartości uzyskiwane przy nabieganiu kół na iglicę prostą wybrano rozjazdy charakteryzujące się stosunkowo dużymi różnicami szerokości toru $a - b$ i $b - c$).

Wprowadzając konkretną wartość odchyłki ze znakiem „+” nadawano zawsze odchyłce ujemnej wartość $-0,1$ i odwrotnie (rys. 2).

C:\Symio-prog\korytkow44w2-160.syr - [Tor zasadniczy]

Plik Wymiary wózka Tor zasadniczy Tor zwojny

Liczba iteracji: 1000

Prędkość: 160 [km/h]

Opis obliczeń

Końców rozj. m 44

R-1200

Wymiary rozjazdu [mm]

Rysunek rozjazdu

Rysunek kierownicy

Złobek w iglicy odsuniętej

Złobek w gardzieli

Złobek w kierownicy

Złobek w krzyżownicy

Odległość kier. w miejscu zakończenia odgięcia

Odległość iglicy od opornicy

Długość iglicy prostej

Odległość od początku iglicy do złobka z

Odległość od styku przediglicowego do ostrza iglicy

Odległość dzioba krzyżownicy od gardzieli

Odległość początku kierownicy od szyny tocznej

Odległość odgiętego końca kierownicy

Skos rozjazdu 1:n

nam.	+	-	
a	1435	.1	Rozkład równomierny
b	1439	.1	Rozkład równomierny
c	1435	.8	Rozkład równomierny
d	1435	1.7	Rozkład równomierny
e	1435	.1	Rozkład równomierny
z	87	.1	Rozkład równomierny
g	62	.1	Rozkład równomierny
h	44	.1	Rozkład równomierny
i	44	.1	Rozkład równomierny
h1	65	1	Rozkład równomierny
s	160		
q	21668		
m	12334		
i	3335		
dg	1544		
ho	65		
lh	2700		
n	18.5		

Wprowadź wymiary rozjazdu:

Dowolny

Obliczenia

Powrót do wyników

Rys. 2. Ekran z wprowadzonymi wymiarami rozjazdu

Do badań danego przypadku przyjmowano 2÷3 rozjazdów z określonej grupy prędkości i typu. Maksymalną wartość dyssypacji energii kinetycznej określano na podstawie histogramów edytowanych przez program SYMRO. Brano przy tym pod uwagę wyniki uzyskiwane przy zastosowaniu rozkładów równomiernych, przy których wartości dyssypacji energii są nieco większe niż przy rozkładach normalnych.

Ponieważ wyniki eksperymentów nie są w pełni powtarzalne, każdy eksperyment wykonywano 3—4-krotnie i notowano wyniki najbardziej niekorzystne.

3.2. Wyniki eksperymentów symulacyjnych w torze zasadniczym

W symulacji przejazdu wózka wagonu przez rozjazd rozpatrywano następujące zjawiska:

- uderzenia w iglicę prostą¹,
- uderzenia w iglicę odsuniętą,
- uderzenia w kierownicę,
- uderzenia w szynę toczną przy kierownicy,
- uderzenia w szynę skrzydłową między gardzielą a dziobem,
- uderzenia w szynę skrzydłową przed gardzielą,
- uderzenia w dziób krzyżownicy,
- zakleszczenia zestawu między szyną skrzydłową a kierownicą.

Wyniki symulacji przejazdu wózka przez wybrane do analizy strefy rozjazdu przedstawiono w postaci liczby przypadków niekorzystnych, maksymalnej wartości proporcjonalnej do dyssypacji energii kinetycznej W_{\max} przy nabieganiu (uderzeniu) koła na rozpatrywaną część rozjazdu oraz maksymalnego przemieszczenia p_{\max} określonych elementów rozjazdu przy uderzeniu.

W tablicach 4 i 5 przedstawiono wyniki symulacji dotyczące uderzeń koła o iglicę prostą, występujących w rozjazdach eksploatowanych z prędkościami 160 i 100 km/h². Wyniki te obejmują liczbę uderzeń oraz maksymalną wartość proporcjonalną do dyssypacji energii kinetycznej przy uderzeniu W_{\max} . Warto zauważyć, że wartości W_{\max} przy odchyłkach stwierdzonych w rozjazdach eksploatowanych z prędkością 100 km/h są na ogół większe niż występujące przy prędkości 160 km/h.

Tablica 4

Uderzenia w iglicę prostą $V = 160$ km/h (pomierzone rozjazdy)

Rozjazd i jego odchyłki	Wózek 1		Wózek 2		Wózek 3	
	liczba	W_{\max}	liczba	W_{\max}	liczba	W_{\max}
R-300 m: $a = -3,2$ $b = 7,1$ $c = -3,1$	573	2,7	637	7,6	554	5,7
R-300 m: $a = 1,0$ $b = 5,1$ $c = -4,4$	565	2,3	605	6,7	597	4,5
R-300 m: $a = 5,1$ $b = 9,2$ $c = 0,1$	577	2,5	516	8,1	575	4,9
R-500 m: $a = 3,0$ $b = 6,8$ $c = 0,2$	620	3,5	554	8,4	614	5,7
R-500 m: $a = 2,2$ $b = 4,4$ $c = 3,8$	576	2,6	557	6,9	563	5,1
R-1200 m: $a = 4,1$ $b = 9,5$ $c = -1,9$	550	2,3	624	7,3	543	5,5
R-1200 m: $a = 3,0$ $b = 5,2$ $c = 0,0$	575	2,3	563	6,5	563	4,4
R-1200 m: $a = -2,2$ $b = 5,6$ $c = 4,1$	610	2,4	599	6,6	583	4,3

¹ W pracy osobno nie przytoczono wyników dotyczących uderzeń koła o opornicę, ponieważ stanowią one dopełnienie uderzeń w iglicę prostą do liczby symulacji, a wartości W_{\max} nie różnią się istotnie od występujących przy uderzeniach w iglicę prostą.

² Pełne wyniki przeprowadzonych eksperymentów przedstawiono w pracach [7, 11].

Uderzenia w iglicę prostą; $V = 100$ km/h (pomierzone rozjazdy)

Rozjazd i jego odchyłki	Wózek 1		Wózek 2		Wózek 3	
	liczba	W_{\max}	liczba	W_{\max}	liczba	W_{\max}
R-190 m: $a = 4,2$ $b = 14,3$ $c = 6,5$	689	3,6	530	8,0	541	6,0
R-190 m: $a = 10,0$ $b = 10,2$ $c = -4,8$	619	3,0	500	7,4	503	5,7
R-190 m: $a = 5,3$ $b = 13,6$ $c = 2,0$	567	3,7	510	9,1	556	5,7
R-190 m: $a = 6,2$ $b = 11,5$ $c = 0,2$	436	3,4	505	7,7	513	5,3
R-190 m: $a = 7,5$ $b = 9,8$ $c = -3,5$	633	3,0	534	7,9	531	5,0
R-300 m: $a = 4,1$ $b = 12,0$ $c = 0,1$	699	2,3	551	5,9	563	3,9
R-500 m: $a = 7,3$ $b = 12,3$ $c = 1,5$	695	2,4	558	6,3	570	4,9

W przypadku uderzeń o iglicę odsuniętą — poza liczbą uderzeń oraz maksymalną wartością proporcjonalną do dyssypacji energii kinetycznej przy uderzeniu W_{\max} — rozpatrywano również maksymalne przemieszczenie tej iglicy pod wpływem uderzenia p_{\max} .

Do badań uderzeń wewnętrznej płaszczyzny koła o iglicę odsuniętą wybrano — w poszczególnych grupach prędkości — rozjazdy charakteryzujące się jednocześnie największą różnicą pomierzonych wymiarów $b - c$ i najmniejszą szerokością żłobka z .

W jazdach symulacyjnych, przy prędkościach 100÷160 km/h, w przypadku pierwszego wariantu wózka nie stwierdzono uderzeń wewnętrznej płaszczyzny koła o iglicę odsuniętą. Minimalna wartość szerokości żłobka z w rozjazdach przeznaczonych do tych prędkości wynosiła 54,5 mm.

W grupie rozjazdów przeznaczonych do prędkości 80 km/h w dwóch rozjazdach zanotowano minimalne szerokości żłobków, wynoszące 50,3 oraz 51,2 mm. W obu tych rozjazdach uderzenia koła o iglicę odsuniętą wystąpiły przy wszystkich trzech wariantach wózka.

W przypadku uderzeń o kierownicę, szynę toczną przy kierownicy i szynę skrzydłową między gardzielią a dziobem wyniki symulacji obejmują liczbę tych uderzeń oraz maksymalną wartość proporcjonalną do dyssypacji energii kinetycznej. W przypadku zaś uderzeń w szynę skrzydłową przed gardzielią, uderzeń w dziób krzyżownicy oraz zakleszczenia zestawu została wyznaczona liczba tych zdarzeń i maksymalne przemieszczenie odpowiednich elementów krzyżownicy.

O doborze rozjazdów do analizy zjawisk w strefie krzyżownicy decydowały odchyłki pomierzonych wymiarów szerokości toru — d i e , szerokości żłobków — g , i oraz odległości kierownicy od szyny tocznej — h .

Największe maksymalne wartości proporcjonalne do dyssypacji energii kinetycznej zanotowano przy uderzeniach w kierownicę drugiego wariantu wózka przy prędkości 160 km/h (tabl. 6). W sześciu analizowanych rozjazdach wartości te przekraczały $90 \text{ km}^2/\text{h}^2$, a największą z nich ($95,1 \text{ km}^2/\text{h}^2$) zanotowano na rozjeździe charakteryzującym się najmniejszą wartością wymiaru h (38,3 mm).

Uderzenia w kierownicę; $V = 160$ km/h (pomierzone rozjazdy)

Rozjazd i jego odchyłki	Wózek 1		Wózek 2		Wózek 3	
	liczba	W_{\max}	liczba	W_{\max}	liczba	W_{\max}
R-1200 m: $d = -0,4$ $e = -2,6$ $g = 64,4$ $i = 43,6$ $h = 38,3$	258	29,9	716	95,1	486	69,6
R-1200 m: $d = 4,6$ $e = -2,3$ $g = 63,6$ $i = 41,9$ $h = 42,6$	200	28,8	653	89,3	437	66,5
R-1200 m: $d = -0,5$ $e = -5,9$ $g = 62,0$ $i = 39,7$ $h = 39,6$	186	28,7	631	91,5	427	70,3
R-300 m: $d = -4,1$ $e = -4,7$ $g = 60,2$ $i = 42,9$ $h = 39,5$	177	28,5	638	90,2	453	65,6
R-300 m: $d = -3,7$ $e = 3,7$ $g = 59,5$ $i = 43,7$ $h = 40,0$	226	29,8	737	93,9	542	69,5
R-300 m: $d = -0,4$ $e = -1,4$ $g = 58,9$ $i = 44,0$ $h = 40,3$	184	31,7	696	93,5	499	69,9
R-300 m: $d = -0,2$ $e = -1,7$ $g = 55,0$ $i = 44,9$ $h = 42,2$	183	26,9	692	90,8	464	68,2
R-1200 m: $d = 0,8$ $e = -1,2$ $g = 63,0$ $i = 42,0$ $h = 46,0$	53	26,2	675	86,9	394	62,6

Najmniejszą wartość W_{\max} przy tej prędkości, wynoszącą $86,9 \text{ km}^2/\text{h}^2$, stwierdzono w rozjeździe, w którym pomierzony wymiar h (równy $46,0 \text{ mm}$) był największy w całej populacji pomierzonych rozjazdów, przeznaczonych do prędkości 160 km/h . W rozjeździe tym najmniejsze wartości W_{\max} wystąpiły również w pozostałych dwóch wariantach wózka, przy czym przy wózku pierwszym liczba uderzeń koła o kierownicę jest wyraźnie mniejsza niż w pozostałych analizowanych rozjazdach.

W pierwszym wariantcie wózka maksymalne wartości proporcjonalne do dyssypacji energii kinetycznej wynosiły od $26,2$ do $31,7 \text{ km}^2/\text{h}^2$, a przy wózku trzecim — od $62,6$ do $70,3 \text{ km}^2/\text{h}^2$.

Maksymalne wartości proporcjonalne do dyssypacji energii kinetycznej przy uderzeniu koła o szynę toczną przy kierownicy we wszystkich grupach prędkości analizowanych rozjazdów są znikome i wynoszą od $0,3 \text{ km}^2/\text{h}^2$ przy pierwszym wariantcie wózka, do $5,2 \text{ km}^2/\text{h}^2$ przy wariantcie drugim. Rozjazd, na którym wystąpiła ta wartość W_{\max} (przy prędkości 160 km/h) — w odróżnieniu od pozostałych analizowanych rozjazdów — charakteryzował się zwiększeniem szerokości toru od wymiaru $d = -3,7 \text{ mm}$ do wymiaru $e = 3,7 \text{ mm}$, co powoduje odwrotne, niż w pozostałych rozjazdach, nachylenie szyny tocznej.

Drugi wariant wózka wywoływał również największe, w porównaniu z dwoma pozostałymi, wartości W_{\max} przy uderzeniach koła w szynę skrzydłową między gardzielą a dziobem. Zanotowane maksymalne wartości przy tych uderzeniach wynosiły:

- $57,4 \text{ km}^2/\text{h}^2$ — przy prędkości 160 km/h ,
- $33,0 \text{ km}^2/\text{h}^2$ — przy prędkości 140 km/h ,
- $31,1 \text{ km}^2/\text{h}^2$ — przy prędkości 120 km/h ,
- $21,7 \text{ km}^2/\text{h}^2$ — przy prędkości 100 i 80 km/h .

W rozjazdach eksploatowanych z prędkościami 160 i 140 km/h w każdej z tych grup na jednym rozjeździe zanotowano uderzenia w szynę skrzydłową przed gardzielą przy drugim wariantcie wózka, a maksymalne przemieszczenia, wywołane uderzeniem, wynosiły odpowiednio $3,1$ i $1,3 \text{ mm}$.

Najniekorzystniejszy przypadek oddziaływań w tej strefie stwierdzono w grupie rozjazdów przystosowanych do prędkości 120 km/h , wśród których na jednym rozjeździe

szerokość gardzieli g wynosiła zaledwie 44,8 mm. Na rozjeździe tym uderzenia o szynę skrzydłową przed gardzielą zanotowano dla wszystkich trzech wariantów wózka, a maksymalne przemieszczenia wynosiły odpowiednio 3,1, 13,3 i 7,8 mm

W pozostałych rozjazdach w tej grupie prędkości uderzenia koła w tej strefie występowały tylko podczas przejazdu drugiego wariantu wózka, a maksymalne przemieszczenie, spowodowane tym uderzeniem, nie przekraczało 2,8 mm.

Uderzenia w dziób krzyżownicy we wszystkich grupach rozjazdów, z wyjątkiem eksploatowanych z prędkością 120 km/h, występowały jedynie przy pierwszym wariantcie wózka, a maksymalne przemieszczenia, wywołane uderzeniem, wahały się w granicach 0,3÷4,8 mm. Natomiast w grupie rozjazdów przystosowanych do prędkości 120 km/h na dwóch rozjazdach — charakteryzujących się największymi przekroczeniami wymiaru h (49,5 i 51,3 mm) — przy wózku pierwszym maksymalne przemieszczenia wynosiły 11,3 oraz 9,1 mm. W tych samych rozjazdach uderzenia o krzyżownicę wystąpiły również przy trzecim wariantcie wózka.

W żadnym z analizowanych rozjazdów nie stwierdzono przypadku zakleszczenia zestawu między szyną skrzydłową a kierownicą.

3.3. Wyniki eksperymentów symulacyjnych w torze zwrotnym

Do wyznaczania odchyłek dopuszczalnych w torze zwrotnym rozjazdu zastosowano optymalizację, w której zmiennymi decyzyjnymi są: wielkość proporcjonalna do dyssypacji energii kinetycznej przy nabieganiu koła na szynę W oraz pole tolerancji wymiarów:

$$k_c = c_{\max} - c_{\min}$$

$$k_d = d_{\max} - d_{\min}$$

Kryterium optymalizacji ma postać:

$$F_o(x) = \eta_w \frac{W}{W_r} + \eta_k \frac{k}{k_r} \rightarrow \min \quad (3)$$

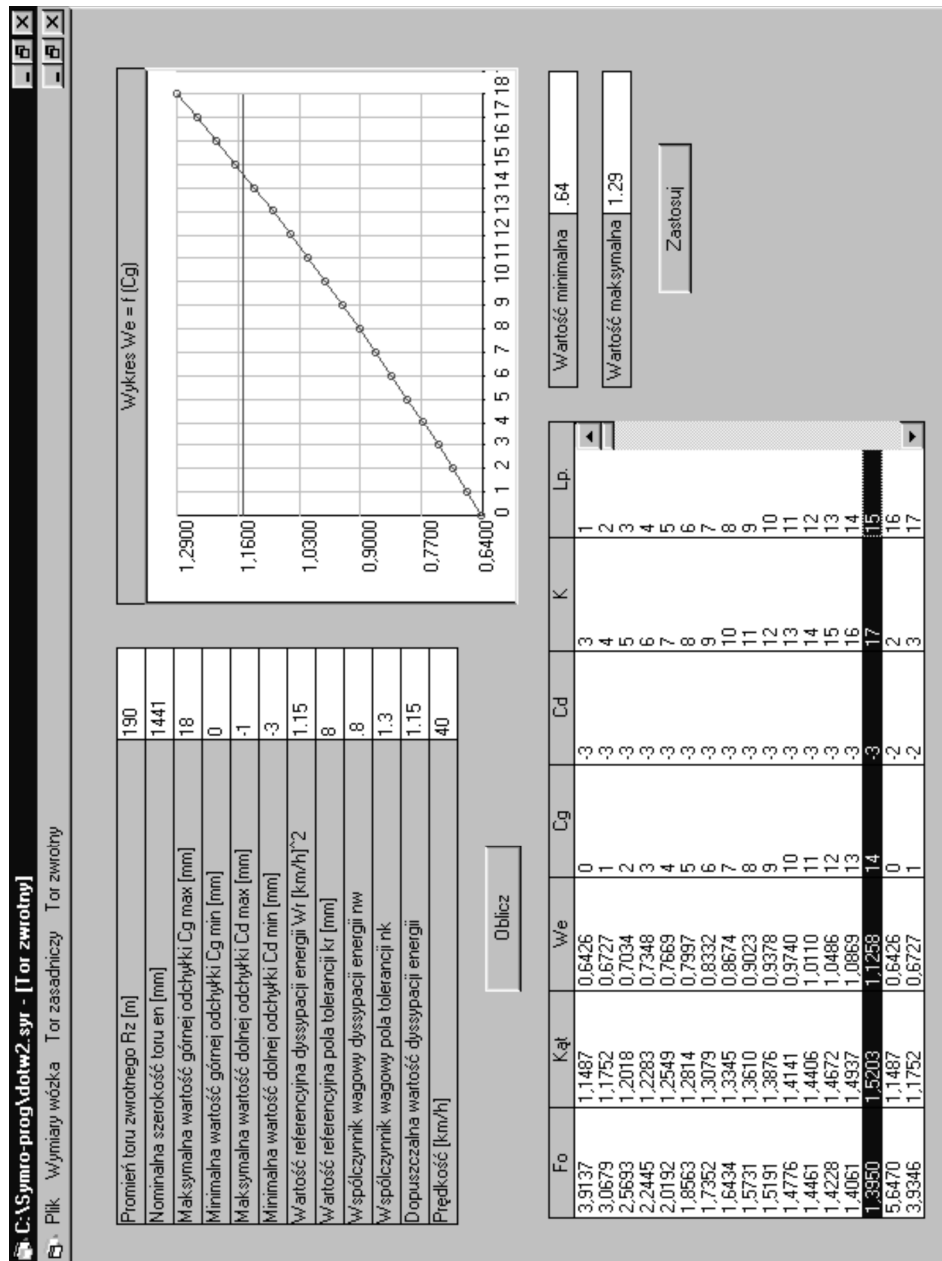
gdzie:

W_r, k_r — wartości referencyjne zmiennych decyzyjnych,
 η_w, η_k — współczynniki wag dla tych zmiennych.

Zastosowany model optymalizacji jest szczegółowo przedstawiony w pracach [6, 7].

Eksperymenty symulacyjne w torach zwrotnych rozjazdów zostały poprzedzone analizą wyników pomiarów szerokości torów c_1 i d_1 . Maksymalne wartości tych wymiarów posłużyły do określenia granicznych wartości proporcjonalnych do dyssypacji energii kinetycznej w rozjazdach o promieniach: 190, 300, 500 i 1200 m. Jako wartości maksymalne prawdopodobne przyjęto wartość średnią szerokości toru, powiększoną o 2,5 jej odchylenia standardowego. Na tej podstawie można przyjąć, że maksymalna, prawdopodobna szerokość w torze zwrotnym rozjazdów o promieniu $R=190$ m wynosi 1453 mm, o promieniach zaś $R=300$ m i $R=500$ m — 1446 mm. Na rozjazdach o promieniu 1200 m nie stwierdzono szerokości większej niż 1440 mm.

Przyjmując te wymiary i teoretycznie najgorszy wózek (wariant drugi) wyznaczono maksymalne prawdopodobne wartości W_{\max} , jakie mogą wystąpić na rozjazdach o podanych promieniach i poszerzeniach. Z rysunku 3 wynika, że w rozjeździe o promieniu 190 m maksymalna wartość W_{\max} — przy tym wariancie wózka — wynosi $1,29 \text{ km}^2/\text{h}^2$.



Rys. 3. Wyniki eksperymentu na rozjeździe R-190 m z wózkiem W2

Na podstawie tego rysunku można również wyznaczyć optymalne pola tolerancji, przyjmując przy tym następujące założenia:

- jako graniczną wartość W_g przyjmuje się wartość mniejszą w przybliżeniu o 10% od wartości W_{max} , tj. w konkretnym przypadku $1,15 \text{ km}^2/\text{h}^2$,
- preferując cechy utrzymania nawierzchni, wprowadza się współczynniki $n_w = 0,8$ i $n_k = 1,3$,
- wartość referencyjną W_r przyjmuje się równą wartości W_g .

Przy tych założeniach optymalnym przedziałem odchyłek dopuszczalnych jest przedział $\langle -3, 14 \rangle$ mm. W wyniku tego samego eksperymentu, lecz z wózkiem w wariancie trzecim otrzymano wartość proporcjonalną do dyssypacji energii kinetycznej $W_{max} = 1,19$. Zakładając więc wartość graniczną $W_g = 1,05$, otrzymano taki sam optymalny przedział odchyłek, przy którym funkcja celu $F_o = 1,3968$.

Podczas jazdy symulowanej z pierwszym wariantem wózka otrzymano wartość $W_{max} = 0,92$, w związku z czym wartość graniczną przyjęto jako $W_g = 0,80$. Optymalnym wariantem odchyłek, również w tym przypadku, jest przedział $\langle -3, 14 \rangle$ mm, przy którym $F_o = 1,3875$ (rys. 4). Warto jednak zauważyć, że w tym przypadku granica W_g byłaby osiągnięta przy odchyłce górnej zbliżonej do 15 mm. Przykład ten wskazuje na to, że przy dobrym stanie taboru odchyłki utrzymania nawierzchni można by było rozszerzyć.

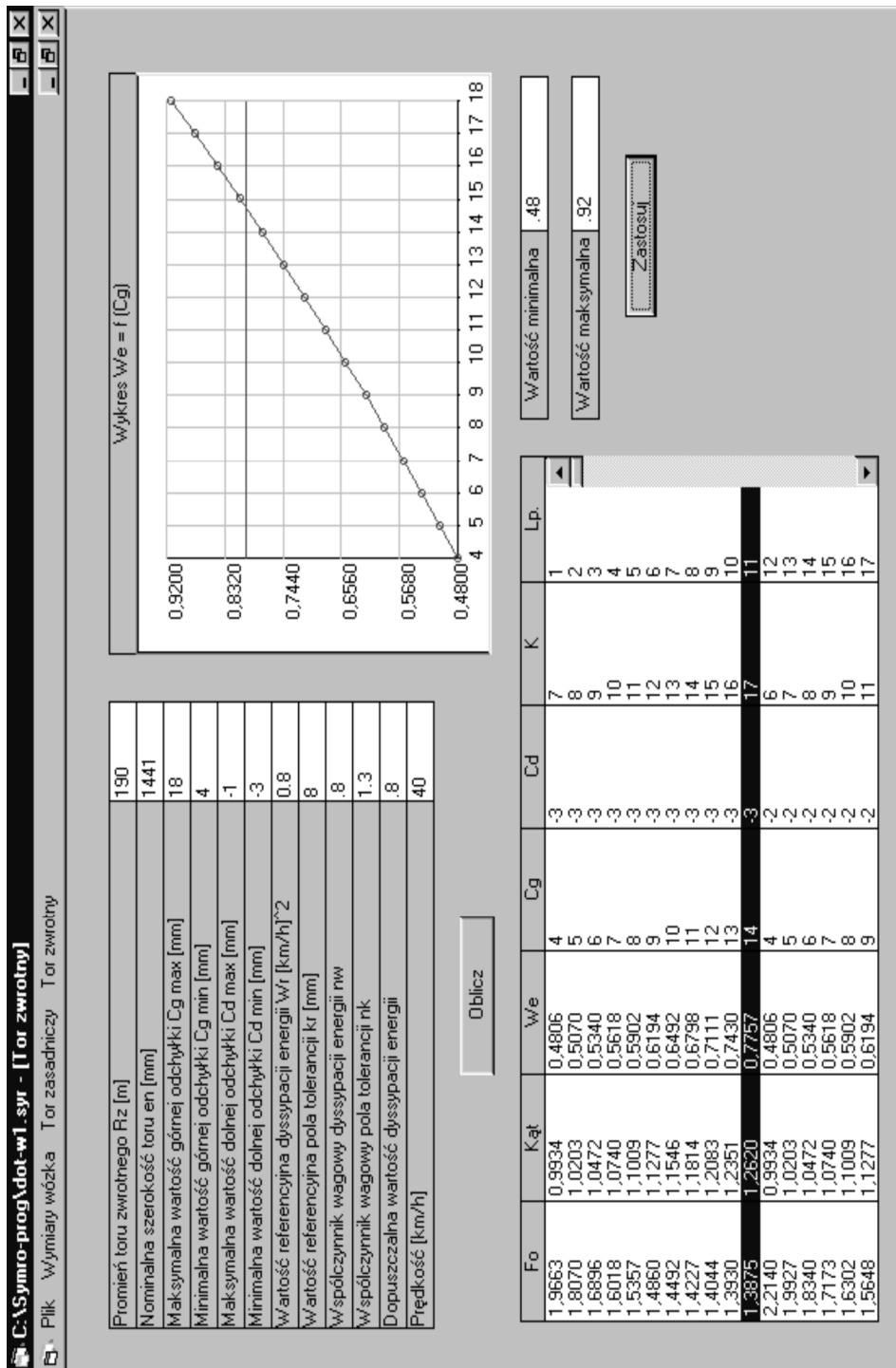
Eksperymenty z rozjazdem o promieniu 300 m rozpoczęto od pierwszego wariantu wózka, zakładając prędkość maksymalną odpowiadającą temu promieniowi, tj. 50 km/h i odchyłkę maksymalną 11 mm. Otrzymano przy tym $W_{max} = 0,62$ ($W_g = 0,55$) i optymalny przedział odchyłek $\langle -3, 9 \rangle$ mm. Przy trzecim wariantcie wózka otrzymano taki sam przedział optymalny odchyłek przy funkcji celu $F_o = 1,6413$, a przy drugim wariantcie wózka — przedział $\langle -3, 8 \rangle$ mm, przy $F_o = 1,7343$.

Biorąc pod uwagę wartości górnych odchyłek wyznaczone dla trzech rozpatrywanych wariantów wózków, jako górną odchyłkę projektowaną przyjęto 10 mm. Największa wartość proporcjonalna do dyssypacji energii kinetycznej W przy tej odchyłce i najgorszym, tj. drugim, wariantcie wózka jest mniejsza niż w rozjeździe o promieniu R–190 m.

W rozjeździe o promieniu R–500 m przy prędkości $V = 60$ km/h, odchyłce 11 mm i drugim wariantcie wózka uzyskano $W_{max} = 1,3$. Przyjmując wartość graniczną $W_g = 1,15$ otrzymano optymalny przedział odchyłek $\langle -3, 9 \rangle$ mm.

W wyniku symulacji przejazdu pierwszego wariantu wózka otrzymano wartość $W_{max} = 0,75$ ($W_g = 0,65$) i również przedział optymalny odchyłek $\langle -3, 9 \rangle$ mm. Eksperyment z trzecim wariantem wózka dał wynik $W_{max} = 1,15$ ($W_g = 1,0$) i taki sam przedział odchyłek. Daje to podstawę do zalecenia tego przedziału jako projektowanego.

W rozjeździe o promieniu R–1200 m przy prędkości 100 km/h, maksymalnej założonej odchyłce górnej równej 6 mm i drugim wariantcie wózka uzyskano $W_{max} = 2,31$ ($W_g = 2,1$) i odchyłkę górną — 4,4 mm. Przy trzecim wariantcie wózka otrzymano górną odchyłkę wynoszącą 4,7 mm, a przy pierwszym wariantcie wózka — 4,9 mm. Przy wszystkich wariantach wózka odchyłka dolna wynosiła –3 mm. Eksperyment ten uzasadnia więc celowość ograniczenia odchyłek szerokości torów zwrotnych w rozjeździe o promieniu 1200 m do przedziału $\langle -3, 5 \rangle$ mm.



Rys. 4. Wyniki eksperymentu na rozjeździe R-190 m z wózkiem W1

3.4. Podsumowanie eksperymentów symulacyjnych

Wyniki eksperymentów symulacyjnych na torach zasadniczych rozjazdów wykazały, że we wszystkich rozpatrywanych zjawiskach, z wyjątkiem zaczepienia koła o dziób krzyżownicy, najniekorzystniejszy okazał się drugi wariant wózka. Najgorsze wyniki przy zaczepianiu kół o dziób krzyżownicy zanotowano w symulacjach przejazdu z pierwszym wariantem wózka, co jest oczywiste biorąc pod uwagę, że odległość między obrzeżami kół różni się od odległości nominalnej tylko o 5 mm.

Wartość proporcjonalna do dyssypacji energii kinetycznej W w strefie zwrotnicy jest wielokrotnie mniejsza niż w strefie krzyżownicy. Przy nabieganiu drugiego wariantu wózka z prędkością 160 km/h na iglicę prostą wartość W_{\max} w wybranych rozjazdach waha się od 6,5 do 8,4 km²/h², natomiast przy nabieganiu na kierownicę — w granicach 86,9÷95,1 km²/h². Duże są również wartości W_{\max} przy nabieganiu na szynę skrzydłową między gardzielią i dziobem. Wyjątkiem w strefie krzyżownicy są jedynie nabiegania na szynę toczną przy kierownicy, gdzie maksymalna wartość proporcjonalna do dyssypacji energii kinetycznej rzadko przekracza 5 km²/h².

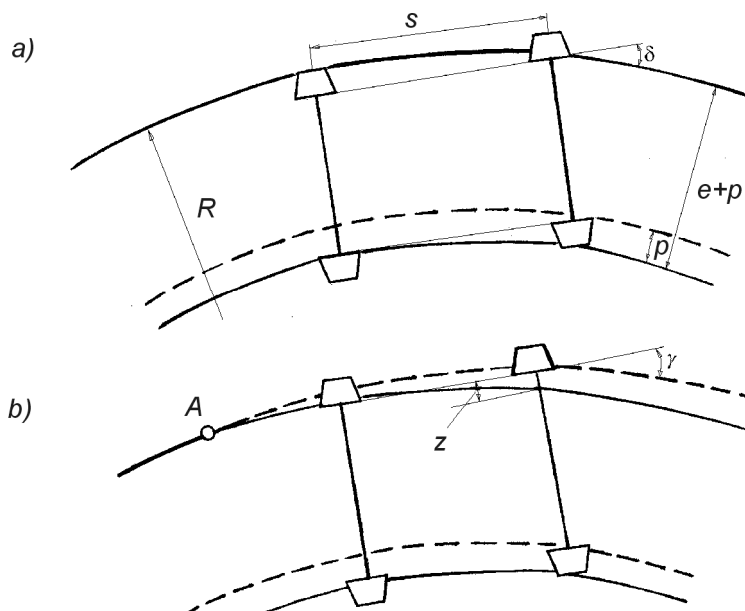
Wrażliwość wartości proporcjonalnej do dyssypacji energii kinetycznej na wymiary rozjazdów okazała się największa przy nabieganiu koła na szynę skrzydłową między gardzielią a dziobem na rozjazdach o promieniu 1200 m, w których wahała się od 18,5 do 57,4 km²/h².

W pewnych przypadkach maksymalne wartości proporcjonalne do dyssypacji energii kinetycznej, obliczone przy prędkościach mniejszych, są większe od tych, które uzyskano przy prędkościach większych. Przyczyną tych pozornych anomalii jest gorszy stan utrzymania rozjazdów o mniejszych prędkościach pociągów.

Eksperymenty symulacyjne na torach zasadniczych rozjazdów wykazały, jaki jest rozmiar zjawisk niepożądanych, wyrażanych liniowo. Stwierdzono np., że drugi wariant wózka wywołałby maksymalne przemieszczenie iglicy odsuniętej o 7 mm w jednym z rozjazdów należących do grupy prędkości 160 km/h i 12 mm — w rozjeździe należącym do grupy prędkości 100 km/h.

Eksperymenty przeprowadzone na torach zwrotnych wskazują, że występujące w nich odchyłki szerokości mogą istotnie wpływać na rozwój ich degradacji. Szybko postępujące zużycie boczne szyn w rozjazdach, na których ograniczono prędkość w torach zwrotnych i w których siły poprzeczne — przy tym ograniczeniu — są stosunkowo niewielkie, zależy w dużej mierze od kątów nabiegania, te zaś — od wymiarów szerokości. Ustawienie wózków wagonów odpowiada w tych warunkach schematowi pokazanemu na rysunku 5, przy którym kąty nabiegania rosną. O zwiększonych oporach ruchu przy takim ustawieniu wózków świadczy często charakterystyczny hałas, generowany podczas jazdy po torach zwrotnych rozjazdów o promieniach R=190 m. Kąty nabiegania przy takim ustawieniu wózków będą tym większe, im większe jest poszerzenie toru i im większe są zużycia obrzeży kół, czyli im mniejszy jest wymiar t . Z tego właśnie powodu są szkodliwe nadmierne poszerzenia torów zwrotnych. Obecnie do rzadkości należą wagony trzyosiowe o dużym rozstawie osi, wymagające niegdyś wprowadzania znacznych poszerzeń toru, które miały chronić szyny przed zmianą pochylenia poprzecznego („rozpychania toru”). Wbrew więc spotykanym jeszcze niekiedy poglądom, że duża szerokość toru zwrotnego zmniejsza degradację nawierzchni, zużycie szyn i uszkodzenia podrozdziadnic drewnianych przy nadmiernej szerokości będą rosły.

Zwiększone przedziały szerokości toru zwrotnego w stosunku do odchyłek dotychczasowych wynikają głównie z chęci przedłużenia okresu między wymianami szyn łączących wówczas, gdy jest intensywny ruch na odgałęzieniu. Zwiększenie przedziału odchyłek dopuszczalnych w eksploatacji nie powinno jednak oznaczać rozszerzenia odchyłek przy odbiorze nowych rozjazdów.



Rys. 5. Położenie wózka wagonu w łuku przy mniejszych prędkościach pociągów
a — przy równomiernym poszerzeniu toru, *b* — przy dodatkowym gradiencie szerokości

Ogólny wniosek nasuwający się z tych rozważań, to konieczność dokładnego sprawdzania wymiarów rozjazdów w czasie ich montażu i bezpośrednio po zakończeniu robót. Obecna technika pomiarowa stwarza możliwość wykrywania niedokładności, a dzięki temu również umożliwia łatwiejsze zapobieganie powstawaniu nawet niewielkich przekroczeń odchyłek dopuszczalnych, które w późniejszej eksploatacji nawierzchni mogłyby przyspieszać jej degradację.

Sprawdzanie dokładności nawierzchni w poszczególnych stadiach jej budowy odpowiada procesowemu podejściu do zarządzania jakością [13]. W takim sposobie zarządzania zakłada się, że pożądane wyniki są osiągnięte skuteczniej wówczas, gdy odpowiednie działania traktuje się jako elementy dynamicznego łańcucha zdarzeń.

4. PROJEKTOWANE ODCHYLENKI DOPUSZCZALNE

4.1. Kryteria ustalania odchyłek dopuszczalnych

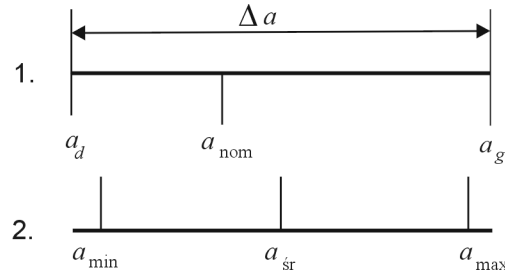
Zbiór odchyłek szerokości torów i żłobków w rozjazdach, przy założonej maksymalnej prędkości pociągu [5], powinien:

- minimalizować liczbę wystąpień przypadków niekorzystnych we współdziałaniu kół z elementami rozjazdów,
- wykluczać całkowicie zjawiska niebezpieczne,
- umożliwiać maksymalne zwiększenie okresów między naprawami rozjazdów, spowodowanymi przekroczeniem odchyłek dopuszczalnych.

Jednym z najważniejszych kryteriów, jakie uwzględniano w tych analizach była racjonalizacja utrzymania rozjazdów, sprowadzająca się do wykonywania w nich wszelkich napraw jedynie wówczas, gdy są one bezwzględnie konieczne. Warunek ten można utożsamić z dążeniem do zachowania możliwie dużych odchyłek dopuszczalnych, zwłaszcza przy mniejszych prędkościach jazdy pociągów.

Częstość napraw rozjazdów zależy od wartości pól tolerancji poszczególnych odchyłek dopuszczalnych oraz od dopasowania pola tolerancji do zbadanych odchyłek wymiarów od wymiaru nominalnego (rys. 6). Polem tolerancji Δa jest różnica między górną i dolną odchyłką dopuszczalną, tj.:

$$\Delta a = a_g - a_d$$



Rys. 6. Pole tolerancji (1) oraz przedział wymiarów pomierzonych (2)

Im większa jest wartość pola tolerancji Δa i jego lepsze dopasowanie do wymiarów pomierzonych, tym dłużej rozjazd może być eksploatowany bez koniecznej naprawy. Z drugiej jednak strony, rozszerzenie pola tolerancji prowadzi do zwiększenia liczby zjawisk niepożądanych (np. zakleszczenia zestawu między szyną skrzydłową i kierownicą, zaczeplenia o dziób krzyżownicy) i w skrajnym przypadku może spowodować sytuację niebezpieczną.

4.2. Odchyłki dopuszczalne szerokości toru i żłobków w torze zasadniczym

Uwzględniając kryteria przedstawione w punkcie 4.1 oraz wyniki pomiarów rozjazdów i wyniki eksperymentów symulacyjnych przeprowadzonych na pomierzonych rozjazdach przyjęto — dla poszczególnych prędkości — wartości odchyłek dopuszczalnych wymiarów nominalnych w torze zasadniczym, przedstawione w tabelicy 7. Dotyczą one prędkości w zakresie od 200 do 40 km/h. Różnicowanie odchyłek dopuszczalnych przy prędkościach mniejszych uznano za bezcelowe, ponieważ zjawiska dynamiczne na rozjazdach przy prędkościach 40 km/h i mniejszych niewiele się różnią, stąd ograniczanie prędkości na rozjazdach poniżej 40 km/h może mieć większe znaczenie ze względu na skutki wykolejenia niż na jego uniknięcie.

W proponowanych odchyłkach dla rozjazdów przeznaczonych do prędkości 200 km/h zwiększono zakres obecnie obowiązujących przy tej prędkości dolnych odchyłek dopuszczalnych wymiarów a , b , c i d do -3 mm.

Proponowane odchyłki dopuszczalne wymiarów w torze zasadniczym

V [km/h]	Odchyłki wymiaru [mm]								Warunki	
	a	b	c	d	e	h	i	f		
200	+4	+4	+4	+4	+4	+3	+3	≥ 1392	$e - h - i \leq 1357$	
	-3	-3	-3	-3	-2	-1	-1			
160	+5	+5	+5	+5	+5	+4	+4			
	-3	-3	-3	-3	-2	-1	-1			
140	+6	+6	+6	+6	+6	+4	+4			
	-3	-3	-3	-3	-3	-1	-1			
120	+6	+6	+6	+6	+6	+4	+4			
	-4	-4	-4	-4	-4	-2	-2			
100	+6	+6	+6	+6	+6	+5	+5			≥ 1391
	-4	-4	-4	-4	-4	-2	-2			
80	+7	+7	+7	+7	+7	+5	+5			≥ 1390
	-4	-4	-4	-4	-4	-3	-3			
60	+7	+7	+7	+7	+7	+7	+7	≥ 1389		
	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4			
40	+8	+8	+8	+8	+8	+7	+7			
	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4			

W grupie rozjazdów, na której prędkość na torze zasadniczym wynosi 160 km/h, proponowane odchyłki, odnoszące się do szerokości toru, tj. wymiarów *a*, *b*, *c* i *d*, wynoszą +5 -3 mm. Za przyjęciem takich odchyłek przemawiają wartości proporcjonalne do dysypacji energii kinetycznej, wyznaczone w wyniku eksperymentów symulacyjnych, a mianowicie:

- wartości W_{max} występujące w strefie zwrotnicy, a więc związane z wymiarami *a*, *b* i *c*, są kilkakrotnie mniejsze od występujących w strefie krzyżownicy,
- największe wartości W_{max} , stwierdzone w wyniku symulacji przejazdu przez krzyżownicę, nie wystąpiły w rozjazdach, w których zanotowano przekroczenia proponowanych wartości odchyłek dopuszczalnych w wymiarach *d* i *e*.

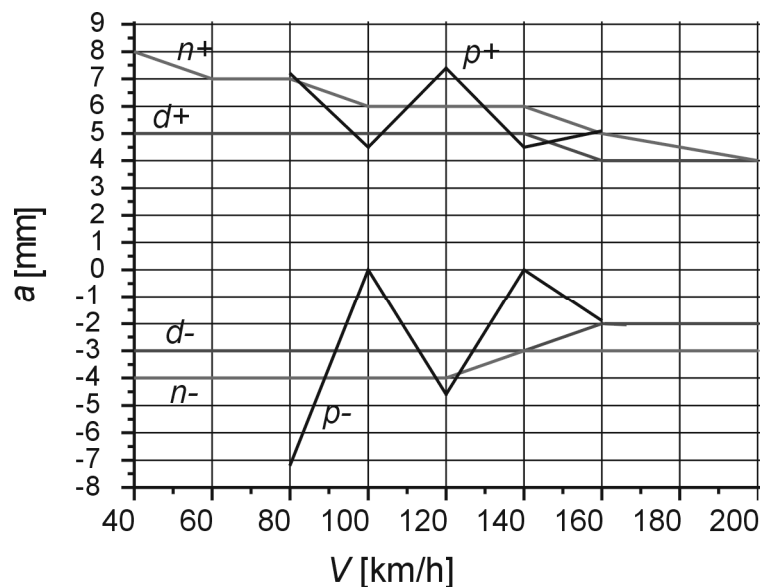
Z drugiej strony, wyniki pomiarów 58 rozjazdów w tej grupie prędkości świadczą, iż przekroczenia proponowanych wartości są nieliczne oraz nieduże, i tak:

- górna odchyłka szerokości toru *a* była przekroczona tylko w jednym przypadku, o wartość 0,1 mm, przy czym brakowało przekroczeń odchyłek ujemnych,
- w szerokości toru *c* zanotowano cztery przekroczenia dolnej odchyłki (w trzech przypadkach o 0,1÷0,7 mm i jeden o 1,4 mm) oraz jedno przekroczenie odchyłki górnej o 0,3 mm,
- górna odchyłka szerokości *d* była przekroczona w jednym rozjeździe o 1,2 mm, a odchyłka dolna — w pięciu rozjazdach (w czterech o wartość 0,1÷0,8 mm i w jednym o 2,1 mm),
- dla szerokości *e* nie zanotowano przekroczeń odchyłki górnej, a odchyłka dolna została przekroczona w 15 rozjazdach (w siedmiu o 0,2÷0,6 mm, w trzech o 1,1÷1,8 mm i w pięciu o 2,0÷3,9 mm).

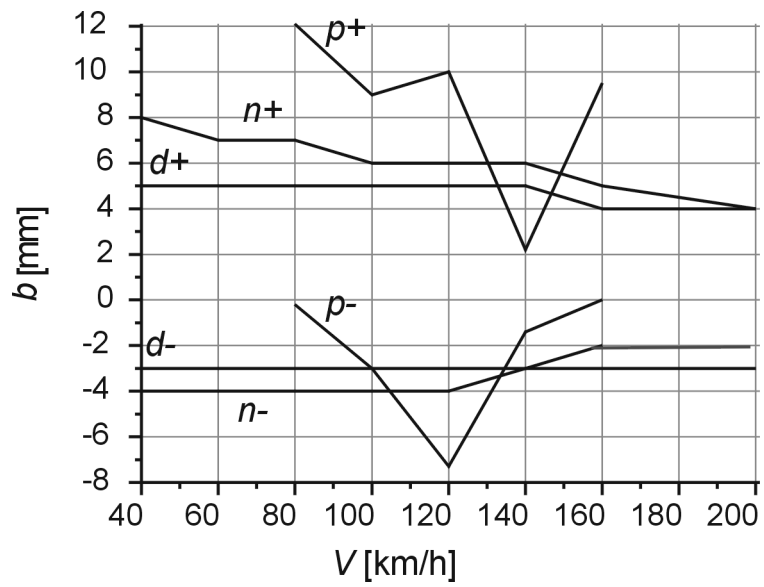
Najliczniejsze przekroczenia proponowanych odchyłek szerokości toru w grupie rozjazdów przeznaczonych do prędkości 160 km/h zanotowano w wymiarze b , w którym — przy braku przekroczeń odchyłki dolnej — wystąpiło 28 przekroczeń odchyłki górnej o wartość od 0,1 do 4,5 mm.

Jeśli chodzi o szerokości żłobków i oraz h , to proponuje się, aby w tej grupie rozjazdów wprowadzono dolną odchyłkę wynoszącą -1 mm, a górną $+4$ mm. Przyjęcie tych wartości nie powinno spowodować zwiększenia największych, a więc występujących przy uderzeniach w kierownicę, wartości W_{\max} . Jak wynika bowiem z przeprowadzonych symulacji, przy szerokości żłobka i rzędu 42 mm, wartości te były najmniejsze (86,9 i 89,3 km^2/h^2), a największą wartość W_{\max} , wynoszącą 95,1 km^2/h^2 , zanotowano przy szerokości żłobka h równej 38,3 mm, czyli o blisko 2 mm mniejszej od wynikającej z proponowanej odchyłki dolnej. Liczba przekroczeń dolnej odchyłki wymiaru żłobka i w pomierzonej grupie rozjazdów wynosi 8 (o wartość 0,1÷3,3 mm), a żłobka h — 12 (od 0,2 do 2,2 mm). Proponowana wartość odchyłki górnej została przekroczona tylko w jednym przypadku (w odniesieniu do żłobka h) o 1 mm.

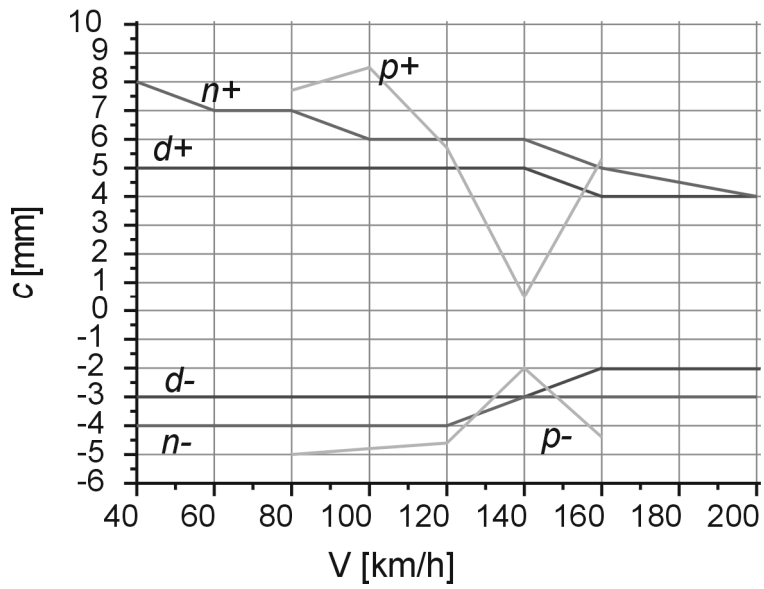
Ważne jest znaczenie odchyłek dopuszczalnych jako czynnika, od którego zależy częstość napraw. Na rysunkach 7÷13 przedstawiono proponowane odchyłki szerokości torów i żłobków w rozjazdach na tle odchyłek dotychczasowych i ekstremalnych przekroczeń wymiarów nominalnych, zanotowanych w pomierzonych rozjazdach. Rysunki te ułatwiają porównanie wpływu pól tolerancji dotychczasowych i projektowanych na podejmowanie takich zabiegów naprawczych, jak poprawianie szerokości toru, ścinanie spływów, a nawet wymianę pewnych części rozjazdów.



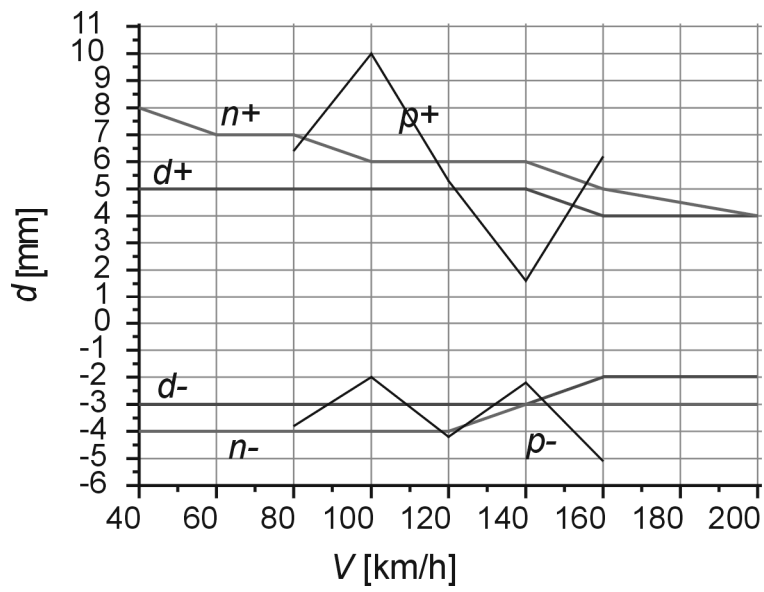
Rys. 7. Wartości odchyłek szerokości toru a : dotychczasowe — d , projektowane — n oraz skrajne odchyłki pomierzone — p



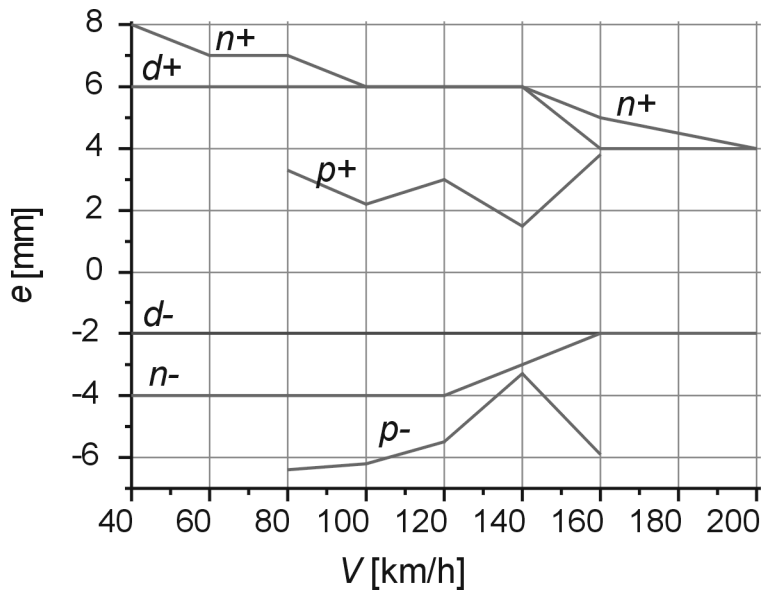
Rys. 8. Wartości odchyłek szerokości toru b : dotychczasowe — d , projektowane — n oraz skrajne odchyłki pomierzone — p



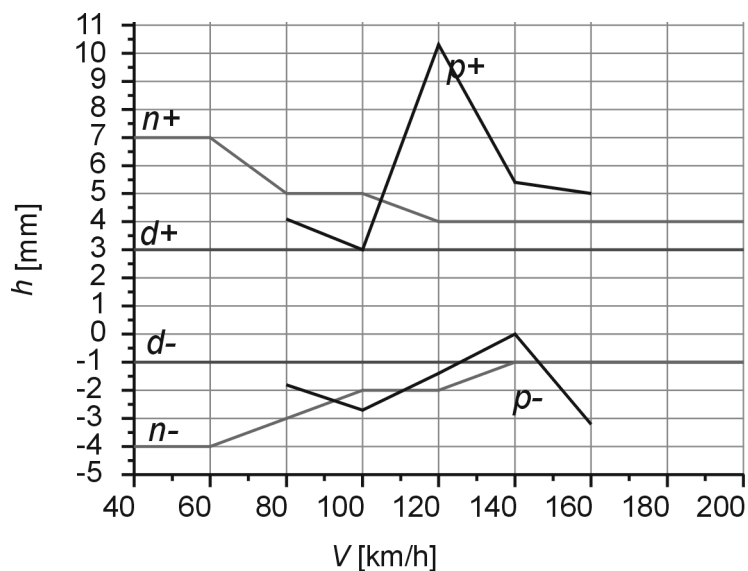
Rys. 9. Wartości odchyłek szerokości toru c : dotychczasowe — d , projektowane — n oraz skrajne odchyłki pomierzone — p



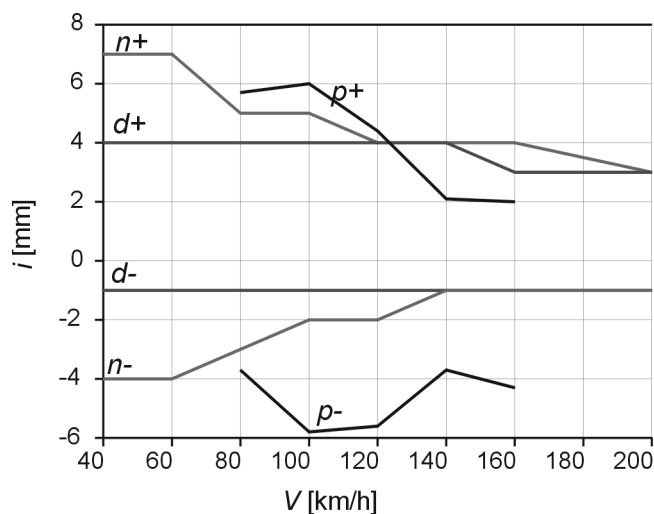
Rys. 10. Wartości odchyłek szerokości toru d : dotychczasowe — d , projektowane — n oraz skrajne odchyłki pomierzone — p



Rys. 11. Wartości odchyłek szerokości toru e : dotychczasowe — d , projektowane — n oraz skrajne odchyłki pomierzone — p



Rys. 12. Wartości odchyłek szerokości żłobka h : dotychczasowe — d , projektowane — n oraz skrajne odchyłki pomierzone — p



Rys. 13. Wartości odchyłek szerokości żłobka i : dotychczasowe — d , projektowane — n oraz skrajne odchyłki pomierzone — p

Na podstawie analizy tych rysunków można wyciągnąć interesujące spostrzeżenia. Już na pierwszy rzut oka widać, że przy mniejszych prędkościach w projektowanych polach tolerancji mieszczą się — w pewnych przypadkach — skrajne odchyłki pomierzone, przekraczające odchyłki dotychczasowe. I tak:

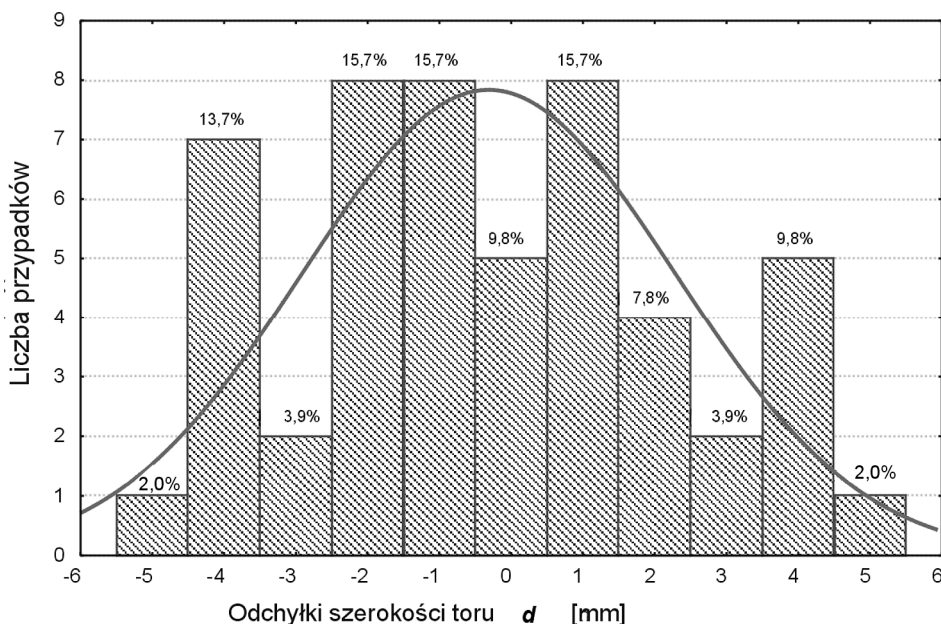
- przy prędkości 120 km/h w projektowanym polu tolerancji znalazł się skrajny dodatni wymiar pomierzony c (rys. 9) oraz skrajny ujemny wymiar h (rys. 12),
- w projektowanym polu tolerancji dla prędkości 100 km/h znalazł się skrajny ujemny wymiar b (rys. 8),

— pole tolerancji projektowane dla 80 km/h obejmuje skrajne pomierzone odchyłki szerokości toru d (rys. 10) oraz odległości kierownicy od szyny tocznej h (rys. 12).

Rysunki te uwidaczniają również dobrze przyjętą filozofię projektowania nowych odchyłek dopuszczalnych. Widać bowiem na nich znaczne zwiększenie pól tolerancji w rozjazdach o mniejszych prędkościach i niewielkie zwiększenie tych pól przy prędkościach 140÷200 km/h. Dzięki temu zmaleje zdecydowanie konieczność napraw znacznej liczby rozjazdów na sieci PKP PLK S.A., o czym można się przekonać analizując histogramy wymiarów pomierzonych w poszczególnych grupach prędkości rozjazdów.

I tak np. na podstawie rysunku 14, przedstawiającego histogram wymiarów d pomierzonych w rozjazdach, na których prędkość na torze zasadniczym wynosi 120 km/h, można stwierdzić, że frakcja rozjazdów o przekroczonych odchyłkach dopuszczalnych — w stosunku do obowiązujących obecnie — zmniejszy się przy projektowanych odchyłkach o około 14%.

- Frakcja przekroczeń innych wymiarów w rozjazdach z tej grupy prędkości zmniejszy się o około:
- 4% — w zakresie wymiaru a ,
 - 12% — w zakresie wymiaru b ,
 - 6% — w zakresie wymiarów c i e ,
 - 8% — w zakresie wymiaru i .



Rys. 14. Odchyłki szerokości toru d pomierzone na rozjazdach o $V = 120$ km/h

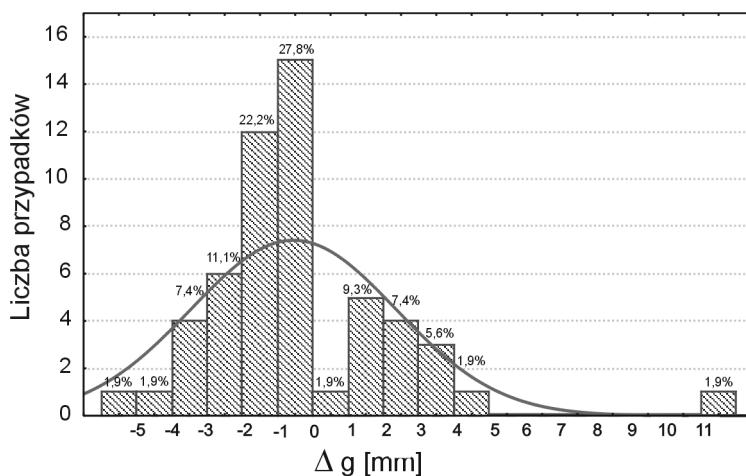
Na podstawie analizy histogramów opracowanych dla wszystkich grup prędkości można stwierdzić, że projektowane odchyłki spowodują znaczne zmniejszenie robót przy regulacji szerokości żłobków w krzyżownicy. Przy projektowanych odchyłkach zabiegu tego nie trzeba przeprowadzać w sumie na 60% pomierzonych rozjazdów z grup prędkości 80÷120 km/h.

W licznych przypadkach (por. rys. 7—13) pomierzone wymiary ekstremalne przekraczają wartości projektowanych odchyłek dopuszczalnych. Na tej podstawie można wyciągnąć dwa wnioski:

- 1) wartości tych odchyłek nie są niepotrzebnie za duże, czyli ich rozszerzenie było uzasadnione;
- 2) jest to potwierdzeniem, że przy tych rozszerzonych odchyłkach nie dojdzie do niekorzystnych zjawisk nieobserwowanych dotychczas w eksploatacji; nie mogą więc one pogorszyć obecnego stanu rozjazdów.

4.3. Odchyłki dopuszczalne szerokości w gardzieli

Z wykonanych pomiarów wynika, że stosunkowo często zdarzają się przekroczenia dotychczasowych dolnych odchyłek dopuszczalnych szerokości w gardzieli. Dotyczy to zwłaszcza rozjazdów eksploatowanych z większymi prędkościami. I tak, w grupie 54 rozjazdów przeznaczonych do prędkości 160 i 140 km/h, poza przedziałem 60_{-2}^{+4} mm znalazło się 13 rozjazdów, przy czym w jednym (tj. niespełna 2%) została przekroczona odchyłka górna, a w dwunastu (25,5%) — dolna (rys. 15).



Rys. 15. Odchyłki szerokości w gardzieli Δg — pomiary rozjazdów przy $V = 160$ i 140 km/h

W 51 pomierzonych rozjazdach w grupie 120 km/h poza przedziałem odchyłek dopuszczalnych znalazło się 25% rozjazdów (przy czym w każdym z nich została przekroczona odchyłka dolna). W rozjazdach przeznaczonych do prędkości 100 i 80 km/h poza polem obowiązujących tolerancji znalazło się — w każdej z tych grup — około 35% pomierzonych rozjazdów. I tak na 31 rozjazdów, eksploatowanych z prędkością 100 km/h, w ośmiu została przekroczona odchyłka dolna i w trzech odchyłka górna. Natomiast na 30 analizowanych rozjazdów dostosowanych do prędkości 80 km/h, przekroczenie dopuszczalnej odchyłki dolnej stwierdzono w 4 rozjazdach, a odchyłki górnej — w 7 rozjazdach. W grupie tej widać więc wyraźny wzrost częstości przekroczeń odchyłki górnej.

W grupie ośmiu rozjazdów przeznaczonych do prędkości 40 km/h, w dwóch przypadkach zanotowano przekroczenie odchyłki górnej o 17,7 oraz o 1,3 mm, a w dwóch — odchyłki dolnej o 2,0 i 4,7 mm.

W celu zbadania wpływu wielkości odchyłek dopuszczalnych wymiaru g na uderzenia kół w szynę skrzydłową przed gardzielą oraz między gardzielą a dziobem wykonano symulacje przejazdu trzech wariantów wózka wagonu, przy sześciu zbiorach tych odchyłek, tj. przy odchyłkach:

- a) +4 -2 mm,
- b) +4 -3 mm,
- c) +4 -4 mm,
- d) +5 -2 mm,
- e) +5 -3 mm,
- f) +5 -4 mm.

Analiza uzyskanych wyników symulacji wykazała, że zwiększenie odchyłek dopuszczalnych szerokości gardzieli g nie powoduje istotnych różnic w oddziaływaniu koła przy uderzeniach w szynę skrzydłową między gardzielą a dziobem krzyżownicy. Jest jednak widoczna tendencja do zwiększania wartości W_{\max} przy górnej odchyłce równej +5 mm, w porównaniu z wartością +4 mm, z wyjątkiem rozjazdu o promieniu $R=1200$ m.

Istotne różnice stwierdzono natomiast w skutkach uderzeń koła o szynę skrzydłową przed gardzielą. Dla pierwszego wariantu wózka w ogóle nie zanotowano uderzeń koła o szynę skrzydłową przed gardzielą w rozjazdach o promieniach $R=1200$ m, $R=500$ m i $R=300$ m, a w rozjeździe $R=190$ m wystąpiły one dopiero przy dolnej odchyłce, wynoszącej -4 mm.

W drugim wariantcie wózka uderzenia koła zanotowano przy wszystkich rozpatrywanych zbiorach odchyłek dopuszczalnych; warto jednak zauważyć, że we wszystkich rozjazdach, przy dolnej odchyłce równej -2 mm, zarówno liczba uderzeń jak i wielkość przemieszczenia jest wyraźnie mniejsza od wartości zanotowanych przy odchyłkach wynoszących -3 i -4 mm.

W trzecim wariantcie wózka i dolnej odchyłce równej -2 mm, w rozjeździe o promieniu $R=190$ m zanotowane oddziaływania koła na szynę skrzydłową przed gardzielą są niemal identyczne — bez względu na wartość odchyłki górnej. Przy pozostałych dolnych granicach odchyłek wyraźnie wzrasta liczba uderzeń oraz wielkość przemieszczenia.

W innych badanych rozjazdach, przy dolnej odchyłce równej -2 mm, nie wystąpiły uderzenia koła o szynę skrzydłową przed gardzielą. Pojawiają się one przy odchyłkach -3 i -4 mm, przy czym wraz ze wzrostem tej odchyłki wzrasta liczba uderzeń i wielkość maksymalnego przemieszczenia.

Na podstawie analizy wyników pomiarów i przeprowadzonej symulacji można wyciągnąć następujące wnioski:

- 1) konieczne jest zwrócenie większej uwagi na prawidłowość wymiarów krzyżownic przy ich odbiorze;
- 2) zmiana dotychczasowych dolnych odchyłek szerokości gardzieli mogłaby jeszcze bardziej pogorszyć stan obserwowany;
- 3) górną odchyłkę wymiaru g można zwiększyć do +5 mm.

4.4. Odchyłki dopuszczalne wymiaru f

Od wielu dziesiątków lat jest stosowana zasada utrzymywania minimalnej odległości dzioba krzyżownicy od krawędzi iglicy; odległość ta, znana powszechnie jako wymiar f , jest równa 1392 mm. Nominalny wymiar $f = 1394 \pm \frac{2}{2}$ mm wynika z warunku eliminującego zaczepienie koła o dziób krzyżownicy.

W projektowanych odchyłkach proponuje się odejście od tej zasady w rozjazdach eksploatowanych przy prędkościach mniejszych niż 100 km/h (por. tabl. 7). Propozycja ta wynika z całości badań scharakteryzowanych w niniejszej pracy oraz w związanych z nią opracowaniach, które są podane w odpowiednich pozycjach bibliografii. Argumenty przemawiające za przyjęciem tej propozycji są następujące:

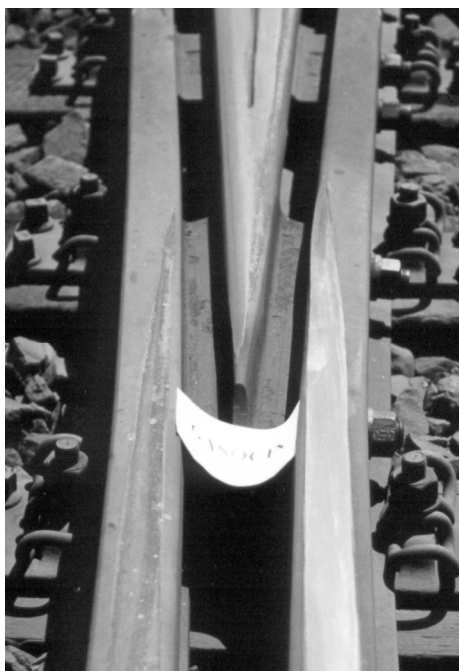
1. Wieloletnie obserwacje eksploatacyjne i tysiące wyników pomiarów rozjazdów wykonywanych podczas badań technicznych wykazały, że wymiary f w przedziale 1389÷1391 mm nie powodują żadnych dających się zauważyć skutków ujemnych. W toku badań stwierdzono w wielu rozjazdach, że wymiar f był mniejszy niż 1392 mm. Potwierdzeniem przekroczeń tego wymiaru we wszystkich grupach pomierzonych rozjazdów są dane tablicy 2, z której wynika, że nawet w rozjazdach eksploatowanych przy prędkości 160 km/h najmniejsze wartości f wynoszą 1386 mm na podrozjazdnicach betonowych i 1385,1 mm na podrozjazdnicach drewnianych. O masowych przekroczeniach obecnej dolnej granicy f świadczą też wyniki pomiarów zawartych w opracowaniu [18]. I tak np. w grupie 36 rozjazdów — o promieniu $R=300$ m, na podrozjazdnicach drewnianych — eksploatowanych przy prędkości 120 km/h, połowa krzyżownic ma wymiary $f < 1391$ mm, a w czterech przypadkach wymiar ten wynosił 1387 mm¹.

2. Dokładne obserwacje krzyżownic badanych rozjazdów wykazały, że w krzyżownicach, w których wymiar f jest mniejszy o 3÷4 mm w stosunku do obowiązującego obecnie wymiaru minimalnego, nie dochodzi do styku koła z końcem dzioba krzyżownicy. Przykładem mogą być krzyżownice pokazane na rysunkach 16 i 17. Zaobserwowana prawidłowość wynika z tego, że na wysokości odpowiadającej obniżeniu dzioba krzyżownicy odległość między obrzeżami kół, nawet w razie zużycia tych obrzeży, jest o kilka milimetrów większa niż na przepisowej odległości pomiaru rozstawu szyn, czyli na wysokości 10 mm poniżej powierzchni tocznej. Ślady uderzeń kół o boczną powierzchnię końca dzioba pojawiają się dopiero przy bardzo małych i rzadko spotykanych wymiarach f , tj. przy wymiarach od około 1382 do 1384 mm. Przypadek taki ilustruje rysunek 18.



Rys. 16. Krzyżownica z wymiarem $f = 1388,1$ mm; prawdopodobna wartość zaczepienia koła wynosi 3,9 mm, zupełny brak śladów współpracy końca dzioba z kołem na długości ok. 45 mm, przeważający ruch po torze zasadniczym, prędkość maksymalna 120 km/h

¹ Pominięto tu dane dotyczące torów zwrotnych, w których stwierdzono nawet 1385 mm.



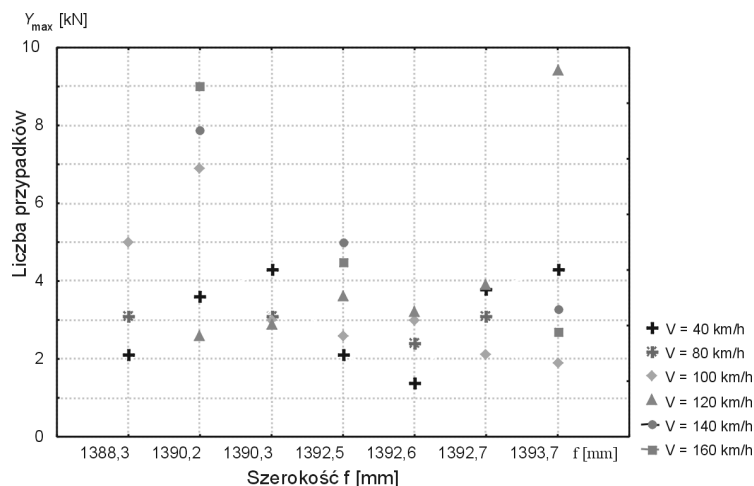
Rys. 17. Krzyżownica z wymiarem $f = 1388,4$ mm; prawdopodobna wartość zaczepienia koła wynosi 3,6 mm, zupełny brak śladów współpracy końca dzioba z kołem na długości ok. 35 mm, przeważający ruch po torze zasadniczym, prędkość maksymalna 120 km/h



Rys. 18. Krzyżownica z wymiarem $f = 1381,7$ mm ($e = 1435 - 2$; $h = 51,3$ mm, prawdopodobna wartość zaczepienia koła wynosi 10,3 mm); lewa powierzchnia boczna nosi ślady uderzeń kół od samego początku dzioba, dziób nie jest jednak zniekształcony; dość równomierny ruch po obu torach

3. Z pracy [12] wynika, że nie ma wyraźnych zależności — w sensie statystycznym — między wymiarami geometrycznymi a oddziaływaniami dynamicznymi na rozjazdach. Stąd wniosek, że należy poszukiwać zależności przyczynowo-skutkowych między określonymi wymiarami konkretnego rozjazdu a pomierzonymi na nim siłami. Wniosek ten uwzględniono w poszukiwaniu zależności między siłami poprzecznymi Y a wymiarami f , zakładając, że małe wymiary odległości dzioba krzyżownicy od kierownicy mogą powodować wzrost sił Y . Wynik poszukiwania tych zależności przedstawia rysunek 19. Na osi odciętych znajdują się wymiary f , na osi zaś rzędnych — bezwzględne wartości sił Y , pomierzonych przy określonych wymiarach f i różnych prędkościach jazdy pociągów. Z rysunku tego wynika, że nie występuje zależność sił Y od wymiarów f w przedstawionym przedziale. Nie można też stwierdzić na tej podstawie zależności między siłami i prędkością. Spostrzeżenia te prowadzą do hipotezy, że oddziaływania dynamiczne na rozjazdach zależą w dużym stopniu od ich sztywności i tłumienia, które to cechy pozostają dotychczas poza zakresem badań diagnostycznych.

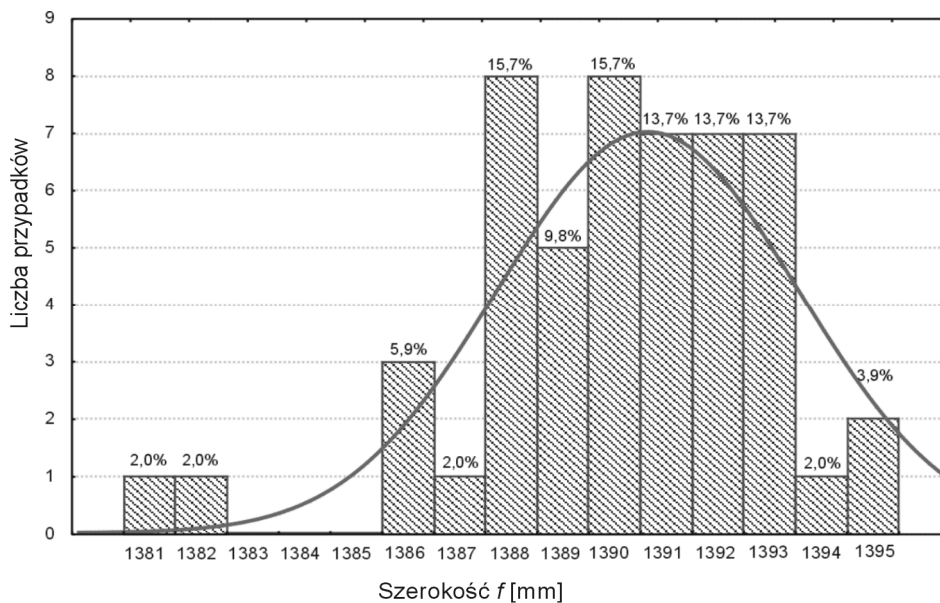
Na podstawie uzyskanych wyników badań sił poprzecznych i pionowych na rozjazdach [12] można by również wysnuć wniosek, że siły te są stosunkowo niewielkie. Należy jednak pamiętać, że są to siły wywierane przez wagon dynamiczny (nacisk osi 120 kN). Inny obraz oddziaływań przyniosłyby na rozjazdach badania z oprzyrządowanymi lokomotywami lub załadowanymi wagonami towarowymi, gorzej utrzymanymi.



Rys. 19. Maksymalne wartości sił poziomych Y pomierzonych przy różnych prędkościach V na rozjazdach, w zależności od wymiaru f

Przedstawione wyniki pomiarów, obserwacji i badań dowodzą, że dopuszczenie w wymiarze f odchyłek ujemnych -3 i -4 mm nie pociągnie za sobą ryzyka wykolejeń ani też przyspieszonej degradacji rozjazdów. Pozwoli natomiast zdecydowanie zmniejszyć na rozjazdach zakres robót wywoływanych koniecznością regulacji związanych ze sobą wymiarów szerokości toru w krzyżownicy (e) i szerokości żłobka w kierownicy (h). I tak np. w grupie rozjazdów przeznaczonych do prędkości 80 km/h, połowa z nich miała wymiar f mniejszy od 1392 mm.

W rozjazdach przeznaczonych do 100 km/h wymiar f mniejszy od 1392 mm wystąpił na 27% rozjazdów, a w grupie rozjazdów o prędkości 120 km/h wymiar taki zanotowano na 67% rozjazdów, przy czym minimalny wymiar wynosił tu 1381 mm (rys. 20).



Rys. 20. Szerokość f w rozjazdach przeznaczonych do prędkości $V = 120$ km/h

Można więc wnioskować, że zakres robót dotyczących regulacji związanych ze sobą wymiarów szerokości toru w krzyżownicy (e) i szerokości żłobka w kierownicy (h) zmniejszy się w przybliżeniu o połowę. Biorąc pod uwagę mały stopień zmechanizowania tych robót i ich różną skuteczność (zwłaszcza przy poprawianiu szerokości toru w krzyżownicy o kilka milimetrów), proponowana zmiana powinna oznaczać realne ułatwienie utrzymania rozjazdów.

Przytoczone histogramy uzasadniają celowość rozszerzenia dolnej granicy wymiaru f przy prędkościach do 100 km/h włącznie. Natomiast zamiast dotychczasowej górnej granicy tego wymiaru, tj. +2 mm, należałoby wprowadzić warunek:

$$e - h - i \leq 1357 \text{ mm}$$

Wprowadzenie tego warunku dla wszystkich prędkości pociągów wykluczyłoby przypadki zakleszczenia zestawu między szyną skrzydłową i kierownicą.

4.5. Odchyłki dopuszczalne żłobka z

Szerokość żłobka z — a ściślej jej dolna granica — ma istotny wpływ na oddziaływanie pojazdu szynowego w strefie łukowej iglicy odsuniętej. Jak wykazały eksperymenty symulacyjne, przy szerokości żłobka wynoszącej 58 mm zarówno liczba uderzeń, jak i wartość proporcjonalna do utraty energii kinetycznej oraz wielkość przemieszczenia są wyraźnie mniejsze niż te same charakterystyki przy mniejszych szerokościach żłobka. Stąd też proponuje się pozostawienie dolnej granicy wymiaru żłobka z , wynoszącej 58 mm. Jak wykazują symulacje przejazdu zestawu kołowego przez strefę zwrotnicy, wykonane z zastosowaniem programu KINWAG [8, 9], prawdopodobieństwo uderzenia koła o iglicę odsuniętą przy $z = 58$ mm i pierwszym wariancie wózka wynosi 0,3%.

Nie znajduje natomiast uzasadnienia ustalanie górnej granicy tego wymiaru. Przekroczenie obowiązującej obecnie odchyłki górnej +4 mm nie ma żadnego wpływu na oddziaływanie pojazdu szynowego w strefie zwrotnicy, a pociągałoby za sobą konieczność regulacji żłobków na około 60% rozjazdów. Górna granica szerokości żłobka (tj. 64 mm) jest bowiem nagminnie przekraczana. I tak np. na 184 badanych rozjazdów, w 104 rozjazdach stwierdzono szerokość żłobka z większą od 64 mm; maksymalne, zanotowane wartości w poszczególnych grupach prędkości wynoszą od 88,9 mm — w rozjazdach eksploatowanych z prędkością 160 km/h do 101,7 mm — w rozjazdach o prędkości 100 km/h.

Szerokość mniejszą od 58 mm zanotowano w 38 rozjazdach.

4.6. Odchyłki dopuszczalne w torze zwrotnym

Wartości projektowanych odchyłek dopuszczalnych w torach zwrotnych rozjazdów przedstawiono w tablicy 8.

Odchyłki dopuszczalne szerokości w osadzie iglicy c_1 oraz w strefie szyn łączących toru zwrotnego rozjazdu d_1 i d_3 zróżnicowano w zależności od jego promienia. Proponowane wartości przyjęto na podstawie wykonanych eksperymentów symulacyjnych, opisanych w rozdziale 3.3. Odchyłki szerokości toru zwrotnego w krzyżownicy e_1 są takie same, jak odchyłki e w torze zasadniczym (por. tabl. 7).

Odchyłki dopuszczalne w torach zwrotnych rozjazdów

Promień rozjazdu	Odchyłki wymiaru [mm]		
	c_1	$d_1 (d_3)$	e_1
R-190 m	-3 +14	-3 +14	Równe wartościom odchyłek e przedstawionym w tablicy 7
R-300 m	-3 +10	-3 +10	
R-500 m	-3 +9	-3 +9	
R-1200 m	-3 +5	-3 +5	

Na podstawie wyników badań całej populacji mierzonych rozjazdów można stwierdzić, że:

- 1) wszystkie dodatnie odchyłki wymiarów c_1 i d_1 zanotowane w rozjazdach R-190 m są mniejsze od projektowanej odchyłki górnej, a projektowana odchyłka dolna jest przekroczona maksymalnie o 1,9 mm;
- 2) maksymalne przekroczenia projektowanych odchyłek wymiarów c_1 , d_1 i d_3 w grupie rozjazdów R-300 m wynoszą +3,3 oraz -2,2 mm;
- 3) projektowane pole tolerancji dla rozjazdów R-500 m obejmuje wszystkie pomierzone odchylenia wymiarów c_1 , d_1 i d_3 ;
- 4) wyniki pomiarów rozjazdów R-1200 m w zakresie wartości ujemnych nie przekraczają odchyłki dolnej, a projektowana dla tej grupy rozjazdów odchyłka górna jest przekroczona na dwóch rozjazdach w wymiarze c_1 (o 0,1 i 1,5 mm) i na jednym rozjeździe w wymiarze d_3 — o 3,8 mm.

5. OCENA PROJEKTOWANYCH ODCHYLEK

Ocenę projektowanych odchyłek poprzedzono przeprowadzeniem symulacji przejazdu trzech wariantów wózka po rozjazdach o promieniach R-1200 m, R-500 m, R-300 m i R-190 m, przy różnych prędkościach jazdy oraz przy odchyłkach projektowanych i dotychczasowych. Wyniki tych eksperymentów, przedstawione szczegółowo w opracowaniu [7], umożliwiły wielokryterialną ocenę projektowanych odchyłek. Założeniem funkcji oceny było uwzględnienie kryteriów charakteryzujących zjawiska niepożądane, jakie mogą wystąpić przy danym wariancie odchyłek, pole tolerancji, jakie one tworzą oraz względną, łączną wartość tych cech w stosunku do cech odchyłek dotychczasowych. Przyjęty model oceny każdego wariantu odchyłek w przekroju rozjazdu i oraz prędkości V ma postać:

$$F_o(i, V) = \frac{\sum_{k=1}^n W_{kp} \cdot \sum_{k=1}^n f_{kp} \cdot \sum_{j=1}^m T_{jd}}{\sum_{k=1}^n W_{kd} \cdot \sum_{k=1}^n f_{kd} \cdot \sum_{j=1}^m T_{jp}} \quad (4)$$

gdzie:

- W — wartość proporcjonalna do utraty energii kinetycznej przy uderzeniu,
 f — frakcja charakteryzująca występowanie przypadków niekorzystnych,

- T — pole tolerancji,
 k — oznaczenie zjawiska niepożądanego,
 n — liczba zjawisk niepożądanych występujących w przekroju rozjazdu i ,
 j — oznaczenie wymiaru z odchyłkami decydującymi o zjawiskach niepożądanych w danym przekroju rozjazdu,
 m — liczba tych wymiarów,
 p — indeks oznaczający charakteryzujące wielkości projektowane,
 d — indeks oznaczający charakteryzujące wielkości dotychczasowe.

Zastosowanie tego modelu przedstawiają obliczenia dotyczące krzyżownicy (przekrój $i = 3$). Występuje tu pięć przypadków niekorzystnych:

- 1) uderzenie o kierownicę,
- 2) uderzenie o szynę skrzydłową między gardzielą i dziobem,
- 3) uderzenie koła o szynę skrzydłową przed gardzielą,
- 4) zaczepienie koła o dziób krzyżownicy,
- 5) zakleszczenie zestawu między szyną skrzydłową i kierownicą.

W ocenie odchyłek w obrębie krzyżownicy pominięto przypadek uderzenia koła w szynę toczną przy kierownicy, przy którym wartość W_{\max} jest zawsze dużo mniejsza od innych uderzeń oraz przypadek zakleszczenia zestawu, ponieważ przy wyznaczaniu liczby tych przypadków nie uwzględniano warunku, który powinien je eliminować. Tak więc liczba uwzględnianych przypadków niekorzystnych wynosi $k = 4$.

Z przeprowadzonych symulacji wynika, że o zjawiskach tych decydują wymiary rozjazdu e, h, i, g oraz d . Wpływ wymiaru d jest mniejszy niż trzech pozostałych i dotyczy tylko przypadku 1), toteż można go pominąć. W ten sposób liczba wymiarów wynosi $m = 4$ (e, h, i, g). W przypadkach 3), 4) i 5), charakteryzowanych wymiarami liniowymi, zamiast wielkości W_{\max} w równaniu (4) należy wstawić wartość p_{\max} .

Funkcja oceny odchyłek dopuszczalnych przy prędkości 160 km/h dla rozjazdu o promieniu 1200 m i pierwszego wariantu wózka ma wartość [7]:

$$F_o(i,160) = \frac{(41,5 + 12,5 + 2,6) \cdot (286 + 809 + 39) \cdot (6 + 4 + 4 + 6)}{(41,6 + 11,1 + 2,8) \cdot (266 + 782 + 40) \cdot (7 + 5 + 5 + 7)} = 0,89$$

Wartości funkcji oceny odchyłek dopuszczalnych przy prędkości 160 km/h dla rozjazdów R-500 m i R-300 m wynosiły odpowiednio 0,95 i 0,77, co oznacza, że odchyłki projektowane dla wymiarów krzyżownicy przy prędkości 160 km/h są rozwiązaniem lepszym od odchyłek dotychczasowych.

Dla zbioru odchyłek odpowiadających prędkości 140 km/h, wartość funkcji oceny w przypadku rozjazdu R-1200 m wynosiła 0,90, a rozjazdów o promieniu 500 i 300 m — 0,95.

Pozostałe wyznaczone wartości funkcji oceny F_o przedstawiono w tablicy 9.

Tablica 9

Wartości funkcji oceny

Funkcja oceny	Wartość funkcji dla rozjazdu			
	R-1200 m	R-500 m	R-300 m	R-190 m
$F_o(i,120)$	1,10	0,86	0,78	0,79
$F_o(i,100)$	—	—	0,67	0,81
$F_o(i,80)$	—	—	1,15	1,04
$F_o(i,40)$	—	—	1,27	1,18

O wartościach funkcji oceny większej od jedności decyduje przede wszystkim duża różnica liczby uderzeń o dziób krzyżownicy przy odchyłkach projektowanych i dotychczasowych. W eksploatacji — dzięki wprowadzeniu górnej granicy wymiaru f — zarówno liczba tych przypadków, jak i wartości przemieszczeń powinny być znacznie mniejsze, a zatem mniejsze byłyby również wartości F_o . Na uwagę zasługuje fakt, że dla zbioru odchyłek przy prędkości 120 km/h w rozjazdach R-300 m i R-190 m wartości funkcji oceny są mniejsze od jedności, mimo iż w tych grupach rozjazdów liczba uderzeń o dziób krzyżownicy jest blisko dwukrotnie większa przy odchyłkach projektowanych niż przy dotychczasowych.

6. WNIOSKI

Projektowane odchyłki dopuszczalne na rozjazdach charakteryzują się następującymi cechami:

1. Są dostosowane do maksymalnych prędkości pociągów osiąganych w torach zasadniczych. Dostosowanie to polega na spełnieniu warunku, że przy utrzymaniu tych odchyłek występujące wartości proporcjonalne do dyssypacji energii kinetycznej przy uderzeniu kół o szyny oraz inne miary nie różnią się istotnie od uzyskiwanych przy odchyłkach dotychczasowych, a niejednokrotnie są mniejsze od występujących w eksploatacji.

2. Powodują znaczne zmniejszenie częstości i zakresu napraw rozjazdów. Osiągnięto to dzięki zwiększeniu pól tolerancji i zerwaniu z pewnymi zasadami, jak np. nieprzekraczanie $f \leq 1392$ mm, jaskrawo sprzecznymi z realiami eksploatacyjnymi. Pewne zmniejszenie liczby i zakresu napraw wystąpi już na rozjazdach przeznaczonych do prędkości 160 km/h i będzie coraz większe przy prędkościach malejących.

3. Dzięki dostosowaniu odchyłek do prędkości pociągów zmieni się stosunek pracowników do konieczności ich przestrzegania. Stosunek ten do dotychczasowych odchyłek był w większości krytyczny. Trudno bowiem było uzasadnić, dlaczego żłobek w kierownicy nie może być o 2 mm węższy od nominalnego, skoro w setkach, a nawet tysiącach rozjazdów mierzono żłobki węższe, nie widząc żadnych ujemnych skutków tego przekroczenia. Po wprowadzeniu nowych odchyłek ta postawa musi ulec zmianie, ponieważ ich przekroczenie będzie szybko zmieniać margines bezpieczeństwa.

Wykonane badania przyniosły, oprócz projektu nowych odchyłek dopuszczalnych, również inne korzyści użytkowe. Stwierdzenie występowania największych wartości proporcjonalnych do dyssypacji energii kinetycznej przy wjeździe na kierownicę powinno stać się sygnałem dla konstruktorów rozjazdów, że układ wymiarów tej części rozjazdu powinien być, przy większych prędkościach jazdy pociągów, zmieniony. Wyniki jazd symulowanych z trzema wariantami wózków potwierdziły jeszcze raz bardzo duży wpływ stanu utrzymania taboru na oddziaływania dynamiczne, występujące na rozjazdach.

Poznaczącym wynikiem pracy, który będzie miał również znaczenie w przyszłych badaniach, jest nowa metoda projektowania odchyłek dopuszczalnych na rozjazdach. Oryginalność tej metody polega na:

- 1) nowych modelach kinematycznych przejazdu wózka wagonu przez charakterystyczne strefy (przekroje) rozjazdu, m.in. wprowadzenie przesuwu i obrotu osi oraz możliwość stosowania dwóch generatorów liczb pseudolosowych (według rozkładu normalnego i równomiernego);

- 2) opracowaniu nowej, wielokryterialnej oceny rozpatrywanych wariantów projektowanych odchyłek, uwzględniającej wartość proporcjonalną do dyssypacji energii kinetycznej przy uderzeniu, frakcji występowania zjawisk niepożądanych oraz wielkości pola tolerancji jako kryterium częstości i zakresu napraw;
- 3) określeniu granicznych wartości proporcjonalnych do dyssypacji energii kinetycznej, zróżnicowanych w poszczególnych przekrojach rozjazdów, na podstawie przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych, uwzględniających pomiary kilkuset rozjazdów i powiązanych z wynikami badań oddziaływań dynamicznych, co oznacza zerwanie z dotychczasową zasadą stosowania jednej wartości granicznej dla wszystkich stref rozjazdu;
- 4) odejściu od dotychczasowej zasady, wykluczającej możliwość teoretycznego zaczepienia koła o dziób krzyżownicy.

Nagromadzony materiał eksperymentalny — w postaci pomiarów szerokości torów i żłobków, różnic wysokości toków szynowych oraz nierówności pionowych i poziomych, pomiarów sił i przyspieszeń — może być wykorzystany w innych badaniach nawierzchni kolejowej. I tak np. na jego podstawie będzie można weryfikować projekty zmiennych cykli diagnozowania rozjazdów lub testować pewne fragmenty baz rozjazdowych, związanych z systemem GIS-RAIL.

BIBLIOGRAFIA

1. *Bałuch H.*: Badania rozjazdów zwyczajnych i krzyżowych przy różnych prędkościach pociągów. *Prace COBiRTK*, 1967, nr 26.
2. *Bałuch H.*: Optymalizacja układu geometrycznego rozjazdów przeznaczonych do dużego natężenia przewozów i dużych szybkości pociągów. *Problemy Kolejnictwa*, 1968, nr 44.
3. *Bałuch H.*: The use of computer simulation for the solution of track design and maintenance problems. *Rail International*, 1976, No. 10, p. 546—554.
4. *Bałuch H.*: Wymiary w krzyżownicach zwyczajnych typu 8a i 6d. *Przegląd Kolejowy Drogowy*, 1968, nr 2, s. 29—32.
5. *Bałuch H., Bałuch M.*: Metoda symulacji kinematyki pojazdu szynowego w strefach rozjazdów. *Biuletyn WAT*, 2004, nr 8.
6. *Bałuch H., Bałuch M.*: Odchyłki szerokości w torach zwrotnych rozjazdów kolejowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej — seria Transport*, 2004, z. 54.
7. *Bałuch M., Bałuch H.*: Opracowanie wytycznych stosowania poszczególnych typów rozjazdów na torach PKP PLK S.A. oraz odchyłek dopuszczalnych w rozjazdach i skrzyżowaniach torów w funkcji prędkości. Zadanie 3071/11 etap III — wydanie rozszerzone. Warszawa, grudzień 2005.
8. *Bałuch M.*: Kinematics simulation as method of determining deviations of switch blade position in turnouts. *Archives of Civil Engineering*, 1998, No. 3.
9. *Bałuch M.*: Model kinematyczny przejazdu wózka wagonu przez strefę zwrotnicy. Zadanie 6801/23, Warszawa 1997.
10. *Bałuch M.*: Model kinematyczny współdziałania wózka wagonu z rozjazdem jako narzędzie określania tolerancji szerokości toru. *Zeszyty Naukowe Politechniki Radomskiej — Transport*, 2002, z. 1 (15).
11. *Bałuch M.*: Oddziaływania pojazdów szynowych w poszczególnych strefach rozjazdów. *Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP w Krakowie*, 2005, z. 124.

12. *Bałuch M.*: Opracowanie wytycznych stosowania poszczególnych typów rozjazdów na torach PKP PLK S.A. oraz odchyłek dopuszczalnych w rozjazdach i skrzyżowaniach torów w funkcji prędkości. Zadanie 3071/11. Wstępna analiza parametrów geometrycznych i dynamicznych. Sprawozdanie przejściowe. Warszawa, grudzień 2004.
13. *Byzia T.*: Zarządzanie jakością. *Informatyka*, 1998, nr 9.
14. *Cejmer J.*: Badania kształtu zużycia kół zestawów kołowych taboru eksploatowanego na sieci PKP PLK S.A. Zadanie nr 4064/11 — praca w toku.
15. *Gąsowski W.*: Wagony kolejowe. Konstrukcja i badania. WKŁ, Warszawa 1988.
16. *Jancz J., Gawel K.*: Badanie i analiza szerokości toru w rozjazdach. Praca doktorska wykonana pod kierunkiem *H. Bałucha*, obroniona na PW, Warszawa 1978, maszynopis, s. 171.
17. *Korab D.*: Komputerowy system wspomagania projektowania krzyżownic przystosowanych do dużych prędkości. *Prace CNTK*, 1993, nr 108.
18. Opracowanie wytycznych stosowania poszczególnych typów rozjazdów na torach PKP PLK S.A. oraz odchyłek dopuszczalnych w rozjazdach i skrzyżowaniach torów w funkcji prędkości. Zadanie 3071/11. Etap 2. Warszawa, listopad 2004.
19. Sprawozdanie z pomiarów badań dynamicznych rozjazdów. Zadanie 21/3071/11. Warszawa, listopad 2004.
20. *Zajac K.*: Zarys metod statystycznych. Warszawa, PWE, 1974.