

POLITECHNIKA POZNAŃSKA

**WYDZIAŁ AUTOMATYKI, ROBOTYKI
I ELEKTROTECHNIKI**

**INSTYTUT ELEKTROTECHNIKI
I ELEKTRONIKI PRZEMYSŁOWEJ**

**ZAKŁAD MECHATRONIKI
I MASZYN ELEKTRYCZNYCH**



mgr inż. Adam Garczarek

Rozprawa doktorska

**Opracowanie i wdrożenie metodyki badań dynamicznej
współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną**

Promotor: *dr hab. inż. Dorota Stachowiak, prof. PP*

Poznań 2026

Streszczenie

Rozprawa dotyczy opracowania, eksperymentalnej weryfikacji i wdrożenia konfigurowalnej metodyki pomiarowo-analitycznej badań dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną. Jej celem było zapewnienie wiarygodnego wyznaczania chwilowej siły stykowej $F_c(t)$ z uwzględnieniem właściwości dynamicznych kompletnej konfiguracji pomiarowej, oddziaływań bezwładnościowych i aerodynamicznych oraz niepewności pomiaru, a następnie wykorzystanie wyników do oceny zdolności eksploatacyjnej systemu odbioru prądu.

W pracy opracowano modułową architekturę układu pomiarowego, cztery tory pomiaru siły i cztery przyspieszenia, zaprojektowano elementy integrujące czujniki z odbierakiem oraz przeprowadzono ich weryfikację konstrukcyjną. Opracowana w ramach rozprawy kompleksowa metodyka obejmuje wzorcowanie torów pomiarowych, kontrolę funkcjonalną, laboratoryjną ocenę właściwości dynamicznych kompletnego oprzyrządowanego odbieraka, wyznaczanie korekcji aerodynamicznej, realizację pomiarów podczas jazdy, przetwarzanie danych oraz ocenę niepewności.

Eksperymentalną weryfikację przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych i terenowych, dla systemów 3 kV DC i 25 kV AC. Wyznaczono wartość bezwzględną funkcji przenoszenia i wskaźnik J , korekcję aerodynamiczną oraz parametry charakteryzujące dynamiczną współpracę odbieraka z siecią. Opracowano również budżety niepewności kluczowych wielkości. Uzyskane wyniki potwierdziły przydatność opracowanej metodyki do badań pojazdów szynowych oraz jej skuteczność w rozpatrywanych warunkach eksploatacyjnych.

Metodykę rozszerzono o moduły obejmujące analizę obrazu, badania parametrów elektrycznych zestawów kołowych, emisji zaburzeń promieniowanych, prądów zakłócających oraz pola magnetycznego. Wykazano, że struktura opracowanej metodyki może być przenoszona na inne konfiguracje pomiarowe, natomiast wielkości zależne od konfiguracji wymagają każdorazowej weryfikacji. Tezę rozprawy zweryfikowano pozytywnie, a wdrożenie potwierdzono zastosowaniem metodyki w rzeczywistych kampaniach badawczych oraz jej formalizacją w dokumentacji systemu zarządzania laboratorium Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznańskiego Instytutu Technologicznego, posiadającego akredytację PCA nr AB 053.

Słowa kluczowe: odbierak prądu, sieć trakcyjna, siła stykowa, badania dynamiczne, układ pomiarowy, korekcja aerodynamiczna, niepewność pomiaru.

Abstract

The dissertation concerns the development, experimental verification, and implementation of a configurable measurement and analytical methodology for investigating the dynamic interaction between a current collector and the overhead contact line. Its objective was to ensure reliable determination of the instantaneous contact force $F_c(t)$, taking into account the dynamic properties of the complete measurement configuration, inertial and aerodynamic effects, and measurement uncertainty, and subsequently to use the results to assess the operational capability of the current collection system.

The work involved the development of a modular architecture of the measurement system, comprising four force measurement channels and four acceleration measurement channels, the design of components integrating the sensors with the current collector, and the structural verification of these components. The comprehensive methodology developed within the dissertation includes calibration of the measurement channels, functional checks, laboratory assessment of the dynamic properties of the complete instrumented current collector, determination of aerodynamic correction, measurements performed during vehicle operation, data processing, and uncertainty evaluation.

Experimental verification was carried out under laboratory and field conditions for 3 kV DC and 25 kV AC systems. The absolute value of the transfer function and the J index, aerodynamic correction, and parameters characterising the dynamic interaction between the current collector and the overhead contact line were determined. Uncertainty budgets were also developed for the key measurands. The obtained results confirmed the applicability of the developed methodology to rail vehicle testing and its effectiveness under the operational conditions considered.

The methodology was extended to include modules covering image analysis, testing of the electrical parameters of wheelsets, radiated disturbance emissions, disturbing currents, and magnetic fields. It was demonstrated that the structure of the developed methodology can be transferred to other measurement configurations, whereas configuration-dependent quantities require verification for each specific application. The dissertation hypothesis was positively verified, and the implementation of the methodology was confirmed through its application in actual test campaigns and its formalisation in the management system documentation of the Łukasiewicz Research

Network – Poznań Institute of Technology laboratory, accredited by the Polish Centre for Accreditation (PCA), accreditation No. AB 053.

Keywords: current collector, overhead contact line, contact force, dynamic testing, measurement system, aerodynamic correction, measurement uncertainty.

Spis treści

1	Wprowadzenie. Cel, teza i zakres pracy	13
1.1	Geneza i problem badawczy	13
1.2	Cel, teza i sposób jej weryfikacji	15
1.3	Zakres pracy, granice uogólnienia i oryginalny wkład autora	18
2	Podstawy dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną – stan wiedzy i uwarunkowania badań	21
2.1	Dynamiczna współpraca odbieraka prądu z siecią trakcyjną.....	21
2.2	Właściwości mechaniczne i elektryczne sieci trakcyjnej istotne dla współpracy dynamicznej	22
2.3	Właściwości konstrukcyjne, dynamiczne i elektryczne odbieraka prądu	25
2.4	Nakładki ślizgowe i warunki styku z przewodem jezdny.....	30
2.5	Stan wiedzy w zakresie badania i oceny dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną	33
3	Koncepcja metodyki pomiarowo-analitycznej	40
3.1	Założenia i struktura procesu badawczego	40
3.2	Wielkości mierzone, wielkości wyznaczane i kryteria oceny.....	43
3.3	Rola badań statycznych, dynamicznych i uzupełniających	47
3.4	Schemat koncepcyjny opracowanej metodyki	50
4	Układ pomiarowy i przygotowanie obiektu badań	52
4.1	Wymagania i architektura układu pomiarowego	52
4.2	Tory pomiarowe oraz układy rejestracji danych	59
4.3	Montaż aparatury i przygotowanie obiektu do badań	65
4.4	Aparatura pomiarowa.....	70
5	Model wyznaczania siły stykowej	73
5.1	Równanie pomiaru siły stykowej	73
5.2	Laboratoryjne badanie właściwości dynamicznych oprzyrządowanego odbieraka – funkcja przenoszenia i wskaźnik J	74

5.3	Korekcja siły aerodynamicznej	77
6	Opracowana metodyka badań	81
6.1	Przygotowanie obiektu i konfiguracji pomiarowej	81
6.2	Kontrola funkcjonalna i laboratoryjne badanie oprzyrządowanego odbieraka ..	82
6.3	Wyznaczenie wielkości niezbędnych do uwzględnienia oddziaływań aerodynamicznych	83
6.4	Realizacja pomiarów dynamicznych siły stykowej	85
6.5	Rejestracja warunków badania i zabezpieczenie danych.....	86
6.6	Opracowanie, weryfikacja i ocena wyników	86
6.7	Badania uzupełniające w rozszerzonej ocenie systemu odbioru prądu	88
6.8	Zakończenie badań.....	89
7	Niepewności pomiarów	91
7.1	Założenia wspólne analizy niepewności	96
7.2	Niepewność wyznaczania wartości bezwzględnej funkcji przenoszenia i wskaźnika J	98
7.3	Ocena aerodynamicznego wpływu układu pomiarowego	109
7.4	Niepewność wyznaczania siły stykowej $F_c(t)$	113
8	Analiza konstrukcyjna elementów układu pomiarowego	122
8.1	Cel i zakres projektowej weryfikacji konstrukcyjnej.....	122
8.2	Model MES, materiały, obciążenia i warunki brzegowe	123
8.3	Wyniki analizy naprężeń i przemieszczeń oraz ocena przyjętych kryteriów ...	128
8.4	Znaczenie wyników MES dla projektu układu pomiarowego	130
9	Wyniki badań statycznych	133
9.1	Cel i zakres kwalifikacji statycznej.....	133
9.2	Weryfikacja geometrii i zakresu roboczego.....	134
9.2.1	Odbierak Panto300	134
9.2.2	Odbierak 200EC	135
9.3	Charakterystyka statyczna siły stykowej	137

9.3.1	Sposób wyznaczania wartości charakterystycznych.....	137
9.3.2	Wyniki dla odbieraka Panto300.....	137
9.3.3	Wyniki dla odbieraka 200EC.....	138
9.4	Ocena kwalifikacji i znaczenie wyników dla dalszych badań	140
10	Eksperymentalna weryfikacja opracowanej metodyki badań dynamicznej współpracy odbieraka z siecią trakcyjną.....	142
10.1	Zakres eksperymetalnej weryfikacji	142
10.2	Weryfikacja właściwości dynamicznych kompletnej konfiguracji pomiarowej	144
10.3	Eksperymentalne wyznaczenie korekcji aerodynamicznej	147
10.4	Wyniki wyznaczania siły stykowej w warunkach jazdy.....	151
10.4.1	System 3 kV DC	152
10.4.2	System 25 kV AC	156
10.5	Analiza porównawcza i zakres stosowalności metodyki	160
10.6	Ocena metrologiczna wyników i odniesienie do kryteriów.....	161
10.7	Synteza eksperymetalnej weryfikacji metodyki	163
11	Eksperymentalna realizacja modułów badań uzupełniających w opracowanej metodyce	164
11.1	Modułowa koncepcja i zakres badań uzupełniających	164
11.2	Wizyjna analiza współpracy odbieraka z siecią trakcyjną.....	165
11.3	Badania rezystancji, impedancji i reaktancji zestawów kołowych	167
11.4	Badania emisji zaburzeń promieniowanych	169
11.5	Badania prądów zakłócających generowanych do sieci trakcyjnej	171
11.6	Pomiary pola magnetycznego w pojeździe i jego otoczeniu	174
11.7	Synteza modułowej realizacji badań uzupełniających.....	176
12	Dyskusja wyników, weryfikacja tezy i wdrożenie metodyki	178
12.1	Synteza wyników eksperymetalnej weryfikacji metodyki.....	178
12.2	Dyskusja znaczenia metrologicznego opracowanej metodyki.....	182

12.3 Zakres stosowalności i granice uogólnienia.....	185
12.4 Weryfikacja tezy rozprawy	187
12.5 Wdrożenie metodyki do praktyki badawczej.....	190
12.6 Ograniczenia i kierunki dalszego rozwoju.....	192
13 Podsumowanie i wnioski końcowe.....	195
13.1 Podsumowanie pracy	195
13.2 Wnioski końcowe.....	198
LITERATURA	201

Oznaczenie	Nazwa stosowana w rozprawie	Jednostka
$a_{sensor,j}(t)$	przyspieszenie zmierzone w j-tym torze pomiaru przyspieszenia	m/s ²
$d_{F,j}$	rozdzielczość wskazania j-tego toru pomiaru siły	N
$d_{F,q}$	rozdzielczość wskazania q-tego toru pomiaru siły unoszącej	N
$d_{F,applied}$	rozdzielczość wskazania siły zadanej	N
d_f	rozdzielczość wskazania częstotliwości	Hz
$d_{a,sensor,j}$	rozdzielczość wskazania j-tego toru pomiaru przyspieszenia	m/s ²
$d_{m,above}$	rozdzielczość pomiaru masy	kg
f_l	dolna granica rozpatrywanego zakresu częstotliwości	Hz
f_i	częstotliwość wymuszenia w i-tym punkcie badania laboratoryjnego	Hz
f_n	górną granicę rozpatrywanego zakresu częstotliwości	Hz
Δf_i	różnica kolejnych częstotliwości, $f_{(i+1)} - f_i$	Hz
F_a	składnik bezwładnościowy siły stykowej	N
$F_{applied}(t)$	siła wywierana na ślizgacz podczas badania laboratoryjnego	N
$F_{applied,i}$	amplituda składowej $F_{applied}(t)$ o częstotliwości f_i	N
$F_{aero}(v)$	siła aerodynamiczna odbieraka przy prędkości v	N
$\Delta F_{aero}(v)$	aerodynamiczny wpływ zainstalowanego układu pomiarowego	N
$F_c(t)$	siła stykowa odbieraka prądu z siecią jezdnią	N
$F_{cord,q}(t)$	siła zmierzona w q-tej lince uwiązującej	N
$\bar{F}_{cord,q}(v)$	średnia w czasie wartość siły w q-tej lince uwiązującej	N
$F_{corr,aero}(v)$	korekcja siły aerodynamicznej	N
F_m	średnia siła stykowa	N
$F_{measured}(t)$	sumaryczna odpowiedź układu pomiarowego odbieraka w badaniu laboratoryjnym	N
$F_{measured,i}$	amplituda składowej $F_{measured}(t)$ o częstotliwości f_i	N

Oznaczenie	Nazwa stosowana w rozprawie	Jednostka
$F_{measured,j}(t)$	odpowiedź j-tego kanału układu pomiarowego odbieraka w badaniu laboratoryjnym	N
$F_s(v)$	całkowita średnia siła unosząca odbieraka przy prędkości v	N
$F_{sensor,j}(t)$	siła zmierzona w j-tym torze pomiaru siły	N
F_{stat}	statyczna siła stykowa	N
$F_z(v)$	całkowita średnia siła unosząca odbieraka bez układu pomiarowego	N
$F_\Sigma(t)$	suma chwilowych wskazań torów pomiaru siły	N
$\bar{F}_\Sigma(v)$	średnia w czasie z sumy wskazań torów pomiaru siły	N
$H(f_i)$	funkcja przenoszenia układu	—
$ H(f_i) $	wartość bezwzględna funkcji przenoszenia przy częstotliwości f_i	—
I_t	prąd trakcyjny	A
J	wskaźnik J	%
k	współczynnik rozszerzenia	—
k_a	liczba czujników przyspieszenia	—
k_f	liczba czujników siły	—
m_{above}	masa części odbieraka pomiędzy punktami pomiaru siły a punktem styku	kg
N	liczba próbek w analizowanym przedziale uśredniania	—
n	liczba punktów częstotliwości w analizowanym zakresie	—
n_r	liczba powtórzeń pomiaru	—
r	numer powtórzenia pomiaru	—
r_i	względna różnica amplitudy siły zmierzonej i zadanej	—
s	przemieszczenie ślizgacza / elementów odbieraka	mm
q	numer linki uwiązującej	—
s_u	uniesienie przewodu jezdnego	mm

Oznaczenie	Nazwa stosowana w rozprawie	Jednostka
t	czas	s
U_t	napięcie trakcyjne	V
$U(F_c)$	niepewność rozszerzona wyznaczenia siły stykowej	N
v	prędkość pojazdu / prędkość przypisana do warunków badania	km/h
v_f	prędkość propagacji zaburzenia w przewodzie	m/s
σ	odchylenie standardowe siły stykowej	N
$F_m - 3\sigma$	statystyczne minimum siły stykowej	N
$F_m + 3\sigma$	statystyczne maksimum siły stykowej	N
ℓ	numer próbki w analizowanym przedziale	–
D	szerokość analizowanego zakresu częstotliwości	Hz
x_r	wynik r-tego powtórzenia wielkości x	jednostka x
$\bar{x}$	średnia arytmetyczna z serii wyników x_r	jednostka x
h	wysokość ślizgacza/odbieraka przy wyznaczaniu charakterystyki statycznej	mm
F_t	siła tarcia suchego	N

Wykaz ważniejszych skrótów

Skrót	Znaczenie
AC	prąd przemienny (ang. Alternating Current)
BIPM	Międzynarodowe Biuro Miar i Wag (fr. Bureau International des Poids et Mesures)
BPF	filtr pasmowoprzepustowy (ang. Band-Pass Filter)
DC	prąd stały (ang. Direct Current)
EMC	kompatybilność elektromagnetyczna (ang. Electromagnetic Compatibility)
EN	Norma Europejska (ang. European Standard)
EZT	elektryczny zespół trakcyjny
FBG	światłowodowa siatka Bragga (ang. Fiber Bragg Grating)
FFT	szybka transformata Fouriera (ang. Fast Fourier Transform)
GPS	globalny system pozycjonowania (ang. Global Positioning System)
GUM	przewodnik wyrażania niepewności pomiaru (ang. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)
HIL	badania/symulacja ze sprzętem w pętli (ang. Hardware-in-the-Loop)
HMH	Hubera–Misesa–Hencky’ego; hipoteza stosowana do wyznaczania naprężenia zredukowanego
ICNIRP	Międzynarodowa Komisja ds. Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym (ang. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)
IEC	Międzynarodowa Komisja Elektrotechniczna (ang. International Electrotechnical Commission)
ILAC	Międzynarodowa Współpraca w Dziedzinie Akredytacji Laboratoriów (ang. International Laboratory Accreditation Cooperation)
ISO	Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna (ang. International Organization for Standardization)
JCGM	Wspólny Komitet ds. Przewodników w Metrologii (ang. Joint Committee for Guides in Metrology)
MBD	dynamika układów wieloczłonowych (ang. Multibody Dynamics)
MES	metoda elementów skończonych
PCA	Polskie Centrum Akredytacji
PIT	Poznański Instytut Technologiczny; w rozprawie: Sieć Badawcza Łukasiewicz – PIT
PN	Polska Norma
PN-EN	Polska Norma wprowadzająca Normę Europejską
SI	Międzynarodowy Układ Jednostek Miar (fr. Système international d’unités)
TSI	techniczne specyfikacje interoperacyjności (ang. Technical Specifications for Interoperability)
TSI ENE	TSI dotycząca podsystemu „Energia”
TSI LOC&PAS	TSI dotycząca podsystemu „Tabor – lokomotywy i tabor pasażerski” (ang. Locomotives and Passenger Rolling Stock)
UE	Unia Europejska
VIM	Międzynarodowy słownik metrologii (ang. International Vocabulary of Metrology)

1 Wprowadzenie. Cel, teza i zakres pracy

1.1 Geneza i problem badawczy

Odbiór energii elektrycznej przez poruszający się pojazd szynowy wymaga zachowania ciągłego i stabilnego kontaktu pomiędzy nakładką ślizgową odbieraka prądu a przewodem jezdnym. Wraz ze wzrostem prędkości jazdy problem ten nabiera szczególnego znaczenia, ponieważ współpraca obu elementów przestaje mieć charakter quasi-statyczny i jest w coraz większym stopniu determinowana przez ich właściwości dynamiczne. Sieć jezdna stanowi układ o parametrach rozłożonych, w którym występuje propagacja zaburzeń mechanicznych, natomiast odbierak prądu może być rozpatrywany jako układ dyskretny o określonych masach, sztywnościach i tłumieniu. Wzajemne oddziaływanie tych elementów prowadzi do powstawania drgań wymuszonych, zmian siły stykowej oraz, w niekorzystnych warunkach, chwilowej utraty kontaktu.

Problem dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną jest zatem bezpośrednio związany z rozwojem trakcji elektrycznej, zwiększaniem prędkości eksploatacyjnych pojazdów oraz wzrostem wymagań dotyczących niezawodności i interoperacyjności transportu kolejowego. Utrzymanie właściwych warunków styku ma znaczenie nie tylko dla ciągłości przekazywania energii, ale także dla trwałości elementów systemu odbioru prądu. Zbyt mała siła stykowa zwiększa prawdopodobieństwo lokalnego odciążenia nakładki i utraty kontaktu z przewodem jezdym, czemu może towarzyszyć powstawanie łuku elektrycznego, lokalne nagrzewanie i erozja powierzchni stykowych. Z kolei nadmierna siła stykowa intensyfikuje zużycie mechaniczne nakładek ślizgowych i przewodu jeznego oraz może prowadzić do nadmiernego unoszenia sieci. Odpowiednia wartość siły stykowej i ograniczenie jej zmienności są więc podstawowymi warunkami prawidłowego funkcjonowania systemu odbioru prądu.

Warunki współpracy nie zależą przy tym wyłącznie od nastawy siły statycznej odbieraka. Na jego zachowanie podczas jazdy wpływają między innymi właściwości konstrukcyjne i dynamiczne, masa i naprężenie przewodu jeznego, geometria oraz sposób zawieszenia sieci, prędkość pojazdu, liczba i rozmieszczenie pracujących odbieraków, drgania przenoszone z pojazdu oraz warunki aerodynamiczne i środowiskowe. Oddziaływania aerodynamiczne mogą zmieniać całkowitą siłę unoszącą odbieraka, a w konsekwencji również warunki styku. Mechaniczny charakter współpracy

pozostaje jednocześnie bezpośrednio związany z elektryczną funkcją systemu, ponieważ zmiany siły stykowej oraz chwilowe utraty kontaktu wpływają na ciągłość przepływu prądu i możliwość występowania zjawisk łukowych.

Badania dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną rozwijane są równolegle w zakresie modelowania matematycznego i numerycznego [1]–[8], badań eksperymentalnych [9], [10], [18], [19] oraz metod diagnostycznych i monitoringowych [11]–[17]. Poszczególne podejścia różnią się zakresem odwzorowywanych zjawisk, wymaganiami dotyczącymi aparatury oraz możliwością wykorzystania uzyskanych wyników w badaniach pojazdów. Formalne ramy pomiarów i oceny ich wyników wyznaczają dokumenty normalizacyjne oraz techniczne specyfikacje interoperacyjności, w szczególności PN-EN 50317 [18], [19], PN-EN 50367 [20], [38], [114] i rozporządzenia Komisji (UE) [21], [22]. Szczegółową analizę aktualnego stanu wiedzy, stosowanych metod oraz wymagań przedstawiono w podrozdziale 2.5.

Jedną z głównych wielkości wykorzystywanych do oceny mechanicznego aspektu dynamicznej współpracy jest chwilowa siła stykowa $F_c(t)$. Jej eksperymentalne wyznaczenie na pojeździe wymaga nie tylko pomiaru sił w elementach odbieraka, lecz również uwzględnienia członu bezwładnościowego oraz korekcji siły aerodynamicznej. Wiarygodność wyniku zależy ponadto od właściwości kompletnej oprzyrządowanej konfiguracji, właściwości metrologicznych torów pomiarowych oraz właściwego oszacowania niepewności. Szczegółowy model wyznaczania $F_c(t)$ i zasady jego realizacji przedstawiono w dalszych rozdziałach rozprawy.

Norma PN-EN 50317 [18], [19] określa wymagania dotyczące pomiaru dynamicznego oddziaływania pantografu z siecią jezdnią, w tym wyznaczania siły stykowej, właściwości układu pomiarowego, uwzględniania członu bezwładnościowego i oddziaływań aerodynamicznych oraz laboratoryjnego badania właściwości dynamicznych kompletnego oprzyrządowanego odbieraka. Dokument ten nie narzuca jednak jednej technicznej realizacji kompletnego systemu pomiarowego ani modelu niepewności właściwego dla konkretnej konfiguracji. W praktyce realizacja wymagań musi zostać dostosowana do konstrukcji odbieraka, rozmieszczenia czujników, właściwości torów pomiarowych i konfiguracji badanego pojazdu.

Na podstawie analizy stanu wiedzy, przedstawionej szczegółowo w podrozdziale 2.5, zidentyfikowano problem badawczy będący przedmiotem niniejszej rozprawy. Dostępne metody badawcze, rozwiązania opisane w literaturze oraz wymagania

normatywne dostarczają podstaw do badania i oceny poszczególnych aspektów dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną. Nie stanowią jednak kompletnego rozwiązania, odpowiadającego potrzebie ich powiązania w spójną metodykę pomiarowo-analityczną, dostosowaną do zróżnicowanych konstrukcji odbieraków i konfiguracji pomiarowych oraz przeznaczoną do badań pojazdów.

Luka badawcza dotyczy braku takiej metodyki, zapewniającej kompleksowe przygotowanie, realizację i ocenę badań dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną, z uwzględnieniem wiarygodności metrologicznej uzyskiwanych wyników. Jej opracowanie wymaga powiązania identyfikacji i kwalifikacji badanego obiektu, konfiguracji układu pomiarowego, oceny właściwości dynamicznych kompletnego oprzyrządowanego odbieraka, wyznaczania wielkości zależnych od konfiguracji, pomiaru i analizy siły stykowej, oceny niepewności oraz interpretacji wyników względem właściwych kryteriów. Istotnym elementem podjętego problemu jest również uwzględnienie elektrycznych i elektromagnetycznych aspektów funkcjonowania systemu odbioru prądu poprzez odrębne badania uzupełniające, w tym analizę obrazu współpracy odbieraka z siecią. Badania te poszerzają zakres oceny pojazdu i jego współpracy z infrastrukturą, zachowując właściwe dla siebie cele, wielkości mierzone i kryteria oceny.

Naukowy wymiar podjętego problemu wiąże się z opracowaniem i eksperymentalną weryfikacją metodyki badań dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną, obejmującej autorskie rozwiązania w zakresie konfiguracji i integracji układu pomiarowego, modele i budżety niepewności oraz spójne postępowanie badawcze uwzględniające rolę poszczególnych badań i zasady oceny ich wyników. Wymiar aplikacyjny wynika z przeznaczenia opracowanej metodyki do badań pojazdów prowadzonych na potrzeby certyfikacji i oceny zgodności.

1.2 Cel, teza i sposób jej weryfikacji

Celem głównym rozprawy jest opracowanie, eksperymentalna weryfikacja i wdrożenie konfigurowalnej metodyki pomiarowo-analitycznej badań dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną, umożliwiającej wiarygodne wyznaczenie chwilowej siły stykowej $F_c(t)$ z uwzględnieniem właściwości dynamicznych kompletnej konfiguracji pomiarowej, oddziaływań bezwładnościowych i aerodynamicznych oraz niepewności pomiaru, a następnie wykorzystanie uzyskanych wyników do oceny

zdolności eksploatacyjnej systemu odbioru prądu w badaniach prowadzonych na potrzeby certyfikacji i oceny zgodności.

Realizacja celu głównego wymagała osiągnięcia następujących celów szczegółowych:

- 1) przeprowadzenia analizy aktualnego stanu wiedzy oraz wymagań normatywnych dotyczących dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną i określenia na tej podstawie struktury procesu badawczego;
- 2) opracowania konfigurowalnej, modułowej architektury układu pomiarowego umożliwiającej dostosowanie aparatury do konstrukcji badanego odbieraka, pojazdu i zakresu prowadzonych badań;
- 3) zaprojektowania elementów mechanicznych służących do integracji czujników z odbierakiem oraz przeprowadzenia ich projektowej weryfikacji konstrukcyjnej z uwzględnieniem wymagań wytrzymałościowych, masy i wpływu zabudowy na właściwości badanego układu;
- 4) opracowania sposobu pozyskiwania i przetwarzania wielkości wejściowych niezbędnych do wyznaczania chwilowej siły stykowej $F_c(t)$, przy zachowaniu postaci równania wynikającej z PN-EN 50317 [18], [19];
- 5) określenia na podstawie badań eksperymentalnych właściwości dynamicznych kompletnego oprzyrządowanego odbieraka, w tym wartości bezwzględnej funkcji przenoszenia i wskaźnika J oraz wyznaczenia wielkości niezbędnych do określenia korekcji siły aerodynamicznej i oceny aerodynamicznego wpływu zabudowy układu pomiarowego;
- 6) opracowania modeli i budżetów niepewności dla podstawowych wielkości wyznaczanych w ramach metodyki oraz powiązania oceny niepewności z właściwościami rzeczywistych torów pomiarowych, wynikami ich wzorcowania i warunkami prowadzenia badań;
- 7) zastosowania opracowanej metodyki w badaniach pojazdów szynowych oraz wdrożenia jej do praktyki badań prowadzonych na potrzeby certyfikacji i oceny zgodności, w tym poprzez wykorzystanie opracowanego procesu w kolejnych kampaniach badawczych i jego formalizację w dokumentacji systemu zarządzania laboratorium Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny.

W związku z przedstawionym problemem badawczym oraz określonym celem pracy sformułowano następującą tezę rozprawy:

Opracowana metodyka pomiarowo-analityczna badań dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną, obejmująca konfigurowalny układ pomiarowy, ocenę właściwości dynamicznych kompletnej oprzyrządowanej konfiguracji, uwzględnienie członu bezwładnościowego i korekcji siły aerodynamicznej oraz ilościową ocenę niepewności, umożliwia wiarygodne wyznaczenie chwilowej siły stykowej $F_c(t)$ i wykorzystanie uzyskanych wyników do oceny zdolności eksploatacyjnej systemu odbioru prądu w badaniach prowadzonych na potrzeby certyfikacji i oceny zgodności.

Tak sformułowana teza ma charakter weryfikowalny eksperymentalnie i metrologicznie. Jej weryfikację oparto na wzajemnie powiązanych kryteriach obejmujących:

- 1) wykonanie i zastosowanie na rzeczywistym odbieraku konfigurowalnego układu pomiarowego zapewniającego pozyskanie wielkości wymaganych do wyznaczenia $F_c(t)$;
- 2) laboratoryjną ocenę właściwości dynamicznych kompletnego oprzyrządowanego odbieraka poprzez wyznaczenie wartości bezwzględnej funkcji przenoszenia i wskaźnika J zgodnie z PN-EN 50317 [18], [19];
- 3) eksperymentalne wyznaczenie korekcji siły aerodynamicznej oraz ocenę wpływu zabudowy układu pomiarowego na właściwości aerodynamiczne odbieraka, z uwzględnieniem specyfiki badanej konfiguracji;
- 4) wyznaczenie chwilowej siły stykowej $F_c(t)$ oraz parametrów służących do oceny dynamicznej współpracy i odniesienie wyników do właściwych kryteriów normatywnych;
- 5) ilościowe wyznaczenie niepewności pomiaru podstawowych wielkości wynikowych na podstawie modeli pomiaru, wyników wzorcowania oraz zidentyfikowanych wielkości wpływających;
- 6) zastosowanie opracowanego pełnego procesu pomiarowo-analitycznego w badaniach pojazdów szynowych, wykorzystanie uzyskanych wyników na potrzeby certyfikacji i oceny zgodności oraz udokumentowanie wdrożenia w raportach i sprawozdaniach z badań, a także poprzez formalizację procedury

badawczej w systemie zarządzania laboratorium Sieć Badawcza Łukasiewicz - PIT.

Spełnienie tych kryteriów stanowi łącznie podstawę weryfikacji tezy rozprawy.

1.3 Zakres pracy, granice uogólnienia i oryginalny wkład autora

Zakres rozprawy obejmuje analizę zjawisk i wymagań istotnych dla dynamicznej współpracy odbieraka z siecią trakcyjną, opracowanie koncepcji metodyki pomiarowo-analitycznej, projekt i wykonanie układu pomiarowego oraz opracowanie sposobu jego integracji z różnymi konstrukcjami odbieraków. Na etapie projektowania przeprowadzono również analizę konstrukcyjną elementów układu pomiarowego z wykorzystaniem metody elementów skończonych. W ramach prac badawczych uwzględniono kwalifikację statyczną badanego układu, laboratoryjną ocenę właściwości dynamicznych kompletnego oprzyrządowanego odbieraka, wyznaczanie korekcji siły aerodynamicznej, ocenę aerodynamicznego wpływu zabudowy układu pomiarowego, pomiary podczas jazdy, przetwarzanie i analizę danych oraz ocenę niepewności. Zakres wdrożeniowy pracy obejmował zastosowanie opracowanej metodyki w kampaniach badawczych oraz jej formalizację w dokumentacji systemu zarządzania laboratorium Sieć Badawcza Łukasiewicz - PIT.

Zaprojektowano kilka wariantów elementów mocujących, dostosowanych do zróżnicowanych konstrukcji odbieraków, przy zachowaniu wspólnych założeń funkcjonalnych i jednolitego toku postępowania badawczego. Modułowy charakter układu umożliwia dostosowanie jego konfiguracji do konstrukcji badanego odbieraka, pojazdu i zakresu prowadzonych badań.

W części teoretycznej uwzględniono uwarunkowania współpracy występujące w europejskich systemach trakcyjnych 3 kV DC, 15 kV AC 16,7 Hz oraz 25 kV AC 50 Hz, dla których konstrukcje sieci jezdnych mogą różnić się między innymi napięciem przewodów, długością przęseł, masą jednostkową i sposobem kompensacji. Zakres ten nie oznacza jednak, że pojedynczy wynik uzyskany dla określonego pojazdu i odbieraka może zostać bezpośrednio przeniesiony na wszystkie wymienione systemy. Uogólnieniu podlega struktura opracowanej metodyki i sposób postępowania badawczego, natomiast wielkości zależne od konfiguracji muszą być każdorazowo wyznaczane dla konkretnego obiektu, sposobu instalacji aparatury i warunków prowadzenia badań.

Granice uogólnienia wyników wyznaczają przede wszystkim różnice konstrukcyjne odbieraków, sposób ich zabudowy na pojazdach, właściwości sieci jezdnych oraz warunki prowadzenia badań. W szczególności nie należy bez ponownej weryfikacji przenosić na inny typ odbieraka, odmienny sposób rozmieszczenia czujników lub istotnie zmienioną konfigurację aparatury: właściwości dynamicznych kompletnej konfiguracji pomiarowej, wyników laboratoryjnej oceny wartości bezwzględnej funkcji przenoszenia, wskaźnika J , korekcji siły aerodynamicznej, oceny aerodynamicznego wpływu zabudowy układu pomiarowego ani odpowiadających im składowych niepewności. Analogicznie wyniki uzyskane na określonych odcinkach sieci i w określonym zakresie prędkości stanowią charakterystykę zbadanych konfiguracji i warunków. Metodykę opracowano natomiast tak, aby po przeprowadzeniu odpowiedniej kwalifikacji i wyznaczeniu wielkości zależnych od konfiguracji mogła być stosowana do kolejnych obiektów badań.

Badania uzupełniające, obejmujące wizyjną analizę współpracy odbieraka z siecią trakcyjną, badania rezystancji, impedancji i reaktancji zestawów kołowych, badania emisji zaburzeń elektromagnetycznych promieniowanych, badania prądów zakłócających generowanych do sieci trakcyjnej oraz pomiary pola magnetycznego, poszerzają zakres informacji diagnostycznej o badanym pojeździe i jego współpracy z infrastrukturą. Nie stanowią one jednak wielkości wejściowych do modelu $F_c(t)$ i nie zastępują badań dynamicznych realizowanych zgodnie z PN-EN 50317 [18], [19]. Ich wyniki należy interpretować według kryteriów właściwych dla poszczególnych rodzajów badań.

Oryginalny wkład autora polega na integracji wymagań normatywnych, pomiarowych, metrologicznych i praktycznych w jeden konfigurowalny proces pomiarowo-analityczny. Wkład ten obejmuje opracowanie modułowej architektury układu i sposobu jej adaptacji do różnych odbieraków, projektową weryfikację elementów integrujących czujniki, praktyczną realizację laboratoryjnego badania właściwości dynamicznych kompletnej oprzyrządowanej konfiguracji zgodnie z PN-EN 50317 [18], [19], eksperymentalne wyznaczenie wielkości zależnych od konfiguracji oraz ilościową ocenę niepewności kluczowych wyników.

W zakresie badań dynamicznych zachowano normową postać równania wyznaczania siły stykowej [18], [19]. Autorski sposób realizacji tego zakresu obejmuje ciąg postępowania tj. identyfikację obiektu i konfigurację układu pomiarowego,

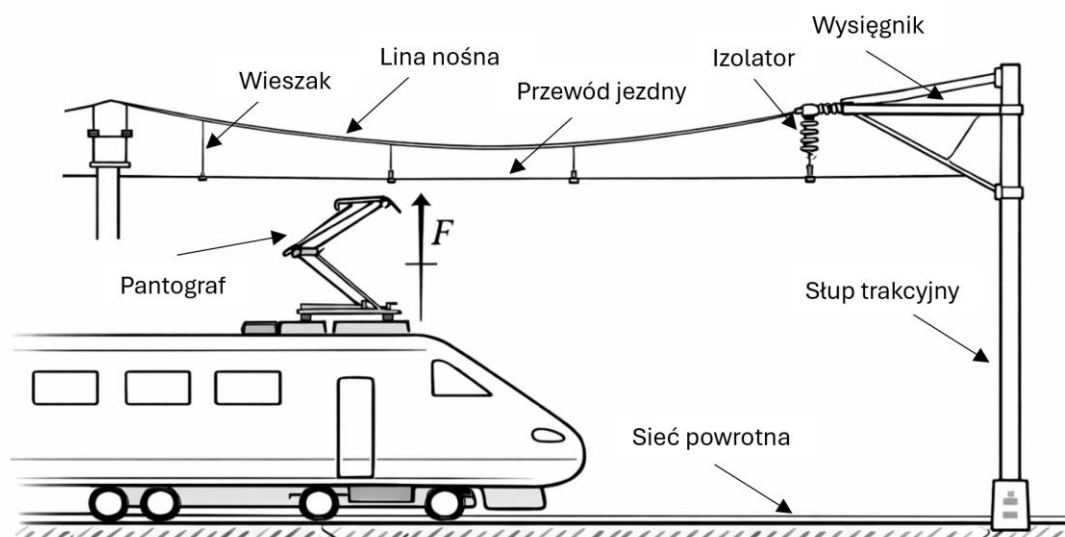
pozyskanie i przetwarzanie wymaganych wielkości, kwalifikację dynamiczną kompletnej konfiguracji, wyznaczenie wielkości zależnych od konfiguracji, a następnie wyznaczenie $F_c(t)$ wraz z oceną niepewności oraz końcową ocenę wyników względem właściwych kryteriów.

Wdrożeniowy wymiar pracy nie ogranicza się do wskazania potencjalnych możliwości zastosowania opracowanej metodyki. Została ona wykorzystana w badaniach pojazdów szynowych, co udokumentowano w raportach i sprawozdaniach z kolejnych kampanii badawczych. Elementem formalizacji tego procesu było również zarejestrowanie Instrukcji Badań odbieraka IP-BLT-70 w systemie zarządzania Sieć Badawcza Łukasiewicz - Poznańskiego Instytutu Technologicznego posiadającego akredytację AB 053. Praktyczne zastosowanie oraz sposób formalizacji metodyki przedstawiono w rozdziale 12.

2 Podstawy dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną – stan wiedzy i uwarunkowania badań

2.1 Dynamiczna współpraca odbieraka prądu z siecią trakcyjną

Odbiór energii elektrycznej przez poruszający się pojazd szynowy realizowany jest poprzez dynamicznie współpracujący układ odbieraka prądu i sieci trakcyjnej. Zapewnienie ciągłego i stabilnego kontaktu pomiędzy nakładką ślizgową odbieraka a przewodem jezdny ma zasadnicze znaczenie dla prawidłowego zasilania pojazdu, ograniczenia zużycia elementów stykowych oraz bezpieczeństwa eksploatacji. Jakość tej współpracy zależy zarówno od właściwości dynamicznych odbieraka i sieci, jak i od warunków ruchu oraz oddziaływań występujących podczas jazdy. Schemat układu odbierak prądu – sieć jezdna oraz występującego w obszarze styku oddziaływania przedstawiono na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Schemat dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią jezdnią

Układ odbierak prądu – sieć trakcyjna jest układem dynamicznym, w którym występują drgania wymuszone, oddziaływania nieliniowe oraz zmienna w czasie siła stykowa. Zjawiska te nabierają szczególnego znaczenia wraz ze wzrostem prędkości jazdy, ponieważ utrzymanie ciągłego kontaktu pomiędzy nakładką ślizgową odbieraka a przewodem jezdny staje się jednym z ważniejszych warunków prawidłowego odbioru energii elektrycznej.

Z punktu widzenia mechaniki sieć trakcyjna jest układem o parametrach rozłożonych, natomiast odbierak prądu może być opisywany jako układ dyskretny.

Ich wzajemne oddziaływanie tworzy złożony układ elektromechaniczny, w którym przebieg siły stykowej zależy między innymi od geometrii i naprężenia sieci, właściwości dynamicznych odbieraka, prędkości pojazdu oraz warunków eksploatacyjnych [23]–[25].

Jakość współpracy odbieraka z siecią wpływa bezpośrednio na niezawodność odbioru energii, zużycie nakładek i przewodu jezdnego oraz ryzyko uszkodzeń systemu odbioru prądu. Wzrost prędkości jazdy zwiększa znaczenie zjawisk dynamicznych i powoduje wzrost wymagań dotyczących zarówno właściwości konstrukcyjnych układu, jak i metod stosowanych do oceny jego współpracy.

Przedstawione zależności wskazują, że dynamiczna współpraca odbieraka prądu z siecią trakcyjną jest wynikiem jednoczesnego oddziaływania właściwości obu elementów układu oraz warunków eksploatacyjnych. Utrzymanie odpowiedniej wartości i ograniczenie zmienności siły stykowej wymaga zatem uwzględnienia zarówno parametrów mechanicznych sieci trakcyjnej, jak i właściwości konstrukcyjnych i dynamicznych odbieraka. Z tego względu w kolejnych podrozdziałach scharakteryzowano te cechy obu elementów układu, które mają bezpośredni wpływ na jego współpracę dynamiczną oraz na sposób prowadzenia jej badań.

2.2 Właściwości mechaniczne i elektryczne sieci trakcyjnej istotne dla współpracy dynamicznej

Sieć trakcyjna stanowi wiodący element systemu zasilania pojazdu trakcyjnego oraz układu dynamicznej współpracy odbieraka prądu z przewodem jezdnym. Pełni jednocześnie funkcję elektryczną, polegającą na doprowadzaniu energii do poruszającego się pojazdu, oraz mechaniczną, związaną z zapewnieniem właściwych warunków kontaktu przewodu jezdnego z nakładką ślizgową odbieraka. Z punktu widzenia prowadzonych badań obie funkcje są ze sobą bezpośrednio powiązane, ponieważ właściwości mechaniczne sieci wpływają na przebieg siły stykowej, natomiast jakość kontaktu determinuje warunki przepływu prądu trakcyjnego.

Do podstawowych elementów sieci należą przewód jezdny, lina nośna, wieszaki, elementy zawieszenia, konstrukcje wsporcze, izolatory oraz układy naciągowe i kompensacyjne. Przewód jezdny jest elementem bezpośrednio współpracującym z nakładką ślizgową odbieraka. Lina nośna wraz z wieszakami odpowiada za utrzymanie wymaganej geometrii przewodu względem toru, natomiast zastosowane rozwiązanie zawieszenia i naciągu wpływa na rozkład sztywności oraz odpowiedź dynamiczną sieci.

Układy kompensacyjne ograniczają wpływ zmian temperatury na długość, naprężenie i położenie przewodów. Konstrukcje wsporcze i elementy izolacyjne zapewniają wymagane położenie geometryczne oraz właściwą izolację elektryczną układu [25]–[27].

Przewody jezdne wykonywane są przede wszystkim z miedzi oraz jej stopów, w tym Cu-ETP, CuAg i CuMg [25], [28]. Dobór materiału i przekroju wynika zarówno z wymagań dotyczących przewodności elektrycznej i obciążalności prądowej, jak i właściwości mechanicznych oraz odporności eksploatacyjnej. Z punktu widzenia współpracy dynamicznej szczególne znaczenie mają masa jednostkowa przewodu, jego naprężenie wstępne, sztywność oraz geometria i sposób zawieszenia. Parametry te wpływają na sposób propagacji zaburzeń powstających podczas przejazdu odbieraka oraz na przebieg siły stykowej.

W europejskiej infrastrukturze kolejowej stosowane są różne systemy zasilania trakcyjnego. W zakresie rozpatrywanym w pracy szczególne znaczenie mają systemy 3 kV DC, 15 kV AC 16,7 Hz oraz 25 kV AC 50 Hz. Różnią się one parametrami elektrycznymi, wymaganiami izolacyjnymi oraz rozwiązaniami stosowanymi w infrastrukturze zasilającej. Jednocześnie w poszczególnych systemach występują różne konstrukcje sieci jezdnej, charakteryzujące się odmiennymi wartościami naprężenia przewodów, masy jednostkowej, długości przęseł, geometrii zawieszenia oraz sposobu kompensacji. Przykładowe parametry sieci jezdnych stosowanych w rozpatrywanych systemach zasilania opracowane na podstawie [25], [29] zestawiono w tabeli 2.1.

Tabela 2.1 Przykładowe parametry konstrukcyjne sieci jezdnych stosowanych w rozpatrywanych systemach zasilania

Parametr	3 kV DC	15 kV AC	25 kV AC
Napięcie znamionowe	3 kV	15 kV	25 kV
Częstotliwość	-	16,7 Hz	50 Hz
Typowe naprężenie przewodu jezdnego	12–15 kN	10–27 kN	12–27 kN
Typowa długość przęsła	50–65 m	65–80 m	50–70 m
Kompensacja termiczna	częściowa (zależna od konstrukcji sieci)	pełna	pełna

Na warunki współpracy dynamicznej wpływa również liczba jednocześnie pracujących odbieraków i ich wzajemne położenie. Przejazd pierwszego odbieraka powoduje powstanie zaburzenia propagującego się wzdłuż przewodu jezdnego.

W zależności od prędkości pojazdu, właściwości sieci oraz odległości pomiędzy odbierakami zaburzenie to może wpływać na warunki pracy kolejnego odbieraka. Z tego względu konfiguracja pracujących odbieraków stanowi jeden z parametrów istotnych zarówno z punktu widzenia projektowania systemu, jak i prowadzenia badań jego współpracy dynamicznej.

Do czynników kształtujących odpowiedź dynamiczną sieci należą: napężenie wstępne, masa jednostkowa i sztywność przewodów, długość oraz geometria przęsła, sposób zawieszenia i właściwości tłumiące układu. Znaczenie mają również temperatura oraz warunki aerodynamiczne. Zmiana temperatury może wpływać na warunki mechaniczne przewodów, natomiast wiatr oraz oddziaływania aerodynamiczne związane z ruchem pojazdu mogą stanowić dodatkowe źródła wymuszeń.

Mechaniczna odpowiedź sieci jest bezpośrednio związana z realizacją jej funkcji elektrycznej. Prawidłowy przebieg siły stykowej sprzyja utrzymaniu ciągłego połączenia elektrycznego pomiędzy przewodem jezdny a nakładką odbieraka. Zmniejszenie siły stykowej może prowadzić do wzrostu niestabilności styku, natomiast jego chwilowe przerwanie powoduje utratę ciągłości przepływu prądu i może prowadzić do powstawania łuku elektrycznego. Zjawisku temu towarzyszy lokalne nagrzewanie powierzchni stykowych, erozja materiału oraz przyspieszone zużycie przewodu jeznego i nakładki ślizgowej.

Warunki elektryczne występujące w obszarze styku zależą również od systemu zasilania, wartości napięcia i prądu trakcyjnego oraz właściwości elektrycznych elementów toru przepływu energii. W konsekwencji dynamiczna współpraca odbieraka z siecią ma charakter elektromechaniczny i nie może być oceniana wyłącznie na podstawie właściwości mechanicznych obu elementów. Siła stykowa pozostaje główną wielkością opisującą ich oddziaływanie mechaniczne, ale jej przebieg jest bezpośrednio związany z ciągłością odbioru prądu i występowaniem zjawisk elektrycznych w strefie kontaktu.

Z tego względu w pracy, obok pomiarów wielkości mechanicznych charakteryzujących współpracę odbieraka z siecią, uwzględniono również wybrane wielkości i zjawiska elektryczne oraz elektromagnetyczne związane z systemem odbioru energii. Pozwala to na szerszą ocenę badanego układu i powiązanie mechanicznych warunków kontaktu z jego funkcją elektryczną.

Przedstawione zależności wskazują, że warunki współpracy odbieraka z siecią są wynikiem jednoczesnego oddziaływania parametrów konstrukcyjnych, mechanicznych i elektrycznych oraz warunków eksploatacyjnych. Typ i konfiguracja sieci, właściwości przewodu jezdnego, prędkość pojazdu, konfiguracja pracujących odbieraków i warunki środowiskowe wpływają na przebieg siły stykowej oraz ciągłość odbioru energii. Drugim podstawowym elementem kształtującym odpowiedź analizowanego układu jest odbierak prądu, którego właściwości konstrukcyjne i dynamiczne przedstawiono w kolejnym podrozdziale.

2.3 Właściwości konstrukcyjne, dynamiczne i elektryczne odbieraka prądu

Odbierak prądu stanowi ruchomy element systemu odbioru energii elektrycznej, pośredniczący pomiędzy siecią jezdnią a układem elektrycznym pojazdu trakcyjnego. Jego zadaniem jest utrzymanie ciągłego kontaktu nakładki ślizgowej z przewodem jezdny w zmiennych warunkach geometrycznych i dynamicznych, przy jednoczesnym zapewnieniu warunków umożliwiających przepływ prądu trakcyjnego. Odbierak należy zatem rozpatrywać jako element układu elektromechanicznego, w którym właściwości konstrukcyjne i dynamiczne bezpośrednio wpływają na jakość styku elektrycznego.

Konstrukcja odbieraka obejmuje podstawę mocowaną na izolatorach wsporczych, układ napędowy, ruchomą ramę przegubową oraz ślizgacz wyposażony w nakładki stykowe. Z punktu widzenia współpracy z siecią szczególne znaczenie mają konstrukcja i sposób zawieszenia ślizgacza, właściwości mechaniczne części ruchomych, charakterystyka układu odpowiedzialnego za wytwarzanie siły unoszącej oraz sposób elektrycznego połączenia ślizgacza z obwodem głównym pojazdu. Zasadnicze elementy konstrukcyjne odbieraka przedstawiono na rys. 2.2.



Rys. 2.2. Wybrane elementy konstrukcyjne odbieraka prądu

W eksploatacji stosowane są odbieraki o różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych i kinematycznych. Do charakterystycznych należą konstrukcje czteroramienne oraz jednoramienne. Różnią się one geometrią układu, liczbą połączeń przegubowych, masą części ruchomych, budową ślizgacza oraz sposobem realizacji siły unoszącej. Zróżnicowanie to wpływa na właściwości dynamiczne odbieraka, jego bezwładność, sztywność i tłumienie, a także na możliwości instalacji aparatury pomiarowej.

Przykładowe różnice konstrukcyjne pomiędzy odbierakiem czteroramiennym AKP-4E/W i jednoramiennym Panto300 przedstawiono na rys. 2.3.



(a)



(b)

Rys. 2.3. Przykłady różnych konstrukcji odbieraków prądu: a) odbierak czteroramienny AKP-4E/W, b) odbierak jednoramienny Panto300

Wybrane cechy konstrukcyjne przykładowych odbieraków opracowane na podstawie [30]–[34] oraz badań własnych przedstawiono w tabeli 2.2. Zestawienie obejmuje rozwiązania różniące się m.in. typem ślizgacza, zakresem wysokości roboczej, siłą statyczną, sposobem realizacji napędu oraz masą.

Tabela 2.2. Porównanie wybranych cech konstrukcyjnych odbieraków prądu

Parametr	Typ odbieraka			
	Panto300	160Ec	Fb 700.102	5ZL
Rodzaj konstrukcji	połówkowy	połówkowy	połówkowy	symetryczny
Typ ślizgacza	bliźniaczy	bliźniaczy	bliźniaczy	pojedynczy
Długość części roboczej ślizgacza [mm]	950	1030	1050	1100
Zakres wysokości roboczej [mm]	670–2710	800–1800	–	800–1800
Średni nacisk statyczny [N]	110 (reg. 90–120)	100	80	90
Układ napędowy	pneumat. napęd mieszkowy	pneumat. napęd mieszkowy	siłownik elektryczny	sprężynowy
Masa [kg]	153 ± 5	130	135	380

Przedstawione różnice konstrukcyjne mają znaczenie zarówno dla odpowiedzi dynamicznej odbieraka, jak i dla sposobu realizacji pomiarów. Uzasadniają potrzebę zastosowania konfigurowalnego układu pomiarowego, umożliwiającego dostosowanie

rozmieszczenia czujników oraz elementów mocujących do konstrukcji badanego odbieraka.

Z punktu widzenia dynamiki odbierak można traktować jako układ mechaniczny o właściwościach bezwładnościowych, sprężystych i tłumiących. Do parametrów mających podstawowy wpływ na jego odpowiedź należą masa części ruchomych, sztywność układu, tłumienie, charakterystyka siły statycznej oraz właściwości zawieszenia ślizgacza. Parametry te określają zdolność odbieraka do nadążania za zmianami położenia przewodu jezdnego oraz wpływają na przebieg siły stykowej podczas ruchu pojazdu.

W analizach dynamicznych odbieraki mogą być reprezentowane za pomocą modeli dyskretnych o jednym lub wielu stopniach swobody. W modelach tych poszczególne części ruchome odwzorowywane są za pomocą skupionych mas połączonych elementami sprężystymi i tłumiącymi. Pozwala to analizować wpływ parametrów mechanicznych na odpowiedź częstotliwościową układu, przenoszenie drgań oraz występowanie zjawisk rezonansowych. W literaturze stosowane są zarówno modele uproszczone, jak i modele wielomasowe [1]–[3], [32], [35]–[37].

W niniejszej pracy właściwości dynamiczne rzeczywistego odbieraka nie są jednak określane wyłącznie na podstawie zastępczego modelu mechanicznego. Istotnym elementem opracowanej metodyki jest eksperymentalne wyznaczenie charakterystyki przenoszenia układu obejmującego odbierak wraz z zainstalowanymi elementami toru pomiarowego. Pomiar wykonywany jest w zakresie częstotliwości od 0,5 Hz do 20 Hz i umożliwia ocenę zdolności układu do odwzorowania wymuszenia działającego na ślizgacz.

Jednym z ważniejszych parametrów odbieraka jest charakterystyka siły statycznej. Układ podnoszący powinien zapewniać wymagane oddziaływanie ślizgacza na przewód jezdny w całym zakresie wysokości roboczej. Na przebieg siły wpływają zarówno właściwości układu podnoszącego, jak i tarcie występujące w połączeniach ruchomych. W konsekwencji podczas podnoszenia i opuszczania odbieraka może występować histereza charakterystyki siły. Ocena tego parametru stanowi jeden z elementów kwalifikacji odbieraka przed badaniami dynamicznymi.

W warunkach eksploatacyjnych odpowiedź odbieraka zależy również od prędkości pojazdu, zmian geometrii i wysokości przewodu jezdnego, drgań przenoszonych

z pojazdu, warunków aerodynamicznych oraz stanu elementów mechanicznych i stykowych. Czynniki te wpływają na ruch ślizgacza i zmienność siły stykowej.

Szczególne znaczenie wraz ze wzrostem prędkości mają oddziaływania aerodynamiczne. Siły działające na elementy odbieraka zależą od jego geometrii, sposobu zabudowy na pojeździe, kierunku jazdy oraz warunków przepływu powietrza. Mogą one powodować zmianę całkowitej siły unoszącej, a tym samym wpływać na wartość siły stykowej. Z tego względu opracowana metodyka obejmuje pomiar całkowitej siły unoszącej oraz wyznaczenie korekcji aerodynamicznej.

Z punktu widzenia funkcji elektrycznej odbieraka istotna jest ciągłość styku pomiędzy nakładką ślizgową a przewodem jezdny. Zmienność siły stykowej powoduje zmiany warunków tego styku, a chwilowe odciążenie lub utrata kontaktu prowadzi do przerwania metalicznej drogi przepływu prądu. W takich warunkach może powstać łuk elektryczny, powodujący lokalne nagrzewanie, erozję powierzchni ślizgowych i uszkodzenie przewodu jezdnego.

Zależność pomiędzy odpowiedzią mechaniczną odbieraka a ciągłością przepływu prądu powoduje, że ocena współpracy nie może być ograniczona wyłącznie do parametrów mechanicznych. Siła stykowa pozostaje podstawową wielkością charakteryzującą oddziaływanie odbieraka na sieć, ale jej przebieg ma również znaczenie dla jakości elektrycznego odbioru energii. Z tego względu w rozwijanej metodyce klasyczną ocenę dynamiczną uzupełniono o wybrane pomiary i obserwacje elektryczne oraz elektromagnetyczne systemu odbioru prądu.

Właściwości konstrukcyjne, dynamiczne i elektryczne odbieraka tworzą więc wzajemnie powiązany układ. Masa, sztywność, tłumienie, charakterystyka siły statycznej i oddziaływania aerodynamiczne kształtują przebieg siły stykowej, natomiast warunki kontaktu mechanicznego wpływają na ciągłość przepływu prądu i możliwość występowania zjawisk łukowych. Ocena odbieraka wymaga zatem uwzględnienia zarówno jego odpowiedzi dynamicznej, jak i funkcji realizowanej w elektrycznym torze odbioru energii.

Bezpośrednim elementem realizującym mechaniczny i elektryczny kontakt odbieraka z przewodem jezdny jest nakładka ślizgowa. Jej materiał, geometria, właściwości elektryczne, stan powierzchni oraz stopień zużycia wpływają na warunki styku i trwałość systemu odbioru prądu. Zagadnienia te przedstawiono w kolejnym podrozdziale.

2.4 Nakładki ślizgowe i warunki styku z przewodem jezdnym

Nakładka ślizgowa jest wymiennym elementem ślizgacza odbieraka prądu i pozostaje w bezpośrednim kontakcie mechanicznym i elektrycznym z przewodem jezdny. W obszarze styku następuje jednocześnie przenoszenie siły pomiędzy odbierakiem i siecią oraz przepływ prądu trakcyjnego. Właściwości nakładki mają zatem znaczenie zarówno dla odpowiedzi dynamicznej układu, jak i dla warunków elektrycznego odbioru energii.

Materiały stosowane na nakładki powinny zapewniać kompromis pomiędzy wymaganiami elektrycznymi, mechanicznymi i tribologicznymi. Decydujące znaczenie mają wysoka przewodność elektryczna, mała rezystancja styku, odpowiednia odporność mechaniczna i cieplna, właściwe parametry tarcia oraz kontrolowane zużycie materiału. Jednocześnie materiał nakładki powinien ograniczać zużycie przewodu jezdny, którego wymiana jest znacznie bardziej złożona niż wymiana elementów ślizgowych odbieraka.

W rozwiązaniach stosowanych w kolejnictwie wykorzystywane są przede wszystkim materiały węglowe, w tym węgiel czysty, impregnowany oraz domieszkowany metalem. Stosowane są również rozwiązania metalizowane i kompozytowe. W przypadku materiałów węglowych dodatek metalu, najczęściej miedzi lub jej stopów, umożliwia modyfikację właściwości elektrycznych i mechanicznych nakładki [22], [38].

Z punktu widzenia oceny współpracy odbieraka z siecią istotny jest zespół ich właściwości użytkowych. Do bazowych parametrów należą twardość i gęstość materiału, jego wytrzymałość mechaniczna, współczynnik tarcia, przewodność elektryczna, dopuszczalna obciążalność prądowa oraz odporność cieplna. Znaczenie mają również geometria nakładki, jej masa, granica dopuszczalnego zużycia oraz sposób połączenia materiału ślizgowego z elementem nośnym. Właściwości te są przedmiotem badań wymaganych dla dopuszczenia nakładek do eksploatacji.

Stan nakładki ślizgowej wpływa bezpośrednio na warunki współpracy z przewodem jezdny. W trakcie eksploatacji powierzchnia materiału ulega zużyciu wskutek połączonego oddziaływania siły stykowej, ruchu ślizgowego, przepływu prądu oraz zjawisk cieplnych i środowiskowych. Prawidłowe zużycie powinno mieć możliwie równomierny charakter na długości części roboczej nakładki. Nierównomierny rozkład zużycia może natomiast wskazywać na nieprawidłową geometrię współpracy,

niewłaściwą wartość siły statycznej, nieprawidłową integrację odbieraka z pojazdem lub niekorzystne warunki współpracy z siecią.

Mechaniczny i elektryczny charakter styku powoduje, że skutki nieprawidłowej współpracy są ze sobą powiązane. Zbyt mała siła stykowa zwiększa prawdopodobieństwo lokalnego odciążenia i utraty kontaktu, co może prowadzić do powstawania łuku elektrycznego. Łuk powoduje lokalny wzrost temperatury oraz erozję materiału nakładki i przewodu jezdnego. Z kolei nadmierna siła stykowa zwiększa intensywność zużycia mechanicznego zarówno nakładki, jak i przewodu. Zużycie nakładki może następnie pogarszać geometrię styku i zwiększać niestabilność dalszej współpracy, tworząc sprzężenie pomiędzy stanem technicznym elementów stykowych a jakością odbioru energii.

Na stan nakładek wpływają również czynniki związane z pojazdem i infrastrukturą. Nieprawidłowe ustawienie odbieraka względem osi pojazdu lub przewodu jezdnego może powodować miejscowe przeciążenie powierzchni ślizgowej i nierównomierne zużycie. Podobny efekt mogą powodować nieprawidłowości geometrii sieci, w tym wysokości i odsuwu przewodu jezdnego. Przykłady uszkodzeń wynikających z niewłaściwej siły statycznej oraz nieprawidłowej integracji odbieraka z pojazdem przedstawiono na rys. 2.4.



Rys. 2.4. Przykłady nierównomiernego zużycia nakładek ślizgowych: a) uszkodzenie związane z niewłaściwą siłą statyczną, b) miejscowe zużycie wynikające z nieprawidłowej integracji odbieraka z pojazdem

Warunki atmosferyczne mogą dodatkowo pogarszać jakość styku. Obłodzenie lub oszronienie przewodu zwiększa prawdopodobieństwo występowania nieciągłości kontaktu, natomiast wiatr wpływa zarówno na położenie sieci, jak i na warunki aerodynamiczne pracy odbieraka. Skutkiem niekorzystnych warunków może być

zwiększenie zużycia mechanicznego, występowanie wyładowań łukowych oraz lokalnych nadpaleń powierzchni stykowych.

Szczególną grupę stanowią uszkodzenia o charakterze elektrycznym i cieplnym. Przerwanie ciągłości styku podczas przepływu prądu trakcyjnego może prowadzić do powstawania łuku i miejscowej erozji materiału. Z kolei przepływ prądu o dużej wartości przez ograniczony obszar styku, szczególnie podczas postoju pojazdu, może powodować intensywne lokalne nagrzewanie i liniowe wypalenie nakładki. Przykłady takich uszkodzeń przedstawiono na rys. 2.5.



Rys. 2.5. Przykłady uszkodzeń nakładek związanych ze zjawiskami elektrycznymi: *a) nadpalenia powierzchni wskutek występowania łuku elektrycznego, b) liniowe wypalenie nakładki*

Stan nakładek ślizgowych powinien być uwzględniany przy przygotowaniu obiektu do badań dynamicznych. Kontrola obejmuje w szczególności rodzaj i wymiary zastosowanych nakładek, stopień ich zużycia, poprawność mocowania oraz geometrię ślizgacza. Weryfikacja tych parametrów przed rozpoczęciem badań ogranicza możliwość uzyskania wyników obciążonych wpływem nieprawidłowego stanu lub geometrii elementów stykowych. Stan i zużycie nakładek są ponadto uwzględniane w opracowanej metodyce jako element warunków rejestrowanych podczas realizacji badań.

Nakładka ślizgowa stanowi zatem element łączący mechaniczne i elektryczne aspekty współpracy odbieraka z siecią trakcyjną. Jej materiał, geometria i stan techniczny wpływają na warunki kontaktu z przewodem jezdnym, właściwości tarciove, ciągłość przepływu prądu oraz możliwość występowania zjawisk łukowych. Z tego względu kontrola elementów stykowych stanowi istotny etap kwalifikacji odbieraka do dalszych badań.

2.5 Stan wiedzy w zakresie badania i oceny dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną

Badanie dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną stanowi przedmiot prac prowadzonych zarówno w zakresie modelowania matematycznego i numerycznego [1]–[8], jak i badań eksperymentalnych realizowanych na stanowiskach laboratoryjnych oraz podczas jazd pojazdów szynowych [9], [10], [18], [19]. Uzupełnieniem klasycznych metod oceny są rozwijane systemy diagnostyki bezstykowej, analiza sygnałów rejestrowanych podczas eksploatacji oraz metody wykorzystujące informacje o zjawiskach elektrycznych i elektromagnetycznych towarzyszących pogorszeniu jakości styku [11]–[15], [16], [17], [39]. Poszczególne podejścia różnią się zakresem odwzorowywanych zjawisk, wymaganiami dotyczącymi aparatury badawczej oraz możliwością wykorzystania uzyskanych wyników w procesie oceny zgodności.

Kluczową rolę w prowadzeniu badań i ocenie współpracy układu odbierak prądu–sieć trakcyjna pełnią dokumenty normalizacyjne. Norma PN-EN 50318 [40] określa zasady walidacji modeli symulacyjnych opisujących dynamiczne oddziaływanie pantografu z siecią jezdnią, natomiast PN-EN 50317:2012 [18] wraz ze zmianą PN-EN 50317:2012/A1:2023-05 [19] odnosi się do pomiarów dynamicznego oddziaływania obu elementów i walidacji wyników tych pomiarów. Kryteria techniczne dotyczące wzajemnego oddziaływania pantografu i sieci jezdnej określono również w PN-EN 50367 [20], [38], [114]. Zagadnienia dotyczące charakterystyk i badań odbieraków prądu opisano w EN 50206-1 [41], natomiast metody badań nakładek stykowych w PN-EN 50405 [42]. Wymagania wynikające z norm uzupełniają techniczne specyfikacje interoperacyjności, w szczególności TSI LOC&PAS wraz z kolejnymi zmianami [22] oraz TSI ENE [21]. Dokumenty te wyznaczają formalne ramy prowadzenia badań i oceny współpracy układu pantograf–sieć trakcyjna. Sposoby odwzorowania zjawisk zachodzących w tym układzie oraz pozyskiwania informacji niezbędnych do jego oceny są natomiast rozwijane w ramach badań naukowych, obejmujących metody numeryczne, pomiarowe i diagnostyczne.

Jednym z ważniejszych kierunków tych prac jest modelowanie matematyczne i numeryczne dynamicznej współpracy pantografu z siecią trakcyjną. Najprostsze modele wykorzystują reprezentację układu za pomocą parametrów skupionych i ograniczonej liczby stopni swobody. Pozwalają one odwzorować podstawowe zależności pomiędzy masą, sztywnością i tłumieniem elementów odbieraka a zmianami siły stykowej. Modele tego rodzaju są użyteczne szczególnie w analizach parametrycznych i przy badaniu

wpływu właściwości dynamicznych odbieraka na jakość jego współpracy z siecią [1], [2], [4], [43], [44]. Ich zaletą jest stosunkowo niewielka złożoność obliczeniowa, natomiast ograniczeniem jest uproszczone odwzorowanie sieci trakcyjnej jako układu o parametrach rozłożonych oraz zjawisk związanych z propagacją i odbiciem fal mechanicznych [1], [2], [4], [35], [45]–[48].

Dokładniejsze odwzorowanie zjawisk zachodzących w układzie wymaga zastosowania bardziej rozbudowanych modeli numerycznych. W pracach [3], [5], [49], [50]–[52] wykorzystano metodę elementów skończonych do analizy dynamicznej współpracy sieci jezdnej i odbieraka prądu. W takich modelach możliwe jest uwzględnienie przestrzennego rozmieszczenia elementów sieci, sił naciągu, właściwości przewodów i wieszaków oraz lokalnych zmian sztywności konstrukcji [9], [53]–[55].

W bardziej złożonych rozwiązaniach model sieci trakcyjnej może być sprzężony z wieloczłonowym modelem odbieraka, tworząc wielodziedzinowy model układu pantograf-sieć trakcyjna. Podejście takie umożliwia uwzględnienie m.in. propagacji fal mechanicznych w sieci trakcyjnej, nieliniowych właściwości wieszaków, zmiany położenia punktu styku, właściwości zawieszenia ślizgacza, oddziaływań aerodynamicznych oraz wymuszeń przenoszonych z pojazdu. W rozwiązaniu przedstawionym przez Zdziebkę model sieci trakcyjnej sformułowano z wykorzystaniem MES, natomiast model pantografu – w ujęciu dynamiki układów wieloczłonowych MBD, a wymianę danych pomiędzy oboma modelami realizowano w procesie kosymulacji [56]. Model sieci trakcyjnej poddano następnie walidacji zgodnie z wymaganiami EN 50318. Rozwiązania tego rodzaju umożliwiają szczegółową analizę wpływu poszczególnych zjawisk na przebieg siły stykowej i jakość dynamicznej współpracy odbieraka z siecią, jednak wiążą się ze wzrostem złożoności modelu, koniecznością identyfikacji większej liczby parametrów oraz zwiększeniem nakładu obliczeniowego [3], [57]–[62].

Z tego względu odrębnym kierunkiem rozwoju są modele zredukowane i szybkie modele obliczeniowe, których zadaniem jest ograniczenie czasu obliczeń przy zachowaniu możliwości odwzorowania najistotniejszych właściwości dynamicznych układu. Przykładem jest model przedstawiony przez Pan i in. [63], przeznaczony do szybkiej symulacji współpracy pantografu z siecią trakcyjną na długich odcinkach przejazdu. Rozwiązania tego rodzaju są szczególnie użyteczne w analizach obejmujących dużą liczbę wariantów parametrów konstrukcyjnych lub eksploatacyjnych. W przypadku modeli zredukowanych szczególnego znaczenia nabiera właściwy dobór parametrów

oraz weryfikacja zachowania modelu względem modelu o większej szczegółowości lub wyników eksperymentalnych [64], [65].

Istotnym zagadnieniem związanym z modelowaniem jest również identyfikacja parametrów odbieraka. Wilk i in. [32] przedstawili metodę estymacji parametrów bezwładnościowych i dyssypacyjnych modelu pantografu. Ma to znaczenie, ponieważ wiarygodność modelu numerycznego zależy nie tylko od jego struktury matematycznej, lecz również od poprawności wartości parametrów opisujących rzeczywisty obiekt [66]. Analizy czasowo-częstotliwościowe przebiegu siły stykowej i badanie wrażliwości wyników na parametry sieci stanowią kolejny kierunek badań umożliwiającą identyfikację czynników mających największy wpływ na jakość współpracy [36], [44], [67], [68].

Modele numeryczne wykorzystywane są także do analizy możliwości aktywnego kształtowania siły stykowej. W literaturze rozpatrywano zastosowanie dodatkowych układów wykonawczych oraz algorytmów regulacji umożliwiających ograniczenie zmian siły kontaktowej [37], [69], [70], [71]. Nowsze rozwiązania obejmują także zastosowanie algorytmów sterowania wykorzystujących metody neuronowe do adaptacji układu w zmiennych warunkach eksploatacyjnych [72], [73]. Kierunek ten wskazuje na rosnące znaczenie metod automatycznego przetwarzania danych i sterowania, przy czym zastosowanie aktywnego sterowania odbierakiem stanowi odrębny problem badawczy od zagadnienia wiarygodnego pomiaru i oceny jego współpracy z siecią.

Formą pośrednią pomiędzy badaniami numerycznymi a badaniami wykonywanymi podczas przejazdu są badania Hardware-in-the-Loop (HIL), rozwijane od wielu lat jako narzędzie oceny dynamiki pantografu i układu pantograf–sieć [74]–[77]. Tur i in. [9] przedstawili stanowisko umożliwiające współpracę rzeczywistego odbieraka prądu z wirtualnym modelem sieci jezdnej. Podejście takie pozwala badać reakcję rzeczywistego obiektu na wymuszenia odpowiadające różnym konfiguracjom sieci bez konieczności prowadzenia każdej próby na infrastrukturze kolejowej. Stanowiska HIL umożliwiają kontrolowaną zmianę parametrów badanego układu i wielokrotne powtarzanie eksperymentu. Wiarygodność uzyskanych wyników jest jednak zależna od jakości modelu sieci, dynamiki elementów wykonawczych stanowiska oraz sposobu sprzężenia części rzeczywistej z częścią symulowaną. Metoda HIL stanowi więc wartościowe narzędzie badawcze i walidacyjne, ale nie eliminuje potrzeby badań prowadzonych w rzeczywistych warunkach ruchu.

Drugą zasadniczą grupę metod stanowią bezpośrednio badania eksperymentalne odbieraka i jego współpracy z siecią trakcyjną. Obejmują one zarówno badania statyczne i laboratoryjne odbieraka, jak i pomiary wykonywane podczas jazdy pojazdu. Zagadnienia badań dopuszczeniowych i eksploatacyjnych odbieraków przedstawiono między innymi w [10], natomiast metody badań statycznych stosowanych podczas produkcji i eksploatacji opisano w [31]. Badania statyczne pozwalają określić między innymi charakterystykę nacisku oraz właściwości geometryczne odbieraka i stanowią uzupełnienie późniejszej oceny dynamicznej.

W badaniach dynamicznych podstawową wielkością opisującą jakość mechanicznej współpracy odbieraka z siecią jest siła stykowa występująca pomiędzy nakładką ślizgową a przewodem jezdnym. Jej wartość nie jest jednak wynikiem wyłącznie działania mechanizmu unoszenia odbieraka. Na sygnał pomiarowy wpływają również siły bezwładności elementów znajdujących się pomiędzy miejscem pomiaru a punktem styku oraz oddziaływania aerodynamiczne. Z tego względu pomiar wymaga równoczesnej rejestracji wielkości pozwalających na wprowadzenie odpowiednich korekcji. PN-EN 50317 [18], [19] określa wymagania dotyczące pomiaru dynamicznego oddziaływania pantografu z siecią, w tym wymagania odnoszące się do torów pomiarowych, właściwości dynamicznych układu oraz sposobu przetwarzania zarejestrowanych sygnałów. Wyznaczone na tej podstawie parametry statystyczne są następnie odnoszone do kryteriów określonych we właściwych dokumentach odniesienia, w szczególności PN-EN 50367 [20], [38], [114] oraz TSI LOC&PAS [22] i TSI ENE [21]. W dalszej części rozprawy wymagania te są wykorzystywane między innymi przy korekcji wpływu sił bezwładności, filtracji sygnału siły stykowej oraz wyznaczaniu wartości średnich i miar jego zmienności.

W badaniach wykonywanych na pojeździe znaczenie ma również wpływ samego układu pomiarowego na właściwości dynamiczne odbieraka. Czujniki oraz elementy służące do ich zamocowania wprowadzają dodatkową masę i mogą wpływać na właściwości dynamiczne odbieraka [19]. Z tego względu uzyskanie wiarygodnego wyniku wymaga nie tylko odpowiedniej dokładności zastosowanych przetworników, lecz także znajomości właściwości dynamicznych całego toru pomiarowego. W praktyce problem ten prowadzi do konieczności sprawdzenia przenoszenia sygnału siły w wymaganym zakresie częstotliwości oraz uwzględnienia wpływu elementów znajdujących się pomiędzy punktem kontaktu i miejscem pomiaru. Znaczenie

charakterystyki dynamicznej toru pomiarowego pokazano również w badaniach Zdziebki, w których odpowiedź układu z czujnikiem światłowodowym FBG oceniano w funkcji częstotliwości i porównywano z pomiarem referencyjnym [57].

Odrębną grupę stanowią metody diagnostyczne i monitoringowe, których celem nie jest bezpośrednie odtworzenie przebiegu siły stykowej, lecz wykrywanie zmian stanu odbieraka, sieci lub obszaru styku. W pracach [14], [15] przedstawiono rozwiązania stosowane w diagnostyce sieci trakcyjnej i odbieraków prądu, w tym metody bezstykowe oraz systemy monitoringu eksploatacyjnego. Rozwój technik wizyjnych pozwala na automatyzację oceny geometrii oraz wzajemnego położenia elementów układu [11], [17], [78]–[81]. Przykładem jest system wizyjny służący do analizy położenia sieci trakcyjnej względem odbieraka prądu przedstawiony w pracy [11]. Metody wizyjne mogą dostarczać informacji trudnych do uzyskania wyłącznie na podstawie przebiegów sił, a równoczesna rejestracja obrazu i innych wielkości pomiarowych ułatwia interpretację krótkotrwałych zaburzeń obserwowanych podczas przejazdu.

Szczególnym przypadkiem pogorszenia jakości współpracy jest chwilowa utrata kontaktu nakładki z przewodem jezdny i związane z nią powstawanie łuku elektrycznego. Zjawisko to może być identyfikowane z wykorzystaniem metod optycznych oraz analizy sygnałów elektrycznych [12], [82]–[87]. Rozwój metod automatycznej analizy danych doprowadził także do zastosowania algorytmów uczenia głębokiego do detekcji i klasyfikacji zjawisk łukowych [12]. Rozwiązania takie mogą być użyteczne w diagnostyce eksploatacyjnej, ponieważ umożliwiają analizowanie dużych zbiorów danych pomiarowych i automatyczną identyfikację zdarzeń. Wynik detekcji łuku należy jednak traktować jako informację uzupełniającą ocenę dynamiczną: wystąpienie łuku jest skutkiem określonych warunków elektrycznych i mechanicznych w obszarze styku, natomiast nie zastępuje ilościowego pomiaru siły stykowej wymaganego w klasycznej ocenie dynamicznej.

Interakcja odbieraka z siecią ma również wymiar elektryczny i elektromagnetyczny. Pogorszenie lub chwilowa utrata styku wpływa na warunki przepływu prądu i może prowadzić do powstawania stanów przejściowych. Modelowanie łuku pantograf–sieć oraz związanych z nim przejść elektromagnetycznych przedstawiono w pracy [13]. Badania dotyczące środowiska elektromagnetycznego systemów kolejowych wskazują równocześnie na występowanie pól elektromagnetycznych związanych z przepływem prądów trakcyjnych i pracą układu zasilania [39], [88]. Zagadnienia propagacji oraz

ograniczania oddziaływania pól elektromagnetycznych niskiej i średniej częstotliwości są szeroko analizowane również w odniesieniu do właściwości materiałowych i geometrycznych elementów przewodzących oraz ekranów [89], [90]. Metody te nie stanowią alternatywy dla pomiaru parametrów mechanicznych współpracy, lecz umożliwiają ocenę skutków elektrycznych i elektromagnetycznych nieprawidłowości pojawiających się w układzie odbioru prądu.

Przeprowadzony przegląd wskazuje zatem, że rozwój metod badania układu pantograf–sieć trakcyjna przebiega równolegle w kilku kierunkach. Modele matematyczne i numeryczne umożliwiają przewidywanie zachowania układu i analizę wpływu jego parametrów, stanowiska HIL pozwalają na kontrolowaną weryfikację wybranych zjawisk, natomiast badania wykonywane podczas jazdy dostarczają informacji o rzeczywistym oddziaływaniu odbieraka z siecią. Metody wizyjne, algorytmy automatycznej diagnostyki oraz pomiary wielkości elektrycznych i elektromagnetycznych rozszerzają zakres informacji o stanie badanego układu. Nie są to jednak metody wzajemnie zastępowalne, lecz źródła informacji opisujące różne aspekty tego samego złożonego procesu.

Analizowane źródła obejmują zarówno prace koncentrujące się na pojedynczych elementach procesu badawczego, takich jak identyfikacja parametrów, analiza siły stykowej, diagnostyka czy obserwacja obszaru styku, jak i rozwiązania integrujące wybrane obszary, w szczególności modelowanie MES/MBD oraz badania HIL [9], [32], [57]. Z punktu widzenia badań prowadzonych na pojazdach istotnym zagadnieniem pozostaje jednak zapewnienie spójności całego procesu pomiarowego, obejmującego przygotowanie odbieraka i aparatury, wiarygodne odwzorowanie siły stykowej, uwzględnienie właściwości dynamicznych toru pomiarowego i wymaganych korekcy, zsynchronizowaną rejestrację wielkości potrzebnych do interpretacji wyniku oraz jego ocenę metrologiczną. Wiarygodność modeli numerycznych dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią jezdnią może być zwiększana przez porównanie wyników obliczeń z rozwiązaniami analitycznymi oraz wynikami badań terenowych [91].

Przedstawiony przegląd stanowi podstawę do podjęcia w rozprawie zadania opracowania i eksperymentalnego sprawdzenia metodyki badań pojazdów, obejmującej przygotowanie konfiguracji pomiarowej, pozyskanie wymaganych wielkości wejściowych, ocenę właściwości dynamicznych kompletnego układu, uwzględnienie właściwych korekcy, ocenę niepewności oraz interpretację wyników w odniesieniu do

kryteriów oceny. Wnioski wynikające z przeprowadzonej analizy stanowiły podstawę sformułowania problemu badawczego przedstawionego w rozdziale 1 oraz opracowania koncepcji metodyki przedstawionej w rozdziale 3.

3 Koncepcja metodyki pomiarowo-analitycznej

Analiza stanu wiedzy i wymagań przedstawiona w rozdziale 2 stanowi podstawę do sformułowania koncepcji metodyki pomiarowo-analitycznej. W niniejszym rozdziale uporządkowano jej strukturę, role poszczególnych grup badań oraz relacje pomiędzy wielkościami mierzonymi, wyznaczanymi i kryteriami oceny. Techniczną realizację układu pomiarowego, model wyznaczania siły stykowej oraz szczegółową procedurę badań przedstawiono odpowiednio w rozdziałach 4–6.

3.1 Założenia i struktura procesu badawczego

Opracowanie metodyki badań dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną wymagało uporządkowania działań związanych z przygotowaniem obiektu, konfiguracją układu pomiarowego, rejestracją i przetwarzaniem danych oraz oceną wyników. Proces badawczy potraktowano jako spójny układ funkcjonalnie powiązanych etapów prowadzących od identyfikacji obiektu i wymagań do oceny zgodności oraz interpretacji wyników.

Podstawowym założeniem metodyki jest zachowanie zgodności z właściwymi dokumentami odniesienia, w szczególności PN-EN 50317 [18], [19], przy jednoczesnym uporządkowaniu sposobu przygotowania badań, zapewnienia wiarygodności wyników pomiarów, przetwarzania danych i interpretacji wyników. Rozwiązania własne autora dotyczą przede wszystkim integracji tych elementów w konfigurowalnym procesie pomiarowo-analitycznym dostosowanym do badań pojazdów szynowych.

Poszczególne etapy procesu są ze sobą powiązane funkcjonalnie, jednak nie tworzą jednego wspólnego modelu pomiaru. Wyniki wybranych etapów stanowią dane wejściowe kolejnych obliczeń lub procedur oceny, natomiast inne pełnią funkcję przygotowawczą, kontrolną albo diagnostyczną. Takie rozróżnienie pozwala zachować ciągłość procesu bez utożsamiania wszystkich badań z modelem wyznaczania siły stykowej.

Pierwszym etapem procesu jest identyfikacja obiektu badań. Obejmuje ona określenie rodzaju pojazdu, typu odbieraka prądu, parametrów konstrukcyjnych układu oraz systemu zasilania trakcyjnego, dla którego prowadzone będą badania. Etap ten determinuje sposób przygotowania aparatury pomiarowej, wybór konfiguracji modułów pomiarowych oraz zakres analiz wykonywanych podczas opracowania wyników. Jednocześnie identyfikowane są parametry infrastruktury kolejowej, takie jak rodzaj sieci

trakcyjnej, napięcie zasilania, dopuszczalna prędkość eksploatacyjna oraz charakterystyka odcinka badawczego.

Kolejnym etapem jest określenie warunków prowadzenia badań. Przyjęto założenie, że wiarygodność wyników zależy nie tylko od jakości aparatury pomiarowej, lecz również od właściwego udokumentowania warunków, w jakich wykonywane są pomiary. W związku z tym w procesie badawczym rejestrowano lub dokumentowano podstawowe parametry środowiskowe i eksploatacyjne, w tym temperaturę otoczenia, prędkość i kierunek wiatru, warunki atmosferyczne, prędkość jazdy, napięcie zasilania, wysokość zawieszenia sieci jezdnej oraz konfigurację badanego pojazdu. Informacje te wykorzystywano podczas interpretacji wyników oraz oceny porównywalności poszczególnych przejazdów.

Następnym krokiem jest przygotowanie układu pomiarowego. W opracowanej metodyce przyjęto modułową architekturę systemu, umożliwiającą dostosowanie konfiguracji do rodzaju badanego odbieraka oraz zakresu planowanych pomiarów. Na poziomie koncepcji obejmuje to dobór właściwych modułów i torów pomiarowych, określenie sposobu ich integracji oraz zapewnienie wspólnej podstawy czasu dla sygnałów wykorzystywanych wspólnie w obliczeniach. Szczegóły montażu, akwizycji i kontroli funkcjonalnej przedstawiono w rozdziałach 4 i 6.

W ramach przygotowania obiektu do badań dynamicznych wykonywane są badania statyczne. Służą one ocenie właściwości geometrycznych i mechanicznych odbieraka oraz pozyskaniu danych wykorzystywanych podczas przygotowania i interpretacji kolejnych etapów badań.

W ramach zapewniania wiarygodności wyników rozdzielono trzy odrębne rodzaje działań: wzorcowanie stosowanych torów pomiarowych, kontrolę funkcjonalną kompletnej konfiguracji po montażu oraz laboratoryjne badanie właściwości dynamicznych oprzyrządowanego odbieraka zgodnie z pkt 7.5 PN-EN 50317 [18], [19] określone w normie jako „Kalibracja układu pomiarowego”. Działania te mają odmienne cele i nie należy ich ze sobą utożsamiać. Szczegółowo przedstawiono je w rozdziałach 4 i 6.

Po wykonaniu czynności przygotowawczych realizowane są badania dynamiczne, stanowiące zasadniczy etap oceny współpracy odbieraka prądu z siecią jezdnią. Podczas przejazdów wykonywanych zgodnie z przyjętym programem badań rejestrowane są

wielkości niezbędne do wyznaczania i oceny siły stykowej oraz wielkości towarzyszące służące dokumentowaniu warunków badania i interpretacji wyników.

Istotnym elementem procesu jest przetwarzanie danych pomiarowych. Sygnały wykorzystywane łącznie w modelu wyznaczania siły stykowej są rejestrowane ze wspólną podstawą czasu, a następnie przetwarzane i filtrowane zgodnie z przyjętą procedurą. Chwilową wartość siły stykowej $F_c(t)$ wyznacza się na podstawie sumy wskazań torów pomiaru siły, członu bezwładnościowego określanego z pomiarów przyspieszeń i odpowiedniej masy oraz korekcji siły aerodynamicznej $F_{corr,aero}(v)$. Z otrzymanego przebiegu $F_c(t)$ wyznaczane są następnie wymagane parametry statystyczne wykorzystywane w ocenie wyników.

Ocena niepewności stanowi integralny element metodyki dla kluczowych wielkości wynikowych objętych przyjętymi modelami pomiaru. Budżety niepewności odnoszą się do jednoznacznie zdefiniowanych równań pomiaru i obejmują źródła związane z zastosowanymi torami pomiarowymi, warunkami badań oraz przetwarzaniem danych. Szczegółowe modele i obliczenia przedstawiono w rozdziale 7.

Odrębny blok metodyki stanowią badania uzupełniające obejmujące analizę obrazu współpracy odbieraka z siecią trakcyjną, badania rezystancji i impedancji zestawów kołowych, badania kompatybilności elektromagnetycznej, analizę zakłóceń przewodzonych do sieci trakcyjnej oraz pomiary pola magnetycznego. Badania te rozszerzają zakres informacji diagnostycznych dotyczących pojazdu i systemu odbioru prądu, lecz nie stanowią wielkości wejściowych modelu wyznaczania $F_c(t)$.

Ostatnim etapem jest ocena zgodności i interpretacja wyników. Wyniki poszczególnych badań odnoszone są do właściwych dla nich wymagań i kryteriów, z uwzględnieniem niepewności tam, gdzie ma ona znaczenie dla interpretacji wyniku. Wyniki badań uzupełniających mogą wspierać szerszą interpretację diagnostyczną badanego systemu, lecz nie są łączone z wynikami oceny dynamicznej opartej na $F_c(t)$ w jedno wspólne kryterium zgodności.

Przyjęta organizacja procesu badawczego służy zapewnieniu jednoznaczności i powtarzalności postępowania badawczego, wiarygodności wyników pomiarów oraz porównywalności ocen prowadzonych dla różnych pojazdów i konfiguracji odbieraków. Osiąga się to przez właściwe przygotowanie obiektu, stosowanie wzorcowanych torów pomiarowych, kontrolę funkcjonalną konfiguracji, laboratoryjne badanie właściwości

dynamicznych oprzyrządowanego odbieraka, spójny sposób przetwarzania danych oraz ocenę niepewności dla kluczowych wielkości wynikowych.

Istotną cechą metodyki jest jej modułowy charakter. Umożliwia on dostosowanie konfiguracji układu pomiarowego i zakresu badań do badanego obiektu oraz celu oceny, przy zachowaniu wspólnej logiki postępowania. Metodyka może być stosowana w badaniach na potrzeby oceny zgodności i certyfikacji, a także w badaniach rozwojowych i diagnostycznych.

Podsumowując, w rozdziale 3 określono strukturę metodyki i relacje pomiędzy jej głównymi elementami: przygotowaniem obiektu i układu pomiarowego, zapewnianiem wiarygodności wyników pomiarów, realizacją badań dynamicznych, przetwarzaniem danych, oceną niepewności oraz interpretacją wyników. Tak zdefiniowana koncepcja stanowi punkt wyjścia do przedstawienia technicznej realizacji układu pomiarowego w rozdziale 4, modelu wyznaczania siły stykowej w rozdziale 5 oraz procedury badawczej w rozdziale 6.

3.2 Wielkości mierzone, wielkości wyznaczane i kryteria oceny

Jednym z podstawowych elementów opracowanej metodyki jest rozróżnienie wielkości mierzonych, wielkości wyznaczanych na podstawie zarejestrowanych danych i przyjętych modeli oraz wielkości wykorzystywanych w kryteriach oceny. Podział ten pozwala jednoznacznie określić rolę poszczególnych sygnałów i wyników w dalszych etapach rozprawy, bez utożsamiania całej aparatury i wszystkich badań z jednym modelem pomiarowym.

Współpraca odbieraka prądu z siecią trakcyjną jest zjawiskiem dynamicznym, dlatego interpretacja wielkości występujących w modelu wyznaczania siły stykowej wymaga uwzględnienia ich funkcji oraz charakteru czasowego. Jednocześnie część rejestrowanych wielkości służy innym kryteriom oceny lub badaniom uzupełniającym i nie stanowi wielkości wejściowych modelu $F_c(t)$.

Wielkości mierzone są pozyskiwane za pomocą odpowiednich torów pomiarowych i stanowią dane wejściowe właściwych modeli, procedur obliczeniowych lub odrębnych ocen. W zależności od funkcji obejmują wielkości mechaniczne, elektryczne, eksploatacyjne i środowiskowe. Sposób przetwarzania zarejestrowanych danych wynika z modelu lub kryterium, dla którego dana wielkość jest wykorzystywana.

Do elementarnych wielkości mierzonych wykorzystywanych w modelu $F_c(t)$ należą siły $F_{sensor,j}(t)$ oraz przyspieszenia $a_{sensor,j}(t)$. W modelu uwzględniana jest również masa m_{above} części odbieraka znajdujących się pomiędzy punktami pomiaru siły a punktem styku oraz korekta siły aerodynamicznej $F_{corr,aero}(v)$, wyznaczana w odrębnym etapie procedury. Odrębnie rejestrowane są wielkości służące innym kryteriom oceny i analizom uzupełniającym, m.in. uniesienie przewodu jezdnego oraz wybrane parametry elektryczne i warunki prowadzenia badań.

Wielkości wyznaczone oblicza się na podstawie zarejestrowanych danych i przyjętych modeli. Kluczową wielkością w badaniu dynamicznej współpracy jest siła stykowa $F_c(t)$. Zgodnie z PN-EN 50317 [18], [19] jej wartość wyznacza się na podstawie sumy wskazań czujników siły, członu bezwładnościowego określanego z pomiarów przyspieszeń i odpowiadającej im masy m_{above} oraz korekty siły aerodynamicznej $F_{corr,aero}$. Szczegółową postać równania i sposób wyznaczania jego składników przedstawiono w rozdziale 5.

Odrębną wielkością wyznaczaną podczas laboratoryjnego badania właściwości dynamicznych kompletnej konfiguracji oprzyrządowanego odbieraka jest wskaźnik J . W normie PN-EN 50317 [18], [19] został on określony jako „dokładność wartości bezwzględnej funkcji przenoszenia”. W niniejszej rozprawie stosuje się określenie „wskaźnik J ”, aby odróżnić normową nazwę tej wielkości od metrologicznego pojęcia dokładności pomiaru. Wskaźnik J służy do oceny właściwości dynamicznych kompletnej konfiguracji oprzyrządowanego odbieraka i nie stanowi współczynnika korekcyjnego ani składnika modelu $F_c(t)$.

Wynikowi wyznaczenia siły stykowej przypisywana jest również niepewność pomiaru. W dalszej części rozprawy rozróżnia się złożoną niepewność standardową $u_c(F_c)$ oraz niepewność rozszerzoną $U(F_c)$. Wielkości te charakteryzują niepewność przypisaną wynikowi i stanowią podstawę jego metrologicznej interpretacji. Szczegółowy model i budżet niepewności przedstawiono w rozdziale 7.

Tabela 3.1 przedstawia zestawienie podstawowych wielkości wykorzystywanych w opracowanej metodyce oraz ich funkcję w procesie pomiarowo-analitycznym.

Tabela 3.1. Podstawowe wielkości mierzone i wyznaczane w opracowanej metodyce badań

Wielkość	Symbol	Charakter	Jednostka	Znaczenie w metodyce
Siła zmierzona przez j-ty czujnik	$F_{\text{sensor},j}$	mierzona	N	wielkość wejściowa modelu $F_c(t)$
Przyspieszenie zmierzone przez j-ty czujnik	$a_{\text{sensor},j}$	mierzona	m/s ²	wielkość wejściowa do wyznaczenia członu bezwładnościowego
Masa części odbieraka pomiędzy punktami pomiaru siły a punktem styku	m_{above}	wyznaczona / parametr modelu	kg	wielkość wejściowa członu bezwładnościowego
Suma wskazań torów pomiaru siły	$F_{\Sigma}(t)$	wyznaczana	N	chwilowa suma sił wykorzystywana w modelu $F_c(t)$ i przy wyznaczaniu korekcji aerodynamicznej
Średnia w czasie z sumy wskazań torów pomiaru siły	$\bar{F}_{\Sigma}(v)$	wyznaczana	N	wielkość wykorzystywana do wyznaczenia $F_{\text{corr,aero}}(v)$
Całkowita średnia siła unosząca	$F_s(v)$	wyznaczana	N	wielkość wykorzystywana do wyznaczenia $F_{\text{corr,aero}}(v)$
Korekcja siły aerodynamicznej	$F_{\text{corr,aero}}$	wyznaczana	N	składnik równania $F_c(t)$ uwzględniający wpływ oddziaływań aerodynamicznych
Siła stykowa	$F_c(t)$	wyznaczana	N	wielkość opisująca dynamiczną współpracę odbieraka z siecią
Średnia siła stykowa	F_m	wyznaczana	N	średnia z przebiegu $F_c(t)$ w analizowanej sekcji; parametr oceny
Odchylenie standardowe siły stykowej	σ	wyznaczana	N	statystyczna miara zmienności $F_c(t)$
Statystyczne minimum siły stykowej	$F_m - 3\sigma$	wyznaczane	N	statystyczna charakterystyka dolnego zakresu wartości siły stykowej
Statystyczne maksimum siły stykowej	$F_m + 3\sigma$	wyznaczane	N	statystyczna charakterystyka górnego zakresu wartości siły stykowej
Wskaźnik J	J	wyznaczany	%	ocena właściwości dynamicznych kompletnej konfiguracji oprzyrządowanego odbieraka; kryterium PN-EN 50317 [18], [19]
Uniesienie przewodu jezdnego	s_u	mierzona	mm	ocena oddziaływania odbieraka na sieć zgodnie z właściwym kryterium
Prąd trakcyjny	I_t	mierzona	A	charakterystyka warunków obciążenia elektrycznego podczas badań
Napięcie trakcyjne	U_t	mierzona	V	ocena warunków zasilania podczas badań
Niepewność rozszerzona wyznaczenia siły stykowej	$U(F_c)$	wyznaczana	N	ocena wiarygodności metrologicznej wyniku

Przedstawione zestawienie pokazuje, że poszczególne wielkości pełnią odmienne funkcje w procesie pomiarowo-analitycznym. Część z nich jest mierzona za pomocą

odpowiednich torów pomiarowych, część wyznaczana w wyniku przetwarzania danych zgodnie z przyjętym modelem lub procedurą, a część stanowi statystyczną albo metrologiczną charakterystykę uzyskanego wyniku. Takie uporządkowanie umożliwia prześledzenie zależności pomiędzy wielkościami wejściowymi, wielkościami wynikowymi i kryteriami oceny.

Kryteria oceny wyników przyjęto na podstawie właściwych dokumentów odniesienia stosowanych w poszczególnych badaniach, w szczególności PN-EN 50317 [18], [19], PN-EN 50367 [20], [38], [114] oraz odpowiednich wymagań TSI [21], [22]. W dalszych rozdziałach wartości graniczne i kryteria odnoszone są każdorazowo do konkretnej wielkości oraz wersji dokumentu właściwej dla danego badania.

W zakresie oceny dynamicznej współpracy odbieraka z siecią podstawowe znaczenie mają średnia siła stykowa F_m , odchylenie standardowe siły stykowej σ , statystyczne minimum $F_m - 3\sigma$, statystyczne maksimum $F_m + 3\sigma$ oraz uniesienie przewodu jezdnego, jeżeli dana wielkość jest objęta kryterium właściwym dla badanego przypadku. Wyniki badań uzupełniających oceniane są według odrębnych kryteriów odpowiadających celowi i podstawie normatywnej danego badania.

Z metrologicznego punktu widzenia szczególnie ważne jest zapewnienie możliwości prześledzenia sposobu uzyskania wielkości wynikowych – od zarejestrowanych danych wejściowych, przez zastosowany model i sposób przetwarzania, do wyniku końcowego. Dokumentacja wzorcowania właściwych torów pomiarowych, kontroli funkcjonalnej konfiguracji, laboratoryjnego badania oprzyrządowanego odbieraka oraz oceny niepewności stanowi podstawę udokumentowania wiarygodności procesu pomiarowego. Spójność pomiarowa odnosi się natomiast do właściwości wyników pomiarów i powiązania ich z odniesieniem poprzez udokumentowany, nieprzerwany łańcuch wzorcowań, a nie do samej możliwości odtworzenia kolejnych etapów obliczeń.

Podsumowując, rozróżnienie wielkości mierzonych, wyznaczanych i kryteriów oceny porządkuje koncepcję metodyki oraz dalszą strukturę rozprawy. Pozwala zachować spójność pomiędzy rejestracją danych, modelami pomiaru, oceną niepewności i końcową interpretacją wyników, bez przypisywania wszystkim wielkościom tej samej funkcji w procesie badawczym.

3.3 Rola badań statycznych, dynamicznych i uzupełniających

W opracowanej metodyce rozróżniono funkcje badań statycznych, dynamicznych i uzupełniających. Badania statyczne służą ocenie wybranych właściwości obiektu oraz jego przygotowaniu do dalszych etapów badań, badania dynamiczne stanowią zasadnicze źródło wyników dotyczących współpracy odbieraka prądu z siecią jezdnią podczas jazdy, natomiast badania uzupełniające tworzą odrębny blok diagnostyczny. Powiązanie tych grup dotyczy organizacji procesu badawczego i interpretacji uzyskiwanych wyników, a nie ich połączenia w jeden wspólny model pomiaru.

Proces badawczy stanowi ciąg logicznie i funkcjonalnie powiązanych etapów. Nie oznacza to jednak, że wynik każdego etapu stanowi bezpośrednią wielkość wejściową etapu kolejnego. Tylko wybrane wielkości są wykorzystywane w określonych modelach pomiaru lub procedurach oceny, natomiast pozostałe etapy pełnią funkcję przygotowawczą, kontrolną albo diagnostyczną.

Rola badań statycznych

Badania statyczne stanowią jeden z etapów oceny i przygotowania obiektu do badań dynamicznych. Ich zadaniem jest określenie wybranych właściwości geometrycznych i mechanicznych odbieraka prądu istotnych zarówno z punktu widzenia właściwych kryteriów oceny statycznej, jak i dalszego programu badań. Prowadzenie ich bez oddziaływań związanych z ruchem pojazdu umożliwia ocenę tych parametrów w warunkach właściwych dla badań statycznych.

Do podstawowych celów badań statycznych należy:

- weryfikacja geometrii odbieraka prądu,
- ocena stanu technicznego elementów stykowych,
- pomiar statycznej siły stykowej,
- pozyskanie danych geometrycznych i mechanicznych potrzebnych do przygotowania badań dynamicznych i interpretacji ich wyników.

W opracowanej metodyce badania statyczne pełnią funkcję oceny właściwości obiektu oraz funkcję przygotowawczą. Nie zastępują jednak wzorcowania torów pomiarowych, kontroli funkcjonalnej po montażu ani laboratoryjnego badania właściwości dynamicznych kompletnej konfiguracji oprzyrządowanego odbieraka. Są to odrębne działania, których funkcje przedstawiono szczegółowo w rozdziałach 4–6.

Rola badań dynamicznych

Badania dynamiczne stanowią zasadniczą część opracowanej metodyki. Ich celem jest ocena współpracy odbieraka prądu z siecią jezdnią podczas ruchu pojazdu w warunkach określonych programem badań. W tej fazie rejestrowane są sygnały niezbędne do wyznaczenia siły stykowej oraz wielkości służące ocenie innych parametrów i dokumentowaniu warunków realizacji badania.

Podstawową wielkością wyznaczaną podczas badań dynamicznych jest siła stykowa $F_c(t)$. Jej wartość wyznacza się zgodnie z modelem opartym na wymaganiach PN-EN 50317 [18], [19] obejmującym sumę wskazań czujników siły, człon bezwładnościowy określany na podstawie pomiarów przyspieszeń i masy m_{above} oraz korekcję siły aerodynamicznej $F_{corr,aero}(v)$. Niepewność pomiaru jest oceniana odrębnie i charakteryzuje niepewność przypisaną wyznaczanemu wynikowi.

Z przebiegu siły stykowej $F_c(t)$ wyznaczane są wymagane charakterystyki statystyczne, w szczególności:

- średnia siła stykowa F_m ,
- statystyczne minimum siły stykowej $F_m - 3\sigma$,
- statystyczne maksimum siły stykowej $F_m + 3\sigma$.

Odrębnie wyznaczane jest uniesienie przewodu jezdniego, stanowiące wielkość ocenianą według właściwego dla niej kryterium.

Uzyskane wyniki są odnoszone do właściwych dla nich kryteriów określonych w dokumentach odniesienia. Umożliwiają również analizę wpływu prędkości jazdy, właściwości infrastruktury oraz konfiguracji odbieraka na przebieg i zmienność siły stykowej. Interpretację wyników prowadzi się z uwzględnieniem przypisanej im niepewności, jeżeli jest ona istotna dla danego sposobu oceny.

Wyniki badań uzupełniających mogą wspierać szerszą interpretację diagnostyczną badanego systemu, lecz pozostają odrębnym źródłem informacji.

Rola badań uzupełniających

Badania uzupełniające stanowią odrębny blok metodyki, rozszerzający zakres informacji o badanym pojeździe i jego współpracy z infrastrukturą o zagadnienia niewynikające bezpośrednio z modelu wyznaczenia siły stykowej $F_c(t)$.

Do badań uzupełniających włączono:

- analizę obrazu współpracy odbieraka z siecią trakcyjną,

- badania rezystancji oraz impedancji zestawów kołowych,
- badania kompatybilności elektromagnetycznej (EMC),
- pomiary zakłóceń przewodzonych do sieci trakcyjnej,
- pomiary pola magnetycznego.

Zakres badań uzupełniających obejmuje wybrane zagadnienia elektryczne, elektromagnetyczne i diagnostyczne dotyczące badanego pojazdu oraz jego współpracy z infrastrukturą. Badania te mogą być realizowane w ramach tej samej kampanii lub jako odrębne próby, zależnie od zakresu programu badawczego i dostępności wymaganej infrastruktury. W rozprawie przedstawiono reprezentatywne przykłady pochodzące z różnych rzeczywistych kampanii. Ich wyniki interpretuje się według odrębnych kryteriów właściwych dla danego badania i nie traktuje jako wielkości wejściowych modelu $F_c(t)$.

Analiza obrazu współpracy odbieraka z siecią trakcyjną może wspierać identyfikację zdarzeń obserwowalnych wizualnie, takich jak utraty kontaktu lub występowanie wyładowań łukowych, oraz stanowić materiał dokumentacyjny i diagnostyczny wspierający interpretację wyników badań.

Badania rezystancji i impedancji zestawów kołowych odnoszą się do właściwości istotnych dla współpracy pojazdu z urządzeniami detekcji i sterowania ruchem kolejowym. Badania kompatybilności elektromagnetycznej, pomiary zakłóceń przewodzonych do sieci trakcyjnej oraz pomiary pola magnetycznego służą ocenie odpowiednich właściwości elektrycznych i elektromagnetycznych pojazdu zgodnie z wymaganiami właściwymi dla poszczególnych badań.

Wzajemne zależności pomiędzy poszczególnymi grupami badań

Powiązanie etapów metodyki polega na wykorzystaniu wyników zgodnie z ich funkcją. Badania statyczne dostarczają wyników dotyczących właściwości obiektu oraz danych wykorzystywanych przy przygotowaniu kolejnych etapów. Wzorcowanie właściwych torów pomiarowych, kontrola funkcjonalna po montażu oraz laboratoryjne badanie właściwości dynamicznych kompletnej konfiguracji oprzyrządowanego odbieraka pełnią odrębne funkcje w zapewnianiu wiarygodności wyników pomiarów. Badania dynamiczne dostarczają wyników dotyczących współpracy odbieraka z siecią jezdnią podczas jazdy, natomiast badania uzupełniające rozszerzają zakres informacji diagnostycznych o pojeździe i jego współpracy z infrastrukturą.

Zależności pomiędzy głównymi etapami przedstawiono na rysunku 3.1. Ocena zgodności prowadzona jest dla poszczególnych wymagań na podstawie właściwych dla nich wyników, przy czym wyniki różnych badań mogą być łącznie wykorzystywane w szerszej interpretacji diagnostycznej badanego pojazdu.

Tak uporządkowana struktura umożliwia przejście od przygotowania obiektu i układu pomiarowego do oceny wyników bez mieszania funkcji poszczególnych badań. Ułatwia również wskazanie, które wyniki stanowią wejścia do modeli obliczeniowych, które są podstawą kryteriów zgodności, a które pełnią funkcję uzupełniającą.

Znaczenie dla opracowanej metodyki

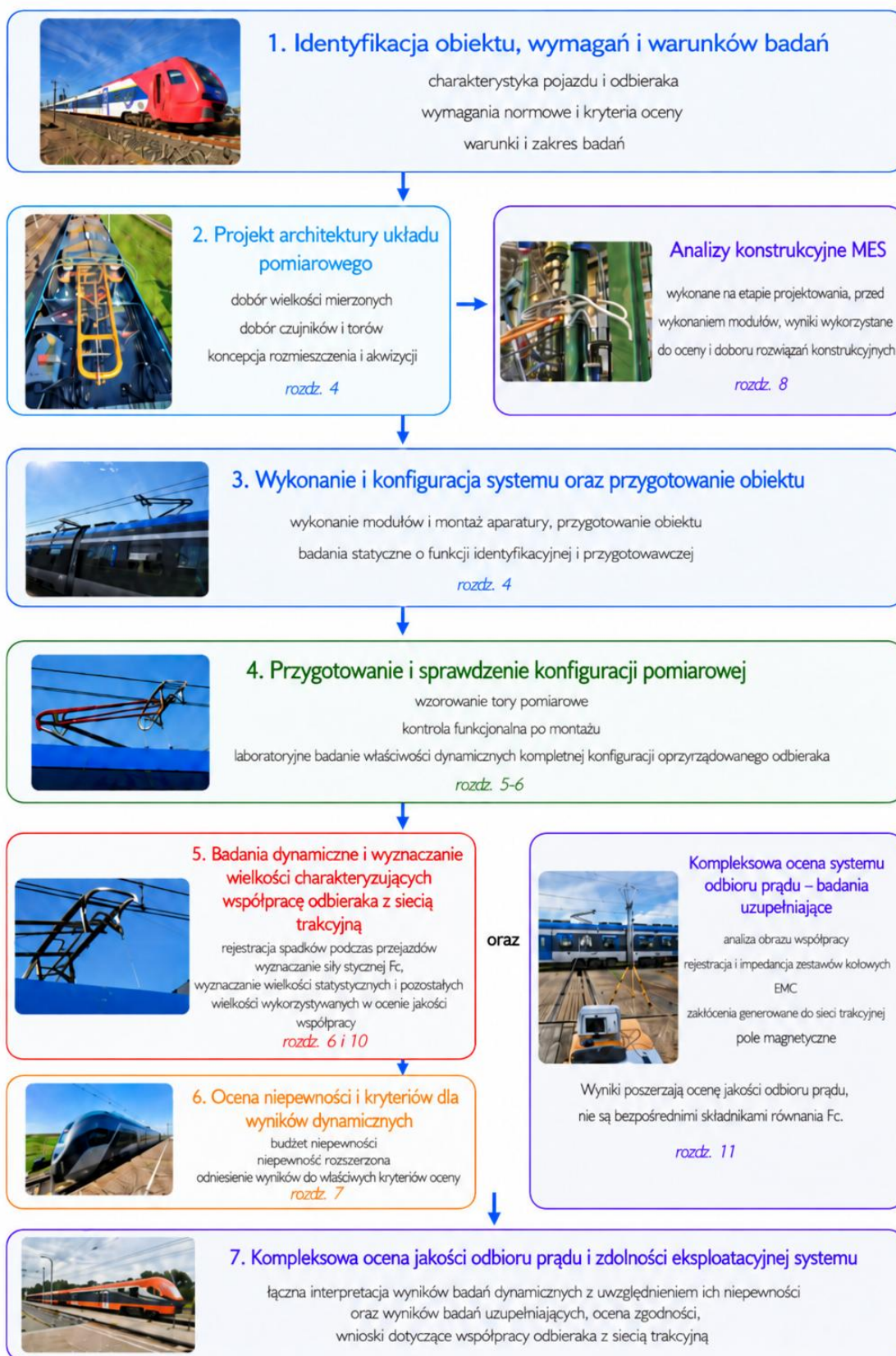
Przyjęty podział procesu na przygotowanie obiektu i układu pomiarowego, działania służące zapewnieniu wiarygodności pomiarów, badania dynamiczne oraz odrębny blok badań uzupełniających porządkuje strukturę opracowanej metodyki. Pozwala zachować logiczne relacje pomiędzy poszczególnymi etapami bez przypisywania im wspólnego modelu pomiaru.

Cechą opracowanej koncepcji jest funkcjonalne powiązanie etapów przygotowania, pomiaru, przetwarzania i oceny oraz możliwość rozszerzenia interpretacji o wyniki badań uzupełniających.

Tak uporządkowana koncepcja stanowi podstawę dalszych rozdziałów rozprawy, w których przedstawiono techniczną realizację układu pomiarowego, model wyznaczania siły stykowej, procedurę badań, ocenę niepewności oraz wyniki eksperymentalnej weryfikacji opracowanej metodyki.

3.4 Schemat koncepcyjny opracowanej metodyki

Na rys. 3.1 przedstawiono schemat koncepcyjny opracowanej metodyki pomiarowo-analitycznej. Schemat porządkuje główne elementy procesu badawczego oraz wskazuje ich wzajemne zależności od identyfikacji obiektu i wymagań poprzez projektowanie i przygotowanie układu pomiarowego, określenie modeli i procedur przetwarzania danych do realizacji badań, oceny niepewności oraz interpretacji wyników. Badania uzupełniające przedstawiono jako odrębny blok rozszerzający zakres informacji diagnostycznych o badanym pojeździe i jego współpracy z infrastrukturą, bez włączania ich wyników do modelu wyznaczania siły stykowej $F_c(t)$. Szczegółową realizację poszczególnych etapów przedstawiono w kolejnych rozdziałach rozprawy.



Rys. 3.1. Schemat koncepcyjny opracowanej metodyki pomiarowo-analitycznej

4 Układ pomiarowy i przygotowanie obiektu badań

W rozdziale 3 określono koncepcję procesu pomiarowo-analitycznego i zależności pomiędzy jego etapami. W niniejszym rozdziale przedstawiono techniczną realizację tej koncepcji: architekturę systemu, rzeczywiście zastosowane tory pomiarowe i rejestracyjne, sposób przygotowania obiektu oraz aparaturę wykorzystaną w badaniach. Model wyznaczania siły stykowej oraz szczegółową procedurę postępowania badawczego przedstawiono odpowiednio w rozdziałach 5 i 6.

4.1 Wymagania i architektura układu pomiarowego

Wymagania projektowe odniesiono do funkcji układu w całym procesie badawczym, natomiast rzeczywiście zastosowane tory pomiarowe i ich funkcje przedstawiono odrębnie w podrozdziale 4.2.

Układ pomiarowy stanowi techniczną realizację jednego z podstawowych elementów opracowanej metodyki badań dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią jezdnią. Jego zadaniem jest pozyskiwanie wielkości niezbędnych do wyznaczania siły stykowej $F_c(t)$ oraz danych wykorzystywanych w pozostałych elementach oceny badanego systemu. W ramach pracy opracowano modułową architekturę układu, umożliwiającą dostosowanie konfiguracji do rodzaju pojazdu, typu odbieraka i zakresu wykonywanych pomiarów. Rozwiązanie to wykorzystano w badaniach na potrzeby oceny zgodności, a jego struktura umożliwia również zastosowania rozwojowe i diagnostyczne.

Projektowanie układu pomiarowego poprzedzono analizą wymagań dokumentów odniesienia oraz doświadczeń wynikających z realizacji badań pojazdów szynowych. Wyjściowym dokumentem dotyczącym pomiarów oddziaływania dynamicznego była PN-EN 50317:2012 [18], [19], określająca m.in. wielkości podlegające pomiarowi, wymagania dotyczące wpływu układu pomiarowego, właściwości dynamicznych oprzyrządowanego odbieraka, parametrów rejestracji i sposobu opracowania wyników. Kryteria oceny i warunki zastosowania wyników odniesiono ponadto do PN-EN 50367 [20], [38], [114] oraz właściwych TSI [21], [22]. Na tej podstawie opracowano architekturę systemu odpowiadającą rzeczywistemu przebiegowi badań i wymaganiom metrologicznym.

Rdzeń układu służącego do wyznaczania siły stykowej zaprojektowano tak, aby zapewnić równoczesne pozyskiwanie sygnałów z czterech torów pomiaru siły i czterech

torów pomiaru przyspieszenia oraz wspólną podstawę czasu dla sygnałów wykorzystywanych łącznie w modelu $F_c(t)$. Wielkości elektryczne, środowiskowe i dane obrazowe rejestrowano jako dane towarzyszące lub w ramach odrębnych badań uzupełniających; nie stanowią one wielkości wejściowych modelu $F_c(t)$.

Jednym z wymagań projektowych było ograniczenie wpływu aparatury na właściwości dynamiczne badanego odbieraka. W projekcie przyjęto minimalizację dodatkowej masy i ingerencji w konstrukcję przy zachowaniu wymaganej sztywności i bezpieczeństwa mocowań. Na etapie projektowania, przed wykonaniem modułów pomiarowych, przeprowadzono analizy konstrukcyjne metodą elementów skończonych (MES). Ich wyniki wykorzystano do oceny i doboru elementów mocujących oraz ich parametrów konstrukcyjnych. Szczegółowe założenia modeli, warunki brzegowe i wyniki analiz przedstawiono w rozdziale 8.

Kolejnym wymaganiem było zapewnienie wiarygodności wyników uzyskiwanych z torów pomiarowych. W badaniach zastosowano cztery wzorcowane tory pomiaru siły i cztery wzorcowane tory pomiaru przyspieszenia, dla których dostępne są świadectwa wzorcowania. Po zainstalowaniu torów na odbieraku wykonywano odrębną kontrolę funkcjonalną konfiguracji, a następnie laboratoryjne badanie właściwości dynamicznych kompletnego oprzyrządowanego odbieraka zgodnie z pkt 7.5 PN-EN 50317 [18], określone w normie jako „Kalibracja układu pomiarowego”. Ocenę niepewności kluczowych wielkości wynikowych przedstawiono w rozdziale 7. Takie rozdzielenie tych etapów pozwala jednoznacznie odróżnić wzorcowanie torów i wynikającą z niego spójność pomiarową od kontroli funkcjonalnej oraz oceny właściwości dynamicznych kompletnej konfiguracji.

Architekturę układu opracowano jako konfigurowalną dla badań prowadzonych w systemach zasilania 3 kV DC, 15 kV AC (16,7 Hz) oraz 25 kV AC (50 Hz). Zakres prac badawczych obejmował infrastrukturę należącą do tych systemów, przy czym szczegółowe serie wyników prezentowane w dalszej części rozprawy dotyczą przede wszystkim konfiguracji 3 kV DC i 25 kV AC. Rozwiązania konstrukcyjne i transmisyjne dobrano z uwzględnieniem bezpieczeństwa elektrycznego, oddziaływań elektromagnetycznych oraz możliwości dostosowania aparatury do różnych konfiguracji odbieraków. Zakres zastosowalności architektury jest zatem szerszy niż zakres szczegółowo prezentowanych serii wyników.

Architektura modułowa układu pomiarowego

Główną cechą opracowanego rozwiązania jest modułowa architektura układu pomiarowego. Funkcje systemu podzielono na obszary odpowiadające poszczególnym grupom wielkości i etapom przetwarzania danych. Taka organizacja ułatwia konfigurację stanowiska, diagnostykę torów oraz wymianę lub rozbudowę wybranych elementów bez zmiany podstawowej struktury systemu.

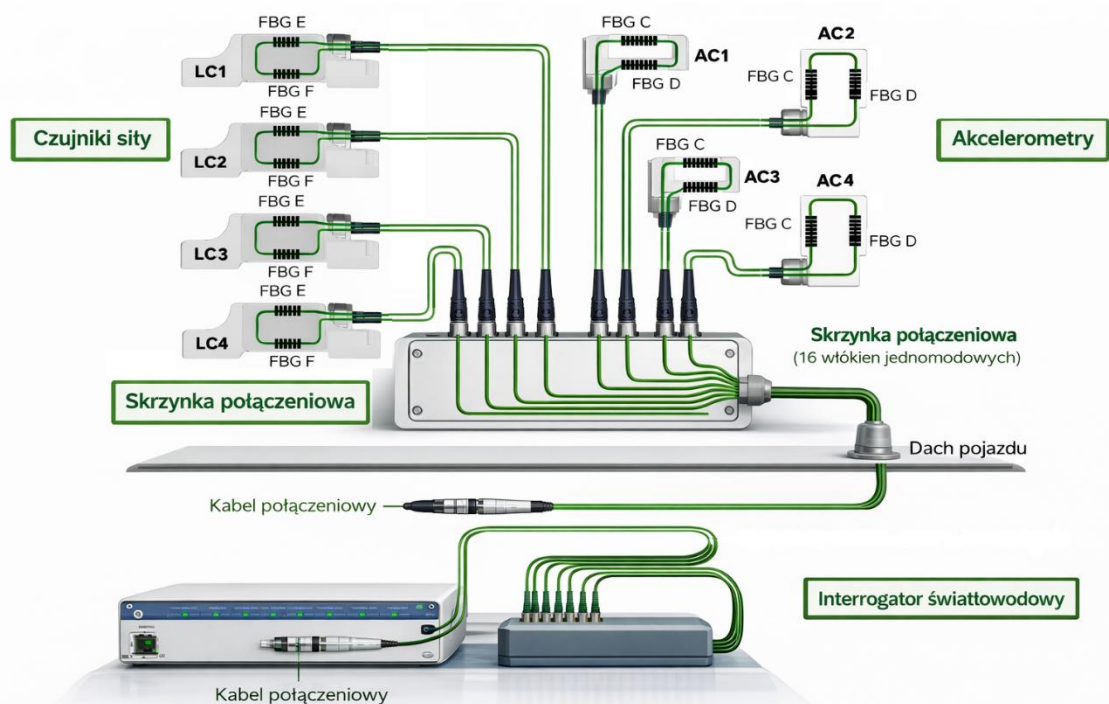
W strukturze układu wyodrębniono następujące główne obszary funkcjonalne:

- moduł pomiarów mechanicznych,
- moduł pomiarów elektrycznych,
- moduł pomiarów środowiskowych,
- moduł rejestracji obrazu,
- moduł akwizycji i magazynowania danych,
- moduł synchronizacji,
- moduł przetwarzania, wizualizacji i raportowania danych.

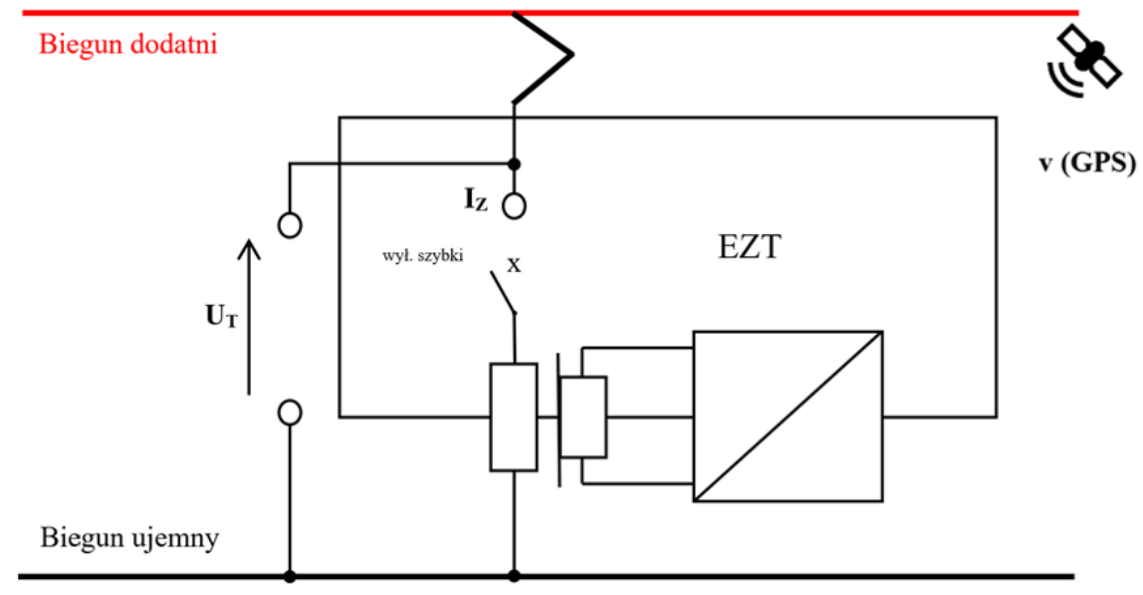
Elementy zasilania, interfejsy oraz rozwiązania integracyjne pełnią funkcje pomocnicze. Poszczególne obszary funkcjonalne realizują odrębne zadania, a ich współdziałanie zapewnia spójną realizację procesu pomiarowego w ramach opracowanego systemu. Szczegółową architekturę układu z podziałem na bloki M1–M11 przedstawiono na rys. 4.1. Sposób połączenia wybranych torów pomiarowych zilustrowano na rys. 4.2 i 4.3. Rys. 4.2 przedstawia układ do pomiaru sił i przyspieszeń, natomiast rys. 4.3 układ do pomiaru prądu i napięcia.



Rys. 4.1. Szczegółowa architektura modułowego układu pomiarowego



Rys. 4.2. Schemat połączeń układu do pomiaru sił i przyspieszeń



Rys. 4.3. Schemat połączeń układu do prądu i napięcia

W dalszej części podrozdziału scharakteryzowano poszczególne moduły, ze wskazaniem ich funkcji, wzajemnych powiązań oraz roli w opracowanym systemie pomiarowym.

Moduł pomiarów mechanicznych

Moduł pomiarów mechanicznych obejmuje zasadnicze tory wykorzystywane do wyznaczania siły stykowej $F_c(t)$: cztery wzorcowane tory pomiaru siły oraz cztery wzorcowane tory pomiaru przyspieszenia. Odrębnie realizowano pomiary przemieszczeń i uniesienia przewodu jezdnego, wykorzystywanych w ocenie według właściwych dla nich kryteriów. Lokalizację czujników i sposób ich mocowania dobierano z uwzględnieniem wymagań modelu $F_c(t)$ oraz potrzeby ograniczenia wpływu aparatury na właściwości badanego odbieraka. Podczas pomiarów służących do wyznaczenia korekcji siły aerodynamicznej wykorzystywano dodatkowo odrębne tory pomiaru sił w linkach, pracujące równocześnie z czterema torami siły FBG zamontowanymi na odbieraku.

Moduł pomiarów elektrycznych

Moduł pomiarów elektrycznych służy do rejestracji napięcia i prądu trakcyjnego oraz do pozyskiwania danych wykorzystywanych w badaniach uzupełniających. Pomiary te charakteryzują warunki zasilania i obciążenia elektrycznego pojazdu oraz są

wykorzystywane również w odrębnych analizach elektrycznych oraz elektromagnetycznych. Nie stanowią wielkości wejściowych modelu $F_c(t)$.

Moduł pomiarów środowiskowych

Moduł pomiarów środowiskowych umożliwia rejestrację lub dokumentowanie warunków towarzyszących badaniom, w szczególności temperatury, wilgotności względnej, ciśnienia atmosferycznego oraz prędkości i kierunku wiatru. Dane te wykorzystywano do opisu warunków przejazdów, oceny ich porównywalności oraz interpretacji pomiarów związanych z oddziaływaniami aerodynamicznymi.

Moduł rejestracji obrazu

Moduł rejestracji obrazu wykorzystano do dokumentowania współpracy ślizgacza z przewodem jezdny oraz do diagnostycznej identyfikacji wybranych zdarzeń. Materiał wideo nie stanowi wielkości wejściowej modelu $F_c(t)$ i nie przypisuje mu się funkcji metrologicznej równorzędnej z torami siły i przyspieszenia.

Moduł akwizycji i magazynowania danych

Moduł akwizycji i magazynowania danych zapewnia rejestrację sygnałów oraz ich zapis w postaci umożliwiającej dalsze przetwarzanie. Dla torów wykorzystywanych w modelu $F_c(t)$ parametry akwizycji dobrano z uwzględnieniem wymagań PN-EN 50317 [18], [19], badanego pasma częstotliwości oraz wymaganej częstotliwości próbkowania. Cztery sygnały siły i cztery sygnały przyspieszenia pozyskiwano równocześnie za pomocą jednego ośmiokanałowego interrogatora światłowodowego i rejestrowano we wspólnym środowisku akwizycji, co zapewniało wspólną podstawę czasu dla ośmiu kanałów wykorzystywanych łącznie w modelu $F_c(t)$.

Moduł synchronizacji

Synchronizacja ma znaczenie przede wszystkim dla sygnałów łączonych w modelu $F_c(t)$, tj. czterech sygnałów siły i czterech sygnałów przyspieszenia. Wspólna podstawa czasu tych ośmiu kanałów wynikała z ich równoczesnego pozyskiwania przez jeden wielokanałowy interrogator. Dla pozostałych rejestracji wymagany poziom zgodności czasowej wynika z celu konkretnej analizy; nie zakłada się automatycznie wspólnej podstawy czasu z torami FBG, jeżeli nie została ona potwierdzona dla danej konfiguracji.

Moduł przetwarzania, wizualizacji i raportowania danych

Moduł przetwarzania, wizualizacji i raportowania danych odpowiada za filtrację i przetwarzanie sygnałów, wyznaczanie przebiegu siły stykowej $F_c(t)$, obliczanie wymaganych charakterystyk statystycznych oraz przygotowanie wyników do oceny zgodności i sprawozdania z badań. Odrębnie przeprowadzono laboratoryjne badanie właściwości dynamicznych kompletnej konfiguracji, w którym na podstawie relacji pomiędzy $F_{measured}$ i $F_{applied}$ wyznaczono wartość bezwzględną funkcji przenoszenia i wskaźnik J . Korekcję siły aerodynamicznej $F_{corr,aero}(v)$ wyznaczano w odrębnej procedurze, a następnie wykorzystywano jako wielkość wejściową modelu $F_c(t)$. W pomiarze służącym do wyznaczenia tej korekcji siły w linkach oraz wskazania czterech torów siły FBG rejestrowano równocześnie.

Integracja modułów w ramach metodyki

Integracja modułów polega na zapewnieniu spójnego przepływu danych i wspólnej organizacji procesu badawczego. Nie wszystkie moduły dostarczają danych do jednego modelu matematycznego: w modelu $F_c(t)$ wykorzystywane są sygnały siły i przyspieszenia, masa m_{above} oraz korekcja siły aerodynamicznej $F_{corr,aero}(v)$, natomiast pomiary przemieszczeń, wielkości elektrycznych i środowiskowych oraz rejestracja obrazu realizują odrębne funkcje pomiarowe, dokumentacyjne lub diagnostyczne.

Modułowa architektura umożliwia zmianę konfiguracji aparatury bez ingerencji w rdzeń torów wykorzystywanych do wyznaczania $F_c(t)$. W rozprawie opisano funkcje rzeczywiście zrealizowane i wykorzystane w przeprowadzonych badaniach, natomiast potencjalne rozszerzenia systemu przedstawiono odrębnie jako kierunki dalszych prac.

Opracowany układ pomiarowy stanowi techniczną podstawę realizacji metodyki. Rdzeń pomiarowy modelu $F_c(t)$ tworzą wzorcowane tory siły i przyspieszenia wraz ze wspólną podstawą czasu. Po ich montażu wykonywano kontrolę funkcjonalną konfiguracji, a kompletny oprzyrządowany odbierak poddawano odrębnemu laboratoryjnemu badaniu właściwości dynamicznych. Ocena niepewności stanowi odrębny etap charakteryzowania kluczowych wyników. Pozostałe moduły rozszerzają zakres informacji o warunkach i przebiegu badania, lecz są interpretowane zgodnie z właściwą im funkcją. Syntezę podstawowych wymagań funkcjonalnych opracowanego układu pomiarowego wraz z określeniem ich znaczenia dla procesu pomiarowego przedstawiono w tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Wymagania funkcjonalne układu pomiarowego

Obszar	Wymaganie	Znaczenie
Metrologia	wzorcowanie torów siły i przyspieszenia; udokumentowana spójność pomiarowa w zakresie objętym wzorcowaniem	podstawa zapewniania oceny wiarygodności wyniku $F_c(t)$
Dynamika	parametry akwizycji dobrane z uwzględnieniem wymagań badania	odtworzenie wymaganych składowych dynamicznych
Synchronizacja	wspólna podstawa czasu dla sygnałów łączonych w modelu $F_c(t)$	zgodne czasowo wyznaczanie $F_c(t)$
Konstrukcja	ograniczony wpływ masy i sztywności aparatury; weryfikacja rozwiązań z wykorzystaniem MES	ograniczenie wpływu układu pomiarowego na dynamikę odbieraka
Eksploatacja	odporność na warunki środowiska kolejowego i oddziaływania elektromagnetyczne	realizacja badań terenowych w różnych systemach zasilania

4.2 Tory pomiarowe oraz układy rejestracji danych

W podrozdziale scharakteryzowano zastosowane tory pomiarowe i rejestracyjne, wskazując mierzone lub rejestrowane wielkości, ich funkcję w metodyce oraz znaczenie dla wiarygodności wyników. Tor pomiarowy traktuje się jako łańcuch elementów obejmujący czujnik, transmisję, przetwarzanie sygnału, jeżeli występuje, oraz układ rejestracji. Elementy mocujące i konstrukcja odbieraka mogą wpływać na odpowiedź kompletnej konfiguracji, nie są jednak automatycznie objęte zakresem wzorcowania toru, jeżeli świadectwo wzorcowania ich nie obejmuje. Rozróżnienie to jest ważne dla jednoznacznego określenia zakresu udokumentowanej spójności pomiarowej oraz dla późniejszej identyfikacji i oceny składników niepewności.

Dynamiczna współpraca odbieraka prądu z siecią jezdnią jest zjawiskiem złożonym. Wyznaczenie siły stykowej $F_c(t)$ wymaga łącznego wykorzystania zgodnych czasowo sygnałów z torów pomiaru siły i przyspieszenia oraz uwzględnienia pozostałych wielkości wejściowych modelu. Inne tory służą do wyznaczania odrębnych wielkości, dokumentowania warunków badania lub prowadzenia analiz uzupełniających. Opracowany system ma zatem charakter zintegrowany funkcjonalnie i organizacyjnie, jednak poszczególne grupy danych pomiarów są interpretowane zgodnie z właściwymi im modelami, procedurami i celami badawczymi.

W opracowanym systemie wyróżniono sześć zasadniczych grup torów pomiarowych i rejestracyjnych:

- tor pomiaru siły,
- tor pomiaru przyspieszeń,
- tor pomiaru przemieszczeń,
- tor pomiarów elektrycznych,
- tor pomiarów środowiskowych,
- układ rejestracji obrazu.

Podział obejmuje zarówno tory dostarczające sygnałów wykorzystywanych w modelu $F_c(t)$, jak i tory oraz układy rejestracyjne realizujące inne kryteria i badania uzupełniające. W modelu $F_c(t)$ bezpośrednio wykorzystywane są sygnały z torów pomiaru siły i przyspieszenia, natomiast pomiary przemieszczeń, wielkości elektrycznych i środowiskowych oraz rejestracja obrazu zachowują funkcje właściwe dla odpowiadających im wielkości i celów badawczych.

Tory pomiaru siły

Tor pomiaru siły dostarcza sygnału $F_{sensor,j}(t)$. W badaniach zastosowano cztery wzorcowane tory pomiaru siły, a ich chwilowe wskazania sumowano w modelu $F_c(t)$.

Opisane powyżej cztery tory pomiaru siły są torami FBG zamontowanymi na oprzyrządowanym odbieraku. Niezależnie od nich podczas pomiaru aerodynamicznego stosowano odrębne tory pomiaru sił w linkach. W tym samym pomiarze aerodynamicznym rejestrowano równocześnie siły w linkach oraz sygnały czterech torów FBG na odbieraku. Z pomiaru sił w linkach wyznaczano całkowitą średnią siłę unoszącą $F_s(v)$, natomiast z sygnałów FBG – średnią w czasie z sumy wskazań czujników. Różnica tych dwóch wielkości stanowiła korekcję siły aerodynamicznej $F_{corr,aero}(v)$, zgodnie z procedurą przedstawioną w podrozdziale 5.3.

W torach siły zastosowano technikę światłowodową z czujnikami opartymi na siatkach Bragga (FBG). Rozwiązanie wybrano ze względu na właściwości mające znaczenie w środowisku trakcyjnym:

- odporność transmisji światłowodowej na zakłócenia elektromagnetyczne,
- możliwość pracy elementów pomiarowych w bezpośrednim sąsiedztwie sieci trakcyjnej,
- separację galwaniczną właściwą dla zastosowanej transmisji światłowodowej,
- właściwości metrologiczne potwierdzone wzorcowaniem,

- niewielką masę elementów montowanych na odbieraku.

Transmisja światłowodowa ogranicza podatność połączeń sygnałowych na oddziaływania elektromagnetyczne i zapewnia separację galwaniczną. Nie eliminuje to potrzeby oceny kompletnego toru pomiarowego oraz wpływu konfiguracji na odpowiedź oprzyrządowanego odbieraka.

Sygnały z czterech torów pomiaru siły stanowią wielkości wejściowe modelu $F_c(t)$, a ich udział w wyniku wyznacza się przez sumowanie chwilowych wskazań. Wskaźnika J nie stosuje się do przeliczania tych sygnałów ani jako współczynnika korekcyjnego modelu $F_c(t)$.

Tory pomiaru przyspieszenia

Drugą podstawową grupę stanowią tory pomiaru przyspieszenia. W badaniach zastosowano cztery wzorcowane tory pomiaru przyspieszenia. Sygnały $a_{sensor,j}$, wraz z masą m_{above} części odbieraka znajdujących się pomiędzy punktami pomiaru siły a punktem styku, wykorzystywano do wyznaczania członu bezwładnościowego.

Pomiary przyspieszeń rejestrowały odpowiedź dynamiczną odpowiednich ruchomych części odbieraka i dostarczały sygnałów wykorzystywanych do wyznaczania członu bezwładnościowego w modelu $F_c(t)$.

Uwzględnienie przyspieszeń pozwala określić wpływ sił bezwładności części odbieraka znajdujących się pomiędzy punktami pomiaru siły a punktem styku. Z tego względu tory te stanowią integralny element modelu $F_c(t)$ zgodnego z wymaganiami PN-EN 50317 [18], [19].

Tory pomiaru przemieszczeń

Kolejnym elementem systemu jest tor pomiaru przemieszczeń. Obejmuje on pomiar:

- uniesienia przewodu jezdnego,
- przemieszczeń ślizgacza,
- względnego ruchu pomiędzy odbierakiem a przewodem jezdnym.

Informacje z toru przemieszczeń wykorzystywano przede wszystkim do oceny uniesienia przewodu i ruchu elementów odbieraka zgodnie z właściwymi kryteriami odniesienia.

Przebiegi przemieszczeń mogą wspierać interpretację zmian obserwowanych podczas badania, jeżeli dostępne dane mają odpowiednią relację czasową. Zależności

między geometrią przewodu jezdni, przemieszczeniem i przebiegiem siły stykowej nie przyjęto jednak jako założenia modelu wyznaczania $F_c(t)$.

Tory pomiarów elektrycznych

Tory pomiarów elektrycznych obejmuje przede wszystkim rejestrację:

- napięcia trakcyjnego,
- prądu pobieranego przez pojazd.

Pomiary elektryczne nie służą bezpośrednio do wyznaczania siły stykowej $F_c(t)$, lecz charakteryzują warunki zasilania i obciążenia elektrycznego pojazdu.

Wykorzystywano je do:

- określania warunków obciążenia elektrycznego podczas przejazdu,
- czasowego zestawiania parametrów elektrycznych z przebiegiem badania,
- prowadzenia odrębnych analiz zakłóceń przewodzonych,
- interpretacji wyników badań kompatybilności elektromagnetycznej.

Tory elektryczne rozszerzają opis warunków badania i umożliwiają prowadzenie odrębnych analiz elektrycznych oraz elektromagnetycznych. Dane te mogą być zestawiane z wynikami mechanicznymi, jeżeli zapewniono odpowiednie odniesienie czasowe, lecz nie stanowią wielkości wejściowych modelu $F_c(t)$.

Tory pomiarów środowiskowych

Tory pomiarów środowiskowych służą do rejestracji lub dokumentowania warunków badań, w szczególności temperatury, wilgotności względnej, ciśnienia atmosferycznego oraz prędkości i kierunku wiatru. Dane te wykorzystuje się przy ocenie porównywalności przejazdów i interpretacji oddziaływań aerodynamicznych, nie są one wielkościami wejściowymi modelu $F_c(t)$.

Układ rejestracji obrazu

Uzupełnieniem systemu jest układ rejestracji obrazu wykorzystujący kamerę umieszczoną na dachu pojazdu. Materiał obrazowy służy do dokumentowania przebiegu współpracy odbieraka z przewodem jezdni oraz diagnostycznej identyfikacji zdarzeń obserwowalnych wizualnie.

Analiza obrazu umożliwia obserwację:

- chwilowych utrat kontaktu,
- lokalnych drgań ślizgacza,

- przejazdu przez elementy specjalne sieci,
- ewentualnych wyładowań łukowych.

Tor optyczny pełni w rozprawie funkcję dokumentacyjną i diagnostyczną oraz wspiera interpretację wybranych zdarzeń obserwowalnych podczas przejazdu.

Materiał wideo wykorzystywano przede wszystkim do celów dokumentacyjnych i diagnostycznych. Rejestrowano go w systemie wspólnym z kanałami elektrycznymi, z wykorzystaniem tej samej podstawy czasu dla tych rejestracji. Częstotliwość zapisu obrazu wynosiła 30–48 kl./s. Bez odrębnego potwierdzenia wspólnej podstawy czasu z interrogatorem FBG materiału wideo nie traktuje się jako podstawy metrologicznego przypisywania zdarzeń do pojedynczych wartości $F_c(t)$.

Synchronizacja torów pomiarowych

Dla torów wykorzystywanych łącznie w obliczeniach konieczne jest zachowanie wspólnej podstawy czasu. W modelu $F_c(t)$ dotyczy to czterech torów pomiaru siły i czterech torów pomiaru przyspieszenia. Sygnały te pozyskiwano równocześnie za pomocą jednego ośmiokanałowego interrogatora światłowodowego i rejestrowano we wspólnym środowisku CatmanEasy v. 5.5. Dla pozostałych rejestracji wymagany poziom synchronizacji wynika z celu danej analizy.

Synchronizacja ma zasadnicze znaczenie dla:

- prawidłowego łączenia sygnałów siły i przyspieszenia podczas wyznaczania $F_c(t)$,
- analizy szybkozmiennych składowych sygnałów wymagających wspólnego odniesienia czasowego,
- czasowego zestawiania przebiegów mechanicznych z innymi rejestracjami, jeżeli dla danej konfiguracji potwierdzono odpowiednie odniesienie czasowe,
- analizy krótkotrwałych zdarzeń w obrębie zsynchronizowanych torów.

Niezgodność czasowa sygnałów siły i przyspieszenia może wpływać na wynik wyznaczania $F_c(t)$, szczególnie w zakresie składowych szybkozmiennych. Z tego względu wspólna podstawa czasu tych torów stanowi istotną właściwość funkcjonalną rdzenia systemu pomiarowego i jest uwzględniana przy ocenie jakości danych.

Rola torów i układów rejestracyjnych w metodyce

Architekturę torów podporządkowano ich funkcjom pomiarowym i rejestracyjnym. Tory siły i przyspieszenia dostarczają sygnałów wykorzystywanych w modelu $F_c(t)$, tory przemieszczeń służą do oceny uniesienia przewodu jezdnego i ruchu odbieraka, tory

elektryczne do charakterystyki warunków zasilania oraz odrębnych badań elektrycznych i elektromagnetycznych, tory środowiskowe do dokumentowania warunków przejazdów i interpretacji oddziaływań aerodynamicznych, a układ rejestracji obrazu do dokumentacji i analiz diagnostycznych.

Zestawienie poszczególnych torów pomiarowych, rejestrowanych wielkości oraz ich funkcji w opracowanej metodyce przedstawiono w tab. 4.2.

Tabela 4.2. Tory pomiarowe i rejestracyjne oraz ich funkcje w metodyce

Tor pomiarowy	Rejestrowane wielkości	Funkcja w metodyce
Tory pomiaru siły z czujnikami FBG	$F_{sensor,j}(t)$	sygnały wejściowe modelu $F_c(t)$; podczas pomiaru aerodynamicznego również sygnały do wyznaczenia średniej w czasie z sumy wskazań czujników FBG
Tory pomiaru sił w linkach	siły w linkach	wyznaczanie całkowitej średniej siły unoszącej $F_s(v)$ podczas pomiaru aerodynamicznego; rejestracja równoczesna z torami siły FBG na odbieraku
Tory przyspieszeń	$a_{sensor,j}(t)$	sygnały do wyznaczania członu bezwładnościowego w modelu $F_c(t)$
Tory przemieszczeń	s, s_u	ocena uniesienia przewodu jezdnego i ruchu odbieraka
Tory elektryczne	U_t, I_t	charakterystyka warunków zasilania i dane do odrębnych analiz elektrycznych oraz elektromagnetycznych
Tory pomiarów środowiskowych	T_{amb}, RH, p, V_w, Dir	dokumentowanie warunków badań i interpretacja oddziaływań aerodynamicznych
Układy rejestracji obrazu	sekwencje wideo	dokumentacja i diagnostyczna identyfikacja wybranych zdarzeń

Tabela odzwierciedla funkcje poszczególnych torów przedstawione w opracowanej metodyce.

Znaczenie metrologiczne

Z punktu widzenia metrologii szczególne znaczenie mają tory pomiarowe, których wskazania są wykorzystywane w modelu $F_c(t)$. Zastosowane cztery tory pomiaru siły i cztery tory pomiaru przyspieszenia były wzorcowane i posiadały świadectwa wzorcowania. Dla pozostałych torów sposób potwierdzania ich właściwości wynika z funkcji i znaczenia w konkretnym badaniu; nie przypisuje się im automatycznie takiego

samego statusu metrologicznego jak torom objętym wzorcowaniem i wykorzystywanym w modelu $F_c(t)$. Dla wielkości wejściowych modelu określa się w szczególności:

- wielkość mierzoną i charakterystyki zastosowanego czujnika lub toru,
- dane ze wzorcowania lub inne właściwe informacje dotyczące właściwości metrologicznych zastosowanego toru,
- źródła niepewności związane z daną wielkością wejściową,
- wpływ wielkości wejściowej na wynik modelu.

Takie ujęcie umożliwia zbudowanie budżetu niepewności dla określonej wielkości wynikowej, w szczególności $F_c(t)$, na podstawie rzeczywistych danych metrologicznych właściwych dla zastosowanych torów i przyjętego modelu. Nie oznacza to, że każdy tor lub układ rejestracyjny wymieniony w rozdziale wnosi składową do budżetu niepewności $F_c(t)$.

Opracowane tory i układy rejestracyjne tworzą modułowy system pozyskiwania danych. Rdzeń pomiarowy modelu $F_c(t)$ stanowią wzorcowane tory siły i przyspieszenia wraz ze wspólną podstawą czasu. W zakresie objętym wzorcowaniem spójność pomiarowa jest udokumentowana odpowiednimi świadectwami. Pozostałe tory realizują odrębne funkcje pomiarowe, dokumentacyjne i diagnostyczne. Wiarygodność wyników zapewnia się przez właściwości metrologiczne odpowiednich torów, prawidłową konfigurację i kontrolę funkcjonalną, zastosowanie właściwych modeli oraz ocenę niepewności.

4.3 Montaż aparatury i przygotowanie obiektu do badań

Jednym z warunków uzyskania wiarygodnych wyników badań dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią jezdnią jest właściwe przygotowanie badanego obiektu oraz prawidłowy montaż aparatury pomiarowej. W opracowanej metodyce zagadnienie to traktuje się jako integralny element procesu pomiarowo-analitycznego, ponieważ konfiguracja aparatury może wpływać na odpowiedź oprzyrządowanego odbieraka, wiarygodność uzyskiwanych wyników oraz ich porównywalność pomiędzy kolejnymi badaniami.

W opracowanej metodyce przyjęto udokumentowany i możliwie powtarzalny sposób przygotowania obiektu, montażu i konfiguracji aparatury. Standaryzacja tych czynności wspiera porównywalność wyników uzyskiwanych dla różnych pojazdów i kampanii

badawczych, a dokumentowanie konfiguracji pozwala odtworzyć warunki istotne dla późniejszej analizy.

Założenia procesu przygotowania obiektu

W badaniach zrealizowanych w ramach pracy przygotowanie pojazdu rozpoczynano od identyfikacji obiektu i oceny jego stanu technicznego. Wykonywano oględziny odbieraka, kontrolowano stan i zużycie elementów ślizgowych oraz sprawdzano kompletność wyposażenia pomiarowego. Weryfikowano również działanie głównych podzespołów badanego odbieraka i gotowość aparatury do dalszych etapów badania.

Równocześnie określano dane identyfikacyjne pojazdu i konfiguracji badań, obejmujące między innymi:

- typ i numer pojazdu,
- rodzaj oraz typ odbieraka prądu,
- system zasilania trakcyjnego,
- konfigurację odbieraków wykorzystywanych podczas badań,
- planowany zakres prędkości,
- charakterystykę odcinka pomiarowego, w tym typ sieci jezdnej i jej wysokość.

Informacje te włączano do dokumentacji badawczej i wykorzystywano przy późniejszej interpretacji wyników.

Wymagania dotyczące montażu aparatury

Projektując sposób montażu aparatury, przyjęto zasadę możliwie małej ingerencji w konstrukcję odbieraka. Elementy systemu mocowano w sposób zapewniający wymaganą sztywność i bezpieczeństwo, przy jednoczesnym ograniczeniu dodatkowej masy oraz wpływu mocowań na ruch odbieraka.

Podczas projektowania mocowań uwzględniono następujące wymagania:

- zachowanie oryginalnej geometrii odbieraka,
- ograniczenie dodatkowej masy elementów pomiarowych,
- możliwość łatwego demontażu aparatury,
- odporność mocowań na drgania i obciążenia dynamiczne,
- bezpieczeństwo elektryczne podczas pracy pod napięciem trakcyjnym.

Przed wykonaniem modułów pomiarowych przeprowadzono analizy konstrukcyjne metodą elementów skończonych (MES). Ich wyniki wykorzystano do oceny projektowanych elementów mocujących, doboru ich parametrów konstrukcyjnych oraz

ograniczenia wpływu dodatkowych elementów na właściwości mechaniczne odbieraka. Szczegółowe założenia modelu, warunki brzegowe oraz wyniki analiz przedstawiono w rozdziale 8.

Montaż czujników pomiarowych

Jednym z ważniejszych etapów przygotowania stanowiska był montaż czujników siły i przyspieszenia. Ich rozmieszczenie podporządkowano strukturze równania $F_c(t)$ oraz geometrii konkretnego badanego odbieraka.

Zgodnie z PN-EN 50317 [18], [19] czujniki siły lokalizuje się możliwie blisko punktów styku i konfiguruje do pomiaru pionowej składowej siły stykowej. W zastosowanych konfiguracjach położenie czujników i elementów mocujących dobierano tak, aby ograniczyć udział odkształceń i ruchów konstrukcji niewchodzących do mierzonej składowej. Wymagania dotyczące kompensacji wpływu temperatury odnoszono do właściwości zastosowanych torów pomiarowych.

Akcelerometry rozmieszczono na ruchomych częściach odbieraka w miejscach umożliwiających poprawne wyznaczenie członu bezwładnościowego. Lokalizację czujników dobrano z uwzględnieniem ruchu części objętych masą m_{above} oraz potrzeby ograniczenia wpływu lokalnych drgań mocowań na rejestrowany sygnał.

Aparaturę torów pomiaru napięcia i prądu instalowano zgodnie z wymaganiami dotyczącymi bezpieczeństwa elektrycznego oraz kompatybilności elektromagnetycznej. W tej części systemu stosowano również odniesienie czasowe GPS. Zależności czasowe pomiędzy danymi z różnych grup rejestracji wykorzystywano wyłącznie w zakresie potwierdzonym dla danej konfiguracji pomiarowej.

Prowadzenie przewodów i organizacja instalacji

Istotnym elementem przygotowania stanowiska jest sposób prowadzenia przewodów pomiarowych. W opracowanej metodyce przyjęto, że trasy przewodów powinny:

- nie ograniczać ruchu odbieraka,
- nie powodować dodatkowych obciążeń mechanicznych,
- być zabezpieczone przed uszkodzeniami,
- być prowadzone w sposób ograniczający możliwość wprowadzania zakłóceń do torów pomiarowych.

Zastosowanie transmisji światłowodowej ogranicza podatność połączeń sygnałowych na zakłócenia elektromagnetyczne i zapewnia separację galwaniczną.

W ocenie kompletnego systemu uwzględnia się jednak również wpływy pochodzące od pozostałych elementów aparatury i sposobu jej instalacji.

Kontrola geometrii odbieraka

Po zakończeniu montażu wykonywano kontrolę geometrii odbieraka oraz poprawności instalacji aparatury. W szczególności sprawdzano:

- położenie nakładek ślizgowych,
- poprawność ustawienia czujników,
- brak kolizji elementów pomiarowych z konstrukcją odbieraka,
- swobodę ruchu wszystkich części ruchomych,
- zachowanie wymaganych bezpiecznych odległości izolacyjnych.

Po montażu potwierdzano zachowanie wymaganej geometrii i swobody ruchu odbieraka. Warunki ustawienia stosowane przy wyznaczaniu całkowitej średniej siły unoszącej $F_s(v)$ opisano w rozdziale 6, ponieważ dotyczą odrębnego etapu procedury wyznaczania korekcji siły aerodynamicznej.

Weryfikacja działania układu pomiarowego

Po zainstalowaniu aparatury wykonywano kontrolę funkcjonalną konfiguracji pomiarowej, odrębną zarówno od wzorcowania torów, jak i od laboratoryjnego badania kompletnego oprzyrządowanego odbieraka zgodnie z pkt 7.5 PN-EN 50317:2012 [18].

W ramach kontroli funkcjonalnej sprawdzano reakcję poszczególnych torów na wymuszenie, poprawność rejestracji i komunikacji, zgodność czasową sygnałów oraz wykonywano zapis próbny. Wyniki wykonanych czynności dokumentowano w zapisach technicznych prowadzonych w laboratorium.

Po pozytywnym wyniku kontroli funkcjonalnej przechodzono do laboratoryjnego badania właściwości dynamicznych oprzyrządowanego odbieraka zgodnie z pkt 7.5 PN-EN 50317:2012 [18]. Etapu kontroli funkcjonalnej nie utożsamia się ze wzorcowaniem torów ani z badaniem, w którym wyznaczany jest wskaźnik J .

Dokumentowanie konfiguracji badawczej

Konfigurację badawczą dokumentowano w sposób umożliwiający identyfikację warunków i odtworzenie kluczowych elementów instalacji. Dokumentacja obejmowała w szczególności:

- rozmieszczenie wszystkich czujników,

- sposób mocowania aparatury,
- konfigurację torów pomiarowych,
- stan techniczny odbieraka oraz stan i zużycie nakładek ślizgowych, w tym występowanie uszkodzeń i oznak zużycia.

Dokumentacja konfiguracji stanowi element zapisów badawczych i wspiera analizę porównawczą kolejnych kampanii. W warunkach terenowych, w których nie można wyeliminować zmienności warunków eksploatacyjnych, udokumentowanie konfiguracji, warunków prowadzenia badania i kompletności rejestracji ogranicza ryzyko błędnej interpretacji obserwowanych różnic.

Znaczenie metrologiczne montażu aparatury

Montaż aparatury może wpływać na wynik poprzez zmianę właściwości mechanicznych odbieraka, położenie czujników, sposób przenoszenia obciążenia lub inne efekty konfiguracji. Wpływy mające znaczenie dla wyniku identyfikuje się w odpowiednim modelu lub procedurze, uwzględnia przez właściwe poprawki tam, gdzie istnieje ku temu podstawa, a pozostały istotny wpływ rozpatruje w ocenie niepewności.

Przyjęto, że poprawność montażu wpływa bezpośrednio na trzy zasadnicze obszary:

- **poprawność realizacji pomiaru** – poprzez zapewnienie właściwej konfiguracji aparatury i ograniczenie znanych wpływów montażowych,
- **porównywalność wyników** – dzięki standaryzacji procedur montażowych i dokumentowaniu konfiguracji,
- **możliwość wykorzystania wyników w ocenie zgodności** – pod warunkiem spełnienia właściwych wymagań normowych, proceduralnych i metrologicznych.

Montaż aparatury i przygotowanie obiektu są zatem integralną częścią opracowanej metodyki, a nie wyłącznie czynnościami organizacyjnymi poprzedzającymi pomiar. W pracy połączono ograniczenie ingerencji w odbierak, projektowanie mocowań wspomagane analizami MES, kontrolę funkcjonalną po montażu oraz dokumentowanie konfiguracji. Tak przygotowany obiekt poddawano następnie laboratoryjnemu badaniu właściwości dynamicznych kompletnej konfiguracji oraz właściwym badaniom terenowym.

4.4 Aparatura pomiarowa

Realizacja badań wymagała aparatury dostosowanej do mierzonych wielkości oraz warunków pracy na pojeździe. W podstawowych torach siły i przyspieszenia zastosowano technikę światłowodową FBG, korzystną ze względu na separację galwaniczną i ograniczoną podatność transmisji na oddziaływania elektromagnetyczne. Właściwości metrologiczne czterech torów siły i czterech torów przyspieszenia określono na podstawie ich wzorcowania.

Dobór aparatury podporządkowano modelowi $F_c(t)$ oraz pozostałym celom badawczym. Wyznaczanie $F_c(t)$ wymaga równoczesnego pozyskiwania sygnałów siły i przyspieszenia ze wspólną podstawą czasu, natomiast pomiary elektryczne i środowiskowe oraz rejestracja obrazu pełnią funkcje odrębne i nie są wielkościami wejściowymi tego modelu.

Podstawę torów pomiaru siły stanowiły czujniki światłowodowe wykorzystujące siatki Bragga (FBG), zamontowane w konstrukcji odbieraka zgodnie z przyjętym rozwiązaniem mechanicznym. Zmiany sygnału optycznego przetwarzano w torze pomiarowym na wartości siły wykorzystywane następnie w modelu $F_c(t)$. Zastosowany czujnik siły przedstawiono na rysunku 4.4a.

W pomiarach aerodynamicznych wykorzystywano ponadto odrębne tory pomiaru sił w linkach. Tory te służyły do wyznaczenia całkowitej średniej siły unoszącej $F_s(v)$, przy równoczesnej rejestracji wskazań czterech czujników siły FBG na odbieraku. Nie stanowiły one bezpośrednich torów wejściowych modelu $F_c(t)$, lecz element procedury wyznaczania $F_{corr,aero}(v)$.

W układzie zastosowano również cztery wzorcowane tory pomiaru przyspieszenia z akcelerometrami światłowodowymi (rys. 4.4b). Ich wskazania wykorzystywano do wyznaczania członu bezwładnościowego modelu $F_c(t)$. Rozmieszczenie czujników oraz masa m_{above} odpowiadały rzeczywistej konfiguracji badanego odbieraka.

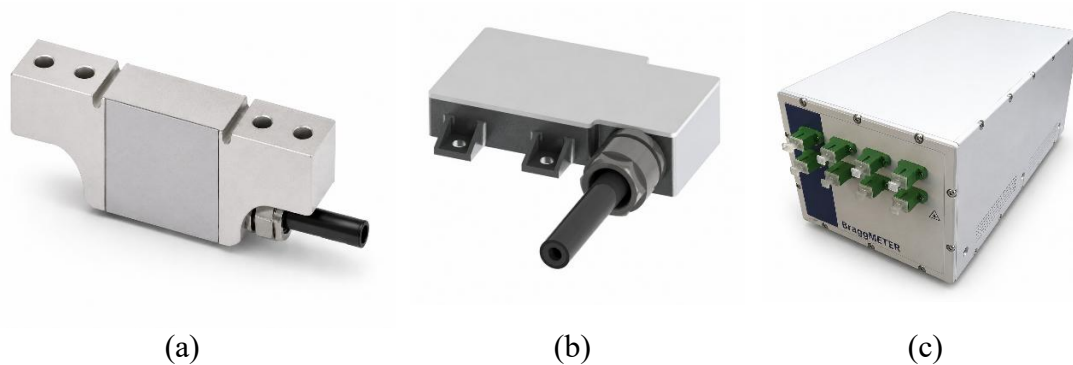
Akwizycję sygnałów z czujników FBG realizowano za pomocą wielokanałowego interrogatora światłowodowego przedstawionego na rys. 4.4c. Zastosowane urządzenie miało osiem kanałów optycznych i umożliwiało równoczesne pozyskiwanie czterech sygnałów siły oraz czterech sygnałów przyspieszenia, zapewniając im wspólną podstawę czasu. Sygnały rejestrowano we wspólnym środowisku CatmanEasy v. 5.5.

Połączenie czujników z interrogatorem zrealizowano za pomocą elementów światłowodowych części zewnętrznej i wewnętrznej systemu, przedstawionych na

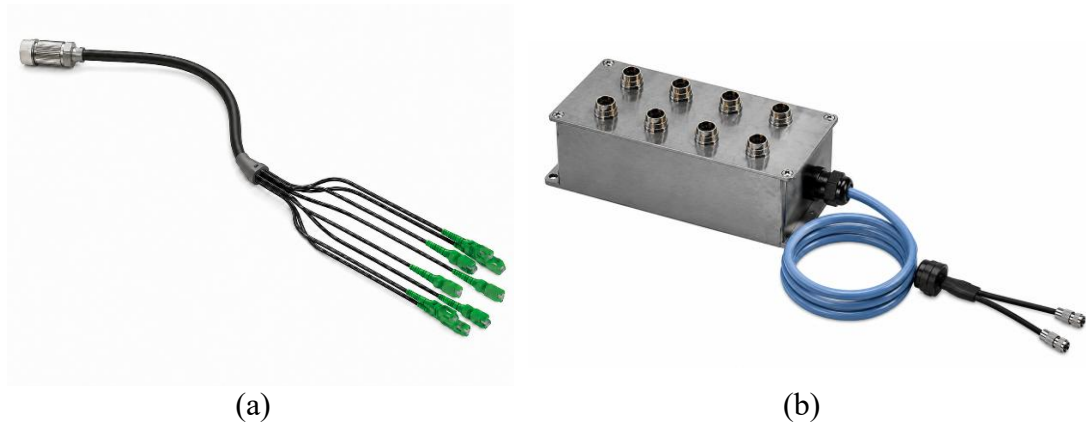
rys. 4.5. Transmisja pomiędzy czujnikami zamontowanymi na odbieraku a urządzeniem rejestrującym wewnątrz pojazdu odbywała się drogą światłowodową, co zapewniało separację galwaniczną i ograniczało podatność połączeń sygnałowych na zakłócenia elektromagnetyczne.

Kompletny zestaw aparatury pomiarowej przygotowany do badań przedstawiono na rysunku 4.6. Widoczna konfiguracja obejmuje wszystkie zasadnicze elementy systemu, począwszy od czujników pomiarowych zamontowanych na odbieraku prądu, poprzez światłowody transmisyjne, aż do urządzeń akwizycji danych. Modułowa budowa układu umożliwia dostosowanie liczby wykorzystywanych czujników do rodzaju badanego odbieraka oraz zakresu prowadzonych badań. Elementy aparatury przedstawiono na rys. 4.4 i 4.5. W dalszej analizie znaczenie mają przede wszystkim funkcje pomiarowe poszczególnych elementów, status wzorcowania torów oraz sposób ich integracji w kompletnej konfiguracji badanego odbieraka.

Zastosowana aparatura umożliwiła realizację pomiarów wymaganych w opracowanej metodyce. Tory siły i przyspieszenia były wzorcowane, po ich montażu wykonywano kontrolę funkcjonalną, a kompletny oprzyrządowany odbierak poddawano odrębnemu laboratoryjnemu badaniu właściwości dynamicznych. Taki układ etapów zapewnia logiczne przejście od potwierdzenia właściwości torów i konfiguracji do wyznaczania $F_c(t)$ w badaniach terenowych.



Rys. 4.4. Elementy torów światłowodowych: a) czujnik siły, b) akcelerometr, c) interogator



Rys. 4.5. Elementy połączeniowe systemu światłowodowego: a) część wewnętrzna, b) część zewnętrzna



Rys. 4.6. Kompletny zestaw aparatury FBG

Przedstawiona architektura, konfiguracja torów i sposób przygotowania obiektu określają techniczną realizację opracowanej metodyki. Kolejnym etapem jest zdefiniowanie zależności pomiędzy wielkościami wejściowymi a siłą stykową $F_c(t)$. Z tego względu w rozdziale 5 przedstawiono model wyznaczania siły stykowej oraz sposób określania jego wymaganych składników.

5 Model wyznaczania siły stykowej

5.1 Równanie pomiaru siły stykowej

Podstawę modelu wyznaczania siły stykowej F_c stanowi równanie określone w PN-EN 50317 [18], [19]. Równanie obejmuje sumę sił zmierzonych przez czujniki siły, człon bezwładnościowy wyznaczany na podstawie przyspieszeń i masy części odbieraka znajdujących się pomiędzy punktami pomiaru siły a punktem styku oraz korekcję siły aerodynamicznej $F_{corr,aero}$. Taka postać równania odpowiada normowemu sposobowi wyznaczania siły stykowej w pomiarach dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią jezdnią górną.

W rozprawie zachowano matematyczną postać równania normowego. Wkład autora w tym zakresie nie polegał na zmianie jego struktury, lecz na zaprojektowaniu i wykonaniu układu pomiarowego umożliwiającego pozyskanie wymaganych wielkości wejściowych, eksperymentalnym wyznaczeniu wielkości zależnych od danej konfiguracji badanego odbieraka oraz ilościowej ocenie niepewności wyniku. Dzięki temu opracowana metodyka może być stosowana w badaniach na potrzeby oceny zgodności bez modyfikowania postaci równania wyznaczania F_c przyjętej w dokumencie odniesienia.

PN-EN 50317 [18], [19] określa nie tylko postać równania F_c , lecz również wymagania dotyczące realizacji pomiaru, w tym rozmieszczenia i właściwości układu pomiarowego, uwzględnienia członu bezwładnościowego i oddziaływań aerodynamicznych, parametrów rejestracji oraz laboratoryjnego badania oprzyrządowanego odbieraka. Norma nie definiuje natomiast konkretnej realizacji sprzętowej systemu pomiarowego ani kompletnego modelu niepewności odpowiadającego zastosowanej konfiguracji.

W opracowanej metodyce wymagania normowe powiązano z działaniami służącymi zapewnieniu wiarygodności wyników pomiarów. W badaniach zastosowano wzorcowane tory pomiaru siły i przyspieszenia, a po ich zainstalowaniu na odbieraku przeprowadzono kontrolę funkcjonalną konfiguracji. Następnie kompletny oprzyrządowany odbierak poddano laboratoryjnemu badaniu zgodnie z pkt 7.5 PN-EN 50317 [18], obejmującemu wyznaczenie wartości bezwzględnej funkcji przenoszenia oraz wskaźnika J . Dla zastosowanej konfiguracji eksperymentalnie wyznaczono również

korekcję siły aerodynamicznej $F_{corr,aero}(v)$, a dla sygnałów siły i przyspieszenia wykorzystywanych łącznie w modelu $F_c(t)$ zapewniono wspólną podstawę czasu.

Uzupełnieniem realizacji wymagań normowych jest opracowana w rozprawie ilościowa ocena niepewności. Pozwala ona określić propagację niepewności wielkości wejściowych modelu do niepewności wyniku wyznaczenia siły stykowej. Szczegółowe modele i budżety niepewności przedstawiono w rozdziale 7.

W ujęciu metrologicznym $F_c(t)$ jest wielkością wyjściową modelu pomiaru, zależną od sił $F_{sensor,j}(t)$, przyspieszeń $a_{sensor,j}(t)$, masy m_{above} oraz korekcji siły aerodynamicznej $F_{corr,aero}(v)$. W równaniu (5.1) zachowano symbole bez jawnych argumentów t i v , zgodnie z postacią normową. Dla uniknięcia kolizji z indeksem i stosowanym w dalszej części dla punktów częstotliwości indeks czujnika oznaczono jako j . W opisie przebiegów i wielkości przypisanych do warunków badania stosuje się rozszerzoną notację $F_c(t)$, $F_{sensor,j}(t)$, $a_{sensor,j}(t)$ oraz $F_{corr,aero}(v)$.

$$F_c = \sum_{j=1}^{k_f} F_{sensor,j} + \frac{m_{above}}{k_a} \cdot \sum_{j=1}^{k_a} a_{sensor,j} + F_{corr,aero}, \quad (5.1)$$

F_c	– siła stykowa [N],
k_f	– liczba czujników siły [-],
$F_{sensor,j}$	– siła zmierzona przez j -ty czujnik siły [N],
m_{above}	– masa części odbieraka znajdujących się pomiędzy punktami pomiaru siły a punktem styku [kg],
k_a	– liczba czujników przyspieszenia [-],
$a_{sensor,j}$	– przyspieszenie zmierzone przez j -ty czujnik przyspieszenia [m/s ²],
$F_{corr,aero}$	– korekcja siły aerodynamicznej [N].

Sposób pozyskania wielkości wejściowych oraz właściwości metrologiczne zastosowanych torów pomiarowych wpływają na niepewność i wiarygodność wyniku wyznaczenia $F_c(t)$.

5.2 Laboratoryjne badanie właściwości dynamicznych oprzyrządowanego odbieraka – funkcja przenoszenia i wskaźnik J

Przed właściwymi badaniami dynamicznymi kompletną konfigurację oprzyrządowanego odbieraka poddano badaniu laboratoryjnemu zgodnie z pkt 7.5 PN-EN 50317 [18], który

w polskiej wersji normy nosi nazwę „Kalibracja układu pomiarowego”. W znaczeniu metrologicznym etap ten jest odrębny od wzorcowania torów pomiarowych. Celem badania była ocena właściwości dynamicznych kompletnej konfiguracji przez porównanie odpowiedzi układu pomiarowego $F_{\text{measured}}(t)$ z siłą $F_{\text{applied}}(t)$ wywieraną na ślizgacz i mierzoną niezależnym wzorcowanym torem odniesienia stanowiska 12SB w wymaganym zakresie częstotliwości, a następnie wyznaczenie wartości bezwzględnej funkcji przenoszenia H i wskaźnika J . W ujęciu ogólnometrologicznym eksperymentalne wyznaczanie charakterystyk częstotliwościowych torów pomiarowych może być prowadzone łącznie z oceną niepewności wyznaczanych parametrów i zapewnieniem spójności pomiarowej [92].

Podczas badania rejestrowano przebieg $F_{\text{applied}}(t)$ oraz sumaryczny przebieg odpowiedzi układu $F_{\text{measured}}(t)$. Sygnał $F_{\text{measured}}(t)$ wyznaczano jako sumę chwilowych wskazań czterech torów pomiaru siły, nie stosowano średniej arytmetycznej z czterech torów. Do wyznaczenia wartości bezwzględnej funkcji przenoszenia dla każdej częstotliwości f_i wykorzystuje się wartości $F_{\text{applied},i}$ i $F_{\text{measured},i}$ charakteryzujące odpowiedź dynamiczną wejścia i wyjścia przy tej częstotliwości.

Badanie pozwala wyznaczyć wartość bezwzględną funkcji przenoszenia w rozpatrywanym paśmie częstotliwości, a następnie wskaźnik J . PN-EN 50317 [18], [19] określa J jako „dokładność wartości bezwzględnej funkcji przenoszenia”. W dalszej części rozprawy stosuje się określenie „wskaźnik J ”, aby odróżnić normową nazwę tej wielkości od metrologicznego pojęcia dokładności pomiaru.

Badanie obejmuje kompletny oprzyrządowany odbierak w konfiguracji przeznaczonej do badań dynamicznych. Nie stanowi ono wzorcowania odbieraka w znaczeniu metrologicznym. Spójność pomiarowa w zakresie wielkości objętych wzorcowaniem jest udokumentowana świadectwami właściwych torów pomiarowych, natomiast badanie zgodnie z pkt 7.5 PN-EN 50317 [18] służy ocenie właściwości dynamicznych kompletnej konfiguracji na podstawie relacji pomiędzy F_{measured} i F_{applied} .

Wskaźnik J wyznaczono dla badanego oprzyrządowanego odbieraka w konfiguracji układu pomiarowego zastosowanej podczas badań. Wskaźnik J nie jest parametrem pojedynczego czujnika ani współczynnikiem korekcyjnym w modelu $F_c(t)$.

Wymaganie normowe uznaje się za spełnione, gdy wartość wskaźnika J jest większa niż 90% w zakresie częstotliwości do 20 Hz. Wynik tego badania służy do potwierdzenia właściwości dynamicznych oprzyrządowanej konfiguracji przed jej wykorzystaniem

w badaniach dynamicznych, nie zastępuje jednak wzorcowania torów pomiarowych ani oceny niepewności wyznaczenia $F_c(t)$.

Dla przejrzystości zapisu w rozprawie wprowadzono pomocnicze oznaczenie $H(f_i)$. Wartość bezwzględna funkcji przenoszenia przy częstotliwości f_i określa relacja:

$$|H(f)_i| = \left| \frac{F_{measured,i}}{F_{applied,i}} \right| \quad (5.2)$$

Na tej podstawie wskaźnik J wyznacza się według zależności:

$$J = \left(1 - \frac{1}{f_n - f_1} \sum_{i=1}^{n-1} \left((f_{i+1} - f_i) \left| 1 - \frac{F_{measured}}{F_{applied}} \right| \right) \right) * 100\%, \quad (5.3)$$

- f_n – górna granica rozpatrywanego zakresu częstotliwości [Hz],
- f_l – dolna granica rozpatrywanego zakresu częstotliwości [Hz],
- f_i – i -ta częstotliwość wymuszenia [Hz],
- n – liczba punktów częstotliwości w analizowanym zakresie [-],
- $F_{measured,i}$ – amplituda składowej sumarycznej odpowiedzi $F_{measured}(t)$ o częstotliwości f_i [N],
- $F_{applied,i}$ – amplituda składowej siły $F_{applied}(t)$ o częstotliwości f_i [N].

W równaniu (5.3) zachowano zapis normowy bez indeksu i ; symbole $F_{measured}$ i $F_{applied}$ odnoszą się w kolejnych składnikach sumy do wartości odpowiadających częstotliwości f_i .

Dla każdego punktu częstotliwości f_i amplitudy $F_{applied,i}$ i $F_{measured,i}$ wyznaczano z próbek należących do odcinka stanu ustalonego zarejestrowanych przebiegów czasowych. Jeżeli cały rekord spełniał warunek stanu ustalonego, do dopasowania wykorzystywano wszystkie jego próbki. Fragmenty obejmujące rozruch, wygaszanie wymuszenia lub inne stany przejściowe wyłączało z analizy według jednakowego kryterium. Amplitudy wyznaczano przez dopasowanie metodą najmniejszych kwadratów modelu harmonicznego zawierającego składową stałą oraz składowe sinusową i cosinusową o częstotliwości f_i . Amplitudę określano jako pierwiastek z sumy kwadratów współczynników obu składowych harmonicznym. Wartość $F_{measured,i}$ wyznaczano z sumarycznego przebiegu czterech torów pomiaru siły odbieraka. Następnie

obliczano $|H(f_i)| = F_{measured,i} / F_{applied,i}$ na podstawie pełnego zestawu punktów częstotliwości wyznaczano wskaźnik J zgodnie z PN-EN 50317 [18]. Dodatkową kontrolę sposobu wyodrębnienia odpowiedzi dynamicznej może stanowić estymacja funkcji odpowiedzi częstotliwościowej metodą Welcha.

5.3 Korekcja siły aerodynamicznej

Na wartość siły stykowej $F_c(t)$ wyznaczanej podczas jazdy wpływają siły aerodynamiczne działające na elementy odbieraka znajdujące się pomiędzy czujnikami siły a punktami styku. Ich udział zmienia się wraz z prędkością, geometrią i położeniem roboczym odbieraka oraz kierunkiem jazdy i warunkami przepływu powietrza. Z tego względu wpływ aerodynamiki musi być określony dla konfiguracji, dla której wyniki są następnie wykorzystywane w modelu $F_c(t)$.

PN-EN 50317 [18], [19] uwzględnia $F_{corr,aero}(v)$ jako składnik modelu $F_c(t)$. Zgodnie z pkt 7.4 korekcję wyznacza się na podstawie pomiaru całkowitej średniej siły unoszącej $F_s(v)$, realizowanego m.in. z wykorzystaniem linek zgodnie z pkt 6, oraz jednoczesnego pomiaru sił przez czujniki układu pomiarowego. Różnica pomiędzy $F_s(v)$ a średnią w czasie z sumy sił mierzonych przez te czujniki stanowi korekcję siły aerodynamicznej dla układu pomiarowego badanego odbieraka.

Nie należy utożsamiać korekcji $F_{corr,aero}(v)$ z siłą aerodynamiczną odbieraka $F_{aero}(v)$. Siłę aerodynamiczną określa różnica pomiędzy całkowitą średnią siłą unoszącą $F_s(v)$ a statyczną siłą stykową F_{stat} , natomiast $F_{corr,aero}(v)$ jest korekcją wykorzystywaną w modelu $F_c(t)$.

W ramach pracy procedurę tę zrealizowano zgodnie z wymaganiem pkt 7.4 PN-EN 50317 [18]. Podczas tego samego pomiaru aerodynamicznego z odbierakiem uwiązany linkami równocześnie rejestrowano siły w linkach oraz sygnały z czterech torów pomiaru siły z czujnikami wykorzystującymi światłowodowe siatki Bragga (FBG), zainstalowanych na odbieraku. Na tej podstawie dla poszczególnych punktów prędkości wyznaczono $F_s(v)$, $\bar{F}_s(v)$ oraz $F_{corr,aero}(v)$. Wyznaczone wartości $F_{corr,aero}(v)$ wykorzystano następnie przy wyznaczaniu $F_c(t)$ dla odpowiadających im warunków przejazdu dynamicznego.

Zgodnie z wymaganiem ustalenia korekcji dla zdefiniowanej konfiguracji oraz uwagą do pkt 7.4 PN-EN 50317 [18], wartość $F_{corr,aero}(v)$ zależy od konfiguracji i warunków badania. W analizowanej metodyce uwzględnia się w szczególności:

- prędkość jazdy pojazdu,
- wysokość roboczą głowicy odbieraka odpowiadającą rozpatrywanej wysokości przewodu jezdnego,
- konfigurację odbieraka i pojazdu oraz kierunek jazdy,
- konfigurację aparatury pomiarowej,
- warunki otoczenia i przepływu powietrza, w szczególności prędkość i kierunek wiatru.

Korekcja $F_{\text{corr,aero}}(v)$ nie jest uniwersalnym parametrem odbieraka, lecz wielkością przypisaną do zdefiniowanej konfiguracji pomiarowej i warunków jej wyznaczenia. W modelu $F_c(t)$ wykorzystuje się wartość odpowiadającą rozpatrywanemu punktowi prędkości, wysokości roboczej, konfiguracji odbieraka i pojazdu, konfiguracji aparatury, kierunkowi jazdy oraz warunkom otoczenia, dla których korekcję wyznaczono.

Dla jednoznaczności notacji indeks q zarezerwowano dla linek uwiązujących, natomiast indeks j dla torów pomiaru siły zainstalowanych na odbieraku. Siłę w q -tej lince oznaczono $F_{\text{cord,q}}(t)$, a jej średnią w czasie $\bar{F}_{\text{cord,q}}(v)$. Całkowita średnia siła unosząca $F_s(v)$ jest sumą tych średnich. Dla sygnałów torów pomiaru siły odbieraka rozróżniono chwilową sumę wskazań czterech torów pomiaru siły z czujnikami FBG $F_\Sigma(t)$ oraz jej średnią w czasie $\bar{F}_\Sigma(v)$. W procedurze korekcji aerodynamicznej $\bar{F}_\Sigma(v)$ wyznacza się z sygnałów tych torów rejestrowanych równocześnie z pomiarem sił w linkach, z którego wyznaczana jest $F_s(v)$, w ramach tego samego pomiaru aerodynamicznego i dla tego samego punktu prędkości. Chwilową sumę opisuje zależność:

$$F_\Sigma(t) = \sum_{j=1}^4 F_{\text{sensor},j}(t) \quad (5.4)$$

Dla N próbek analizowanego przedziału średnią w czasie wyznacza się jako:

$$\bar{F}_\Sigma(v) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{\ell=1}^N F_\Sigma(t_\ell; v) \quad (5.5)$$

Korekcję siły aerodynamicznej opisuje zależność:

$$F_{\text{corr,aero}}(v) = F_s(v) - \bar{F}_\Sigma(v) \quad (5.6)$$

$F_{\text{corr,aero}}(v)$ – korekcja siły aerodynamicznej dla prędkości v [N],

$F_s(v)$ – całkowita średnia siła unosząca, równa sumie średnich w czasie sił $\bar{F}_{\text{cord,q}}(v)$ w linkach uwiązujących z układem pomiarowym dla danego punktu prędkości [N],

$F_{\text{cord},q}(t)$	– siła zmierzona w q -tej lince uwiązującej [N],
$\bar{F}_{\text{cord},q}(v)$	– średnia w czasie wartość siły $F_{\text{cord},q}(t)$ w q -tej lince uwiązującej dla danego punktu prędkości [N],
q	– numer linki uwiązującej [-],
$F_{\Sigma}(t)$	– suma chwilowych wskazań czterech torów pomiaru siły z czujnikami FBG zainstalowanych na odbieraku [N],
$\bar{F}_{\Sigma}(v)$	– średnia w czasie z $F_{\Sigma}(t)$, wyznaczona z równocześnie rejestrowanych sygnałów czterech torów pomiaru siły z czujnikami FBG podczas tego samego pomiaru aerodynamicznego, dla którego wyznaczono $F_s(v)$ [N],
$F_{\text{sensor},j}(t)$	– siła zmierzona w j -tym torze pomiaru siły z czujnikiem FBG odbieraka [N],
N	– liczba próbek w analizowanym przedziale uśredniania [-],
ℓ	– numer próbki w analizowanym przedziale [-].

Sposób eksperymentalnego wyznaczania $F_s(v)$ i $\bar{F}_{\Sigma}(v)$ przedstawiono w rozdziale 6. W opracowanej metodyce, zgodnie z pkt 7.4 PN-EN 50317 [18], podczas tego samego pomiaru aerodynamicznego rejestrowano równocześnie wartości siły w linkach oraz wskazania czterech torów pomiaru siły z czujnikami FBG na odbieraku. Z wartości sił w linkach wyznaczano $F_s(v)$, natomiast z sygnałów tych torów wyznaczano $\bar{F}_{\Sigma}(v)$. Korekcję $F_{\text{corr,aero}}(v)$ obliczano jako różnicę tych wartości średnich dla tego samego punktu prędkości i zdefiniowanej konfiguracji, przy czym nie wykonywano odejmowania przebiegów chwilowych próbka po próbce. Pomiar aerodynamiczny stanowił odrębny etap względem późniejszych przejazdów dynamicznych służących do wyznaczania $F_c(t)$.

Wyznaczenie korekcji $F_{\text{corr,aero}}(v)$ zgodnie z pkt 7.4 PN-EN 50317 [18] stanowi realizację wymagania normowego i nie jest modyfikacją modelu $F_c(t)$. Wkład autora w tym obszarze obejmuje praktyczną implementację wymaganej procedury w zaprojektowanym systemie pomiarowym, powiązanie równocześnie pozyskiwanych wyników z modelem $F_c(t)$ oraz ilościową ocenę niepewności dla zastosowanej konfiguracji badawczej.

Pominięcie lub nieprawidłowe wyznaczenie $F_{\text{corr,aero}}(v)$ prowadzi do pozostawienia w $F_c(t)$ składowej związanej z oddziaływaniem aerodynamicznym i może przesunąć

wartość średniej siły stykowej. Wpływ na inne statystyki, w tym odchylenie standardowe, wymaga odrębnej analizy i nie jest przyjmowany a priori.

Niepewność wyznaczenia $F_{corr,aero}(v)$ oceniono w rozdziale 7 z wykorzystaniem modelu odpowiadającego rzeczywistemu sposobowi realizacji pomiaru, w którym $F_s(v)$ i $\bar{F}_\Sigma(v)$ pozyskiwano równocześnie w ramach tej samej próby aerodynamicznej.

Zdefiniowanie modelu $F_c(t)$, sposobu laboratoryjnej oceny właściwości dynamicznych oprzyrządowanego odbieraka oraz korekcji siły aerodynamicznej tworzy podstawę analityczną metodyki. W rozdziale 6 uporządkowano te elementy w kolejności czynności wykonywanych podczas realizacji badań.

6 Opracowana metodyka badań

W ramach rozprawy opracowano metodykę badań dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią jezdnią górną, integrującą przygotowanie obiektu, konfigurację układu pomiarowego, czynności kontrolne, badania laboratoryjne, pomiary wykonywane podczas jazd oraz opracowanie i weryfikację wyników. Metodyka obejmuje również, zależnie od zakresu programu badawczego, badania uzupełniające rozszerzające ocenę systemu odbioru prądu o wybrane aspekty obserwacyjne, elektryczne i elektromagnetyczne. Rozdziały 4 i 5 przedstawiają odpowiednio techniczną realizację systemu pomiarowego oraz modele i zależności wykorzystywane do wyznaczania wielkości wynikowych. W niniejszym rozdziale opisano kolejność i sposób realizacji poszczególnych etapów metodyki.

Opracowana metodyka ma postać uporządkowanej procedury badawczej i może być stosowana do różnych konfiguracji odbieraków prądu, pod warunkiem dostosowania rozmieszczenia aparatury, parametrów badania oraz kryteriów oceny do badanego obiektu i właściwych dokumentów odniesienia. Jej rdzeń obejmuje działania prowadzące do wyznaczenia i oceny parametrów dynamicznej współpracy odbieraka z siecią jezdnią górną. Badania uzupełniające tworzą odrębny, modułowy obszar oceny i nie są traktowane jako wielkości wejściowe modelu wyznaczania siły stykowej. Takie rozdzielenie zachowuje jednoznaczność modelu pomiarowego, a jednocześnie pozwala wykorzystać dodatkowe informacje przy rozszerzonej ocenie systemu odbioru prądu.

6.1 Przygotowanie obiektu i konfiguracji pomiarowej

Przygotowanie badania rozpoczyna się od identyfikacji badanego pojazdu i odbieraka prądu, określenia zakresu badania oraz wskazania właściwych dokumentów odniesienia. Przeprowadza się oględziny odbieraka i sprawdza stan elementów istotnych z punktu widzenia późniejszych pomiarów, w szczególności elementów stykowych, połączeń mechanicznych oraz części, do których mocowana jest aparatura pomiarowa.

W ramach przygotowania obiektu wykonuje się wymagane sprawdzenia geometryczne i statyczne, w tym pomiar statycznej siły stykowej F_{stat} oraz ocenę cech konstrukcyjnych i geometrycznych mających znaczenie dla realizowanego programu badań oraz wymagań PN-EN 50367 [20], [38], [114]. Zakres tych czynności wynika z rodzaju badanego odbieraka, konfiguracji pojazdu i właściwych dokumentów odniesienia. Badania statyczne stanowią odrębny element oceny badanego odbieraka,

a w przygotowaniu badań dynamicznych dostarczają informacji niezbędnych do potwierdzenia jego właściwej konfiguracji; nie obejmują wyznaczania funkcji przenoszenia ani wskaźnika J .

Konfigurację układu pomiarowego dobiera się z uwzględnieniem konstrukcji badanego odbieraka i zakresu realizowanych pomiarów. Tory pomiaru siły i przyspieszenia instaluje się tak, aby umożliwić pozyskanie wielkości wejściowych wymaganych do wyznaczania siły stykowej. Status metrologiczny zastosowanych torów określa się na podstawie właściwej dokumentacji wzorcowania, przy czym elementów mocujących i konstrukcji odbieraka nie utożsamia się z zakresem wzorcowania, jeżeli nie zostały nim objęte.

Rozmieszczenie czujników, sposób prowadzenia elementów transmisyjnych oraz instalację pozostałych modułów podporządkowuje się wymaganiom PN-EN 50317 [18], [19], dokumentacji zastosowanej aparatury i przyjętej procedurze badawczej. Po zakończeniu montażu sprawdza się poprawność rozmieszczenia i mocowania aparatury, brak kolizji z elementami odbieraka oraz możliwość swobodnego ruchu jego części ruchomych. Konfiguracja przeznaczona do dalszych etapów badania powinna odpowiadać konfiguracji przewidzianej do pomiarów dynamicznych.

6.2 Kontrola funkcjonalna i laboratoryjne badanie oprzyrządowanego odbieraka

Po zainstalowaniu aparatury przeprowadza się kontrolę funkcjonalną konfiguracji pomiarowej. Jej celem jest potwierdzenie prawidłowego działania wykorzystywanych torów, układów akwizycji i rejestracji danych oraz poprawności pozyskiwania sygnałów przed rozpoczęciem kolejnych etapów badania. Dla sygnałów wykorzystywanych łącznie do wyznaczania siły stykowej sprawdza się również zachowanie wymaganej zgodności czasowej.

Kontrola funkcjonalna jest odrębna od wzorcowania torów pomiarowych. Służy sprawdzeniu działania układu po jego zainstalowaniu w konfiguracji badawczej i poprzedza laboratoryjne badanie kompletnego oprzyrządowanego odbieraka.

W ramach kontroli funkcjonalnej sprawdza się reakcję każdego wykorzystywanego toru na wymuszenie, poprawność rejestracji i komunikacji, zgodność czasową sygnałów oraz wykonuje zapis próbny. Wyniki wykonanych czynności dokumentuje się w zapisach technicznych prowadzonych w laboratorium.

Dodatkowo sprawdza się sumaryczną odpowiedź torów pomiaru siły z wykorzystaniem obciążenia kontrolnego. Jeżeli wynik takiego sprawdzenia wskazuje na nieprawidłowość, reakcję sprawdza się dla poszczególnych torów. Czynność ta służy kontroli działania układu po montażu i nie zastępuje wzorcowania torów ani laboratoryjnego badania kompletnego oprzyrządowanego odbieraka.

Przed rozpoczęciem badań dynamicznych kompletny oprzyrządowany odbierak poddaje się laboratoryjnemu badaniu zgodnie z pkt 7.5 PN-EN 50317 [18], [19], określonym w polskiej wersji PN-EN 50317:2012 jako „Kalibracja układu pomiarowego”. W znaczeniu metrologicznym etap ten pozostaje odrębny od wzorcowania torów pomiarowych. Warunki realizacji badania, sposób wyznaczania wartości bezwzględnej funkcji przenoszenia oraz wskaźnika J przedstawiono w podrozdziale 5.2.

Badaniu podlega kompletny oprzyrządowany odbierak w konfiguracji odpowiadającej konfiguracji przewidzianej do pomiarów podczas jazdy. Na podstawie relacji pomiędzy siłą zmierzoną przez układ pomiarowy odbieraka a siłą wywieraną na ślizgacz ocenia się właściwości dynamiczne kompletnej konfiguracji. Wynik badania wykorzystuje się do potwierdzenia spełnienia wymagania dotyczącego wartości bezwzględnej funkcji przenoszenia przed wykorzystaniem konfiguracji w dalszych badaniach dynamicznych.

W badaniach przedstawionych w rozprawie do zadawania siły oraz jej niezależnego pomiaru podczas badania zgodnie z pkt 7.5 wykorzystywano stanowisko laboratoryjne 12SB wyposażone we wzorcowany tor pomiaru siły. Stanowisko umożliwiało realizację wymuszenia na ślizgaczu niezależnie od układu pomiarowego oprzyrządowanego odbieraka.

Laboratoryjne badanie oprzyrządowanego odbieraka nie zastępuje wzorcowania torów pomiarowych ani ilościowej oceny niepewności. Wzorcowanie, kontrola funkcjonalna, badanie zgodnie z pkt 7.5 PN-EN 50317 [18] oraz ocena niepewności pełnią w metodyce odrębne i wzajemnie uzupełniające się funkcje.

6.3 Wyznaczenie wielkości niezbędnych do uwzględnienia oddziaływań aerodynamicznych

Przed wyznaczaniem siły stykowej w warunkach dynamicznych określa się wielkości niezbędne do uwzględnienia wpływu oddziaływań aerodynamicznych właściwych dla zastosowanej konfiguracji odbieraka i układu pomiarowego. W tym celu wykonuje się

pomiar całkowitej średniej siły unoszącej zgodnie z wymaganiami pkt 6 PN-EN 50317 [18], a korekcję siły aerodynamicznej wyznacza się zgodnie z pkt 7.4 tej normy.

Pomiar całkowitej średniej siły unoszącej realizuje się z odbierakiem uwiązanym linkami, bez kontaktu nakładek ślizgowych z przewodem jezdny, dla ustalonej konfiguracji odbieraka i kolejnych punktów prędkości, przy zachowaniu warunków geometrycznych i badawczych wymaganych w dokumencie odniesienia. Podczas tego samego przejazdu aerodynamicznego równocześnie rejestruje się siły w linkach oraz sygnały z czterech torów pomiaru siły z czujnikami wykorzystującymi światłowodowe siatki Bragga (FBG), zainstalowanych na odbieraku. Podczas przejazdów dokumentuje się parametry potrzebne do późniejszej interpretacji wyników, w szczególności prędkość i kierunek jazdy, konfigurację badanego odbieraka, wysokość jego ustawienia oraz istotne warunki środowiskowe.

Z sił w linkach rejestrowanych podczas danego przejazdu wyznacza się całkowitą średnią siłę unoszącą $F_s(v)$ jako sumę średnich wartości sił w poszczególnych linkach. Z rejestrowanych równocześnie sygnałów czterech torów pomiaru siły wyznacza się chwilową sumę $F_{\Sigma}(t)$, a następnie jej średnią w czasie $\bar{F}_{\Sigma}(v)$ dla odpowiadającego przedziału pomiarowego. Korekcję siły aerodynamicznej $F_{corr,aero}(v)$ wyznacza się jako różnicę $F_s(v)$ i $\bar{F}_{\Sigma}(v)$ dla tego samego punktu prędkości i zdefiniowanej konfiguracji. Nie wykonuje się odejmowania przebiegów chwilowych próbek po próbce. Szczegółowe zależności przedstawiono w podrozdziale 5.3.

Dla każdego wymaganego punktu prędkości wartości $F_s(v)$ i $\bar{F}_{\Sigma}(v)$ wyznacza się z danych pozyskanych równocześnie w ramach tego samego pomiaru aerodynamicznego. Pomiar wykonuje się po ustabilizowaniu wymaganej prędkości na prostym odcinku toru; w warunkach rzeczywistych podczas jazdy z wykorzystaniem tempomatu odchylenie od wartości zadanej wynosiło około ± 1 km/h. Nie wyznacza się wartości korekcji dla prędkości pośrednich na podstawie interpolacji.

Wyznaczone wartości korekcji są przypisane do zdefiniowanej konfiguracji odbieraka, pojazdu i układu pomiarowego oraz do punktów prędkości i warunków, dla których wykonano pomiary. Wartość odpowiadającą warunkom danego przejazdu dynamicznego wykorzystuje się następnie w modelu wyznaczania siły stykowej. Niezależnie od procedury wyznaczania korekcji zgodnie z pkt 7.4 PN-EN 50317 [18], sprawdza się aerodynamiczny wpływ zainstalowanego układu pomiarowego na całkowitą średnią siłę unoszącą zgodnie z pkt 7.2 tej normy. Są to odrębne wymagania

normowe i nie należy utożsamiać oceny wpływu oprzyrządowania na aerodynamikę odbieraka z korekcją $F_{corr,aero}(v)$ stosowaną w równaniu siły stykowej.

6.4 Realizacja pomiarów dynamicznych siły stykowej

Po przygotowaniu obiektu, sprawdzeniu konfiguracji pomiarowej, wykonaniu laboratoryjnego badania oprzyrządowanego odbieraka oraz określeniu wielkości niezbędnych do uwzględnienia oddziaływań aerodynamicznych przeprowadza się właściwe pomiary dynamiczne współpracy odbieraka prądu z siecią jezdnią górną.

Podstawowymi sygnałami wykorzystywanymi do wyznaczania siły stykowej są wskazania torów pomiaru siły i przyspieszenia. Sygnały te rejestruje się z zachowaniem wymaganej zgodności czasowej, ponieważ są łącznie wykorzystywane w modelu przedstawionym w podrozdziale 5.1. Wskazania torów pomiaru siły sumuje się zgodnie z przyjętym modelem, natomiast uśrednianie w czasie stosuje się wyłącznie na etapie wyznaczania wielkości, których definicja tego wymaga.

Cztery sygnały z torów pomiaru siły i cztery sygnały z torów pomiaru przyspieszenia są przetwarzane równocześnie przez wspólny ośmiokanałowy interrogator. Wspólna akwizycja ośmiu kanałów zapewnia zgodność czasową sygnałów stanowiących wejścia modelu $F_c(t)$. Dane są następnie przetwarzane i zapisywane we wspólnym środowisku akwizycji CatmanEasy v. 5.5.

Wpływ bezwładności części odbieraka znajdujących się pomiędzy punktami pomiaru siły a punktem styku uwzględnia się na podstawie pomiarów przyspieszenia i odpowiadających im mas. Korekcję siły aerodynamicznej przyporządkowuje się do warunków analizowanego przejazdu zgodnie ze sposobem opisanym w podrozdziale 5.3.

Parametry rejestracji, filtracji i dalszego przetwarzania sygnałów przyjmuje się zgodnie z wymaganiami PN-EN 50317 [18], [19] oraz ustawieniami właściwymi dla zastosowanej aparatury. Ich rzeczywiste wartości dokumentuje się dla danej konfiguracji badawczej, tak aby możliwe było odtworzenie procesu przetwarzania danych.

W badaniach przedstawionych w rozprawie sygnały rejestrowano z częstotliwością próbkowania większą niż 200 Hz. W dalszym przetwarzaniu stosowano cyfrowy filtr dolnoprzepustowy 6. rzędu o częstotliwości odcięcia 20 Hz, zgodnie z wymaganiami pkt 7.6 PN-EN 50317 [18].

Pomiary wielkości elektrycznych i środowiskowych oraz rejestracja obrazu nie stanowią bezpośrednich wejść modelu wyznaczania siły stykowej. Dane te służą do

dokumentowania warunków badania, interpretacji wybranych zdarzeń lub prowadzenia odrębnych badań uzupełniających systemu odbioru prądu, których miejsce w opracowanej metodyce określono w podrozdziale 6.7.

6.5 Rejestracja warunków badania i zabezpieczenie danych

Rejestracja warunków prowadzenia badań jest elementem przekrojowym metodyki i obejmuje wszystkie jej etapy. Dokumentacja powinna umożliwiać jednoznaczne przypisanie wyników do badanego obiektu, zastosowanej konfiguracji pomiarowej oraz warunków, w których przeprowadzono poszczególne próby.

W zapisach z badań uwzględnia się, odpowiednio do rodzaju próby, identyfikację pojazdu i odbieraka prądu, datę i miejsce badania, konfigurację aparatury, aktywne tory pomiarowe, prędkość i kierunek jazdy, odcinek objęty pomiarem, położenie odbieraka w składzie pojazdu, typ sieci jezdnej oraz istotne warunki środowiskowe. Odnotowuje się również zdarzenia i nieprawidłowości mogące mieć znaczenie dla późniejszej interpretacji wyników. Stan elementów stykowych dokumentuje się w zakresie przewidzianym w przyjętej procedurze badawczej.

Parametry toru pomiarów środowiskowych, obejmujące temperaturę T_{amb} , wilgotność względną RH , ciśnienie p oraz prędkość V_w i kierunek Dir wiatru, rejestrowano w sposób ciągły podczas przejazdów. Informacje dotyczące konfiguracji badanego obiektu oraz stan elementów stykowych dokumentowano przed rozpoczęciem badań, a zdarzenia i nieprawidłowości stwierdzone podczas prób odnotowywano w zapisach z badań.

Dane pomiarowe zapisuje się w postaci umożliwiającej ich identyfikację, ponowne przetworzenie oraz powiązanie z określonym przejazdem i warunkami jego realizacji. Po zakończeniu pomiarów dane zabezpiecza się przed utratą lub niezamierzoną modyfikacją i archiwizuje w sposób umożliwiający odtworzenie przebiegu obliczeń oraz zachowanie wymaganych zapisów technicznych laboratorium [93].

6.6 Opracowanie, weryfikacja i ocena wyników

Opracowanie wyników rozpoczyna się od kontroli kompletności zapisów oraz identyfikacji przejazdów i odcinków przeznaczonych do dalszej analizy. Następnie przeprowadza się wymagane przetwarzanie sygnałów oraz wyznacza siłę stykową zgodnie z modelem przedstawionym w rozdziale 5.

Dla analizowanego przebiegu siły stykowej $F_c(t)$ wyznacza się wielkości statystyczne wymagane do oceny dynamicznej współpracy odbieraka z siecią jezdnią górną, w szczególności średnią siłę stykową F_m , odchylenie standardowe σ , statystyczną wartość minimalną $F_m - 3\sigma$, statystyczną wartość maksymalną $F_m + 3\sigma$ oraz histogram lub krzywą prawdopodobieństwa. Średnia siła stykowa F_m jest średnią wartością przefiltrowanego przebiegu $F_c(t)$ w analizowanym odcinku lub sekcji kontrolnej; nie stanowi średniej arytmetycznej oddzielnie wyznaczonych sił statycznej, dynamicznej i aerodynamicznej.

Uzyskane wyniki ocenia się na podstawie kryteriów określonych w dokumentach odniesienia właściwych dla danego rodzaju badania i badanego obiektu. Szczegółowe wartości graniczne wraz z ich podstawą normatywną przedstawiono w rozdziałach poświęconych wynikom badań. W przypadku oceny spełnienia wymagań granicznych w badaniach dynamicznej współpracy zastosowano regułę prostej akceptacji (*simple acceptance*) zgodnie z ILAC-G8:09/2019 [94]. W regule tej granica akceptacji AL jest równa granicy tolerancji TL, tj. $AL = TL$, a pasmo ochronne wynosi $w = 0$. Oznacza to, że wynik uznaje się za spełniający wymaganie, jeżeli jego wartość znajduje się w przedziale określonym właściwymi wartościami granicznymi. Niepewność pomiaru jest przy tym wyznaczana i podawana jako charakterystyka metrologiczna wyniku, lecz nie powoduje zawężenia przedziału akceptacji.

Weryfikacja wyników obejmuje kontrolę kompletności danych, zgodności realizacji badania z przyjętą procedurą, poprawności przetwarzania sygnałów oraz fizycznej wiarygodności uzyskanych przebiegów. Ocena ekspercka, oparta na wiedzy o badanym obiekcie i warunkach próby, może wspierać identyfikację danych wymagających dodatkowego sprawdzenia, lecz nie zastępuje kryteriów normatywnych ani ilościowej oceny niepewności.

W opracowanej metodyce nie przyjmuje się stałej liczby powtórzeń wspólnej dla wszystkich rodzajów badań. Do dalszego opracowania kwalifikuje się przejazdy spełniające kryteria ważności związane z prawidłową realizacją próby, kompletnością rejestracji, właściwą konfiguracją oraz osiągnięciem wymaganego punktu prędkości. Kryteria kwalifikacji powinny być niezależne od uzyskanej wartości $F_c(t)$; nie selekcjonuje się przejazdów na podstawie podobieństwa ich wyników. W przykładach wykorzystanych do oceny niepewności liczbę ważnych realizacji podaje się w rozdziale 7.

Niepewność wielkości wyznaczanych w ramach opracowanej metodyki ocenia się zgodnie z modelami i budżetami przedstawionymi w rozdziale 7. Pozwala to oddzielić ocenę spełnienia kryteriów od metrologicznej oceny wiarygodności wyniku pomiaru.

6.7 Badania uzupełniające w rozszerzonej ocenie systemu odbioru prądu

Opracowana metodyka obejmuje, obok rdzenia związanego z wyznaczaniem i oceną parametrów dynamicznej współpracy odbieraka z siecią jezdnią górną, grupę badań uzupełniających dotyczących systemu odbioru prądu. Ich rolą jest poszerzenie zakresu oceny o informacje, których nie dostarcza bezpośrednio pomiar siły stykowej. Badania te nie zastępują badań dynamicznych prowadzonych zgodnie z PN-EN 50317 [18], [19] i nie zmieniają sposobu wyznaczania siły stykowej.

W ramach rozprawy przeprowadzono analizę obrazu współpracy odbieraka z siecią jezdnią, badania rezystancji i impedancji zestawów kołowych, badania kompatybilności elektromagnetycznej, badania zakłóceń generowanych do sieci trakcyjnej oraz pomiary pola magnetycznego. Szczegółowy zakres, zastosowaną aparaturę, warunki realizacji oraz wyniki tych badań przedstawiono w rozdziale 11. Poszczególne grupy badań służą ocenie odmiennych właściwości badanego systemu i podlegają interpretacji według właściwych dla nich kryteriów. Ich wyników nie traktuje się jako jednej, wspólnej miary jakości odbioru prądu.

Poszczególne moduły badań uzupełniających realizowano w ramach różnych programów badawczych, zależnie od badanego obiektu, celu oceny oraz dostępności wymaganej infrastruktury. Przedstawione w rozdziale 11 przykłady dokumentują możliwość uruchamiania tych modułów niezależnie, bez włączania ich wyników do modelu $F_c(t)$.

Bezpośredni związek z obserwacją dynamicznej współpracy odbieraka z siecią jezdnią ma rejestracja obrazu. Umożliwia ona dokumentowanie zjawisk występujących w obszarze styku, w szczególności chwilowych utrat kontaktu, wyładowań łukowych, nieprawidłowości działania odbieraka oraz przejazdu przez wybrane elementy sieci jezdnej. Materiał wizyjny służy przede wszystkim dokumentacji i diagnostycznej interpretacji zdarzeń.

Rejestracja obrazu była prowadzona z wykorzystaniem tej samej podstawy czasu co sygnały elektryczne zapisywane w tym samym rejestratorze. Częstotliwość zapisu obrazu wynosiła 30–48 kl./s, a więc jego rozdzielczość czasowa była mniejsza niż dla sygnałów

elektrycznych. Materiału wizyjnego nie traktuje się jako bezpośredniego wejścia do modelu $F_c(t)$ ani jako podstawy punktowej metrologicznej korelacji z przebiegiem siły stykowej.

Pomiary elektryczne, badania kompatybilności elektromagnetycznej, badania zakłóceń generowanych do sieci trakcyjnej, pomiary pola magnetycznego oraz badania rezystancji i impedancji zestawów kołowych dostarczają informacji o odrębnych właściwościach badanego pojazdu i jego oddziaływaniu na infrastrukturę kolejową oraz środowisko elektromagnetyczne. Nie stanowią one bezpośredniej miary jakości styku odbieraka z przewodem jezdny ani ciągłości odbioru prądu. Ich wyniki rozszerzają natomiast ocenę systemu odbioru prądu i mogą stanowić dodatkowy kontekst dla interpretacji wyników badań dynamicznych.

Pomiary elektryczne, badania kompatybilności elektromagnetycznej i zakłóceń oraz pozostałe badania uzupełniające realizowano w odrębnych próbach, zgodnie z wymaganiami właściwymi dla danego badania, w tym dotyczącymi prędkości jazdy i obciążenia. Ich wyników nie interpretuje się jako czasowo skorelowanych wejść do wyznaczania przebiegu $F_c(t)$.

Modułowa struktura opracowanego systemu umożliwia dobór zakresu badań uzupełniających do celu i programu prowadzonej oceny. Mogą one stanowić część rozszerzonego programu badań albo być realizowane jako odrębne moduły badawcze. W obu przypadkach zachowuje się rozdzielenie kryteriów właściwych dla poszczególnych grup pomiarów, co pozwala połączyć ich wyniki na poziomie interpretacji systemowej bez mieszania ich z modelem wyznaczania siły stykowej.

6.8 Zakończenie badań

Po zakończeniu pomiarów przeprowadza się oględziny badanego obiektu i aparatury pomiarowej w celu stwierdzenia, czy podczas badań nie wystąpiły zmiany lub uszkodzenia mogące mieć znaczenie dla interpretacji uzyskanych wyników. W przypadku stwierdzenia nieprawidłowości mogących wpływać na wynik ocenia się konieczność powtórzenia odpowiednich pomiarów.

Po wykonaniu wymaganych czynności kontrolnych zabezpiecza się kompletny zbiór danych i dokumentację badania, a następnie demontuje aparaturę pomiarową. Tak uporządkowana metodyka rozdziela rdzeń pomiarowo-analityczny związany z dynamiczną współpracą odbieraka z siecią jezdnią górną od badań uzupełniających,

zachowując ich wspólne osadzenie w procesie oceny systemu odbioru prądu. Wyniki rdzenia metodyki stanowią podstawę oceny parametrów dynamicznych i zgodności z właściwymi kryteriami, natomiast badania uzupełniające poszerzają zakres informacji wykorzystywanych do interpretacji i oceny badanego systemu. Ocenę niepewności wielkości wyznaczanych w ramach rdzenia metodyki przedstawiono w rozdziale 7, analizę konstrukcyjną elementów układu pomiarowego w rozdziale 8, natomiast eksperymentalną weryfikację opracowanego podejścia w rozdziałach 9 i 10.

7 Niepewności pomiarów

W badaniach o charakterze eksperymentalnym analiza niepewności pomiaru stanowi jeden z głównych elementów oceny wiarygodności uzyskanych wyników. Pozwala scharakteryzować rozrzut wartości, które mogą być w uzasadniony sposób przypisane wielkości mierzonej, oraz umożliwia porównywanie wyników uzyskanych w różnych warunkach, z wykorzystaniem odmiennych metod i układów pomiarowych. Współczesne podejście metrologiczne wymaga przy tym wyraźnego rozróżnienia pomiędzy błędem pomiaru a niepewnością pomiaru. Terminologię stosowaną w rozprawie przyjęto zgodnie z International Vocabulary of Metrology (VIM) [95], natomiast podstawowe zasady oceny i wyrażania niepewności oparto na Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), JCGM 100:2008 [96], również dostępnym w oficjalnym polskim tłumaczeniu Głównego Urzędu Miar [97]. JCGM 100 ustanawia ogólne reguły oceny i wyrażania niepewności dla szerokiego zakresu pomiarów, natomiast VIM stanowi podstawę terminologiczną stosowanych pojęć metrologicznych.

Znaczenie właściwego oszacowania niepewności jest szczególnie ważne w badaniach dynamicznych. W tego rodzaju pomiarach wynik zależy nie tylko od właściwości badanego obiektu i charakterystyk statycznych zastosowanej aparatury, lecz również od odpowiedzi dynamicznej całego toru pomiarowego, analizowanego pasma częstotliwości, sposobu akwizycji i przetwarzania sygnałów oraz wzajemnych zależności pomiędzy wielkościami wejściowymi. Elster i Link [98] wykazali, że ocena niepewności pomiarów dynamicznych wymaga uwzględnienia właściwości dynamicznych modelu pomiarowego i nie powinna być sprowadzana wyłącznie do podejścia quasi-statycznego. Wübbeler i in. [99] zwrócili ponadto uwagę na znaczenie korelacji pomiędzy wynikami uzyskiwanymi dla kolejnych punktów charakterystyki częstotliwościowej. Zagadnienia te są szczególnie istotne w odniesieniu do laboratoryjnego badania oprzyrządowanego odbieraka prądu, w którym analizowana jest zależność pomiędzy siłą zadaną i odpowiedzią układu pomiarowego w określonym zakresie częstotliwości.

W przypadku badań dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną szczególne znaczenie mają zatem właściwości dynamiczne odbieraka i układu pomiarowego, pasmo częstotliwości analizowanych sygnałów, liczba i rozmieszczenie czujników, rozdzielczość zastosowanej aparatury, właściwości torów pomiarowych oraz wpływ warunków środowiskowych. Dodatkowym zagadnieniem jest występowanie wielkości wyznaczanych pośrednio z sygnałów pochodzących z kilku torów. W takich

przypadkach końcowy wynik jest zależny zarówno od niepewności poszczególnych wielkości wejściowych, jak i od postaci przyjętego modelu matematycznego. Zagadnienie budowy i stosowania modeli pomiaru zostało rozwinięte w JCGM GUM-6:2020 [100], który traktuje model pomiaru jako podstawę identyfikacji zależności pomiędzy wielkościami wejściowymi i wielkością wyjściową.

Szczególnym przypadkiem występującym w opracowanej metodyce jest dynamiczny pomiar siły. Badania Schlegela i in. [101], Mediny i de Vicente [102] oraz Vlajica i Chijioke [103] pokazują, że charakterystyka przetwornika siły przy wymuszeniu sinusoidalnym wymaga uwzględnienia zależności częstotliwościowych, właściwości mechanicznych układu, sposobu realizacji wymuszenia oraz szeregu źródeł niepewności właściwych dla pomiaru dynamicznego. W pracach tych dynamiczna charakterystyka przetwornika określana jest przy znanym wymuszeniu harmonicznym, a wynik odnoszony jest do wzorcowego toru lub realizacji siły zapewniającej spójność pomiarową. Jest to metodologicznie zbieżne z przyjętym w rozprawie sposobem laboratoryjnej oceny kompletnego oprzyrządowanego odbieraka, przy czym definicja i kryterium wskaźnika J pozostają w rozprawie oparte bezpośrednio na PN-EN 50317 [18], [19].

Na wynik dynamicznego pomiaru siły mogą wpływać również zjawiska mechaniczne związane z rzeczywistym zachowaniem układu pomiarowego. Schlegel i in. [104] wskazują między innymi na możliwość występowania ruchów poprzecznych, kołysania oraz innych efektów zależnych od częstotliwości wymuszenia, które mogą wносить wkład do niepewności kalibracji sinusoidalnej. Podobnie Vlajic i Chijioke [103] uwzględniają w budżecie niepewności dynamicznego pomiaru siły wpływ zjawisk mechanicznych, parametrów ruchu i właściwości układu pomiarowego. Z kolei Röske i in. [105] wskazują na potrzebę systematycznego wyznaczania i dokumentowania niepewności w metrologii siły oraz zachowania jej powiązania ze spójnością pomiarową.

W działalności laboratoriów badawczych i wzorcujących zagadnienia te są dodatkowo związane z wymaganiami dotyczącymi kompetencji, spójności pomiarowej oraz zapewnienia ważności wyników, określonymi w PN-EN ISO/IEC 17025 [93]. Ocena niepewności nie jest więc w opracowanej metodyce działaniem wykonywanym niezależnie od pozostałych etapów badania, lecz wynika bezpośrednio ze zdefiniowanego modelu pomiaru, właściwości zastosowanych torów, danych ze świadectw wzorcowania oraz warunków realizacji pomiaru. Takie podejście jest zgodne zarówno z zasadami GUM [96], [97], jak i z praktycznym ujęciem przedstawianym w materiałach

metrologicznych Głównego Urzędu Miar [106]. Oficjalne materiały GUM obejmują m.in. zagadnienia niepewności standardowej, rozszerzonej, pomiarów pośrednich i sposobów opracowywania wyniku.

Ocena poszczególnych składowych niepewności może być prowadzona metodą typu A lub typu B. Ocena typu A wykorzystuje analizę statystyczną wyników uzyskanych w serii obserwacji, natomiast ocena typu B opiera się na innych dostępnych informacjach o wielkości wejściowej lub procesie pomiarowym, takich jak dane ze świadectw wzorcowania, specyfikacje techniczne aparatury, rozdzielczość wskazania oraz informacje dotyczące istotnych wielkości wpływających. Składowe te, po wyrażeniu w postaci niepewności standardowych, mogą być propagowane przez odpowiedni model pomiaru zgodnie z zasadami przedstawionymi w GUM [96] i GUM-6 [100]. Jeżeli liniowa propagacja niepewności nie zapewnia wystarczającego odwzorowania właściwości modelu lub rozkładów wielkości wejściowych, możliwe jest zastosowanie propagacji rozkładów metodą Monte Carlo zgodnie z JCGM 101:2008 [107].

W przypadku pomiarów pośrednich każdej wielkości wejściowej przypisuje się właściwą niepewność standardową, a jej wpływ na wynik końcowy wynika z postaci modelu oraz odpowiadającego jej współczynnika wrażliwości. W przypadku występowania zależności pomiędzy wielkościami wejściowymi konieczne jest również rozważenie ich korelacji. Jest to szczególnie istotne w układach wielokanałowych oraz podczas analizy danych w dziedzinie częstotliwości, ponieważ pominięcie istniejących zależności może prowadzić do niewłaściwej oceny niepewności wyniku [98], [99], [100].

Budżet niepewności stanowi usystematyzowane zestawienie wielkości wejściowych, ich estymat oraz przypisanych im składowych niepewności. Umożliwia przejrzystą analizę procesu pomiarowego, ocenę udziału poszczególnych źródeł w niepewności wyniku oraz identyfikację składowych dominujących. Ma to znaczenie zarówno przy ocenie przydatności zastosowanego układu, jak i podczas jego dalszego doskonalenia. W przypadku wyników wykorzystywanych do oceny spełnienia określonych wymagań znaczenie niepewności wykracza przy tym poza samo przedstawienie charakterystyki metrologicznej wyniku. JCGM 106:2012 [108] wskazuje na rolę niepewności pomiaru w procesie oceny zgodności i podejmowania decyzji w odniesieniu do określonych wymagań.

W ramach przeprowadzonej w rozprawie analizy budżety niepewności powiązano bezpośrednio z równaniami pomiaru właściwymi dla poszczególnych wielkości

wynikowych. Analizie poddano niepewność wyznaczania wartości bezwzględnej funkcji przenoszenia i wskaźnika J, korekcji siły aerodynamicznej $F_{corr,aero}(v)$ oraz siły stykowej $F_c(t)$. Aerodynamiczny wpływ zainstalowanego układu pomiarowego, wyznaczany w odrębnej kontroli przez porównanie konfiguracji z wyposażeniem pomiarowym i bez niego, nie jest utożsamiany z korektą $F_{corr,aero}(v)$ wchodzącą do modelu $F_c(t)$.

Podstawowymi wielkościami wejściowymi występującymi w analizowanych modelach są siła, przyspieszenie, częstotliwość oraz masa. Źródła niepewności wynikają przede wszystkim z właściwości metrologicznych zastosowanych torów pomiarowych, danych zawartych w świadectwach wzorcowania, rozdzielczości wskazań, powtarzalności pomiarów oraz – w uzasadnionych przypadkach – oddziaływania warunków środowiskowych. W odniesieniu do pomiarów siły z wykorzystaniem czujników FBG istotnym czynnikiem wpływającym może być temperatura. Tan i in. [109] wykazali w badaniach układu pantograf–sieć wpływ temperatury na sygnał czujników FBG i zastosowali rozwiązanie kompensacyjne. W opracowanym w rozprawie układzie zastosowano czujniki umożliwiające kompensację temperaturową, a zasadność wprowadzania odrębnej składowej temperaturowej oceniano z uwzględnieniem właściwości konkretnego toru oraz wyników jego wzorcowania i badań.

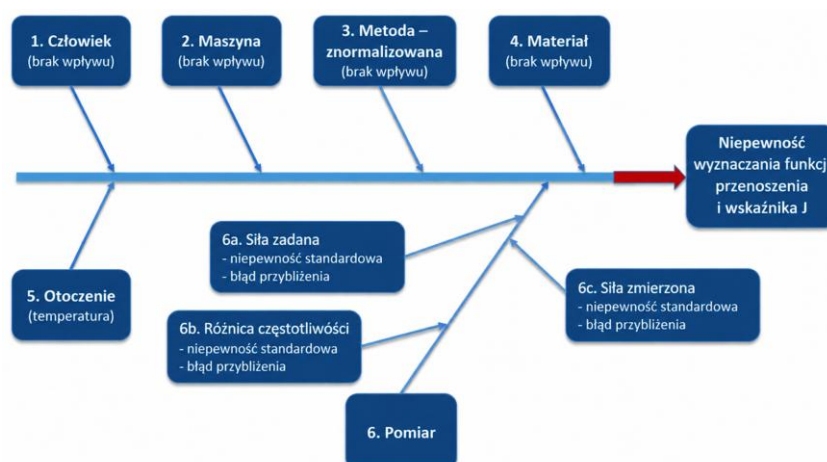
Odrębną grupę oddziaływań stanowią zjawiska aerodynamiczne. Siły działające na odbierak zależą między innymi od geometrii, prędkości, położenia odbieraka na pojeździe oraz warunków przepływu powietrza. Badania Brambilla i in. [110] wskazują, że nawet dla tego samego typu pantografu wartości aerodynamicznego unoszenia mogą zmieniać się wraz z jego położeniem na dachu pojazdu i właściwościami warstwy przyściennej. Publikacja ta stanowi uzasadnienie fizycznego znaczenia kontrolowania warunków aerodynamicznych, natomiast definicje oraz procedury wyznaczania aerodynamicznego wpływu układu i korekcji aerodynamicznej stosowane w niniejszej rozprawie pozostają oparte na PN-EN 50317 [18], [19].

Wszystkie wartości wielkości fizycznych oraz jednostki stosowane w budżetach niepewności przedstawiono zgodnie z zasadami Międzynarodowego Układu Jednostek SI [111]. Odniesienie to ma znaczenie szczególnie przy analizie wielkości pośrednich i współczynników wrażliwości, dla których kontrola wymiarowa równań stanowi dodatkowy element weryfikacji poprawności modelu. Aktualnym źródłem międzynarodowym jest 9. wydanie Broszury SI BIPM, natomiast w rozprawie może być wykorzystane także oficjalne polskie wydanie Głównego Urzędu Miar [112].

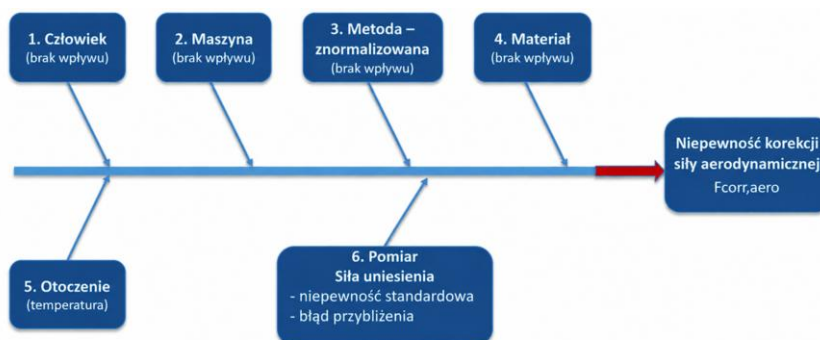
W celu uporządkowania i graficznego przedstawienia potencjalnych źródeł niepewności zastosowano metodę 6M oraz diagramy Ishikawy przedstawione na rys. 7.1–7.3. Diagramy wykorzystano jako jakościowe narzędzie wspomagające identyfikację potencjalnych wpływów związanych z aparaturą pomiarową, metodą badawczą, wielkościami mierzonymi, przetwarzaniem danych oraz warunkami realizacji badań. Przedstawienie danego czynnika na diagramie nie oznacza automatycznie jego włączenia do ilościowego budżetu niepewności. Do dalszych obliczeń wprowadzono wyłącznie składowe, dla których zidentyfikowano istotny wpływ na wynik i które można było powiązać z wielkościami wejściowymi odpowiedniego modelu pomiaru. Czynniki kontrolowane proceduralnie lub ocenione jako pomijalne względem składowych dominujących nie były propagowane jako odrębne składowe niepewności. Diagramy Ishikawy nie zastępują zatem modelu pomiaru ani ilościowego budżetu niepewności, lecz stanowią etap systematyzujący identyfikację i ocenę potencjalnych źródeł niepewności.

Określenie „brak wpływu” zastosowane na diagramach oznacza w niniejszej analizie brak zidentyfikowanej odrębnej, istotnej składowej wymagającej uwzględnienia w budżecie niepewności, a nie całkowity brak fizycznego oddziaływania danego czynnika.

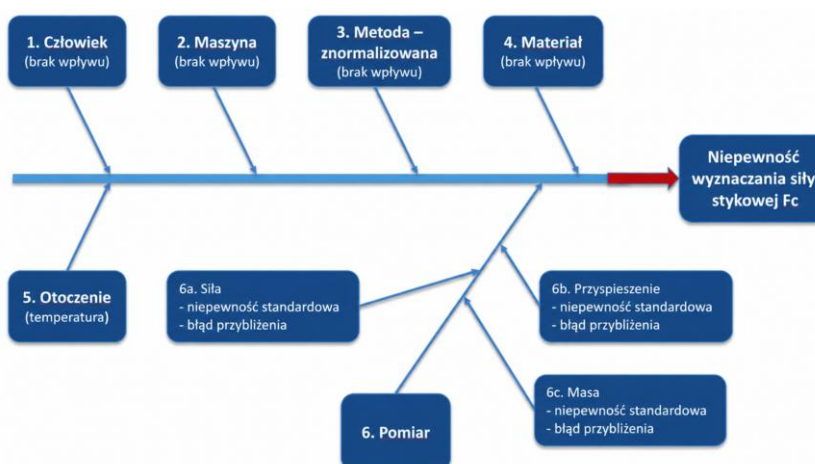
Szczegółowe zasady przyjęte podczas budowy budżetów niepewności, obejmujące sposób wykorzystania danych ze świadectw wzorcowania, uwzględnianie rozdzielczości wskazań i powtarzalności, ocenę wpływu wielkości środowiskowych, zależności i korelacji pomiędzy wielkościami wejściowymi oraz sposób wyznaczania złożonej i rozszerzonej niepewności pomiaru, przedstawiono w podrozdziale 7.1. Kolejne podrozdziały przedstawiają zastosowanie tych zasad do poszczególnych modeli i wielkości wynikowych opracowanej metodyki.



Rys. 7.1. Diagram Ishikawy – identyfikacja potencjalnych źródeł niepewności wyznaczania wskaźnika J



Rys. 7.2. Diagram Ishikawy – identyfikacja potencjalnych źródeł niepewności wyznaczania korekcji siły aerodynamicznej $F_{corr,aero}(v)$



Rys. 7.3. Diagram Ishikawy – identyfikacja potencjalnych źródeł niepewności wyznaczania siły stykowej $F_c(t)$

W ramach oceny potencjalnych źródeł rozważono również wpływ czynności operatora, sposobu wyznaczenia amplitudy, wyboru odcinka ustalonego, filtracji, synchronizacji oraz sposobu przypisania korekcji aerodynamicznej do prędkości przejazdu. Czynniki te były objęte zdefiniowaną procedurą pomiarową lub zostały ocenione jako pomijalne względem składowych dominujących, dlatego nie wprowadzano ich jako odrębnych składników ilościowego budżetu niepewności.

7.1 Założenia wspólne analizy niepewności

W budżetach niepewności przedstawionych w dalszej części przyjęto wspólne zasady identyfikacji, standaryzacji i łączenia składowych niepewności. Uwzględniano składowe wynikające ze świadectw wzorcowania zastosowanej aparatury, rozdzielczości wskazań

oraz – w przypadkach, w których było to uzasadnione właściwościami toru pomiarowego – wpływu warunków środowiskowych, w szczególności temperatury. W przypadkach, w których wynik wielkości mierzonej wyznaczano jako średnią z serii powtórzonych pomiarów, uwzględniano również składową niepewności standardowej typu A wynikającą z rozrzutu wyników.

Składowe wynikające ze świadectw wzorcowania, danych technicznych aparatury i rozdzielczości wskazań oceniano metodą typu B. Jeżeli w świadectwie wzorcowania podano niepewność rozszerzoną wraz ze współczynnikiem rozszerzenia k , odpowiadającą jej niepewność standardową wyznaczano jako $u = U/k$.

Składowych, które były już uwzględnione w niepewności podanej w świadectwie wzorcowania, nie wprowadzano ponownie do budżetu.

W przypadku wielkości wyznaczanej na podstawie powtórzonych pomiarów wartość wyniku przyjmowano jako średnią arytmetyczną:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n x_r \quad (7.1)$$

Niepewność standardową typu A wartości średniej wyznaczano na podstawie eksperymentalnego odchylenia standardowego serii zgodnie z zależnością:

$$u_A(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{r=1}^n (x_r - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (7.2)$$

Składowa typu A opisuje zmienność występującą pomiędzy kolejnymi realizacjami pomiaru. Zwiększenie liczby powtórzeń powoduje zmniejszenie niepewności standardowej średniej związanej z powtarzalnością, natomiast nie powoduje automatycznego zmniejszenia składowych typu B wynikających ze wzorcowania, rozdzielczości lub wpływu warunków środowiskowych.

W przypadku cyfrowego wskazania przyrządu przyjęto, że błąd zaokrąglenia do najbliższego kroku rozdzielczości mieści się w przedziale od $-d/2$ do $+d/2$ i ma rozkład prostokątny. Odpowiadająca mu niepewność standardowa wynosi $d/(2\sqrt{3})$.

Jeżeli wielkość wyjściowa była sumą wskazań kilku niezależnych torów pomiarowych, dla których współczynniki wrażliwości były równe 1, odpowiadające im składowe niepewności standardowej łączono metodą sumy kwadratów. W pozostałych

modelach stosowano ogólne prawo propagacji niepewności z właściwymi współczynnikami wrażliwości.

Prawo propagacji niepewności stosowano z wykorzystaniem współczynników wrażliwości wynikających z odpowiednich równań pomiaru. Jeżeli wielkości wejściowe mogą być skorelowane, zgodnie z GUM [100] w modelu należy uwzględnić również odpowiednie wyrazy kowariancyjne. Przyjęcie kowariancji równej 0 dotyczy wyłącznie tych składowych, dla których na podstawie sposobu realizacji pomiaru i niezależności torów nie zidentyfikowano wspólnego źródła o istotnym wpływie. Sama równoczesna rejestracja sygnałów nie oznacza automatycznie niezależności ani korelacji ich niepewności; założenie to oceniano oddzielnie dla każdego modelu. W przypadku korekcji siły aerodynamicznej składową typu A wyznacza się z par wyników zarejestrowanych podczas tego samego pomiaru, co pozwala zachować informację o współzmienności obu wielkości.

W celu zachowania konserwatywnego charakteru oszacowania, jeżeli dla danego toru pomiarowego dostępnych było kilka wartości niepewności standardowej odpowiadających różnym punktom wzorcowania, do dalszych obliczeń przyjmowano maksymalną wartość występującą w analizowanym zakresie pomiarowym.

Wpływ temperatury uwzględniano jako składową typu B na podstawie danych technicznych zastosowanego przyrządu. Po wyznaczeniu granicznej bezwzględnej zmiany wskazania a_T , przy założeniu rozkładu prostokątnego, odpowiadającą jej niepewność standardową określano jako $u_T = a_T/\sqrt{3}$.

Końcowe wyniki budżetów przedstawiano jako złożoną niepewność standardową, a tam, gdzie wymagane było podanie niepewności rozszerzonej, jako $U(y) = k \cdot u_c(y)$. W analizowanych przykładach do wyznaczenia niepewności rozszerzonej przyjęto współczynnik rozszerzenia $k = 2$.

7.2 Niepewność wyznaczania wartości bezwzględnej funkcji przenoszenia i wskaźnika J

Wskaźnik J wyznaczano na podstawie wartości bezwzględnej funkcji przenoszenia kompletnej konfiguracji oprzyrządowanego odbieraka. PN-EN 50317 [18] w pkt 7.5 wymaga określenia wartości bezwzględnej funkcji przenoszenia na podstawie siły wywieranej na ślizgacz i siły mierzonej przez układ w zakresie częstotliwości $0,5 \div 20$ Hz, dla wymuszenia sinusoidalnego norma odnosi amplitudę siły wywieranej do

przewidywanej średniej siły stykowej. W rozprawie wielkość J nazywa się wskaźnikiem J , w normie występuje ona jako dokładność wartości bezwzględnej funkcji przenoszenia. Norma nie narzuca algorytmu numerycznego wyodrębnienia amplitud z zarejestrowanych próbek. W zastosowanym przetwarzaniu dla każdego punktu częstotliwości f_i amplitudy $F_{applied,i}$ i $F_{measured,i}$ wyznaczano z odcinka ustalonego przebiegów $F_{applied}(t)$ i $F_{measured}(t)$ przez dopasowanie metodą najmniejszych kwadratów modelu harmonicznego zawierającego składową stałą oraz składowe sinusową i cosinusową o częstotliwości f_i . $F_{measured}(t)$ jest chwilową sumą wskazań czterech torów pomiaru siły odbieraka; sygnałów tych nie uśrednia się pomiędzy torami.

$$|H(f_i)| = \left| \frac{F_{measured,i}}{F_{applied,i}} \right| \quad (7.3)$$

$F_{applied,i}$ oznacza amplitudę składowej $F_{applied}(t)$ o częstotliwości f_i , a $F_{measured,i}$ – amplitudę składowej $F_{measured}(t)$ o tej samej częstotliwości. Amplitudy wejścia i wyjścia estymuje się oddzielnie na ich własnych osiach czasu, lecz z zastosowaniem tej samej wartości f_i dla odcinków reprezentujących ten sam ustalony stan próby. Procedurę obliczeniową stosuje się oddzielnie dla wymuszenia centralnego oraz dla wymuszenia przesuniętego o około 250 mm od osi ślizgacza, wartości J dla tych dwóch przypadków nie podlegają uśrednianiu.

Dopasowanie modelu sinusoidalnego metodą najmniejszych kwadratów stanowi element zastosowanej procedury przetwarzania danych, a nie dodatkowe wymaganie PN-EN 50317 [18], [19]. Wpływ sposobu wyznaczenia amplitudy oceniono eksperymentalnie jako pomijalny względem dominujących składowych i nie wprowadzono go jako odrębnej składowej budżetu.

Wskaźnik J wyznaczano zgodnie z modelem przedstawionym w rozdziale 5.2.

$$J = \left(1 - \frac{1}{f_n - f_1} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \left((f_{i+1} - f_i) \cdot \left| 1 - \frac{F_{measured,i}}{F_{applied,i}} \right| \right) \right) \cdot 100\% \quad (7.4)$$

W analizowanym przypadku przyjęto:

$$n = 40, \quad f_1 = 0,5 \text{ Hz}, \quad f_{40} = 20 \text{ Hz}$$

Po uwzględnieniu zakresu częstotliwości równanie pomiaru przyjmuje postać:

$$J = \left(1 - \frac{1}{19,5} \cdot \sum_{i=1}^{39} \left((f_{i+1} - f_i) \cdot \left| 1 - \frac{F_{measured,i}}{F_{applied,i}} \right| \right) \right) \cdot 100\% \quad (7.5)$$

- f_n – górna granica rozpatrywanego zakresu częstotliwości [Hz],
 f_1 – dolna granica rozpatrywanego zakresu częstotliwości [Hz],
 f_i – częstotliwość w i-tym punkcie badania laboratoryjnego [Hz],
 $F_{measured,i}$ – amplituda składowej sumarycznego przebiegu $F_{measured}(t)$ o częstotliwości f_i [N],
 $F_{applied,i}$ – amplituda składowej przebiegu $F_{applied}(t)$ o częstotliwości f_i [N]
 n – liczba punktów pomiarowych (wynika z wymaganego zakresu częstotliwości i kroku pomiarowego),
 D – szerokość analizowanego zakresu częstotliwości, $D = f_n - f_1 = 19,5$ Hz.

W dalszych obliczeniach zastosowano wielkości pomocnicze:

$$\Delta f_i = f_{i+1} - f_i, \quad r_i = \left| 1 - \frac{F_{measured,i}}{F_{applied,i}} \right|, \quad x_i = \Delta f_i r_i.$$

Iloraz $\Delta f_i/D$ oraz wielkość r_i są bezwymiarowe, tym samym wskaźnik J jest wielkością bezwymiarową, której wartość w pracy przedstawiono w procentach. Przy traktowaniu D jako wielkości stałej określającej zakres realizowanego badania oraz przy zastosowaniu w podstawowym wariancie budżetu uproszczonego sposobu łączenia niepewności składników x_i , bez jawnego uwzględniania kowariancji pomiędzy kolejnymi składnikami, złożoną niepewność standardową wskaźnika J wyznaczono z zależności:

$$u_c(J) = \frac{100}{D} \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} u^2(x_i)} \quad (7.6)$$

$$c_{\Delta f,i} = \frac{\partial x_i}{\partial (\Delta f_i)} = r_i \quad (7.7)$$

$$c_{r,i} = \frac{\partial x_i}{\partial r_i} = \Delta f_i \quad (7.8)$$

Wielkości Δf_i oraz r_i wyznaczane są na podstawie sygnałów pochodzących z odrębnych torów pomiarowych: odpowiednio toru pomiaru częstotliwości oraz torów

pomiaru siły. Nie zidentyfikowano wspólnej wielkości wejściowej o istotnym wpływie na obie wielkości, dlatego w obrębie pojedynczego składnika przyjęto brak korelacji pomiędzy Δf_i i r_i , stąd otrzymuje się:

$c_{\Delta f,i}$ – współczynnik wrażliwości składnika x_i względem Δf_i ,

$c_{r,i}$ – współczynnik wrażliwości składnika x_i względem r_i .

$$u_c(J) = \frac{100}{D} \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} [r_i^2 u^2(\Delta f_i) + (\Delta f_i)^2 u^2(r_i)]} \quad (7.9)$$

Budżet niepewności wyznaczenia wskaźnika J opracowano dla amplitud $F_{measured,i}$ i $F_{applied,i}$ oraz dla częstotliwości f_i . Uwzględnione składowe obejmują dane ze świadectw wzorcowania, rozdzielczość oraz dla toru odniesienia wpływ temperatury. Wpływ sposobu wyznaczenia amplitudy i wyboru odcinka ustalonego oceniono eksperymentalnie jako pomijalny względem dominujących składowych i nie wprowadzono ich jako odrębnych pozycji budżetu.

Poniżej przedstawiono przykład obliczeń dla częstotliwości 0,5 Hz, w których uwzględniono:

- niepewności standardowe torów wykorzystywanych do wyznaczenia $F_{measured,i}$ i $F_{applied,i}$,
- składową niepewności związaną z rozdzielczością wskazania,
- składową niepewności związaną z wpływem warunków środowiskowych na pracę siłomierza.

Wyznaczenie $F_{measured,i}$ i jej niepewności

Sygnał $F_{measured}(t)$ wyznaczono jako sumę chwilowych wskazań czterech światłowodowych torów pomiaru siły. Dla każdego punktu f_i z sumarycznego przebiegu wyznaczano odpowiadającą mu wartość $F_{measured,i}$ zgodnie z procedurą przetwarzania przyjętą dla laboratoryjnego badania właściwości dynamicznych,

$$F_{measured}(t) = \sum_{j=1}^{k_f} F_{sensor,j}(t) = \sum_{j=1}^4 F_{sensor,j}(t) \quad (7.10)$$

$k_f = 4$ – liczba światłowodowych torów pomiaru siły.

Równanie (7.10) definiuje chwilowy przebieg $F_{measured}(t)$. Dla każdego punktu częstotliwości f_i z przebiegów $F_{measured}(t)$ i $F_{applied}(t)$ wyznaczano następnie amplitudy odpowiednio $F_{measured,i}$ i $F_{applied,i}$. W dalszej analizie niepewności wielkości z indeksem i odnoszą się do amplitud harmoniczych wykorzystywanych w modelu wskaźnika J , a nie do pojedynczych wartości chwilowych sygnałów.

Przy założeniu braku korelacji pomiędzy torami niepewność standardową siły zmierzonej wyznaczono z zależności:

$$u(F_{measured,i}) = \sqrt{\sum_{j=1}^4 u_{cal}^2(F_{sensor,j}) + u_{res}^2(F_{measured,i})} \quad (7.11)$$

$u_{cal}(F_{sensor,j})$ – składowa niepewności standardowej wskazania j -tego toru pomiaru siły wynikająca ze świadectwa wzorcowania [N],

$u_{res}(F_{measured,i})$ – łączna składowa niepewności standardowej przypisana amplitudzie $F_{measured,i}$, związana z rozdzielczością czterech światłowodowych torów pomiaru siły [N].

Wartości względnych niepewności rozszerzonych podanych w świadectwach wzorcowania oraz odpowiadających im składowych niepewności standardowej $u_{cal}(F_{sensor,j})$, wyznaczonych dla $k = 2$, zestawiono dla czterech światłowodowych torów pomiaru siły w tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Niepewności względne i standardowe czterech światłowodowych torów pomiaru siły

Zakres wzorcowania [N]	Tor 1		Tor 2		Tor 3		Tor 4	
	U_{rel} [%]	u_{cal} [N]	U_{rel} [%]	u_{cal} [N]	U_{rel} [%]	u_{cal} [N]	U_{rel} [%]	u_{cal} [N]
100	0.538	0.269	1.203	0.602	0.618	0.309	0.601	0.301
150	0.469	0.352	0.763	0.572	0.522	0.392	0.517	0.388
200	0.434	0.434	0.544	0.544	0.475	0.475	0.465	0.465
250	0.413	0.516	0.412	0.515	0.446	0.558	0.429	0.536
300	0.400	0.600	0.324	0.486	0.427	0.641	0.402	0.603
400	0.382	0.764	0.214	0.428	0.403	0.806	0.363	0.726
500	0.372	0.930	0.148	0.370	0.389	0.973	0.336	0.840

W dalszej analizie, w celu zachowania podejścia konserwatywnego, dla każdego toru pomiarowego przyjęto maksymalną wartość niepewności standardowej występującą w rozpatrywanym zakresie wzorcowania. Składowe te przypisano następnie do amplitudy $F_{measured,i}$ wyznaczanej z sumarycznego przebiegu $F_{measured}(t)$.

W tabeli 7.1 wartości U_{rel} są niepewnościami rozszerzonymi ze świadectw wzorcowania dla $k = 2$, natomiast $u_{cal}(F_{sensor,j})$ są odpowiadającymi im niepewnościami standardowymi.

Rozdzielczość wskazania każdego z czterech torów pomiaru siły wynosiła:

$$d_{F,j} = 0,001 \text{ N}, j = 1, \dots, 4 \quad (7.12)$$

$d_{F,j}$ – rozdzielczość wskazania j-tego toru pomiaru siły, $j = 1, \dots, 4$.

Łączną składową niepewności wynikającą z rozdzielczości czterech torów wyznaczono zgodnie z przyjętą zasadą sumy kwadratów:

$$u_{res}(F_{measured,i}) = \sqrt{\sum_{j=1}^4 u_{res}^2(F_{sensor,j})} = \sqrt{4 \cdot (0,00029)^2} = 0,00058 \text{ N} \quad (7.13)$$

Po podstawieniu przyjętych wartości otrzymano:

$$\begin{aligned} u(F_{measured,i}) &= \sqrt{0,930^2 + 0,602^2 + 0,973^2 + 0,840^2 + 0,00058^2} \\ &= 1,697 \text{ N} \end{aligned} \quad (7.14)$$

Wyznaczenie $F_{applied,i}$ i jego niepewności

Niepewność standardową przypisaną wartości $F_{applied,i}$ wyznaczono z uwzględnieniem składowej wynikającej ze wzorcowania niezależnego toru odniesienia, rozdzielczości wskazania oraz w przyjętym wariancie konserwatywnym wpływu temperatury zgodnie z danymi technicznymi zastosowanego siłomierza.

$$u(F_{applied,i}) = \sqrt{u_{cal}^2(F_{applied,i}) + u_{res}^2(F_{applied,i}) + u_T^2(F_{applied,i})} \quad (7.15)$$

$u_{cal}(F_{applied,i})$ – składowa niepewności standardowej przypisana amplitudzie $F_{applied,i}$, wynikająca ze świadectwa wzorcowania toru odniesienia,

$u_{res}(F_{applied,i})$ – składowa niepewności standardowej przypisana amplitudzie, $F_{applied,i}$, związana z rozdzielczością wskazania,

$u_T(F_{applied,i})$ – składowa niepewności standardowej przypisana amplitudzie, $F_{applied,i}$, związana z wpływem temperatury.

Składową niepewności standardowej przypisaną amplitudzie $F_{applied,i}$ i wynikającą ze świadectwa wzorcowania toru odniesienia wyznaczono z podanej niepewności rozszerzonej. Dla punktu wzorcowania 1000 N przyjęto względną niepewność rozszerzoną toru $U_{rel}(F_{applied}) = 0,52\%$ oraz współczynnik rozszerzenia $k = 2$:

$$u_{rel,cal}(F_{applied,i}) = \frac{U_{rel}(F_{applied})}{k} = \frac{0,52\%}{2} = 0,26\% \quad (7.16)$$

Odpowiadająca jej bezwzględna składowa niepewności standardowej w punkcie 1000 N wynosi:

$$u_{cal}(F_{applied,i}) = 0,0026 \cdot 1000 \text{ N} = 2,6 \text{ N} \quad (7.17)$$

W dalszych obliczeniach wartość tę przyjęto jako stałe bezwzględne górne ograniczenie składowej przypisywanej amplitudzie $F_{applied,i}$ w analizowanym zakresie; nie wyznaczano jej ponownie jako procentu bieżącej wartości amplitudy. Takie przyjęcie ma charakter konserwatywny.

Składowa niepewności standardowej przypisana amplitudzie $F_{applied,i}$ i związana z rozdzielczością wskazania

$$d_{F,app} = 0,001 \text{ N} \quad (7.18)$$

Dla prostokątnego rozkładu prawdopodobieństwa standardową składową niepewności związaną z rozdzielczością wskazania wyznaczono z zależności:

$$u_{res}(F_{applied,i}) = \frac{d_{F,applied}}{2\sqrt{3}} = 0,00029 \text{ N} \quad (7.19)$$

Składową temperaturową przypisaną amplitudzie $F_{applied,i}$ wyznaczono na podstawie granicznej bezwzględnej zmiany wskazania $a_T(F_{applied,i})$, zgodnie z zasadami przedstawionymi w części wspólnej.

Siłomierz stanowiska pomiarowego:

- temperatura referencyjna: 23°C

- nominalny zakres temperatury: $-10 \div 45^{\circ}\text{C}$
- eksploatacyjny zakres temperatury: $-10 \div 70^{\circ}\text{C}$
- wpływ temperatury na czułość: $0,02\% / 10\text{ K}$

Na podstawie deklarowanego przez producenta wpływu temperatury na czułość, wynoszącego $0,02\% / 10\text{ K}$, oraz maksymalnej różnicy temperatur względem temperatury odniesienia wyznaczono graniczną względną zmianę wskazania.

$$a_{T,\text{rel}}(T_{\text{max}}) = \frac{0,02\%}{10\text{ K}} \cdot |70 - 23|\text{ K} = 0,094\% \quad (7.20)$$

oraz

$$a_{T,\text{rel}}(T_{\text{min}}) = \frac{0,02\%}{10\text{ K}} \cdot |23 - (-10)|\text{ K} = 0,066\% \quad (7.21)$$

Do dalszych obliczeń przyjęto większą z otrzymanych wartości granicznej względnej zmiany wskazania: $a_{T,\text{rel}} = 0,094\%$.

Dla maksymalnej wartości siły przyjętej w analizie, równej 500 N , odpowiada jej graniczna bezwzględna zmiana wskazania:

$$a_T(F_{\text{applied}}(t)) = 500\text{ N} \cdot \frac{0,094}{100} = 0,47\text{ N} \quad (7.22)$$

$$u_T(F_{\text{applied}}(t)) = \frac{a_T(F_{\text{applied}}(t))}{\sqrt{3}} = \frac{0,47}{\sqrt{3}} = 0,271\text{ N} \quad (7.23)$$

Po uwzględnieniu wszystkich składowych niepewności przypisanych amplitudzie $F_{\text{applied},i}$ otrzymano:

$$\begin{aligned} u(F_{\text{applied},i}) &= \sqrt{u_{\text{cal}}^2(F_{\text{applied},i}) + u_{\text{res}}^2(F_{\text{applied},i}) + u_T^2(F_{\text{applied},i})} \\ &= \sqrt{2,6^2 + 0,00029^2 + 0,271^2} = 2,614\text{ N} \end{aligned} \quad (7.24)$$

Podczas serii pomiarowej temperatura pozostawała stała. Składową temperaturową zachowano w budżecie jako konserwatywne ograniczenie typu B wynikające z danych technicznych siłomierza.

Niepewność standardowa różnicy częstotliwości

Składowe niepewności standardowej wskazania częstotliwości $u_{\text{cal}}(f_i)$, wynikające ze świadectwa wzorcowania toru pomiarowego, zestawiono w tabeli 7.2.

Tabela 7.2. Niepewność standardowa wskazania częstotliwości na podstawie świadectwa wzorcowania

Wartość częstotliwości f_i [Hz]	$u_{cal}(f_i)$ [Hz]
0,5	0,00025
5,0	0,0021
10,0	0,0084
20,0	0,016

Składową niepewności standardowej różnicy dwóch kolejnych wartości częstotliwości $\Delta f_i = f_{i+1} - f_i$, przy założeniu braku korelacji pomiędzy f_i i f_{i+1} , wyznaczono zgodnie z prawem propagacji niepewności:

$$u_{cal}(\Delta f_i) = \sqrt{u^2(f_i) + u^2(f_{i+1})} = \sqrt{0,00025^2 + 0,00025^2} = 0,00035 \text{ Hz} \quad (7.25)$$

Tabela 7.3. Przykład wyznaczenia składowej niepewności standardowej różnicy kolejnych wskazań częstotliwości wynikającej ze świadectwa wzorcowania

Przedział częstotliwości [Hz]	$u_{cal}(f_i)$ [Hz]	$u_{cal}(f_{i+1})$ [Hz]	$u_{cal}(\Delta f_i)$ [Hz]
0,5 ÷ 1,0	0,00025	0,00025	0,00035

Dodatkowo uwzględniono składową niepewności związaną z rozdzielczością wskazania częstotliwości. Rozdzielczość pojedynczego wskazania wynosiła:

$$d_f = 0,001 \text{ Hz} \quad (7.26)$$

$$u_{res}(f_i) = \frac{d_f}{2\sqrt{3}} = 0,00029 \text{ Hz} \quad (7.27)$$

Ponieważ różnica Δf_i jest wyznaczana na podstawie dwóch kolejnych wskazań częstotliwości, składową niepewności związaną z rozdzielczością uwzględniono oddzielnie dla obu wskazań f_i i f_{i+1} . Jeżeli niepewność podana w świadectwie wzorcowania obejmuje już rozdzielczość, składowej tej nie należy dodawać ponownie.

$$\begin{aligned} u(\Delta f_i) &= \sqrt{u_{cal}^2(\Delta f_i) + u_{res}^2(f_i) + u_{res}^2(f_{i+1})} = \sqrt{0,00035^2 + 2 \cdot 0,00029^2} \\ &= 0,00054 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (7.28)$$

Tabela 7.4. Przykład wyznaczenia łącznej niepewności standardowej różnicy częstotliwości z uwzględnieniem rozdzielenia obu wskazań

Przedział częstotliwości [Hz]	$u_{cal}(\Delta f_i)$ [Hz]	$u_{res}(f_i) = u_{res}(f_{i+1})$ [Hz]	$u(\Delta f_i)$ łącznie [Hz]
0,5 ÷ 1,0	0,00035	0,00029	0,00054

Stanowisko do badań z wykorzystaniem toru pomiaru częstotliwości pracuje w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych, a więc nie zachodzi konieczność uwzględnienia zmiennych warunków środowiskowych.

Kolejne przyrosty częstotliwości Δf_i nie są formalnie niezależne, ponieważ sąsiednie przyrosty zawierają wspólną wartość f_{i+1} . Przy założeniu niezależności wskazań f_i odpowiadająca kowariancja ma znak ujemny. Pominięcie tych ujemnych wyrazów kowariancyjnych prowadzi do zwiększenia oszacowania częstotliwościowej składowej niepewności i ma zatem charakter konserwatywny.

Niepewność standardowa względnej różnicy wartości $F_{measured,i}$ i $F_{applied,i}$.

W równaniu funkcji przeniesienia występuje bezwymiarowa wielkość r_i której niepewność standardową wyznaczono na podstawie prawa propagacji niepewności, uwzględniając niepewności standardowe $F_{measured,i}$ i $F_{applied,i}$.

$$u(r_i) = \sqrt{c_{F_{measured,i}}^2 \cdot u^2(F_{measured,i}) + c_{F_{applied,i}}^2 \cdot u^2(F_{applied,i})} \quad (7.29)$$

$c_{F_{measured,i}}$ – wartość bezwzględna współczynnika wrażliwości r_i względem $F_{measured,i}$ [N⁻¹],

$c_{F_{applied,i}}$ – wartość bezwzględna współczynnika wrażliwości r_i względem $F_{applied,i}$ [N⁻¹],

$u(F_{measured,i})$ – niepewność standardowa amplitudy składowej $F_{measured}(t)$ o częstotliwości f_i [N],

$u(F_{applied,i})$ – niepewność standardowa amplitudy składowej $F_{applied}(t)$ o częstotliwości f_i [N].

$$c_{F_{measured,i}} = \left| \frac{\partial r_i}{\partial F_{measured,i}} \right| = \frac{1}{F_{applied,i}} \quad (7.30)$$

$$c_{F_{applied,i}} = \left| \frac{\partial r_i}{\partial F_{applied,i}} \right| = \frac{F_{measured,i}}{F_{applied,i}^2} \quad (7.31)$$

$$u(r_i) = \sqrt{\left(\frac{u(F_{\text{measured},i})}{F_{\text{applied},i}}\right)^2 + \left(\frac{F_{\text{measured},i} u(F_{\text{applied},i})}{F_{\text{applied},i}^2}\right)^2} = 0,173 \text{ N} \quad (7.32)$$

W tabelach 7.5 i 7.6 przedstawiono wybrane wartości ilustrujące sposób prowadzenia obliczeń. Pełne obliczenia wykonano dla 40 punktów pomiarowych w zakresie $0,5 \div 20,0$ Hz, co odpowiada 39 przedziałom Δf_i . Dla każdego punktu uwzględniono odpowiadające mu wartości wielkości wejściowych oraz przypisane im składowe niepewności. Ostatnim analizowanym przedziałem jest $19,5 \div 20,0$ Hz; dla punktu 20,0 Hz nie występuje kolejna wartość $f_{(i+1)}$. Pełne zestawienie danych wejściowych i wyników pośrednich stanowi dokumentację obliczeniową przeprowadzonych badań.

Tabela 7.5. Wybrane wartości amplitud $F_{\text{applied},i}$ i $F_{\text{measured},i}$ oraz odpowiadające im składowe niepewności

Częstotliwość [Hz]	Amplituda $F_{\text{applied},i}$ [N]	Amplituda $F_{\text{measured},i}$ [N]	$u(F_{\text{measured},i})$ [N]	$u(F_{\text{applied},i})$ [N]	$u(r_i)$ [-]
0,5	17,487	16,699	1,697	2,614	0,173
1,0	16,443	15,486	1,697	2,614	0,182
...	...	...	...	...	...
19,5	17,865	16,903	1,697	2,614	0,168
20,0	17,381	16,529	1,697	2,614	0,173

Tabela 7.6. Wybrane wartości łącznej niepewności standardowej różnicy kolejnych wskazań częstotliwości

Przedział częstotliwości [Hz]	$u_{\text{cal}}(\Delta f_i)$ [Hz]	$u_{\text{res}}(f_i) = u_{\text{res}}(f_{i+1})$ [Hz]	$u(\Delta f_i)$ łącznie [Hz]
$0,5 \div 1,0$	0,00035	0,00029	0,00054
$19,5 \div 20,0$	0,0226	0,00029	0,0226

W analizie przyjęto 40 punktów pomiarowych w zakresie $0,5 \div 20,0$ Hz, co daje 39 przedziałów Δf_i . Ostatnim przedziałem jest $19,5 \div 20,0$ Hz; dla punktu 20,0 Hz nie występuje kolejna wartość f_{i+1} .

Na podstawie wyznaczonych składowych określono złożoną niepewność standardową $u(J)$, a następnie niepewność rozszerzoną $U(J) = k \cdot u(J)$. W tabeli 7.7 przewidziano odrębne przedstawienie wyników dla obu położań wymuszenia wymaganych w badaniu laboratoryjnym.

Tabela 7.7. Wyniki wyznaczenia wskaźnika J i jego niepewności w zakresie $0,5 \div 20,0$ Hz

Zakres częstotliwości [Hz]	Liczba punktów n	J [%]	$u(J)$ [p.p.]	k	$U(J)$ [p.p.]	Położenie przyłożenia siły
0,5 ÷ 20,0	40	97,57	2,79	2	5,58	centralnie
0,5 ÷ 20,0	40	94,36	3,24	2	6,48	około 250 mm

W podstawowym wariancie budżetu zastosowano uproszczony sposób łączenia niepewności poszczególnych składników $x_i = \Delta f \cdot r_i$, bez pełnej macierzy kowariancji pomiędzy kolejnymi punktami. Uproszczenie to nie jest utożsamiane z dowodem niezależności wszystkich składników. W szczególności wspólne składowe typu B mogą powodować korelację pomiędzy punktami częstotliwości. Dla sąsiednich przyrostów Δf zależność wynikająca ze wspólnej wartości $f_{(i+1)}$ prowadzi do ujemnej kowariancji. Jej pominięcie zwiększa częstotliwościową część oszacowania i jest konserwatywne.

Dodatkowo przeprowadzono uproszczone obliczenie kontrolne polegające na jednoczesnej zmianie wartości sił zmierzonych i zadanych w granicach odpowiadających przyjętym niepewnościom standardowym. Obliczenie to miało charakter weryfikacyjny i nie stanowiło odrębnego sposobu wyznaczenia złożonej niepewności standardowej. Wynik obliczenia kontrolnego nie zmienił końcowej oceny zgodności.

7.3 Ocena aerodynamicznego wpływu układu pomiarowego

Zgodnie z pkt 7.2 PN-EN 50317 zainstalowany układ pomiarowy nie powinien zmieniać całkowitej średniej siły unoszącej o więcej niż 5%. Dla potrzeb jednoznacznego przedstawienia tej kontroli w rozprawie przyjęto względną zmianę:

$$\delta_{sys,aero}(v) = \frac{|F_s(v) - F_z(v)|}{F_z(v)} \cdot 100\% \quad (7.33)$$

$\delta_{sys,aero}(v)$ – względna zmiana całkowitej średniej siły unoszącej spowodowana zainstalowaniem układu pomiarowego [%],

$F_s(v)$ – całkowita średnia siła unosząca, równa sumie średnich w czasie sił $\bar{F}_{cord,q}(v)$ w linkach uwiązujących, wyznaczona dla odbieraka z zainstalowanym układem pomiarowym i danego punktu prędkości [N],

$F_z(v)$ – całkowita średnia siła unosząca, równa sumie średnich w czasie sił $\bar{F}_{cord,q}(v)$ w linkach uwiązujących, wyznaczona dla odbieraka bez zainstalowanego układu pomiarowego i danego punktu prędkości [N].

Obie wartości wyznaczano z wykorzystaniem tego samego układu czterech torów pomiaru siły w linkach, przy odtworzeniu porównywalnych warunków prędkości, wysokości i konfiguracji odbieraka. Składowe typu B tych torów są następnie wykorzystywane również przy wyznaczaniu niepewności $F_s(v)$, stanowiącej wejście do budżetu korekcji $F_{corr,aero}(v)$. Dla skrócenia zapisu w równaniach (7.35)–(7.36) symbol F_{sz} oznacza całkowitą średnią siłę unoszącą w analizowanej konfiguracji.

$$u_{cal}(F_{s,q}) = u_{cal}(F_{z,q}) = u_{cal}(F_{cord,q}) \quad (7.34)$$

$$u_{res}(F_s) = u_{res}(F_z) = u_{res}(F_{sz}) \quad (7.35)$$

$$u_T(F_s) = u_T(F_z) = u_T(F_{sz}) \quad (7.36)$$

$u_{cal}(F_{s,q})$ – składowa niepewności standardowej wskazania siły w q-tej lince uwiązującej z układem pomiarowym wynikająca ze świadectwa wzorcowania [N],

$u_{cal}(F_{z,q})$ – składowa niepewności standardowej wskazania siły w q-tej lince uwiązującej bez układu pomiarowego wynikająca ze świadectwa wzorcowania [N],

$u_{cal}(F_{cord,q})$ – składowa niepewności standardowej wskazania siły w q-tej lince uwiązującej wynikająca ze świadectwa wzorcowania [N],

$u_{res}(F_s)$ – łączna składowa niepewności standardowej całkowitej średniej siły unoszącej z układem pomiarowym związana z rozdzielczością czterech torów pomiaru siły [N],

$u_{res}(F_z)$ – łączna składowa niepewności standardowej całkowitej średniej siły unoszącej bez układu pomiarowego związana z rozdzielczością czterech torów pomiaru siły [N],

$u_{res}(F_{sz})$ – łączna składowa niepewności standardowej całkowitej średniej siły unoszącej związana z rozdzielczością czterech torów pomiaru siły [N],

- $u_T(F_s)$ – składowa niepewności standardowej wskazania toru pomiaru całkowitej średniej siły unoszącej z układem pomiarowym związana z wpływem temperatury [N],
- $u_T(F_z)$ – składowa niepewności standardowej wskazania toru pomiaru całkowitej średniej siły unoszącej bez układu pomiarowego związana z wpływem temperatury [N],
- $u_T(F_{sz})$ – składowa niepewności standardowej całkowitej średniej siły unoszącej związana z wpływem temperatury [N].

Składową typu B całkowitej średniej siły unoszącej $F_s(v)$, wykorzystywaną następnie w budżecie korekcji $F_{corr,aero}(v)$, wyznaczono z zależności:

$$u_B(F_s) = \sqrt{\sum_{q=1}^4 u_{cal}^2(F_{cord,q}) + u_{res}^2(F_s) + u_T^2(F_s)} \quad (7.37)$$

Wartości względnych niepewności rozszerzonych podanych w świadectwach wzorcowania oraz odpowiadających im składowych niepewności standardowej $u_{cal}(F_{cord,q})$, wyznaczonych dla $k = 2$, zestawiono dla czterech torów pomiaru siły w tabeli 7.8.

Tabela 7.8. Niepewności względne i standardowe czterech torów pomiaru siły unoszącej

Zakres wzorcowania [N]	Tor 1		Tor 2		Tor 3		Tor 4	
	U_{rel} [%]	u_{cal} [N]	U_{rel} [%]	u_{cal} [N]	U_{rel} [%]	u_{cal} [N]	U_{rel} [%]	u_{cal} [N]
25	0.140	0.018	0.160	0.020	0.310	0.039	0.400	0.050
50	0.570	0.143	0.220	0.055	0.470	0.118	0.310	0.078
75	0.360	0.135	0.160	0.060	0.260	0.098	0.240	0.090
100	0.340	0.170	0.140	0.070	0.270	0.135	0.190	0.095
125	0.280	0.175	0.170	0.106	0.240	0.150	0.180	0.113
150	0.240	0.180	0.140	0.105	0.140	0.105	0.180	0.135
175	0.240	0.210	0.150	0.131	0.180	0.158	0.140	0.123
200	0.240	0.240	0.120	0.120	0.190	0.190	0.200	0.200
225	0.220	0.248	0.150	0.169	0.180	0.203	0.180	0.203
250	0.250	0.313	0.130	0.163	0.170	0.213	0.150	0.188
300	0.230	0.345	0.120	0.180	0.160	0.240	0.170	0.255
400	0.290	0.580	0.170	0.340	0.170	0.340	0.200	0.400
500	0.300	0.750	0.190	0.475	0.170	0.425	0.190	0.475

W dalszej analizie, w celu zachowania podejścia konserwatywnego, dla każdego toru pomiarowego przyjęto maksymalną wartość niepewności standardowej występującą w rozpatrywanym zakresie pomiarowym.

W tabeli 7.8 wartości U_{rel} są niepewnościami rozszerzonymi ze świadectw wzorcowania dla $k = 2$, natomiast $u_{cal}(F_{cord,q})$ są odpowiadającymi im niepewnościami standardowymi.

Rozdzielczość wskazania każdego z czterech torów pomiaru siły unoszącej wynosiła:

$$d_{F,q} = 0,001 \text{ N}, q = 1, \dots, 4 \quad (7.38)$$

$d_{F,q}$ – rozdzielczość wskazania q-tego toru pomiaru siły, $q = 1, \dots, 4$.

Łączną składową niepewności wynikającą z rozdzielczości czterech torów wyznaczono zgodnie z przyjętą zasadą sumy kwadratów:

$$u_{res}(F_{sz}) = \sqrt{\sum_{q=1}^4 u_{res}^2(F_{sz,q})} = \sqrt{4 \cdot (0,00029)^2} = 0,00058 \text{ N} \quad (7.39)$$

Składową temperaturową pomiaru całkowitej średniej siły unoszącej wyznaczono na podstawie granicznej bezwzględnej zmiany wskazania, zgodnie z zasadami przedstawionymi w części wspólnej.

Siłomierz stanowiska pomiarowego:

- temperatura referencyjna: 23°C
- nominalny zakres temperatury: -10 ÷ 70°C
- eksploatacyjny zakres temperatury: -30 ÷ 85°C
- wpływ temperatury na czułość: 0,02 %/10 K

Na podstawie deklarowanego przez producenta wpływu temperatury na czułość, wynoszącego 0,02 %/10 K, oraz maksymalnej różnicy temperatur względem temperatury odniesienia wyznaczono graniczną względną zmianę wskazania.

$$a_{T,rel}(T_{max}) = \frac{0,02\%}{10 \text{ K}} \cdot |85 - 23| \text{ K} = 0,124\% \quad (7.40)$$

oraz

$$a_{T,rel}(T_{min}) = \frac{0,02\%}{10 \text{ K}} \cdot |23 - (-30)| \text{ K} = 0,106\% \quad (7.41)$$

Do dalszych obliczeń przyjęto większą z otrzymanych wartości granicznej względnej zmiany wskazania: $a_{T,rel} = 0,124 \%$.

Dla maksymalnej wartości siły przyjętej w analizie, równej 500 N, odpowiada jej graniczna bezwzględna zmiana wskazania:

$$a_T(F_{sz,q}) = 500 \text{ N} \cdot \frac{0,124}{100} = 0,62 \text{ N} \quad (7.42)$$

$$u_T(F_{cord,q}) = \frac{a_T(F_{cord,q})}{\sqrt{3}} = \frac{0,62}{\sqrt{3}} = 0,358 \text{ N} \quad (7.43)$$

$$u_T(F_{cord}) = \sqrt{\sum_{q=1}^4 u_T^2(F_{cord,q})} = \sqrt{\sum_{q=1}^4 0,358^2} = 0,716 \text{ N} \quad (7.44)$$

Wpływ wyposażenia pomiarowego na całkowitą średnią siłę unoszącą oceniono na podstawie względnej różnicy wyników uzyskanych dla odbieraka z zainstalowanym układem pomiarowym i bez tego wyposażenia. Maksymalna wartość $\delta_{sys,aero}(v)$ w badanym zakresie prędkości wyniosła 4,2 %, a więc pozostawała poniżej granicy 5 % określonej w PN-EN 50317 [18]. Wynik ten potwierdza, że dla analizowanej konfiguracji aerodynamiczny wpływ zabudowy aparatury pomiarowej mieścił się w granicy przyjętej dla tej kontroli.

Wielkość $\delta_{sys,aero}(v)$ ma charakter kwalifikacyjny i nie stanowi składnika modelu wyznaczania chwilowej siły stykowej $F_c(t)$. Nie jest zatem wprowadzana jako dodatkowa składowa budżetu niepewności $F_c(t)$. W modelu siły stykowej uwzględnia się natomiast korekcję aerodynamiczną $F_{corr,aero}(v)$, wyznaczaną odrębnie jako różnicę całkowitej średniej siły unoszącej $F_s(v)$ oraz średniej w czasie z sumy wskazań czterech torów FBG $\bar{F}_\Sigma(v)$, rejestrowanych równocześnie podczas tego samego badania aerodynamicznego.

7.4 Niepewność wyznaczania siły stykowej $F_c(t)$

Siłę stykową wyznaczano zgodnie z modelem przedstawionym w rozdziale 5.1. W budżecie zachowano pełną postać równania odpowiadającą PN-EN 50317 [18].

$$F_c = \sum_{j=1}^{k_f} F_{sensor,j} + \frac{m_{above}}{k_a} \sum_{j=1}^{k_a} a_{sensor,j} + F_{corr,aero} \quad (7.45)$$

$F_{sensor,j}(t)$ – siła zmierzona w j -tym torze pomiaru siły [N],

$F_{corr,aero}$ – korekcja siły aerodynamicznej [N],

$a_{sensor,j}$ – przyspieszenie [m/s^2],

k_f – liczba czujników siły,

k_a – liczba czujników przyspieszenia,

m_{above} – masa części odbieraka znajdujących się pomiędzy punktami pomiaru siły a punktem styku [kg].

Dla czytelności dalszej analizy niepewności przyjęto oznaczenia pomocnicze:

$$F_{\Sigma}(t) = \sum F_{sensor,j}(t), \quad j = 1, \dots, k_f \quad (7.46)$$

$$F_a(t) = \frac{m_{above}}{k_a} \cdot \sum a_{sensor,j}(t), \quad j = 1, \dots, k_a \quad (7.47)$$

$$F_c(t) = F_{\Sigma}(t) + F_a(t) + F_{corr,aero}(v) \quad (7.48)$$

W analizowanej konfiguracji przyjęto $k_f = 4$ oraz $k_a = 4$, zgodnie z rzeczywistą liczbą torów pomiaru siły i przyspieszenia zastosowanych w modelu $F_c(t)$. Tory tensometryczne wykorzystywane do pomiaru sił w linkach podczas badania aerodynamicznego nie są dodatkowymi torami wejściowymi chwilowego modelu $F_c(t)$.

Struktura budżetu niepewności siły stykowej $F_c(t)$

$$u_c(F_c) = \sqrt{u^2(F_{\Sigma}) + u^2(F_a) + u^2(F_{corr,aero})} \quad (7.49)$$

W równaniu (7.49) przyjęto brak jawnych wyrazów kowariancyjnych pomiędzy trzema członami budżetu. Przyjęcie braku jawnych wyrazów kowariancyjnych stanowi uproszczenie modelu propagacji niepewności. Wpływ tego uproszczenia na wynik zależy od znaku i wartości pominiętych kowariancji. W szczególności $F_{\Sigma}(t)$ z przejazdu dynamicznego oraz $\bar{F}_{\Sigma}(v)$ występująca ze znakiem ujemnym w $F_{corr,aero}(v)$ pochodzą z tych samych torów FBG, wspólne składowe typu B mogłyby prowadzić do częściowego znoszenia ich wpływu. Brak pełnego modelu kowariancji nie uzasadnia jednak sztucznego zmniejszania budżetu, dlatego w podstawowym wariancie składowe połączono metodą sumy kwadratów.

Budżet końcowy zbudowano kolejno z:

- 1) $u(F_{\Sigma})$ – niepewności sumy chwilowych wskazań czterech torów pomiaru siły FBG,
- 2) $u(F_a)$ – niepewności członu bezwładnościowego wynikającej z niepewności masy m_{above} i torów przyspieszenia,
- 3) $u(F_{corr,aero})$ – niepewności korekcji aerodynamicznej wyznaczonej z równoczesnego pomiaru $F_s(v)$ i $\bar{F}_{\Sigma}(v)$ podczas tego samego badania aerodynamicznego.

Niepewność sumy wskazań torów pomiaru siły $F_{\Sigma}(t)$

$F_{\Sigma}(t)$ jest sumą chwilowych wskazań tych samych czterech torów FBG, których właściwości dynamiczne kompletnej konfiguracji sprawdzono wcześniej w badaniu laboratoryjnym służącym do wyznaczenia wskaźnika J . W badaniu J sumaryczna odpowiedź tych torów jest oznaczana jako $F_{measured}(t)$; z jej amplitud $F_{measured,i}$ oraz amplitud $F_{applied,i}$ wyznacza się $|H(f_i)|$ i następnie J . Wskaźnik J pełni funkcję kwalifikacji dynamicznej kompletnej konfiguracji, ale nie skaluje $F_{\Sigma}(t)$. Dlatego $U(J)$ nie jest składnikiem $u(F_{\Sigma})$ ani $u(F_c)$.

$u(F_{\Sigma})$

$$= \sqrt{u_{cal}^2(F_{sensor,1}) + u_{cal}^2(F_{sensor,2}) + u_{cal}^2(F_{sensor,3}) + u_{cal}^2(F_{sensor,4}) + u_{res}^2(F_{\Sigma})} \quad (7.50)$$

Z tabeli 7.1 przyjęto konserwatywnie maksymalne wartości $u_{cal}(F_{sensor,j})$: 0,930 N; 0,602 N; 0,973 N; 0,840 N. Po uwzględnieniu składowej rozdzielczości czterech torów otrzymuje się $u(F_{\Sigma}) = 1,697$ N. Wartość ta jest liczbowo zgodna z wcześniej otrzymaną składową dla sumarycznego toru FBG, ale w 7.4 wynika bezpośrednio z budżetu $F_{\Sigma}(t)$, a nie z niepewności wskaźnika J .

Niepewność korekcji siły aerodynamicznej $F_{corr,aero}(v)$

Siła korekcji aerodynamicznej $F_{corr,aero}(v)$ jest to różnica pomiędzy całkowitą średnią siłą unoszącą $F_s(v)$ a średnią w czasie z sumy sił mierzonych przez czujniki FBG $\bar{F}_{\Sigma}(v)$.

$$F_{corr,aero}(v) = F_s(v) - \bar{F}_{\Sigma}(v) \quad (7.51)$$

$F_{corr,aero}(v)$ – korekcja siły aerodynamicznej dla prędkości v [N],

- $F_s(v)$ – całkowita średnia siła unosząca, równa sumie średnich w czasie sił $\bar{F}_{\text{cord},q}(v)$ w linkach uwiązujących dla danego punktu prędkości [N],
- $\bar{F}_\Sigma(v)$ – średnia w czasie z $F_\Sigma(t)$, wyznaczona z równocześnie rejestrowanych sygnałów czterech torów pomiaru siły z czujnikami FBG podczas tego samego pomiaru aerodynamicznego, dla którego wyznaczono $F_s(v)$ [N].

Przedstawiony poniżej budżet niepewności korekcji aerodynamicznej odnosi się do konfiguracji pomiarowej z odbierakiem EC ENGINEERING Sp. z o.o. typu 160T-3kVDC, wersja 160T-01, wykorzystanej w kampanii 3 kV DC przedstawionej w rozdziale 10.

Sposób zastosowania budżetu niepewności korekcji aerodynamicznej pokazano na rzeczywistym punkcie tej kampanii. Dla kierunku B i prędkości 80 km/h uzyskano $F_s(v)=119,3$ N oraz $\bar{F}_\Sigma(v)=116,1$ N. Z zależności $F_{\text{corr,aero}}(v) = F_s(v) - \bar{F}_\Sigma(v)$ otrzymano $F_{\text{corr,aero}}(v) = 3,2$ N, tabela 7.9. Ten sam punkt przedstawiono w rozdziale 10 w ramach eksperymentalnej weryfikacji metodyki.

Tabela 7.9. Reprezentatywny rzeczywisty punkt wyznaczania korekcji aerodynamicznej
- seria 3 kV DC

System	Kierunek	v [km/h]	$F_s(v)$ [N]	$\bar{F}_\Sigma(v)$ [N]	$F_{\text{corr,aero}}(v)$ [N]
3 kV DC	B	80	119,3	116,1	3,2

Składową typu A określono na podstawie pięciu powtórzeń tego samego punktu pomiarowego. Dla wartości $F_{\text{corr,aero},r}(v) = 3,9; 3,2; 5,4; 5,4$ i $4,6$ N eksperymentalne odchylenie standardowe wyniosło $s(F_{\text{corr,aero}}) = 0,959$ N, a niepewność standardowa średniej $u_A(F_{\text{corr,aero}}) = s/\sqrt{5} = 0,429$ N.

Tabela 7.10. Powtórzenia wykorzystane do oceny składowej typu A korekcji aerodynamicznej

Powtórzenie r	$F_{\text{corr,aero},r}(v)$ [N]
1	3.9
2	3.2
3	5.4
4	5.4
5	4.6

Wartość 3,2 N przedstawiona w tabeli 7.9 jest wynikiem jednego z pięciu powtórzeń nominalnie tego samego punktu pracy. Średnia z serii zestawionej w tabeli 7.10 wynosi 4,5 N, a niepewność standardową typu A równą 0,429 N wyznaczono dla tej średniej.

Składowe typu B przeniesiono z wcześniej wyznaczonych budżetów torów pomiarowych. Dla sumarycznego pomiaru sił w linkach przyjęto $u_B(F_s) = 1,307 \text{ N}$, natomiast dla sumy czterech torów FBG $u_B(\bar{F}_\Sigma) = u(F_\Sigma) = 1,697 \text{ N}$. Po połączeniu tych składowych z powtarzalnością otrzymano:

$$u_c(F_{corr,aero}) = \sqrt{0,429^2 + 1,307^2 + 1,697^2} = 2,185 \text{ N} \quad (7.52)$$

oraz

$$U(F_{corr,aero}) = 4,37 \text{ N dla } k = 2 \quad (7.53)$$

Budżet niepewności korekcji aerodynamicznej dla reprezentatywnego przypadku 3 kV DC zestawiono w tabeli 7.11.

Tabela 7.11. Budżet niepewności korekcji aerodynamicznej dla reprezentatywnego przypadku 3 kV DC

Składnik	Typ / źródło	u [N]	Znaczenie w budżecie
$u_A(F_{corr,aero})$	A	0,429	niepewność standardowa średniej korekcji z pięciu powtórzeń
$u_B(F_s)$	B	1,307	niepewność czterech torów pomiaru sił w linkach
$u_B(\bar{F}_\Sigma)$	B	1,697	niepewność sumy czterech torów FBG
$u_c(F_{corr,aero})$	—	2,185	złożona niepewność standardowa
$U(F_{corr,aero}), k=2$	—	4,37	niepewność rozszerzona

W budżecie dominują składowe typu B związane z pomiarem sił w linkach oraz z sumą czterech torów FBG. Składowa typu A, opisująca powtarzalność procesu wyznaczania korekcji, ma mniejszy udział. Otrzymaną wartość $u(F_{corr,aero}) = 2,185 \text{ N}$ wykorzystano następnie w końcowym budżecie niepewności chwilowej siły stykowej $F_c(t)$ dla tej samej konfiguracji pomiarowej.

Niepewność członu bezwładnościowego $F_a(t)$

Człon bezwładnościowy zachowano jako odrębną wielkość pomocniczą $F_a(t)$, zgodnie z oznaczeniami przyjętymi w rozprawie. Jest on wyznaczany z masy m_{above} części odbieraka znajdujących się pomiędzy punktami pomiaru siły a punktem styku oraz z uśrednionej przestrzennie wartości przyspieszenia wyznaczonej z czterech torów pomiaru przyspieszenia.

$$F_a(t) = \frac{m_{above}}{k_a} \cdot \sum_{j=1}^{k_a} a_{sensor,j}(t) \quad (7.54)$$

Niepewność standardową wyrażenia można przedstawić:

$$u(F_a) = \sqrt{c_1^2 u^2(m_{above}) + c_2^2 u^2\left(\sum_{j=1}^{k_a} a_{sensor,j}\right)} \quad (7.55)$$

$$c_1 = \frac{\partial F_a}{\partial m_{above}} = \frac{1}{k_a} \sum_{j=1}^{k_a} a_{sensor,j} \quad (7.56)$$

$$c_2 = \frac{\partial F_a}{\partial \sum_{j=1}^{k_a} a_{sensor,j}} = \frac{m_{above}}{k_a} \quad (7.57)$$

Przy założeniu braku korelacji pomiędzy m_{above} i $a_{sensor,j}$ w obrębie pojedynczego składnika F_a otrzymuje się:

- c_1 – współczynnik wrażliwości składnika F_a względem m_{above} ,
- c_2 – współczynnik wrażliwości F_a względem sumy przyspieszeń $S_a(t) = \sum a_{sensor,j}(t)$.

$$u(F_a) = \sqrt{\left(\frac{1}{k_a} \sum_{j=1}^{k_a} a_{sensor,j}\right)^2 u^2(m_{above}) + \left(\frac{m_{above}}{k_a}\right)^2 u^2 \sum_{j=1}^{k_a} a_{sensor,j}} \quad (7.58)$$

Niepewność standardowa przyspieszeń

$$u\left(\sum_{j=1}^{k_a} a_{sensor,j}\right) = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^{k_a} u_{cal}^2(a_{sensor,j})\right) + u_{res}^2(a_{sensor})} \quad (7.59)$$

Na potrzeby dalszych analiz przyjęto maksymalną wartość mierzonego przyspieszenia $a_{sensor,j} = 10 \text{ [m/s}^2\text{]}$.

Wartości względnych niepewności rozszerzonych podanych w świadectwach wzorcowania oraz odpowiadających im składowych niepewności standardowej $u_{cal}(a_{sensor,j})$, wyznaczonych dla $k = 2$, zestawiono dla czterech torów pomiaru przyspieszenia w tabeli 7.12.

Tabela 7.12. Niepewności względne i standardowe czterech światłowodowych torów pomiaru przyspieszenia

Tor 1			
Zakres wzorcowania		U_{rel} [%]	u_{cal} [m/s ²]
Częstotliwość [Hz]	Przyspieszenie [m/s ²]		
0,5	0.991	2.3	0.0114
5	10.3	1.7	0.0876
20	10.3	1.7	0.0876
Tor 2			
Zakres wzorcowania		U_{rel} [%]	u_{cal} [m/s ²]
Częstotliwość [Hz]	Przyspieszenie [m/s ²]		
0,5	0.991	2.3	0.0114
5	10.4	1.7	0.0884
20	10.6	1.7	0.0901
Tor 3			
Zakres wzorcowania		U_{rel} [%]	u_{cal} [m/s ²]
Częstotliwość [Hz]	Przyspieszenie [m/s ²]		
0,5	0.992	2.2	0.0109
5	10.5	1.7	0.0893
20	10.4	1.7	0.0884
Tor 4			
Zakres wzorcowania		U_{rel} [%]	u_{cal} [m/s ²]
Częstotliwość [Hz]	Przyspieszenie [m/s ²]		
0,5	0.991	2.3	0.0114
5	10.4	1.7	0.0884
20	10.4	1.7	0.0884

W dalszej analizie, w celu zachowania podejścia konserwatywnego, dla każdego toru pomiarowego przyjęto maksymalną wartość niepewności standardowej występującą w rozpatrywanym zakresie pomiarowym.

W tabeli 7.12 wartości U_{rel} są niepewnościami rozszerzonymi ze świadectw wzorcowania dla $k = 2$, natomiast $u_{cal}(a_{sensor,j})$ są odpowiadającymi im niepewnościami standardowymi.

Rozdzielczość wskazania każdego z czterech torów pomiaru przyspieszenia wynosiła:

$$d_{a,sensor,j} = 0,001 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}, j = 1, \dots, 4 \quad (7.60)$$

$d_{a,sensor,j}$ – rozdzielczość wskazania j-tego toru pomiaru przyspieszenia, $j = 1, \dots, 4$.

Łączną składową niepewności wynikającą z rozdzielczości czterech torów przyspieszenia wyznaczono zgodnie z przyjętą zasadą sumy kwadratów:

$$u_{\text{res}}(a_{\text{sensor}}) = \sqrt{\sum_{j=1}^4 u_{\text{res}}^2(a_{\text{sensor},j})} = \sqrt{4 \cdot (0,00029)^2} = 0,00058 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (7.61)$$

Po podstawieniu przyjętych wartości otrzymano:

$$\begin{aligned} u\left(\sum_{j=1}^4 a_{\text{sensor},j}\right) &= \sqrt{0,0876^2 + 0,0901^2 + 0,0893^2 + 0,0884^2 + 0,00058^2} \\ &= 0,1777 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \end{aligned} \quad (7.62)$$

Niepewność standardowa masy

$$u(m_{\text{above}}) = \sqrt{u_{\text{cal}}^2(m_{\text{above}}) + u_{\text{res}}^2(m_{\text{above}})} \quad (7.63)$$

Dla przedstawionego budżetu przyjęto $m_{\text{above}} = 15 \text{ kg}$ jako masę części odbieraka znajdujących się pomiędzy punktami pomiaru siły a punktem styku. Niepewność standardową pomiaru masy wyznaczono ze składowej wynikającej ze wzorcowania przyrządu oraz jego rozdzielczości.

$$u_{\text{cal}}(m_{\text{above}}) = 0,0005 \text{ kg} \quad (7.64)$$

Składowa niepewności standardowej związana z rozdzielczością pomiaru masy:

$$d_{m,\text{above}} = 0,001 \text{ kg} \quad (7.65)$$

Odpowiadającą rozdzielczości pomiaru masy składową niepewności standardowej wyznaczono zgodnie z założeniami wspólnymi:

$$u_{\text{res}}(m_{\text{above}}) = \frac{d}{2\sqrt{3}} = 0,00029 \text{ kg} \quad (7.66)$$

Po podstawieniu przyjętych wartości otrzymano:

$$u(m_{\text{above}}) = \sqrt{0,0005^2 + 0,00029^2} = 0,00058 \text{ kg} \quad (7.67)$$

Po podstawieniu obliczonych wielkości do wzoru (7.58) otrzymano:

$$u(F_a) = \sqrt{\left(\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 10\right)^2 * 0,00058^2 + \left(\frac{15}{4}\right)^2 * 0,1777^2} = 0,666 \text{ N} \quad (7.68)$$

$$u_c(F_c) = \sqrt{1,697^2 + 0,666^2 + 2,185^2} = 2,846 \text{ N} \quad (7.69)$$

$$U(F_c) = k \cdot u_c(F_c) = 5,692 \text{ N}, \quad k = 2 \quad (7.70)$$

Dla konfiguracji pomiarowej z odbierakiem EC ENGINEERING typu 160T-3kVDC, wersja 160T-01, wykorzystanej w reprezentatywnej kampanii 3 kV DC, uzyskano złożoną niepewność standardową $u_c(F_c) = 2,846 \text{ N}$ oraz niepewność rozszerzoną $U(F_c) = 5,692 \text{ N}$ dla $k = 2$. Wynik ten stanowi charakterystykę metrologiczną tej konfiguracji i jest wykorzystywany przy interpretacji wyników badań dynamicznych przedstawionych w rozdziale 10.

8 Analiza konstrukcyjna elementów układu pomiarowego

8.1 Cel i zakres projektowej weryfikacji konstrukcyjnej

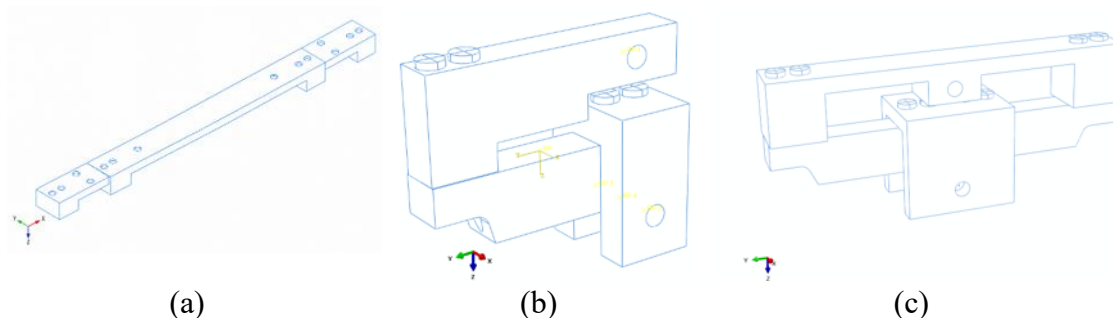
W rozdziałach poprzedzających przedstawiono koncepcję metodyki pomiarowo-analitycznej, architekturę układu pomiarowego, model wyznaczania siły stykowej, procedurę badań oraz ocenę niepewności wielkości wyznaczanych w ramach opracowanej metodyki. Praktyczna realizacja tych założeń wymagała mechanicznego zintegrowania czujników z głowicą odbieraka prądu w sposób ograniczający wpływ dodatkowej masy, podatności elementów mocujących i zmiany geometrii na właściwości badanego układu. Z tego względu analizy konstrukcyjne opisane w niniejszym rozdziale wykonano już na etapie projektowania, przed wykonaniem docelowych modułów pomiarowych.

Podstawowe założenia projektowe wynikały bezpośrednio z modelu pomiaru i wymagań metodyki. Czujniki siły i przyspieszenia należało umieścić możliwie blisko głowicy odbieraka, przy zachowaniu możliwości zabudowy czterech torów pomiaru siły i czterech torów przyspieszenia. Jednocześnie dążono do ograniczenia masy dodatkowych elementów, zapewnienia odpowiedniej sztywności połączeń oraz ograniczenia zmian geometrii mogących zwiększać oddziaływanie aerodynamiczne oprzyrządowanego odbieraka.

Projektowanie miało charakter iteracyjny. W toku prac wykonywano kolejne analizy MES dla modyfikowanych wariantów geometrii, a uzyskiwane wyniki wykorzystywano przy dalszym doborze cech konstrukcyjnych. Modyfikacje obejmowały między innymi grubości elementów, promienie przejść, lokalizację otworów, liczbę i rozstaw połączeń śrubowych oraz przekroje uchwytów. Zakres wykonanych prac obliczeniowych był zatem szerszy niż materiał wynikowy przedstawiony w niniejszym rozdziale. W rozprawie przedstawiono wyniki dotyczące trzech wariantów końcowych, które stanowiły podstawę wykonania modułów pomiarowych.

Ze względu na zróżnicowanie konstrukcji odbieraków prądu nie przyjęto jednego uniwersalnego rozwiązania mechanicznego. Modele obliczeniowe przedstawiono dla trzech końcowych wariantów oznaczonych numerami 2, 3 i 5, reprezentujących rozwiązania o odmiennej geometrii mocowań i sposobie przenoszenia obciążeń. Dla rozwiązań nr 1 i 4, ze względu na prostą konstrukcję elementów mocujących, nie

wykonywano odrębnych pełnych modeli MES. Niezależnie od różnic konstrukcyjnych zachowano wspólne założenia funkcjonalne i ten sam sposób oceny projektowej



Rys. 8.1. Końcowe warianty modułów pomiarowych poddanych analizie MES: a) model nr 2, b) model nr 3, c) model nr 5

Parametry analizowanych modeli modułów pomiarowych zestawione w tabeli 8.1.

Tabela 8.1. Wybrane parametry analizowanych modeli modułów pomiarowych

Parametr	Model nr 2	Model nr 3	Model nr 5
Masa uchwytu głównego, m_p [kg]	0,20	0,16	0,25
Masa pojedynczego uchwytu pomocniczego, m_o [kg]	0,12	0,20	0,22
Masa czujnika siły, m_c [kg]	0,02		
Połączenie uchwyt główny / czujnik	2 x śruba M8x65, klasa 8.8, moment		
Połączenie czujnik / uchwyt pomocniczy	2 x śruba M8x65, klasa 8.8, moment		
Materiał elementów nośnych	PA4 (AW-6082)		

Wartości mas elementów były istotne również z punktu widzenia modelu siły stykowej, ponieważ masa konstrukcji znajdującej się pomiędzy punktami pomiaru siły a punktem styku jest uwzględniana w członie bezwładnościowym modelu przedstawionym w rozdziale 5.

8.2 Model MES, materiały, obciążenia i warunki brzegowe

Modele numeryczne przygotowano w środowisku Abaqus 2024 na podstawie geometrii CAD projektowanych elementów. W analizach przyjęto liniowo-sprężysty model materiału. Elementy nośne wykonano ze stopu aluminium PA4 (AW-6082), którego parametry materiałowe zastosowane w obliczeniach zestawiono w tabeli 8.2.

Tabela 8.2. Właściwości stopu aluminium PA4 (AW-6082) przyjęte do obliczeń

Parametr	Wartość
Moduł Younga E [GPa]	70
Moduł sprężystości poprzecznej G [GPa]	26.4
Współczynnik Poissona ν [-]	0.33
Umowna granica plastyczności R_p [MPa]	105
Granica wytrzymałości na rozciąganie R_m [MPa]	205
Wydłużenie A [%]	14
Gęstość ρ [kg/mm ³]	$2,71 \cdot 10^{-6}$

Podstawowym przypadkiem obciążenia przyjętym do projektowej oceny konstrukcji była pionowa siła $F_{mes} = 500$ N, z uwzględnieniem ciężaru własnego konstrukcji. Do oceny wykorzystano kryteria odnoszące obliczone naprężenie zredukowane σ_c do umownej granicy plastyczności R_p oraz granicy wytrzymałości na rozciąganie R_m . Dla weryfikacji obliczeniowej przyjęto współczynniki bezpieczeństwa $S_l = 1,15$ oraz $S_2 = 1,5$. Przy wartościach materiałowych $R_p = 105$ MPa i $R_m = 205$ MPa odpowiadają im poziomy odniesienia $R_p / S_l = 91,3$ MPa oraz $R_m / S_2 = 136,7$ MPa.

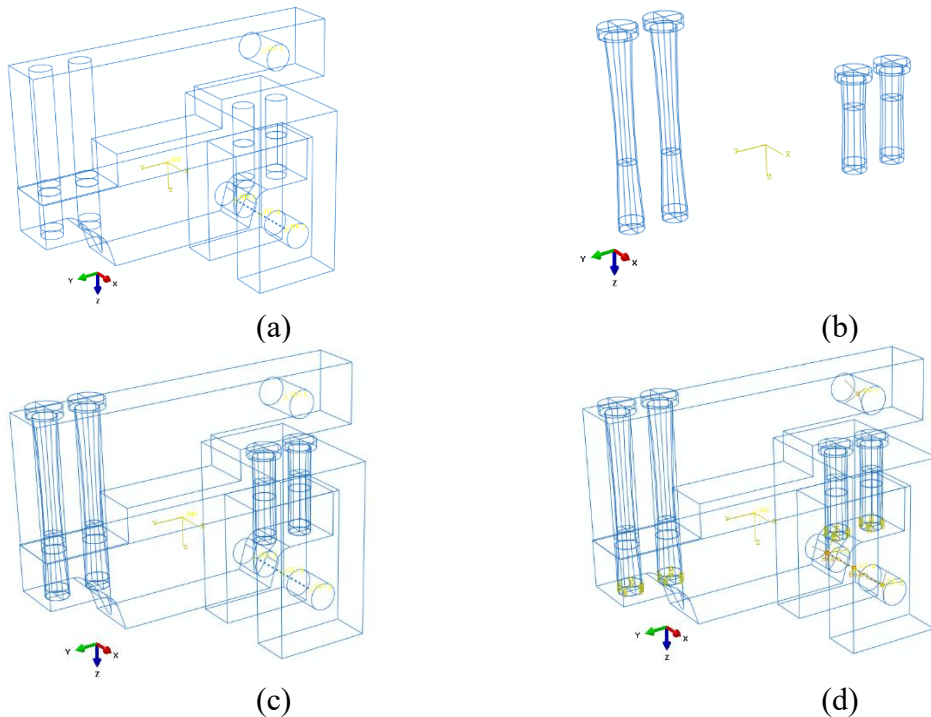
Poziomów tych nie interpretowano jednak jako bezwzględnej wartości granicznej dla każdego pojedynczego maksimum uzyskanego w modelu MES. Zgodnie z zasadami oceny konstrukcji z materiałów ciągliwych przyjętymi w PN-EN 12663-1+A2:2024 [113] lokalne koncentracje naprężeń, występujące m.in. przy otworach, zmianach przekroju i połączeniach, wymagają odrębnej interpretacji. Teoretyczna wartość naprężenia w takiej strefie może przekraczać poziom wynikający z granicy plastyczności, jeżeli obszar potencjalnego lokalnego uplastycznienia pozostaje ograniczony i nie prowadzi po usunięciu obciążenia do znaczącej trwałej deformacji konstrukcji. Analogiczny sposób traktowania lokalnych koncentracji uwzględnia się przy ocenie kryterium nośności granicznej. Z tego względu w analizie oceniano nie tylko wartość maksimum z mapy MES, lecz również jego lokalizację i rozległość oraz rozkład przemieszczeń konstrukcji.

Tabela 8.3. Kryteria i poziomy odniesienia przyjęte w analizie konstrukcyjnej

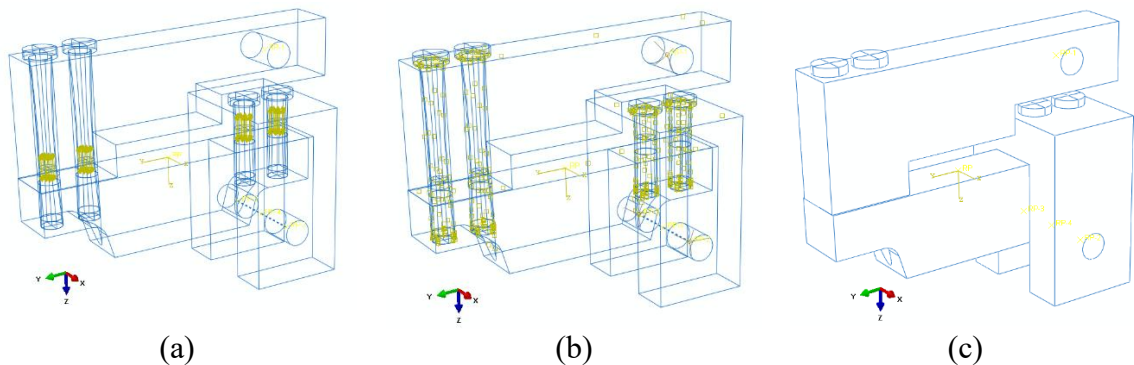
Kryterium	Warunek / sposób oceny	Poziom odniesienia
Granica plastyczności	$\frac{\sigma_c S_1}{R_p} \leq 1, S_1 = 1,15$	$\frac{R_p}{S_1} = 91,3 \text{ MPa}$
Granica wytrzymałości	$\frac{\sigma_c S_2}{R_m} \leq 1, S_2 = 1,5$	$\frac{R_m}{S_2} = 136,7 \text{ MPa}$
Lokalne koncentracje naprężeń	ocena lokalizacji i rozległości strefy koncentracji oraz możliwości wystąpienia znaczących trwałych deformacji po usunięciu obciążenia	ocena indywidualna z uwzględnieniem charakteru i zasięgu lokalnej koncentracji naprężeń

Model obliczeniowy odwzorowywał elementy nośne, połączenia śrubowe oraz warunki kontaktu mające wpływ na sposób przenoszenia obciążeń. Połączenia śrubowe opisano za pomocą elementów zastępczych o zadanej sztywności w trzech kierunkach. Na końcach śrub zastosowano więzy typu TIE, a w miejscach możliwego styku powierzchni przyjęto kontakt z współczynnikiem tarcia 0,2. W przekrojach śrub wprowadzono napięcie wstępne odpowiadające dokręceniu połączeń. W otworach montażowych zastosowano więzy COUPLING skupiające węzły powierzchni w punktach referencyjnych, natomiast do połączenia wybranych punktów referencyjnych wykorzystano elementy belkowe BEAM.

Na rysunkach 8.2 i 8.3 pokazano, na przykładzie jednego z analizowanych wariantów, sposób budowy modelu obliczeniowego i odwzorowania połączeń. Zestawienie tych ilustracji pozwala oddzielić geometrię elementów nośnych od elementów złącznych oraz wskazać miejsca zastosowania więzów, napięcia wstępnego i kontaktu powierzchniowego.

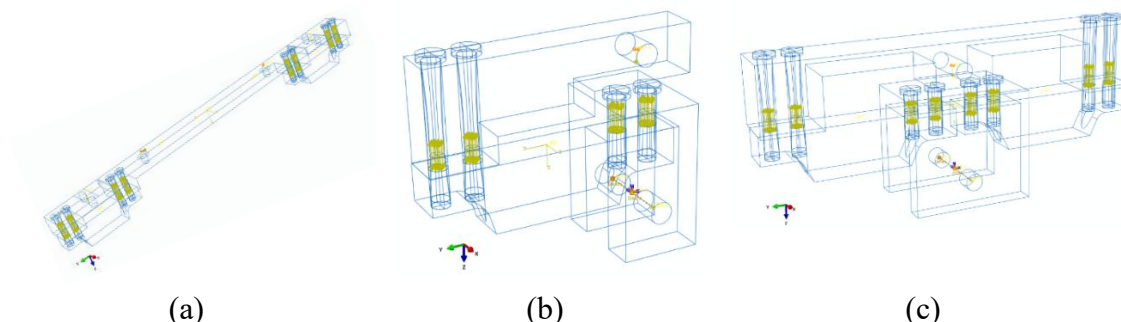


Rys. 8.2. Przykład budowy modelu obliczeniowego: a) elementy nośne, b) elementy złączne, c) złożenie, d) elementy pomocnicze MES – TIE, BEAM i COUPLING



Rys. 8.3. Szczegóły odwzorowania połączeń i warunków modelu: a) napięcie wstępne w śrubach, b) powierzchnie kontaktowe, c) orientacja układu współrzędnych

Przyjęto układ współrzędnych zgodny z orientacją pojazdu: oś X w kierunku jazdy, oś Y w kierunku poprzecznym, a oś Z w kierunku pionowym. W punkcie referencyjnym obejmującym odebrano trzy stopnie swobody translacyjne i trzy obrotowe. Dla stabilizacji rozwiązania w pierwszym kroku obliczeniowym blokowano dodatkowo przemieszczenie w kierunku wzdłużnym, a w kolejnym kroku warunek ten dezaktywowano. Rozmieszczenie obciążeń, punktów referencyjnych i elementów złącznych w końcowych modelach nr 2, 3 i 5 przedstawiono na rysunku 8.4.

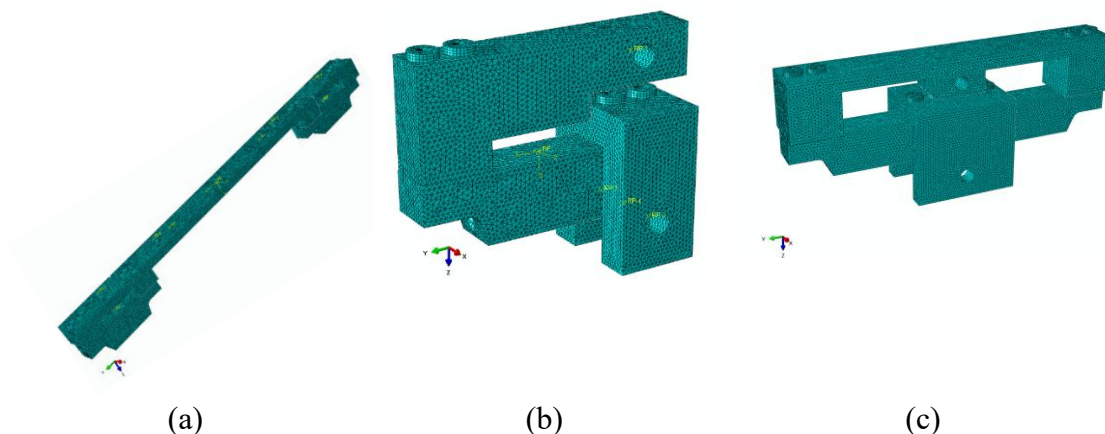


Rys. 8.4. Modele obliczeniowe – siły zewnętrzne, warunki brzegowe i elementy złączne: a) model nr 2, b) model nr 3, c) model nr 5

Siatkę obliczeniową zbudowano z bryłowych elementów drugiego rzędu. Dla elementów zastosowano elementy tetragonalne (czworościenne), natomiast dla śrub elementy heksagonalne. Liczebność siatek końcowych modeli zestawiono w tabeli 8.4, a ich widoki przedstawiono na rysunku 8.5.

Tabela 8.4. Liczba elementów w siatkach modeli MES

Model	Łącznie	Elementy tetragonalne	Elementy heksagonalne
2	359 367	315 911	43 456
3	200 505	179 897	20 608
5	378 081	341 345	36 736



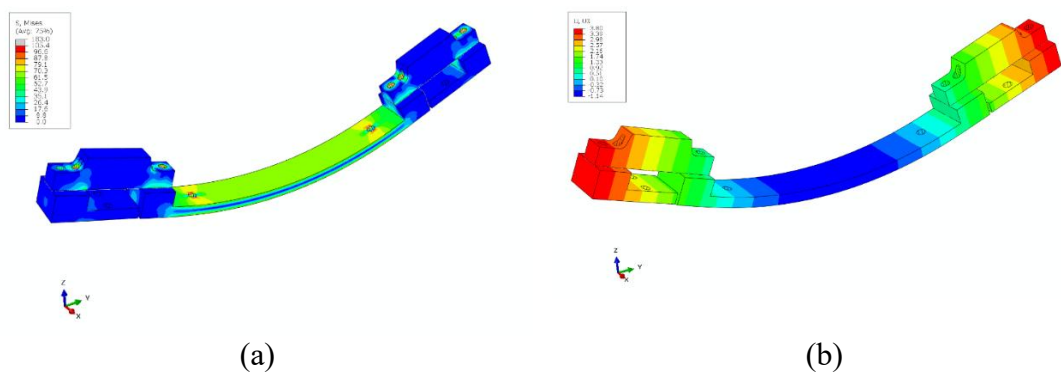
Rys. 8.5. Dyskretyzacja końcowych modeli MES: a) model nr 2, b) model nr 3, c) model nr 5

Ze względu na projektowy charakter analiz najważniejszym celem dyskretyzacji było uzyskanie rozkładów pozwalających identyfikować obszary koncentracji naprężeń oraz oceniać globalną podatność elementów. Lokalnego ekstremum naprężeń nie traktowano jako samodzielnej miary stanu naprężenia całej konstrukcji. Oceniano również jego lokalizację, zasięg obszaru podwyższonych naprężeń oraz odpowiadający mu rozkład przemieszczeń.

8.3 Wyniki analizy naprężeń i przemieszczeń oraz ocena przyjętych kryteriów

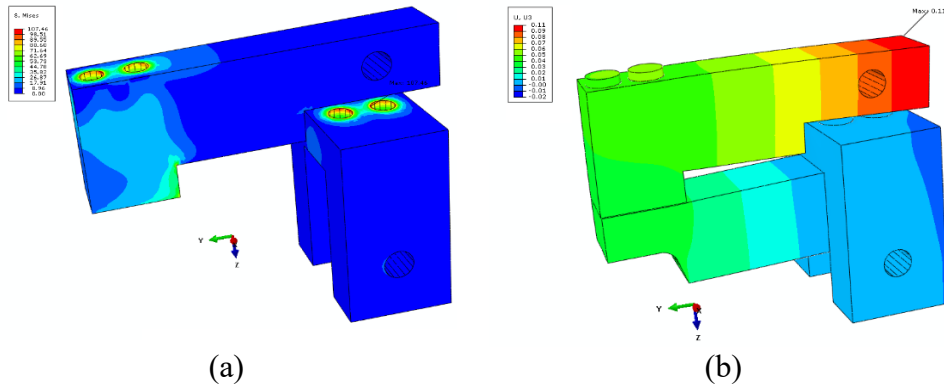
Naprężenia oceniano na podstawie naprężeń zredukowanych według hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego, właściwej dla elementów wykonanych z materiałów ciągłych. Drugą wielkością analizowaną w każdym modelu było przemieszczenie pionowe U_3 . Wspólne założenia materiałowe, obciążenie i sposób interpretacji zastosowano dla wszystkich wariantów końcowych, dzięki czemu możliwe było porównanie wpływu geometrii modułów na sposób przenoszenia obciążeń.

W modelu nr 2 największe wartości naprężeń występowały lokalnie w rejonach mocowania i zmian geometrii, natomiast zasadnicza część elementu nośnego pracowała przy wyrażnie niższych poziomach naprężeń. Maksymalne przemieszczenie pionowe było zlokalizowane w części oddalonej od punktów zamocowania, co odpowiada charakterowi pracy elementu o znacznej rozpiętości. Rozkład naprężeń i przemieszczeń przedstawiono na rysunku 8.6.



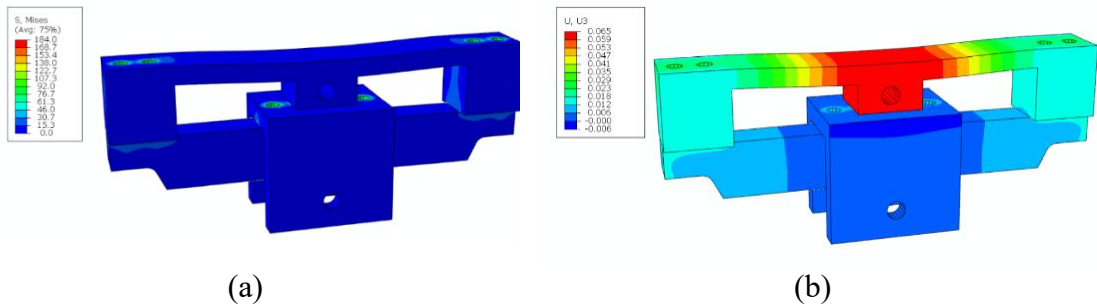
Rys. 8.6. Wyniki modelu nr 2 dla $F_{mes} = 500\text{ N}$: a) naprężenia zredukowane HMM [MPa],
b) przemieszczenie pionowe U_3 [mm]

Dla modelu nr 3 lokalne maksimum naprężenia zredukowanego wyniosło 107,46 MPa i występowało w sąsiedztwie otworu montażowego. Rozkład w pozostałej części konstrukcji był znacznie łagodniejszy. Maksymalne przemieszczenie pionowe wyniosło około 0,11 mm, co wskazuje na wyrażnie większą sztywność tego wariantu w porównaniu z modelem nr 2. Wyniki przedstawiono na rysunku 8.7.



Rys. 8.7. Wyniki modelu nr 3 dla $F_{mes} = 500\text{ N}$: a) naprężenia zredukowane HMH [MPa], b) przemieszczenie pionowe U_3 [mm]

W modelu nr 5 wartości szczytowe naprężeń były ponownie związane z lokalnymi strefami połączeń śrubowych i zmianami przekroju. Maksimum z legendy mapy wyniosło 184,0 MPa, natomiast maksymalne przemieszczenie pionowe około 0,065 mm. Rozkład przemieszczeń wskazuje na wysoką sztywność globalną wariantu, przy jednoczesnym występowaniu lokalnych koncentracji naprężeń w strefach połączeń. Wyniki przedstawiono na rysunku 8.8.



Rys. 8.8. Wyniki modelu nr 5 dla $F_{mes} = 500\text{ N}$: a) naprężenia zredukowane HMH [MPa], b) przemieszczenie pionowe U_3 [mm]

Tabela 8.5. Zestawienie wartości odczytanych z map wynikowych MES

Model	Lokalne maksimum [MPa]	Maks. $ U_3 $ [mm]	Lokalizacja / charakter wartości szczytowej
2	183,0	3,81	lokalne maksima w rejonach mocowania; największe przemieszczenie w części oddalonej od zamocowania
3	107,46	0,11	maksimum w sąsiedztwie otworu montażowego
5	184,0	0,065	lokalne maksima w rejonach połączeń śrubowych

Wartości zestawione w tabeli 8.5 są lokalnymi ekstremami odczytanymi z map naprężeń zredukowanych. We wszystkich analizowanych wariantach wartości szczytowe przekraczały poziom $R_p / S_1 = 91,3$ MPa, natomiast w modelach nr 2 i 5 przekraczały również poziom $R_m / S_2 = 136,7$ MPa. Maksima te występowały jednak w ograniczonych strefach związanych z otworami montażowymi, zmianami przekroju lub połączeniami śrubowymi, a nie w zasadniczych obszarach nośnych całych elementów. Ich lokalizacja odpowiadała miejscom geometrycznej i kontaktowej koncentracji naprężeń.

Z tego względu pojedynczej wartości maksymalnej z legendy mapy MES nie przyjęto jako reprezentatywnej miary stanu naprężenia całego modułu. Przy ocenie wariantów uwzględniano równocześnie położenie i rozległość stref podwyższonych naprężeń oraz rozkład przemieszczeń. Takie podejście odpowiada zasadzie stosowanej dla konstrukcji z materiałów ciągliwych, zgodnie z którą lokalne koncentracje naprężeń mogą być oceniane odrębnie od ogólnego kryterium granicy plastyczności, jeżeli mają ograniczony zasięg i nie powodują znaczącej trwałej deformacji po usunięciu obciążenia.

Należy jednocześnie uwzględnić ograniczenia zastosowanego modelu. Analizy przeprowadzono przy założeniu liniowo-sprężystych właściwości materiału, dlatego uzyskane lokalne wartości przekraczające granicę plastyczności należy traktować jako teoretyczne wskaźniki położenia i intensywności koncentracji naprężeń, a nie jako wynik pozwalający ilościowo określić lokalne odkształcenia plastyczne. Model MES wykorzystano zatem przede wszystkim jako narzędzie projektowe służące lokalizacji obszarów krytycznych, porównywaniu wariantów geometrii oraz ocenie globalnej sztywności projektowanych modułów.

Uzyskane wyniki wykorzystano w iteracyjnym procesie projektowania. Modyfikowano grubości elementów, promienie przejść, położenie otworów, liczbę i rozstaw połączeń śrubowych oraz przekroje uchwytów, ograniczając niekorzystne koncentracje naprężeń i nadmierną podatność konstrukcji. W rozprawie przedstawiono warianty końcowe, stanowiące podstawę wykonania rzeczywistych modułów pomiarowych.

8.4 Znaczenie wyników MES dla projektu układu pomiarowego

Przeprowadzone analizy MES stanowiły rzeczywisty etap projektowania modułów pomiarowych, poprzedzający ich wykonanie i zabudowę na odbierakach prądu. Ich funkcją nie było wyłącznie końcowe sprawdzenie przyjętej geometrii, lecz przede

wszystkim dostarczenie informacji umożliwiających iteracyjny dobór rozwiązań konstrukcyjnych. Na podstawie kolejnych analiz modyfikowano grubości i przekroje elementów, promienie przejść, lokalizację otworów oraz liczbę i rozstaw połączeń śrubowych. Zakres najważniejszych modyfikacji zestawiono w tabeli 8.6.

Tabela 8.6. Zakres modyfikacji konstrukcyjnych w kolejnych wariantach

Obszar projektowy	Rodzaj wprowadzanych zmian	Znaczenie w procesie projektowania
Elementy nośne	dobór grubości elementów	dobór sztywności i sposobu przenoszenia obciążeń przy ograniczeniu dodatkowej masy
Przejścia geometryczne	modyfikacja promieni przejść	ograniczenie lokalnych koncentracji naprężeń w miejscach zmiany geometrii
Otwory mocujące	zmiana lokalizacji otworów	kształtowanie ścieżki przenoszenia obciążeń i odsunięcie stref krytycznych od niekorzystnych przekrojów
Połączenia śrubowe	zmiana liczby i rozstawu śrub	bardziej równomierne rozłożenie obciążeń i zapewnienie powtarzalnego mocowania

Wyniki kolejnych iteracji wykorzystywano do ograniczania niekorzystnych koncentracji naprężeń oraz nadmiernej podatności elementów, przy jednoczesnym dążeniu do minimalizacji dodatkowej masy zabudowy. Było to szczególnie istotne z punktu widzenia przeznaczenia projektowanych elementów, ponieważ moduły pomiarowe są instalowane na ruchomych częściach odbieraka, a ich masa i sztywność mogą wpływać na właściwości dynamiczne kompletnej konfiguracji.

W rozprawie przedstawiono trzy końcowe warianty modeli nr 2, 3 i 5, ponieważ odpowiadają one rozwiązaniom przyjętym następnie do wykonania. Wartości maksymalne naprężeń otrzymane w tych modelach występowały lokalnie przede wszystkim w sąsiedztwie otworów, zmian przekroju i połączeń śrubowych. Przy ich interpretacji uwzględniono zasady oceny lokalnych koncentracji naprężeń w materiałach ciągłych oraz ograniczenia liniowo-sprężystego modelu obliczeniowego. Z tego względu o przydatności wariantu projektowego nie wnioskowano wyłącznie na podstawie pojedynczej maksymalnej wartości naprężenia, lecz na podstawie rozkładu naprężeń, lokalizacji i rozległości stref koncentracji oraz globalnych przemieszczeń konstrukcji.

Analiza MES pełniła zatem przede wszystkim funkcję projektowej weryfikacji i porównania wariantów konstrukcyjnych. Nie stanowiła samodzielnego potwierdzenia wszystkich właściwości kompletnej konfiguracji pomiarowej. Po wykonaniu modułów i ich zabudowie na odbierakach prawidłowość konfiguracji była sprawdzana w kolejnych

etapach opracowanej metodyki: podczas kontroli funkcjonalnej, badań statycznych oraz laboratoryjnego badania właściwości dynamicznych kompletnego oprzyrządowanego odbieraka zgodnie z PN-EN 50317 [18], [19].

Takie rozdzielenie funkcji poszczególnych etapów jest istotne również z punktu widzenia metrologicznego. Analizy konstrukcyjne ograniczały ryzyko zastosowania elementów o niekorzystnej geometrii, nadmiernej podatności lub zbyt dużej masie, natomiast rzeczywistą odpowiedź dynamiczną kompletnego odbieraka wraz z zabudowanym układem pomiarowym oceniano eksperymentalnie. Wyniki MES nie zastępowały więc laboratoryjnej kwalifikacji układu, lecz stanowiły wcześniejszy etap projektowy umożliwiający wykonanie modułów spełniających wymagania funkcjonalne opracowanej metodyki.

W rezultacie analiza konstrukcyjna została powiązana bezpośrednio z dalszym ciągiem procesu badawczego. Po zakończeniu projektowej weryfikacji moduły wykonano i zabudowano na odbierakach, a następnie poddano odpowiednim czynnościom kwalifikacyjnym przed rozpoczęciem właściwych badań dynamicznych. Takie podejście pozwoliło połączyć etap projektowania elementów mechanicznych z oceną ich rzeczywistego funkcjonowania w kompletnej konfiguracji pomiarowej.

9 Wyniki badań statycznych

9.1 Cel i zakres kwalifikacji statycznej

Badania statyczne stanowiły kolejny etap kwalifikacji konfiguracji pojazd-odbierak w ciągu badawczym przyjętym w rozprawie. Realizowano je po etapie projektowej analizy konstrukcyjnej opisanym w rozdziale 8, a przed laboratoryjnym badaniem właściwości dynamicznych kompletnej konfiguracji pomiarowej oraz badaniami dynamicznymi w warunkach jazdy. Ich celem było nie tylko wyznaczenie parametrów statycznych odbieraka, lecz również potwierdzenie prawidłowości jego zabudowy i integracji z pojazdem oraz regulacji parametrów istotnych dla późniejszej oceny współpracy dynamicznej, w szczególności geometrii, zakresu wysokości roboczej i charakterystyki statycznej siły stykowej. Takie uporządkowanie procesu badawczego ogranicza ryzyko przypisania skutków niewłaściwej zabudowy, stanu technicznego lub regulacji statycznej wpływowi układu pomiarowego albo zjawiskom występującym podczas jazdy.

Zakres sprawdzeń określano na podstawie dokumentów odniesienia właściwych dla badanego pojazdu, odbieraka oraz danej kampanii badawczej. W zakresie zamocowania odbieraka na pojeździe, mechanicznego współdziałania z przewodem jezdny i zakresu wysokości roboczej uwzględniano wymagania TSI LOC&PAS [22]. Geometrię ślizgacza i pozostałe parametry konstrukcyjne odnoszono do PN-EN 50367 [20], [38], [114] w wydaniu właściwym dla danej kampanii oraz dokumentacji technicznej odbieraka, natomiast charakterystykę statyczną siły stykowej wyznaczano zgodnie z PN-EN 50206-1 [41]. W zależności od programu danej kampanii sprawdzenia na poziomie pojazdu obejmowały także inne zagadnienia integracyjne, takie jak rozmieszczenie odbieraków, izolowanie odbieraka od pojazdu oraz funkcje i czasy jego opuszczania. Wartości graniczne i nominalne zestawione w dalszych tabelach są zatem wartościami odniesienia dla danej konfiguracji, a nie jednym uniwersalnym zestawem wymagań dla wszystkich odbieraków.

W ramach pracy autor przeprowadził i udokumentował pięć kompleksowych kampanii badawczych obejmujących różne pojazdy, odbieraki, systemy zasilania i lokalizacje badań. Rozdział 9 nie stanowi pełnego raportu ze wszystkich tych kampanii. Do szczegółowej prezentacji wybrano dwa reprezentatywne przypadki, tj. Panto300 i 200EC, dla których zakres uzyskanych wyników umożliwia prześledzenie kwalifikacji

statycznej oraz jej powiązania z kolejnymi etapami programu badawczego. Przedstawione wyniki są rezultatami badań wykonanych przez autora podczas rozwoju i wdrażania opracowanej metodyki. Eksperymentalna weryfikacja metodyki w badaniach dynamicznych, przedstawiona w rozdziale 10, obejmuje również inne konfiguracje pojazd–odbierak niż przypadki Panto300 i 200EC wybrane do szczegółowej prezentacji kwalifikacji statycznej.

Dla zachowania spójności z wykazem oznaczeń i rozdziałami metodycznymi wartość średnią wyznaczaną z charakterystyki przy ruchu odbieraka w dół i w górę oznaczono symbolem F_{stat} . W badaniach własnych wielkość tę określano również jako średni nacisk statyczny. Przedstawione sprawdzenia statyczne są odrębnym etapem kwalifikacji konfiguracji pojazd–odbierak: nie służą do wyznaczania wskaźnika J , korekcji aerodynamicznej ani przebiegu chwilowej siły stykowej $F_c(t)$. Wyznaczona wartość F_{stat} stanowi natomiast wartość odniesienia przy doborze poziomu siły w laboratoryjnym badaniu właściwości dynamicznych kompletnego oprzyrządowanego odbieraka zgodnie z PN-EN 50317 [18], [19].

9.2 Weryfikacja geometrii i zakresu roboczego

Weryfikację geometryczną prowadzono dla odbieraka zainstalowanego na pojeździe w konfiguracji przewidzianej do dalszych badań. Oceniano wymiary ślizgacza i nakładek stykowych, profil ślizgacza, skrajne położenia konstrukcyjne oraz zakres wysokości, w którym odbierak może mechanicznie współpracować z przewodem jezdny. Sprawdzenia te służyły nie tylko ocenie cech samego odbieraka, lecz również weryfikacji prawidłowości jego zabudowy na pojeździe w odniesieniu do położenia ślizgacza względem główki szyny i wymaganego zakresu współdziałania z siecią jezdnią. Wartości odniesienia w tabelach 9.1 i 9.2 pochodzą łącznie z wymagań interoperacyjności, właściwego wydania PN-EN 50367 [20], [38], [114] oraz DTR lub specyfikacji danego odbieraka, nie wszystkie pozycje tabel stanowią samodzielne wymagania jednego dokumentu odniesienia.

9.2.1 Odbierak Panto300

W przypadku odbieraka Panto300 zainstalowanego na pojeździe górna krawędź ślizgacza w położeniu odniesienia znajdowała się na wysokości 4135 mm od główki szyny. Zmierzony zakres uniesienia wyniósł 2475 mm, a maksymalne położenie górnej

krawędzi ślizgacza 6610 mm. Na tej podstawie potwierdzono możliwość mechanicznej współpracy z przewodami jezdnyymi zawieszonymi na wysokości od 4500 do 6500 mm w rozpatrywanej konfiguracji. Zakres uniesienia był większy od przyjętej minimalnej wartości 2000 mm.

Tabela 9.1. Wyniki weryfikacji geometrycznej odbieraka Panto300

Sprawdzany parametr	Wymaganie / wartość odniesienia	Wynik	Ocena
Długość całkowita ślizgacza [mm]	1950 (+0/-10)	1940	spełnione
Wysokość ślizgacza [mm]	340 ±5	335	spełnione
Szerokość ślizgacza [mm]	530 ±2	530	spełnione
Szerokość nakładki węglowej (1) [mm]	60	60	spełnione
Szerokość nakładki węglowej (2) [mm]	60	60	spełnione
Profil ślizgacza	B.2	tak	spełnione
Najmniejsza wysokość konstrukcyjna [mm]	410 (+0/-5)	405	spełnione
Największa wysokość konstrukcyjna [mm]	2900 (+100/-25)	2920	spełnione
Długość listwy węglowej [mm]	min. 1000	1030	spełnione
Długość części roboczej ślizgacza [mm]	1550	1550	spełnione

Odbierak Panto300 był wyposażony w węglowe nakładki stykowe typu RH83M8 produkcji PanTrac GmbH. Zastosowane nakładki posiadały certyfikat WE, a maksymalną zawartość dodatków metalicznych określono na 40 %; materiał znajdował się w wykazie rozwiązań dopuszczonych do współpracy z rozpatrywaną siecią 3 kV DC [115]. Informację tę wykorzystano wyłącznie do jednoznacznej identyfikacji badanej konfiguracji. Nie stanowi ona wyniku odrębnego badania materiałowego przeprowadzonego w ramach niniejszego rozdziału.

Przedstawione sprawdzenia Panto300 były częścią szerszego programu badań. Po kwalifikacji statycznej dla tej konfiguracji realizowano dalsze etapy programu, w tym badania dynamiczne oraz wybrane badania uzupełniające. Reprezentatywne przykłady poszczególnych modułów badań uzupełniających, pochodzące także z innych kampanii i obiektów, przedstawiono w rozdziale 11.

9.2.2 Odbierak 200EC

Dla odbieraka 200EC zainstalowanego na pojeździe górna krawędź ślizgacza w położeniu odniesienia znajdowała się na wysokości 4510 mm od główki szyny.

Zmierzony zakres roboczego uniesienia wyniósł 2150 mm, a maksymalne położenie górnej krawędzi ślizgacza 6660 mm. W badanej konfiguracji potwierdzono możliwość mechanicznej współpracy z przewodami jezdnyymi zawieszonymi na wysokości od 4800 do 6500 mm. Również w tym przypadku zmierzony zakres roboczy był większy od przyjętej minimalnej wartości 2000 mm.

Tabela 9.2. Wyniki weryfikacji geometrycznej odbieraka 200EC

Sprawdzany parametr	Wymaganie / wartość odniesienia	Wynik	Ocena
Długość całkowita ślizgacza [mm]	1950 (+0/-10)	1950	spełnione
Wysokość ślizgacza [mm]	340 ±5	345	spełnione
Szerokość ślizgacza [mm]	400 ±5	400	spełnione
Szerokość nakładki węglowej (1) [mm]	60	60	spełnione
Szerokość nakładki węglowej (2) [mm]	60	60	spełnione
Profil ślizgacza	B.2	tak	spełnione
Najmniejsza wysokość konstrukcyjna [mm]	295 ±5	295	spełnione
Największa wysokość konstrukcyjna [mm]	ok. 2900	2900	spełnione
Długość części roboczej ślizgacza [mm]	1030 (+0/-1)	1030	spełnione

W przypadku 200EC przedstawione pomiary geometrii i charakterystyki statycznej również stanowiły część szerszej kampanii oceny integracji odbieraka z pojazdem. W ramach tej kampanii sprawdzono ponadto rozmieszczenie dwóch odbieraków, izolowanie odbieraka od pojazdu oraz funkcje i czasy opuszczania, w tym czas odłączenia ślizgacza od przewodu jezdny. Wyników tych nie zamieszczono w niniejszym rozdziale, ponieważ nie są bezpośrednimi wielkościami wejściowymi modelu $F_c(t)$. Potwierdzają one jednak, że kwalifikację prowadzono na poziomie kompletnej konfiguracji pojazd-odbierak, a nie wyłącznie na poziomie pojedynczego elementu.

Wyniki zestawione w tabelach 9.1 i 9.2 wskazują na spełnienie wymagań i wartości odniesienia właściwych dla przedstawionych konfiguracji w zakresie objętym wykonanymi sprawdzeniami. Różnice szerokości ślizgacza, wysokości konstrukcyjnych i zakresów roboczych potwierdzają potrzebę każdorazowej identyfikacji badanego odbieraka, sposobu jego zabudowy oraz przypisania właściwego zestawu kryteriów. W opracowanej metodyce kwalifikacja konfiguracji pojazd-odbierak stanowi warunek przejścia do laboratoryjnej oceny właściwości dynamicznych kompletnego układu oraz do badań w warunkach jazdy.

9.3 Charakterystyka statyczna siły stykowej

9.3.1 Sposób wyznaczania wartości charakterystycznych

Charakterystykę statyczną wyznaczano dla obu kierunków ruchu odbieraka zgodnie z procedurą PN-EN 50206-1 [41]. Dla każdej rozpatrywanej wysokości h rejestrowano siłę podczas ruchu odbieraka w dół, oznaczoną $F_{stat,\downarrow}(h)$, oraz podczas ruchu w górę, oznaczoną $F_{stat,\uparrow}(h)$. Statyczną siłę stykową przypisaną do danej wysokości wyznaczano jako średnią arytmetyczną obu gałęzi charakterystyki:

$$F_{stat}(h) = \frac{F_{stat,\downarrow}(h) + F_{stat,\uparrow}(h)}{2} \quad (9.1)$$

Półowę różnicy pomiędzy obiema gałęziami charakterystyki, oznaczoną jako siła tarcia suchego F_t , wyznaczano z zależności:

$$F_t(h) = \frac{F_{stat,\downarrow}(h) - F_{stat,\uparrow}(h)}{2} \quad (9.2)$$

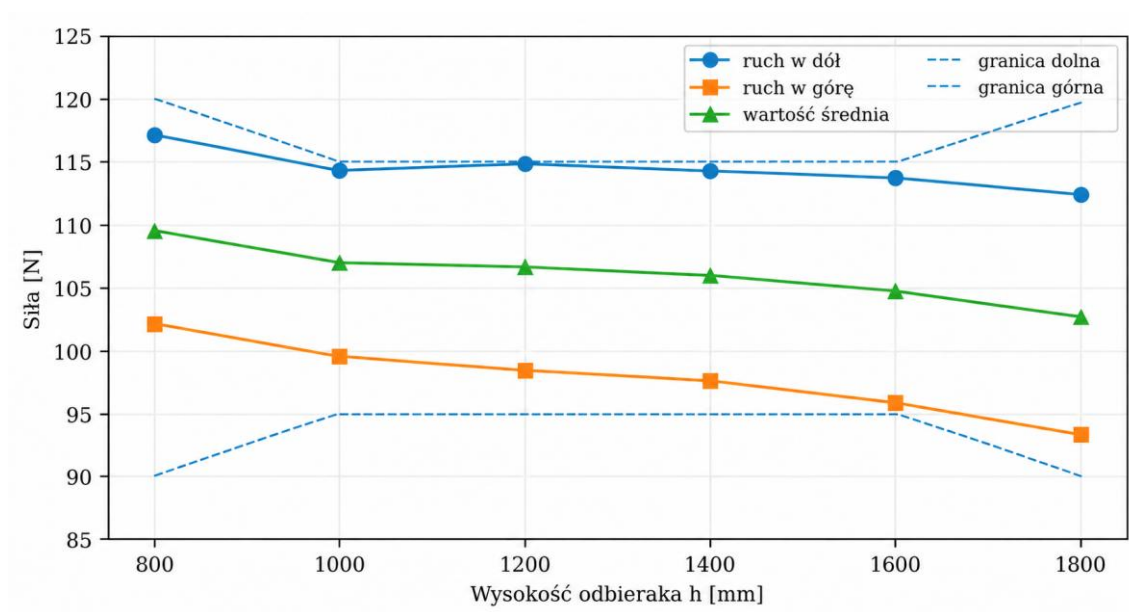
Wartość F_t jest parametrem pomocniczym opisującym rozwarcie statycznej pętli mechanicznej odbieraka. Nie jest ona składnikiem równania chwilowej siły stykowej $F_c(t)$ przyjętego w rozdziale 5. Ocena kwalifikacyjna opierała się przede wszystkim na przebiegu $F_{stat}(h)$, jego położeniu względem przyjętego przedziału oraz zgodności geometrii i regulacji ze specyfikacją danego obiektu.

9.3.2 Wyniki dla odbieraka Panto300

Dla odbieraka Panto300 wykonano łącznie sześć prób, rejestrując charakterystykę w zakresie wysokości 600-2000 mm. Do oceny wartości średniej w rozpatrywanym zakresie roboczym wykorzystano punkty 800-1800 mm. W tabeli 9.3 zestawiono wyniki reprezentatywnej próby nr 4.

Tabela 9.3. Charakterystyka statyczna odbieraka Panto300 - próba nr 4

h [mm]	$F_{stat\downarrow}$ [N]	$F_{stat\uparrow}$ [N]	F_{stat} [N]	F_t [N]
1800	112,36	93,41	102,89	9,48
1600	113,80	95,90	104,85	8,95
1400	114,21	97,66	105,94	8,28
1200	114,82	98,48	106,65	8,17
1000	114,26	99,57	106,92	7,35
800	116,98	102,10	109,54	7,44
Średnia	—	—	106,13	8,28



Rys. 9.1. Charakterystyka statyczna odbieraka Panto300 na podstawie wyników próby nr 4

Średnia wartość F_{stat} wyznaczona dla przedstawionej próby wyniosła 106,13 N, natomiast średnia wartość F_t była równa 8,28 N. Dla tej konfiguracji 3 kV DC jako przedział oceny F_{stat} przyjęto zgodnie z wymaganiami załącznika A do PN-EN 50206 [41]. Wszystkie wartości F_{stat} w zakresie 800 ÷ 1800 mm mieściły się w tym przedziale. Wynik potwierdził prawidłową regulację statyczną konfiguracji Panto300 przed przejściem do kolejnych etapów programu badawczego.

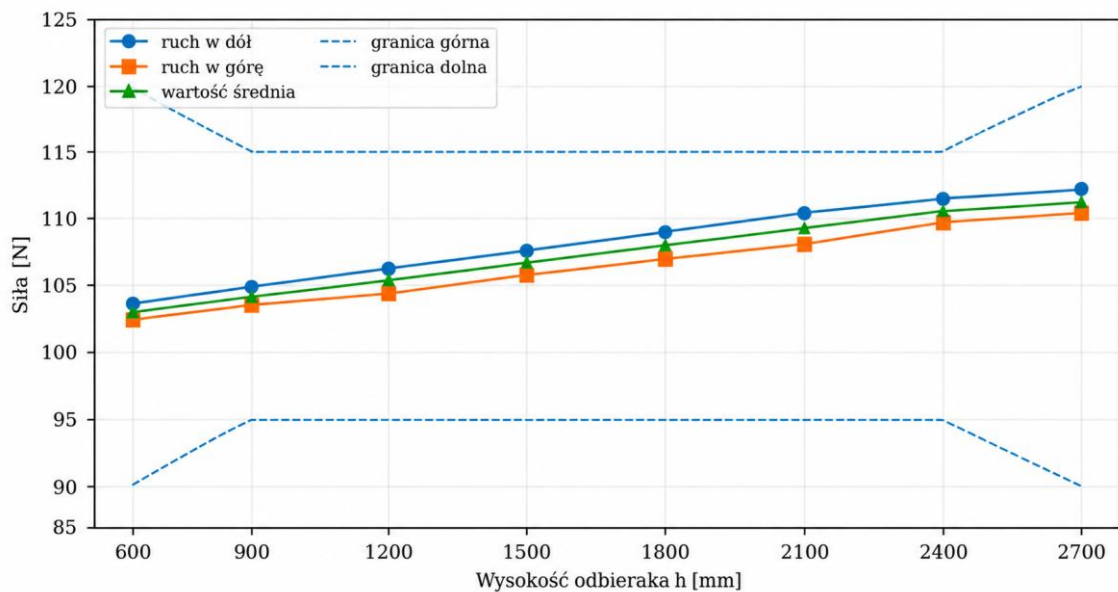
9.3.3 Wyniki dla odbieraka 200EC

Dla odbieraka 200EC wykonano pięć prób. Rejestrację prowadzono w deklarowanym zakresie wysokości 550 ÷ 2700 mm. W tabeli 9.4 przedstawiono wyniki próby nr 3 dla

punktów 600 ÷ 2700 mm. Analogicznie jak dla Panto300 wyznaczono $F_{stat}(h)$ jako średnią obu gałęzi charakterystyki oraz $F_t(h)$ jako połowę ich różnicy.

Tabela 9.4. Charakterystyka statyczna odbieraka 200EC – próba nr 3

h [mm]	$F_{stat\downarrow}$ [N]	$F_{stat\uparrow}$ [N]	F_{stat} [N]	F_t [N]
600	103,5	102,4	102,95	0,55
900	104,8	103,6	104,20	0,60
1200	106,2	104,4	105,30	0,90
1500	107,5	105,8	106,65	0,85
1800	108,9	107,0	107,95	0,95
2100	110,3	108,2	109,25	1,05
2400	111,3	109,7	110,50	0,80
2700	111,9	110,3	111,10	0,80
Średnia	—	—	107,20	0,80



Rys. 9.2. Charakterystyka statyczna odbieraka 200EC na podstawie wyników próby nr 3

Średnia wartość F_{stat} dla przedstawionej próby wyniosła 107,20 N, a średnia wartość F_t 0,80 N. Dla tej konfiguracji jako przedział oceny F_{stat} przyjęto zgodnie z wymaganiami załącznika A do PN-EN 50206 [41], uzyskana wartość mieściła się w tym przedziale. W przedstawionych reprezentatywnych próbach różnica pomiędzy gałęziami ruchu w dół i w górę była dla odbieraka 200EC mniejsza niż dla Panto300. Porównanie to ma charakter opisowy i nie stanowi podstawy do przypisania obserwowanej różnicy danemu rozwiązaniu konstrukcyjnemu ani mechanizmowi fizycznemu bez dodatkowych badań.

9.4 Ocena kwalifikacji i znaczenie wyników dla dalszych badań

Zestawienie ważniejszych wyników kwalifikacji statycznej przedstawiono w tabeli 9.5. Dla obu opisanych konfiguracji, w zakresie objętym przedstawionymi sprawdzeniami, potwierdzono wymagany zakres uniesienia, zgodność wymiarów geometrycznych oraz położenie charakterystyki F_{stat} w przyjętym przedziale. Wyniki te, rozpatrywane łącznie z kontrolą zabudowy i integracji odbieraka z pojazdem realizowaną w ramach poszczególnych kampanii, stanowiły podstawę do przejścia do kolejnych etapów opracowanej metodyki. Pozwala to oddzielić wpływ geometrii, zabudowy i regulacji statycznej od efektów związanych z odpowiedzią dynamiczną kompletnej konfiguracji pomiarowej i przetwarzaniem sygnałów.

Tabela 9.5. Zbioreczna ocena wyników badań statycznych

Odbierak	Zakres uniesienia [mm]	Średnia F_{stat} [N]	Średnia F_t [N]	Podstawa / kryterium oceny F_{stat}	Ocena opisowa
Panto300	2475	106,13	8,28	PN-EN 50206	w przedziale
200EC	2150	107,2	0,80	PN-EN 50206	w przedziale

Badania charakterystyki statycznej wykonano zgodnie z PN-EN 50206 [41]. Uzyskane wartości F_{stat} oceniono względem dopuszczalnego zakresu określonego w tej normie, właściwego dla badanej konfiguracji zgodnie z PN-EN 50367 [20], [38], [114]. Wszystkie wartości w analizowanym zakresie wysokości mieściły się w tym przedziale. Szczegółowa analiza niepewności w rozprawie dotyczy zasadniczego procesu wyznaczania chwilowej siły stykowej $F_c(t)$ i została przedstawiona w rozdziale 7.

Wyniki badań statycznych pełnią w ciągu dowodowym rozprawy funkcję warunku wejściowego do oceny dynamicznej. Potwierdzają, w zakresie wykonanych sprawdzeń, prawidłowość geometrii, zabudowy i integracji odbieraka z pojazdem oraz jego regulacji statycznej. Ogranicza to ryzyko interpretowania ewentualnych nieprawidłowości obserwowanych podczas jazdy jako skutku właściwości dynamicznych lub działania układu pomiarowego w sytuacji, gdy ich źródłem byłaby niewłaściwa konfiguracja pojazd–odbierak. Badania statyczne nie zastępują oceny kompletnej konfiguracji pomiarowej, nie dostarczają wyniku wskaźnika J , nie określają korekcji aerodynamicznej $F_{corr,aero}(v)$ i nie stanowią samodzielnej podstawy do wyznaczenia przebiegu $F_c(t)$. Jednocześnie wartość F_{stat} jest istotna przy przygotowaniu laboratoryjnego badania właściwości dynamicznych kompletnego oprzyrządowanego odbieraka, ponieważ PN-

EN 50317 [18], [19] wiąże poziom wymuszenia tego badania z wartością zmierzonej siły statycznej albo gdy siła stykowa rośnie z prędkością z przewidywaną wartością dla prędkości maksymalnej.

Po zakończeniu kwalifikacji statycznej kolejne etapy prowadzono zgodnie z ciągiem wynikającym z modelu przyjętego w rozdziałach 5–7, wykonywano laboratoryjne badanie właściwości dynamicznych kompletnej konfiguracji i wyznaczano wskaźnik J , następnie określano korekcję aerodynamiczną $F_{corr,aero}(v)$, rekonstruowano przebieg chwilowej siły stykowej zgodnie z zależnością $F_c(t) = F_{\Sigma}(t) + F_a(t) + F_{corr,aero}(v)$, a następnie wyznaczano wymagane parametry statystyczne, w tym F_m i σ . Dla wybranych obiektów program obejmował ponadto odrębny blok badań uzupełniających, zgodnie z koncepcją przedstawioną w rozdziałach 3.3 i 6.7. Wyniki kolejnych etapów przedstawiono w dalszych rozdziałach rozprawy.

10 Eksperymentalna weryfikacja opracowanej metodyki badań dynamicznej współpracy odbieraka z siecią trakcyjną

10.1 Zakres eksperymentalnej weryfikacji

Eksperymentalną weryfikację opracowanej metodyki przeprowadzono w ramach kampanii badawczych obejmujących dwa systemy zasilania – 3 kV DC i 25 kV AC – różne typy sieci i odcinki badawcze, dwa kierunki jazdy oraz zakres prędkości od 80 do 160 km/h. Badania w warunkach jazdy poprzedzały etapy kwalifikacyjne opisane w rozdziałach 8 i 9: projektowa analiza konstrukcyjna elementów układu pomiarowego oraz badania statyczne konfiguracji pojazd–odbierak.

Weryfikacja eksperymentalna objęła trzy wzajemnie powiązane obszary: ocenę właściwości dynamicznych kompletnej konfiguracji pomiarowej, eksperymentalne wyznaczenie korekcji aerodynamicznej oraz wyznaczanie chwilowej siły stykowej $F_c(t)$ podczas jazd badawczych. Dla przebiegów $F_c(t)$ analizowano następnie średnią siłę stykową F_m , odchylenie standardowe σ oraz wartości $F_m - 3\sigma$ i $F_m + 3\sigma$. Wielkości te zostały zdefiniowane we wcześniejszych rozdziałach; w niniejszym rozdziale stanowią podstawę analizy wyników i oceny zakresu stosowalności metodyki.

W analizie zachowano rozdzielenie funkcji poszczególnych wielkości. Wskaźnik J służy do oceny właściwości dynamicznych kompletnej konfiguracji i nie jest współczynnikiem korekcyjnym siły stykowej, natomiast $F_{corr,aero}(v)$ stanowi wielkość wejściową modelu $F_c(t)$. Budżety niepewności tych wielkości opracowano w rozdziale 7. W części wynikowej wykorzystano ich wartości końcowe bez ponownego rozwijania modeli niepewności.

Do szczegółowej analizy wybrano sześć serii wyników badań dynamicznych. Trzy serie dotyczyły systemu 3 kV DC i sieci typu YC150-2C150, YwsC120-2C oraz 2C120-2C-3, a trzy kolejne wykonano w systemie 25 kV AC na torze testowym Faurei oraz odcinkach linii nr 800 Fetesti–Ciulnita i Fetesti–Medgidia. Każdą serię analizowano dla dwóch kierunków jazdy i pięciu poziomów prędkości. Zakres badań wykorzystanych do weryfikacji zestawiono w tabeli 10.1.

W tabelach wynikowych zachowano wartości F_m i σ uzyskane w badaniach. Wielkości pochodne $0,3F_m$, $F_m - 3\sigma$ oraz $F_m + 3\sigma$ obliczono w jednolity sposób na podstawie tych wartości. Pozwoliło to zachować wyniki źródłowe, a jednocześnie

zapewnić spójność arytmetyczną zestawień wykorzystywanych w analizie porównawczej.

Tabela 10.1. Zakres serii badań dynamicznych wykorzystanych w eksperymentalnej weryfikacji

Seria	System	Sieć / odcinek	Miejsce	Zakres prędkości [km/h]	Kierunek jazdy	Data / okres	Pojazd / odbierak
S1	3 kV DC	YC150-2C150 (tor testowy)	Żmigród	80 ÷ 160	2	8-9.12.2023	160T-3kVDC
S2	3 kV DC	YwsC120-2C	Wrocław–Żmigród	80 ÷ 160	2	15.12.2023	160T-3kVDC
S3	3 kV DC	2C120-2C-3	Góra Włodowska–Psary	80 ÷ 160	2	18.12.2023	160T-3kVDC
S4	25 kV AC	tor testowy	Faurei	80 ÷ 160	2	17.09.2025	AX-NG 054
S5	25 kV AC	linia nr 800	Fetesti–Ciulnita	80 ÷ 160	2	18.09.2025	AX-NG 054
S6	25 kV AC	linia nr 800	Fetesti–Medgidia	80 ÷ 160	2	19.09.2025	AX-NG 054

W seriach 3 kV DC przedstawionych w niniejszym rozdziale zastosowano odbierak EC ENGINEERING Sp. z o.o. typu 160T–3kVDC, wersja 160T-01 nr fabryczny 01268. Laboratoryjne badanie tej konfiguracji wykonano 26.10.2023 r. w Łukasiewicz – PIT. Serie obejmowały badania na sieciach YC150-2C150, YwsC120-2C oraz 2C120-2C-3. W seriach 25 kV AC zastosowano odbierak Faiveley Transport S.A. typu AX-NG 054, nr fabryczny FT0075778-001-1P00-R0H. Laboratoryjne badanie tej konfiguracji wykonano 31.07.2025 r. w Łukasiewicz – PIT, natomiast jazdy badawcze na torze Faurei i odcinkach linii nr 800 przeprowadzono we wrześniu 2025 r. Oba odbieraki reprezentujące konfiguracje wykorzystane w eksperymentalnej weryfikacji przedstawiono na rys. 10.1.



a) 160T-3kVDC, wersja 160T-01



b) AX-NG 054

Rys. 10.1. Odbieraki reprezentujące konfiguracje wykorzystane w eksperymentalnej

weryfikacji: a) EC ENGINEERING 160T-3kVDC, wersja 160T-01;

b) Faiveley Transport AX-NG 054

10.2 Weryfikacja właściwości dynamicznych kompletnej konfiguracji pomiarowej

Przed badaniami w warunkach jazdy kompletna, oprzyrządowana konfiguracja odbieraka została poddana laboratoryjnemu badaniu właściwości dynamicznych zgodnie z pkt 7.5 PN-EN 50317 [18]. Badanie przeprowadzono dla wymuszenia centralnego oraz przesuniętego o około 250 mm od osi ślizgacza. Dla obu położenia wyznaczono wskaźnik J w zakresie częstotliwości $0,5 \div 20$ Hz. Stanowisko wykorzystane do laboratoryjnej oceny właściwości dynamicznych kompletnej konfiguracji przedstawiono na rys. 10.2, natomiast sposób realizacji wymuszenia w obrębie głowicy odbieraka pokazano na rys. 10.3. Uzyskane wartości wskaźnika J zestawiono w tabeli 10.2.



Rys. 10.2. *Stanowisko laboratoryjne podczas badania właściwości dynamicznych oprzyrządowanego odbieraka*



Rys. 10.3. *Fragment głowicy odbieraka podczas laboratoryjnej realizacji wymuszenia*

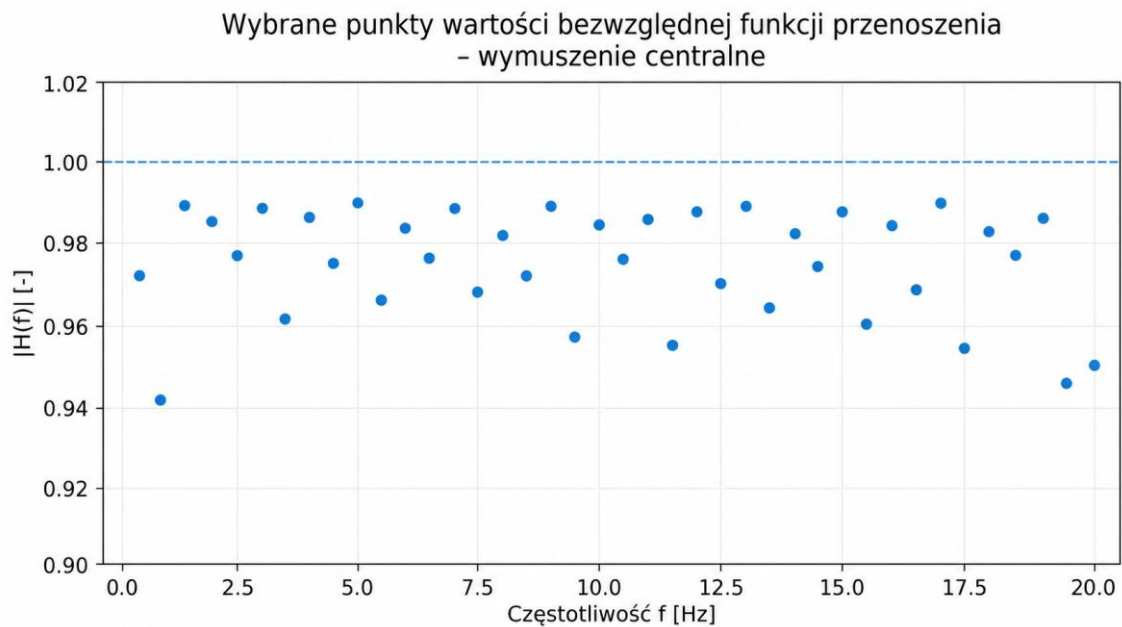
Tabela 10.2. *Wynik wskaźnika J dla konfiguracji objętej analizą niepewności*

Polożenie	J [%]	$u(J)$ [p.p.]	$U(J)$, $k=2$ [p.p.]	Kryterium	Porównanie nominalne
centralne	97,57	2,79	5,58	>90%	$J > 90\%$
ok. 250 mm	94,36	3,24	6,48	>90%	$J > 90\%$

Dla wymuszenia centralnego uzyskano $J = 97,57 \%$, natomiast dla wymuszenia przesuniętego o około 250 mm $J = 94,36 \%$, co przy stosowaniu kryterium prostej akceptacji potwierdza spełnienie wymagania normy, które w tym przypadku wynosi 90 %. Nominalne wartości w obu położeniach przekraczają ten poziom, przy czym mniejsza wartość J i większa niepewność dla położenia przesuniętego wskazują na większą wrażliwość kompletnej konfiguracji na miejsce przyłożenia wymuszenia. Wynik ten uzasadnia ocenę układu jako całości i dla więcej niż jednego położenia obciążenia, zamiast sprowadzania kwalifikacji do właściwości pojedynczych czujników.

Uzyskane wartości J potwierdzają zdolność kompletnej konfiguracji do odwzorowania wymuszeń w analizowanym paśmie przed jej zastosowaniem w badaniach dynamicznych. Wskaźnik J nie jest następnie wykorzystywany do skalowania $F_{\Sigma}(t)$ ani $F_c(t)$. Jego znaczenie w ciągu badawczym polega na kwalifikacji właściwości dynamicznych konfiguracji.

Wybrane wartości bezwzględnej funkcji przenoszenia $|H(f_i)|$ dla wymuszenia centralnego, obliczone z udokumentowanych amplitud $F_{measured,i}$ i $F_{applied,i}$ wykorzystanych w budżecie niepewności z rozdziału 7, przedstawiono na rys. 10.4.



Rys. 10.4. Wybrane wartości $|H(f_i)|$ dla wymuszenia centralnego na podstawie danych wykorzystanych w budżecie niepewności

10.3 Eksperymentalne wyznaczenie korekcji aerodynamicznej

Badania aerodynamiczne służyły zarówno kontroli wpływu zabudowy aparatury na całkowitą średnią siłę unoszącą, jak i wyznaczeniu korekcji $F_{corr,aero}(v)$ wykorzystywanej następnie w modelu $F_c(t)$. Pierwsza z tych ocen ma charakter kwalifikacyjny, zgodnie z pkt 7.2 PN-EN 50317 [18] zmiana całkowitej średniej siły unoszącej po instalacji układu pomiarowego nie powinna przekraczać 5 %.

$$\delta_{sys,aero}(v) = \frac{|F_s(v) - F_z(v)|}{F_z(v)} \cdot 100\% \quad (10.1)$$

Wpływ wyposażenia pomiarowego na całkowitą średnią siłę unoszącą oceniono na podstawie względnej różnicy wyników uzyskanych dla odbieraka z zainstalowanym układem pomiarowym i bez tego wyposażenia. Maksymalna wartość $\delta_{sys,aero}(v)$ w badanym zakresie prędkości wyniosła 4,2 % i była niższa od wartości granicznej 5 % określonej w PN-EN 50317 [18]. Wynik ten stanowi ocenę aerodynamicznego wpływu zabudowy aparatury na badaną konfigurację odbieraka.

Korekcję $F_{corr,aero}(v)$ wyznaczano z równoczesnych pomiarów całkowitej średniej siły unoszącej w linkach uwiązujących odbierak oraz średniej w czasie z sumy wskazań czterech torów FBG. Dla każdego punktu prędkości i kierunku jazdy stosowano zależność:

$$F_{corr,aero}(v) = F_s(v) - \bar{F}_\Sigma(v) \quad (10.2)$$

Konfigurację odbieraka z linkami uwiązującymi podczas pomiaru całkowitej średniej siły unoszącej pokazano na rys. 10.5, natomiast przykład odbieraka podczas jazdy przedstawiono na rys. 10.6. Wyniki wyznaczania korekcji aerodynamicznej dla serii 3 kV DC zestawiono w tabeli 10.3, a zależność $F_{corr,aero}(v)$ od prędkości i kierunku jazdy pokazano na rys. 10.7.



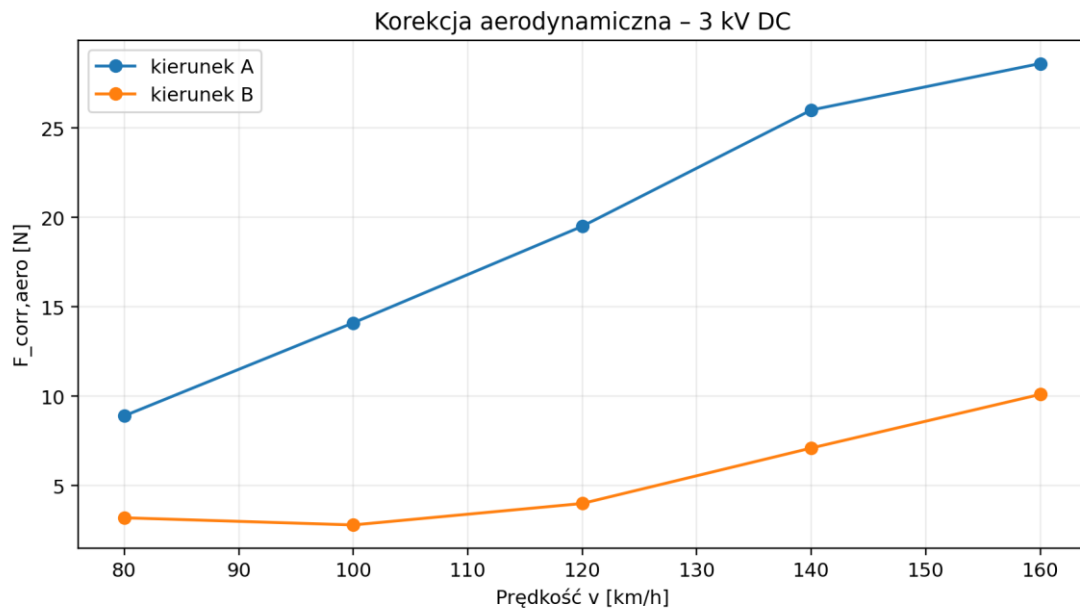
Rys. 10.5. *Odbierak podczas pomiaru całkowitej średniej siły unoszącej F_s z widocznymi linkami uwiązującymi*



Rys. 10.6. *Odbierak podczas jazdy – przykład konfiguracji obiektu objętego badaniami dynamicznymi*

Tabela 10.3. Wyniki korekcji aerodynamicznej - seria 3 kV DC

Kierunek	v [km/h]	F_s [N]	$\bar{F}_z$ [N]	$F_{corr,aero}$ [N]
A	80	129,90	121,00	8,90
A	100	137,50	123,40	14,10
A	120	144,10	124,60	19,50
A	140	153,60	127,60	26,00
A	160	154,90	126,30	28,60
B	80	119,30	116,10	3,20
B	100	122,90	120,10	2,80
B	120	125,80	121,80	4,00
B	140	131,90	124,80	7,10
B	160	136,20	126,10	10,10



Rys. 10.7. Zależność $F_{corr,aero}(v)$ od prędkości - seria 3 kV DC

W serii 3 kV DC korekcja była wyraźnie zależna od kierunku jazdy. W kierunku A wzrosła z 8,90 N przy 80 km/h do 28,60 N przy 160 km/h, natomiast w kierunku B pozostawała znacznie mniejsza i osiągnęła 10,10 N przy 160 km/h. Różnica pomiędzy kierunkami narastała wraz z prędkością i przy 160 km/h wyniosła 18,50 N. Wynik ten pokazuje, że przyjęcie jednej wartości korekcji dla całego zakresu pracy prowadziłoby do systematycznego obciążenia wyznaczonej F_c .

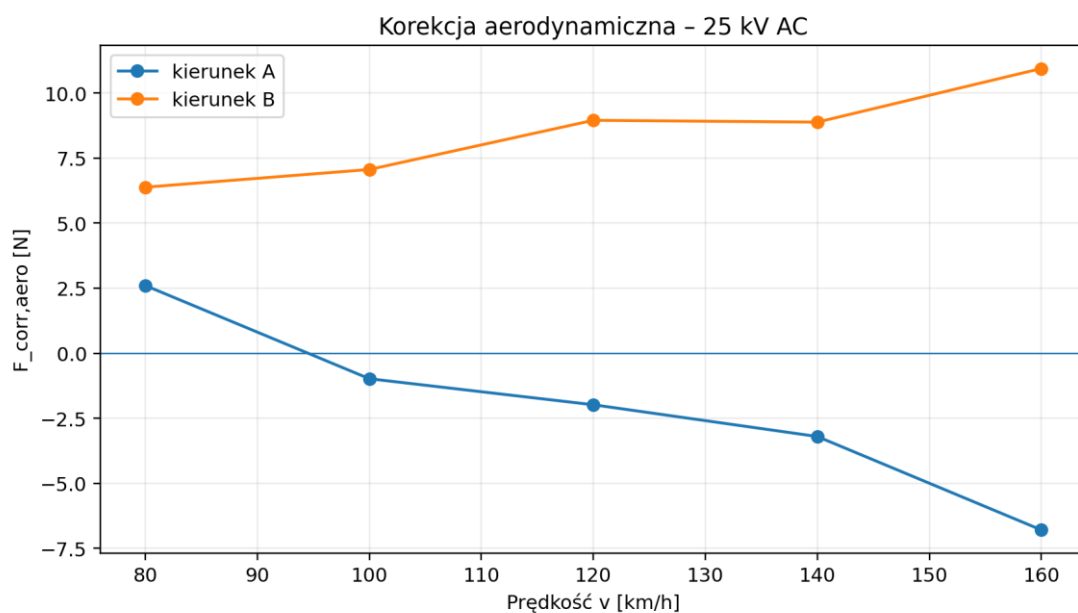
Dla konfiguracji z odbierakiem EC ENGINEERING typu 160T–3kVDC, wersja 160T-01, punkt odpowiadający kierunkowi B i prędkości 80 km/h, dla którego $F_s = 119,3$ N,

$\bar{F}_\Sigma = 116,1$ N oraz $F_{corr,aero} = 3,2$ N, wykorzystano w rozdziale 7 do zilustrowania wyznaczania korekcji aerodynamicznej. Przedstawiony tam budżet uwzględnia również składową typu A wyznaczoną ze średniej pięciu powtórzeń nominalnie tego samego punktu pracy. Dla analizowanej konfiguracji otrzymano $u_c(F_{corr,aero}) = 2,185$ N oraz $U(F_{corr,aero}) = 4,370$ N dla $k = 2$.

Wyniki wyznaczania korekcji aerodynamicznej dla serii 25 kV AC zestawiono w tabeli 10.4, a odpowiadającą im zależność $F_{corr,aero}(v)$ od prędkości przedstawiono na rys. 10.8.

Tabela 10.4. Wyniki korekcji aerodynamicznej – seria 25 kV AC

Kierunek	v [km/h]	F_s [N]	$\bar{F}_\Sigma$ [N]	$F_{corr,aero}$ [N]
A	80	71,92	69,32	2,60
A	100	71,79	72,77	-0,98
A	120	73,72	75,70	-1,98
A	140	77,03	80,23	-3,20
A	160	80,92	87,71	-6,79
B	80	72,73	66,35	6,38
B	100	75,96	68,90	7,06
B	120	79,48	70,53	8,95
B	140	83,36	74,48	8,88
B	160	85,43	74,49	10,94



Rys. 10.8. Zależność $F_{corr,aero}(v)$ od prędkości – seria 25 kV AC

W serii 25 kV AC zależność miała inny przebieg niż w serii 3 kV DC. W kierunku A korekcja zmieniła znak: od +2,60 N przy 80 km/h do -6,79 N przy 160 km/h, podczas gdy w kierunku B pozostawała dodatnia i wzrosła do 10,94 N. Przy 160 km/h różnica pomiędzy kierunkami wyniosła 17,73 N. Nie przypisuje się tej różnicy wyłącznie systemowi zasilania, ponieważ serie dotyczą różnych konfiguracji badawczych. Wyniki potwierdzają natomiast, że charakterystyka aerodynamiczna musi być identyfikowana dla konkretnej konfiguracji i warunków przejazdu.

Porównanie obu serii stanowi istotny wynik eksperymentalny metodyki. Korekcja aerodynamiczna nie jest stałą cechą typu odbieraka ani prostą funkcją prędkości możliwą do przeniesienia pomiędzy kampaniami. Jej znak, wartość i asymetria kierunkowa zależą od konfiguracji, dlatego przypisywanie $F_{corr,aero}(v)$ do konkretnego przejazdu jest koniecznym elementem procesu wyznaczania $F_c(t)$.

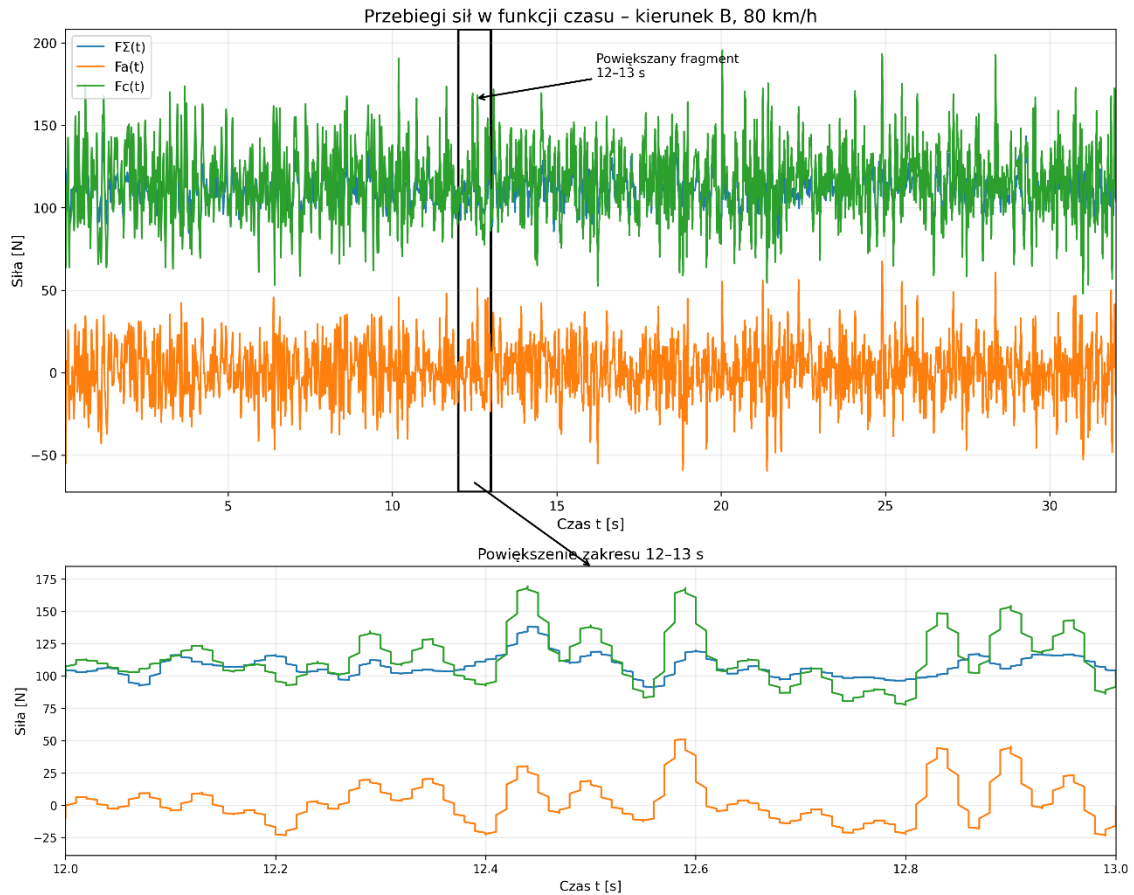
10.4 Wyniki wyznaczania siły stykowej w warunkach jazdy

Chwilową siłę stykową $F_c(t)$ wyznaczano zgodnie z modelem przedstawionym w rozdziale 5, z uwzględnieniem sumy sygnałów torów siły, członu bezwładnościowego oraz korekcji aerodynamicznej właściwej dla danej konfiguracji i warunków jazdy:

$$F_c(t) = F_{\Sigma}(t) + F_a(t) + F_{corr,aero}(v) \quad (10.3)$$

W części wynikowej nie powtarzano procedury wyznaczania poszczególnych składowych równania. Analizie poddano przebiegi $F_c(t)$ otrzymane dla odpowiadających im konfiguracji i warunków przejazdu, a następnie wartości F_m , σ oraz $F_m \pm 3\sigma$.

Dla pełnego zobrazowania działania modelu na danych pomiarowych na rys. 10.9 przedstawiono reprezentatywny przebieg czasowy $F_c(t)$ wraz z jego głównymi składowymi. Na potrzeby sporządzenia wykresu wykorzystano dane serii 3 kV DC dla kierunku B i prędkości 80 km/h. Uwzględniono również $F_{corr,aero}(v) = 3,2$ N.



Rys. 10.9. Reprezentatywny przebieg $F_c(t)$ wraz z $F_\Sigma(t)$ i $F_a(t)$ dla wybranego przejazdu 3 kV DC

Wartości F_m i σ stanowią podstawowe parametry opisujące poziom i zmienność siły stykowej na analizowanym odcinku. Wielkości $F_m - 3\sigma$ i $F_m + 3\sigma$ traktowano jako charakterystyki statystyczne rozkładu, a nie jako zaobserwowane ekstrema chwilowego przebiegu.

10.4.1 System 3 kV DC

Dla systemu 3 kV DC przedstawiono trzy serie wyników dla sieci YC150-2C150, YwsC120-2C oraz 2C120-2C-3. Każda seria obejmuje dwa kierunki jazdy i pięć poziomów prędkości. Szczegółowe wyniki dla poszczególnych sieci zestawiono odpowiednio w tabelach 10.5-10.7.

Tabela 10.5. Wyniki siły stykowej dla sieci YC150-2C150 – 3 kV DC

Kierunek jazdy	v [km/h]	F_m [N]	σ [N]	$0,3F_m$ [N]	$F_m-3\sigma$ [N]	$F_m+3\sigma$ [N]	$\sigma/(0,3F_m)$
A	80	107,64	0,70	32,29	105,54	109,74	2,2%
A	100	104,52	2,20	31,36	97,92	111,12	7,0%
A	120	104,88	0,79	31,46	102,51	107,25	2,5%
A	140	109,49	1,73	32,85	104,30	114,68	5,3%
A	160	114,56	0,85	34,37	112,01	117,11	2,5%
B	80	114,96	0,42	34,49	113,70	116,22	1,2%
B	100	117,72	0,20	35,32	117,12	118,32	0,6%
B	120	118,60	0,59	35,58	116,83	120,37	1,7%
B	140	119,63	0,46	35,89	118,25	121,01	1,3%
B	160	117,75	4,83	35,32	103,26	132,24	13,7%

Tabela 10.6. Wyniki siły stykowej dla sieci YwsC120-2C – 3 kV DC

Kierunek jazdy	v [km/h]	F_m [N]	σ [N]	$0,3F_m$ [N]	$F_m-3\sigma$ [N]	$F_m+3\sigma$ [N]	$\sigma/(0,3F_m)$
A	80	112,34	1,00	33,70	109,34	115,34	3,0%
A	100	108,21	1,39	32,46	104,04	112,38	4,3%
A	120	104,10	1,42	31,23	99,84	108,36	4,5%
A	140	109,60	1,31	32,88	105,67	113,53	4,0%
A	160	115,09	2,44	34,53	107,77	122,41	7,1%
B	80	115,65	0,61	34,70	113,82	117,48	1,8%
B	100	119,07	0,80	35,72	116,67	121,47	2,2%
B	120	119,30	1,01	35,79	116,27	122,33	2,8%
B	140	122,63	2,12	36,79	116,27	128,99	5,8%
B	160	116,30	0,12	34,89	115,94	116,66	0,3%

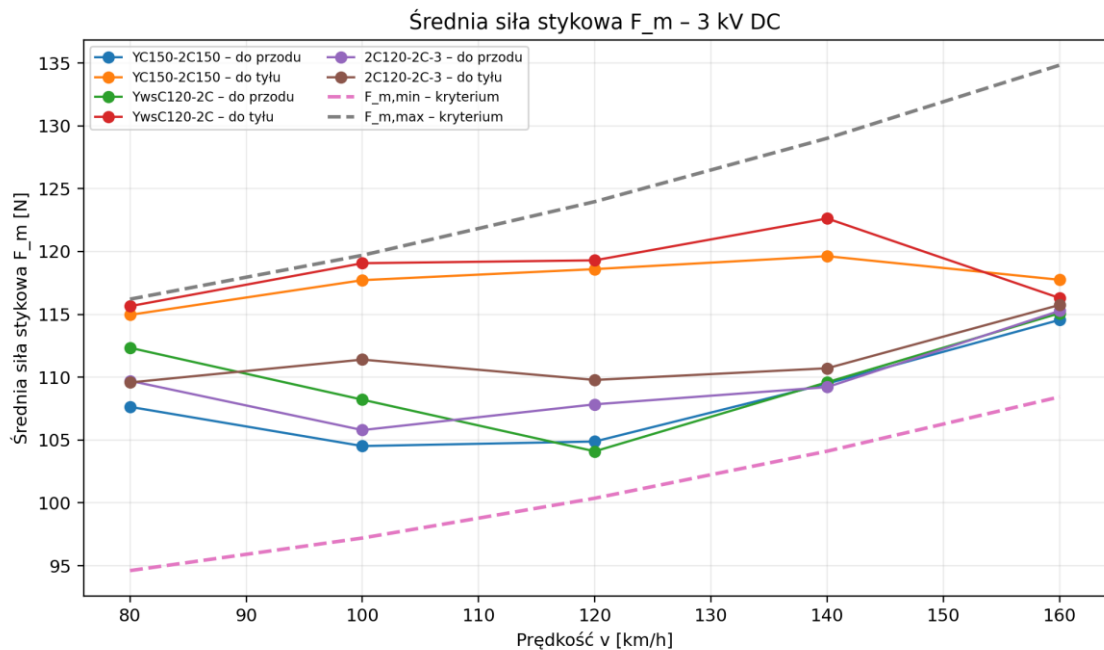
Tabela 10.7. Wyniki siły stykowej dla sieci 2C120-2C-3 – 3 kV DC

Kierunek jazdy	v [km/h]	F_m [N]	σ [N]	$0,3F_m$ [N]	$F_m-3\sigma$ [N]	$F_m+3\sigma$ [N]	$\sigma/(0,3F_m)$
A	80	109,71	0,56	32,91	108,03	111,39	1,7%
A	100	105,79	0,92	31,74	103,03	108,55	2,9%
A	120	107,84	2,22	32,35	101,18	114,50	6,9%
A	140	109,21	3,87	32,76	97,60	120,82	11,8%
A	160	115,28	1,15	34,58	111,83	118,73	3,3%
B	80	109,58	0,27	32,87	108,77	110,39	0,8%
B	100	111,40	0,76	33,42	109,12	113,68	2,3%
B	120	109,78	1,05	32,93	106,63	112,93	3,2%
B	140	110,71	2,43	33,21	103,42	118,00	7,3%
B	160	115,75	1,32	34,73	111,79	119,71	3,8%

W trzech seriach 3 kV DC nie stwierdzono monotonicznej zależności F_m ani σ od prędkości. Dla YC150-2C150 i YwsC120-2C wyraźna jest różnica poziomu F_m pomiędzy kierunkami jazdy, natomiast dla 2C120-2C-3 różnica ta jest mniejsza. W każdej z trzech serii największe wartości σ pojawiały się lokalnie i nie zawsze przy prędkości maksymalnej. Wyniki wskazują zatem, że kierunek jazdy i prędkość są istotnymi warunkami identyfikacji wyniku, ale ich wpływu nie można rozpatrywać w oderwaniu od konkretnej sieci (w tym przede wszystkim wysokości zawieszenia sieci) i pozostałych warunków przejazdu.

Nominalne wartości F_m dla serii 3 kV DC pozostają w granicach przyjętych w rozprawie dla analizowanego zakresu prędkości. Największe względne wykorzystanie poziomu $0,3F_m$ wyniosło 13,7 % i wystąpiło dla YC150-2C150 przy 160 km/h podczas jazdy przegubem do tyłu. Wartość ta opisuje zmienność przebiegu $F_c(t)$, a nie niepewność pomiaru.

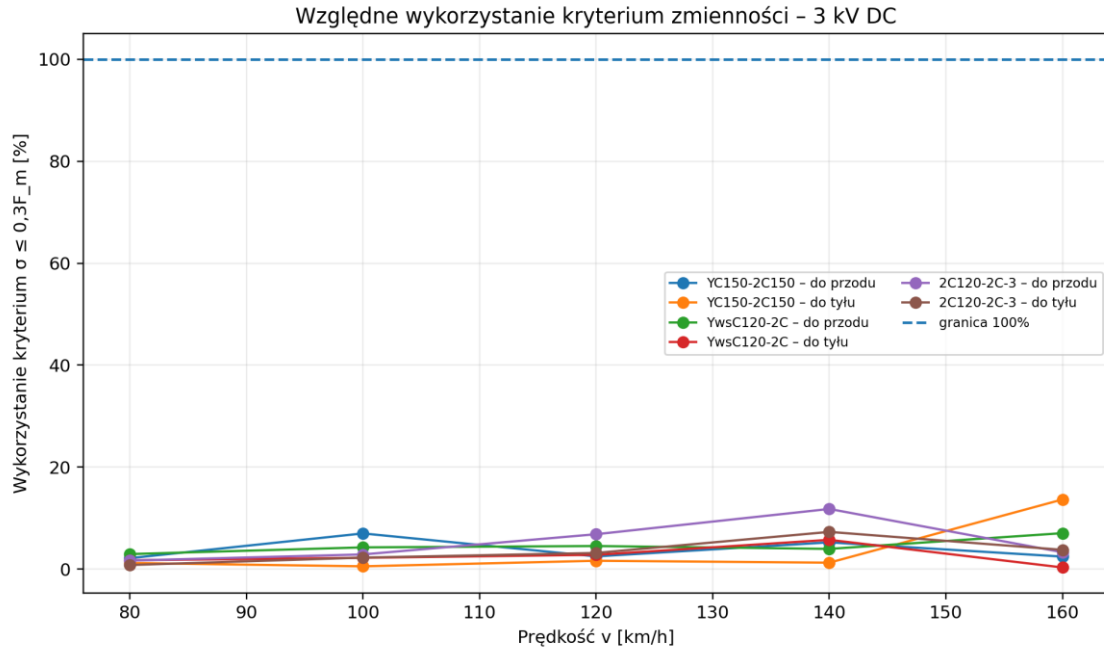
Porównanie średniej siły stykowej F_m z przyjętymi granicami w całym zakresie badanych prędkości dla serii 3 kV DC przedstawiono na rys. 10.10.



Rys. 10.10. F_m w funkcji prędkości dla serii 3 kV DC na tle granic przyjętych w rozprawie

Zbiornicze zestawienie na rys. 10.10 potwierdza lokalny charakter zmian F_m oraz brak podstaw do opisu wszystkich odcinków jedną zależnością $F_m(v)$.

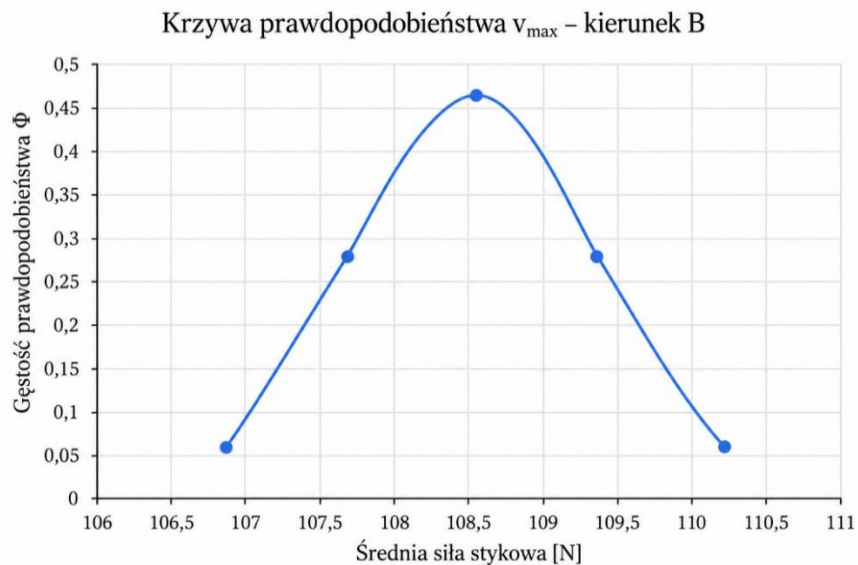
Względne wykorzystanie poziomu $\sigma \leq 0,3F_m$ dla wszystkich serii 3 kV DC przedstawiono na rys. 10.11.



Rys. 10.11. Względne wykorzystanie poziomu $\sigma \leq 0,3F_m$ – serie 3 kV DC

Porównanie wyników 3 kV DC wskazuje jednocześnie, że zmienność siły pozostawała z istotnym marginesem względem poziomu $0,3F_m$ we wszystkich analizowanych seriach.

Kształt rozkładu wyników dla wybranego przypadku 3 kV DC przy prędkości maksymalnej zilustrowano krzywą gęstości prawdopodobieństwa na rys. 10.12. Zamieszczony wynik uzyskano dla przejazdów z prędkością maksymalną $v_{max} = 160$ km/h w kierunku B na torze testowym w Żmigrodzie (sieć typu YC150-2C150).



Rys. 10.12. Krzywa gęstości prawdopodobieństwa dla wybranego przypadku 3 kV DC przy v_{max}

Przykładowa krzywa gęstości prawdopodobieństwa na rys. 10.12 uzupełnia wartości F_m i σ o informację o kształcie rozkładu w wybranym przypadku przy prędkości maksymalnej.

10.4.2 System 25 kV AC

Dla systemu 25 kV AC przedstawiono trzy serie badań wykonanych na torze testowym Faurei oraz na dwóch odcinkach linii nr 800: Fetesti–Ciulnita i Fetesti–Medgidia. W badaniach zastosowano odbierak Faiveley Transport AX-NG 054, a daty przejazdów zestawiono w tabeli 10.1. Analogicznie jak dla 3 kV DC, każda seria obejmuje dwa kierunki jazdy i pięć poziomów prędkości. Szczegółowe wyniki dla toru Faurei oraz odcinków Fetesti–Ciulnita i Fetesti–Medgidia zestawiono odpowiednio w tabelach 10.8–10.10.

Tabela 10.8. Wyniki siły stykowej dla Faurei – 25 kV AC

Kierunek jazdy	v [km/h]	F_m [N]	σ [N]	$0,3F_m$ [N]	$F_m - 3\sigma$ [N]	$F_m + 3\sigma$ [N]	$\sigma/(0,3F_m)$
A	80	91,83	0,16	27,55	91,35	92,31	0,6%
A	100	94,10	3,49	28,23	83,63	104,57	12,4%
A	120	94,72	3,07	28,42	85,51	103,93	10,8%
A	140	93,54	3,80	28,06	82,14	104,94	13,5%
A	160	86,65	1,45	26,00	82,30	91,00	5,6%
B	80	90,68	0,40	27,20	89,48	91,88	1,5%
B	100	91,31	4,07	27,39	79,10	103,52	14,9%
B	120	82,63	5,94	24,79	64,81	100,45	24,0%
B	140	78,14	0,73	23,44	75,95	80,33	3,1%
B	160	83,44	0,99	25,03	80,47	86,41	4,0%

Tabela 10.9. Wyniki siły stykowej dla Fetesti–Ciulnita – 25 kV AC

Kierunek jazdy	v [km/h]	F_m [N]	σ [N]	$0,3F_m$ [N]	$F_m-3\sigma$ [N]	$F_m+3\sigma$ [N]	$\sigma/(0,3F_m)$
A	80	87,93	0,19	26,38	87,36	88,50	0,7%
A	100	83,56	1,69	25,07	78,49	88,63	6,7%
A	120	81,60	1,92	24,48	75,84	87,36	7,8%
A	140	91,70	2,23	27,51	85,01	98,39	8,1%
A	160	79,41	0,91	23,82	76,68	82,14	3,8%
B	80	89,91	1,12	26,97	86,55	93,27	4,2%
B	100	91,21	5,88	27,36	73,57	108,85	21,5%
B	120	88,56	4,24	26,57	75,84	101,28	16,0%
B	140	82,53	1,06	24,76	79,35	85,71	4,3%
B	160	90,22	4,05	27,07	78,07	102,37	15,0%

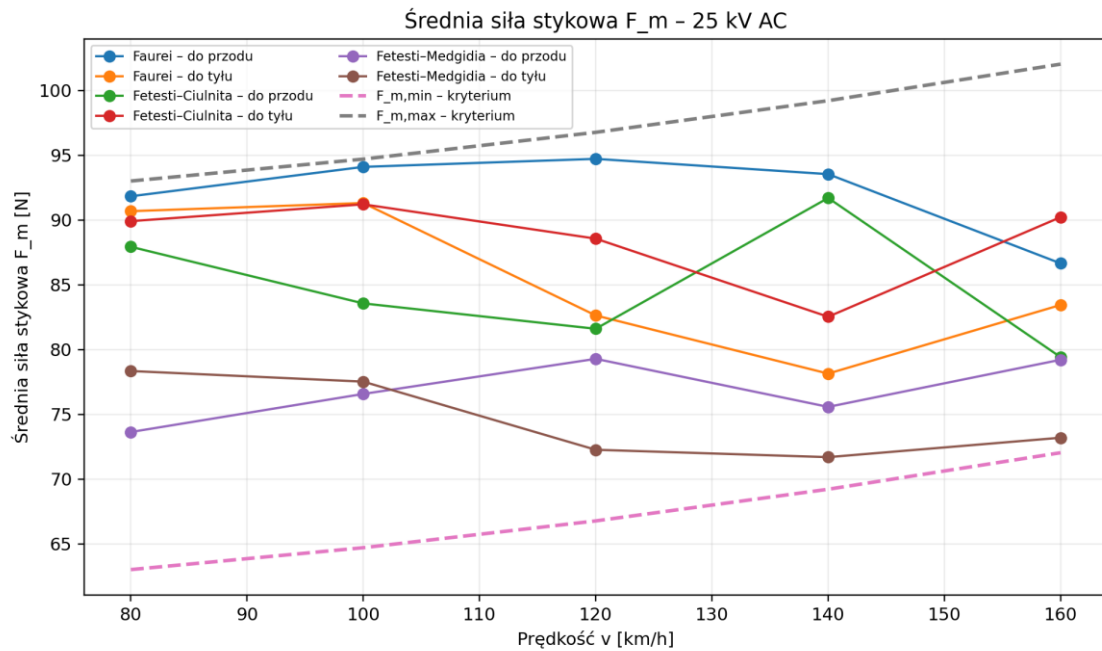
Tabela 10.10. Wyniki siły stykowej dla Fetesti–Medgidia – 25 kV AC

Kierunek jazdy	v [km/h]	F_m [N]	σ [N]	$0,3F_m$ [N]	$F_m-3\sigma$ [N]	$F_m+3\sigma$ [N]	$\sigma/(0,3F_m)$
A	80	73,63	2,11	22,09	67,30	79,96	9,6%
A	100	76,57	2,09	22,97	70,30	82,84	9,1%
A	120	79,28	1,09	23,78	76,01	82,55	4,6%
A	140	75,57	0,61	22,67	73,74	77,40	2,7%
A	160	79,21	5,47	23,76	62,80	95,62	23,0%
B	80	78,34	1,09	23,50	75,07	81,61	4,6%
B	100	77,52	1,44	23,26	73,20	81,84	6,2%
B	120	72,26	3,70	21,68	61,16	83,36	17,1%
B	140	71,69	3,35	21,51	61,64	81,74	15,6%
B	160	73,19	2,49	21,96	65,72	80,66	11,3%

W seriach 25 kV AC zakres wartości F_m i poziom zmienności różniły się wyraźniej pomiędzy odcinkami niż w zbiorze 3 kV DC. Kierunek jazdy nie powodował przy tym jednokierunkowej zmiany F_m : na torze Faurei i odcinku Fetesti–Medgidia niższe wartości występowały dla jazdy przegubem do tyłu, natomiast na odcinku Fetesti–Ciulnita relacja była odmienna. Potwierdza to, że efekt kierunkowy nie ma charakteru uniwersalnego i musi być interpretowany łącznie z konfiguracją odbieraka, właściwościami sieci i warunkami przejazdu.

Największe wykorzystanie poziomu $0,3F_m$ w zbiorze 25 kV AC wyniosło 24,0 % na torze Faurei przy 120 km/h podczas jazdy przegubem do tyłu; wartości 23,0 % i 21,5 % wystąpiły odpowiednio dla Fetesti–Medgidia i Fetesti–Ciulnita. Lokalne maksima σ nie były związane wyłącznie z v_{max} , co uzasadnia analizę pełnego badanego zakresu prędkości.

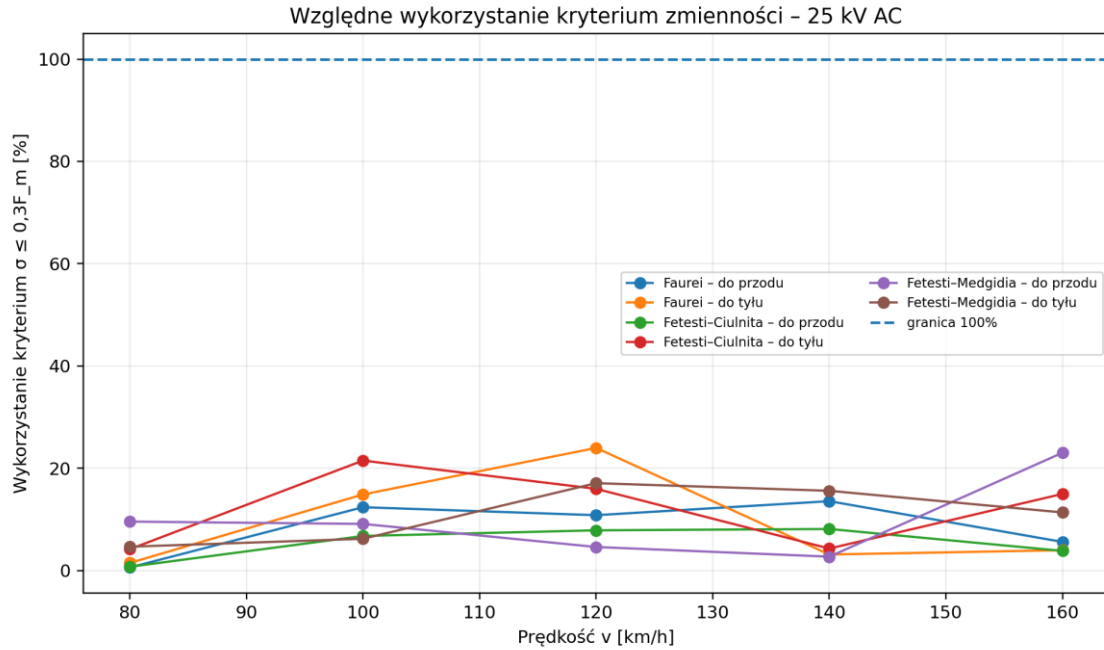
Porównanie średniej siły stykowej F_m z przyjętymi granicami dla serii 25 kV AC przedstawiono na rys. 10.13.



Rys. 10.13. F_m w funkcji prędkości dla serii 25 kV AC na tle granic przyjętych w rozprawie

Zbiorcze zestawienie na rys. 10.13 pokazuje większe zróżnicowanie poziomu F_m pomiędzy odcinkami 25 kV AC niż w seriach 3 kV DC, przy zachowaniu tego samego sposobu wyznaczania i porównywania parametrów oceny. Przy czym nie należy bezpośrednio porównywać uzyskanych wartości sił ze względu na różne wymagania względem napięć zasilania w sieci trakcyjnej.

Względne wykorzystanie poziomu $\sigma \leq 0,3F_m$ dla serii 25 kV AC zestawiono graficznie na rys. 10.14.

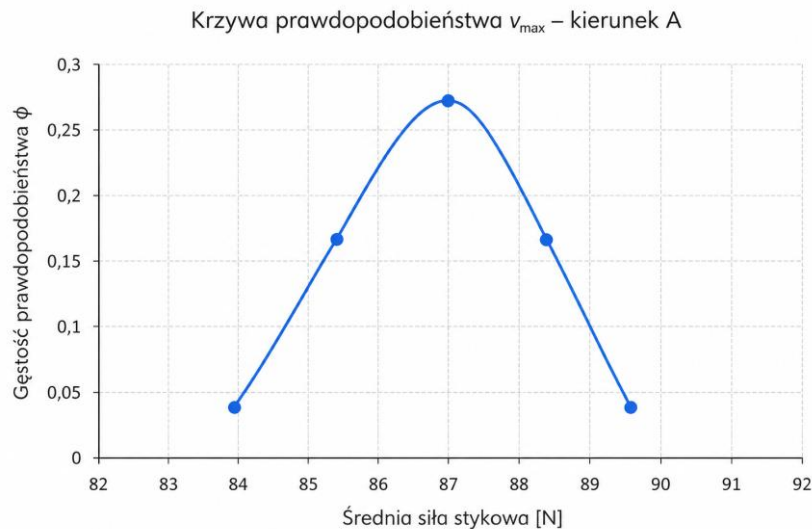


Rys. 10.14. Względne wykorzystanie poziomu $\sigma \leq 0,3F_m$ – serie 25 kV AC

Wartości σ pozostawały poniżej poziomu $0,3F_m$, przy czym większe lokalne wykorzystanie tego poziomu niż w seriach 3 kV DC potwierdza potrzebę zachowania informacji o odcinku, kierunku i prędkości przy interpretacji wyniku.

Krzywą gęstości prawdopodobieństwa dla wybranego przypadku 25 kV AC przy prędkości maksymalnej przedstawiono na rys. 10.15.

Zamieszczony wynik uzyskano dla przejazdów z prędkością maksymalną $v_{max} = 160$ km/h w kierunku A na torze testowym w Faurei.



Rys. 10.15. Krzywa gęstości prawdopodobieństwa dla wybranego przypadku 25 kV AC przy v_{max}

Przykładowa krzywa gęstości prawdopodobieństw na rys. 10.15 ma charakter uzupełniający wobec parametrów F_m i σ i dokumentuje sposób analizy rzeczywistych wyników przejazdów.

10.5 Analiza porównawcza i zakres stosowalności metodyki

Zestawienie wyników ze wszystkich sześciu serii umożliwia ocenę, czy opracowana metodyka zachowuje spójny sposób wyznaczania i interpretacji siły stykowej w zróżnicowanych warunkach badawczych. Nie jest to eksperyment czynnikowy pozwalający oddzielić wpływ pojedynczego elementu, ponieważ pomiędzy seriami zmieniają się jednocześnie konfiguracja odbieraka, odcinek sieci, warunki aerodynamiczne i kierunek jazdy. Analiza porównawcza służy zatem ocenie zakresu praktycznej stosowalności metodyki, a nie tworzeniu rankingu poszczególnych sieci. Zbiorną syntezę zakresów F_m oraz maksymalnych wartości σ przedstawiono w tabeli 10.11.

Tabela 10.11. Synteza wyników badań dynamicznych

System	Sieć / odcinek	Kierunek	Zakres F_m [N]	max σ [N]	v dla max σ [km/h]	max $\sigma/(0,3F_m)$ [%]
3 kV DC	YC150-2C150	A	104,52 ÷ 114,56	2,20	100	7,0
3 kV DC	YC150-2C150	B	114,96 ÷ 119,63	4,83	160	13,7
3 kV DC	YwsC120-2C	A	104,10 ÷ 115,09	2,44	160	7,1
3 kV DC	YwsC120-2C	B	115,65 ÷ 122,63	2,12	140	5,8
3 kV DC	2C120-2C-3	A	105,79 ÷ 115,28	3,87	140	11,8
3 kV DC	2C120-2C-3	B	109,58 ÷ 115,75	2,43	140	7,3
25 kV AC	Faurei	A	86,65 ÷ 94,72	3,80	140	13,5
25 kV AC	Faurei	B	78,14 ÷ 91,31	5,94	120	24,0
25 kV AC	Fetesti–Ciulnita	A	79,41 ÷ 91,70	2,23	140	8,1
25 kV AC	Fetesti–Ciulnita	B	82,53 ÷ 91,21	5,88	100	21,5
25 kV AC	Fetesti–Medgidia	A	73,63 ÷ 79,28	5,47	160	23,0
25 kV AC	Fetesti–Medgidia	B	71,69 ÷ 78,34	3,70	120	17,1

W seriach 3 kV DC zakres F_m dla poszczególnych kierunków mieścił się od 104,10 ÷ 115,09 N do 115,65 ÷ 122,63 N, natomiast maksymalne σ w poszczególnych seriach wynosiły od 2,12 do 4,83 N. W seriach 25 kV AC zakresy F_m były niższe i bardziej zróżnicowane, a maksymalne σ wynosiły od 2,23 do 5,94 N. Różnic poziomu

F_m pomiędzy zbiorami nie interpretuje się jako miary jakości współpracy bez odniesienia do właściwych kategorii sieci i kryteriów.

Wpływ kierunku jazdy ujawnił się zarówno w F_m , jak i w σ oraz w charakterystykach aerodynamicznych, jednak jego znak i skala nie były jednakowe we wszystkich seriach. Wynik ten stanowi eksperymentalne uzasadnienie dla przyjętej w metodyce zasady identyfikowania kierunku przejazdu i przypisywania odpowiedniej korekcji aerodynamicznej, ale nie pozwala sprowadzić wszystkich różnic kierunkowych wyłącznie do aerodynamiki.

Lokalne maksima σ występowały przy różnych prędkościach, co wskazuje, że analiza jedynie punktu v_{max} nie opisuje całego zachowania układu w badanym zakresie. Jednocześnie brak monotoniczności nie jest traktowany jako wada metodyki, lecz jako cecha rzeczywistych warunków współpracy, którą metodyka powinna zachować i umożliwić jej porównywalny opis.

Zakres przeprowadzonych badań potwierdza stosowalność metodyki dla analizowanych konfiguracji 3 kV DC i 25 kV AC oraz dla prędkości $80 \div 160$ km/h. Wyników nie należy jednak rozszerzać na inne typy odbieraków, systemy zasilania, zakresy prędkości lub warunki aerodynamiczne bez odrębnej kwalifikacji konfiguracji i wyznaczenia właściwych parametrów wejściowych.

10.6 Ocena metrologiczna wyników i odniesienie do kryteriów

Ocenę wyników przeprowadzono w odniesieniu do kryteriów przyjętych wcześniej w rozprawie na podstawie PN-EN 50367 [20], [38], [114] i właściwych dokumentów TSI [21], [22]. Dla analizowanego zakresu $v \leq 200$ km/h, przy v wyrażonym w km/h, zastosowano zależności:

$$3 \text{ kV DC: } F_{m,min} = 0,00072 \cdot v^2 + 90 \text{ oraz } F_{m,max} = 0,00097 \cdot v^2 + 110 \quad (10.4)$$

$$25 \text{ kV AC: } F_{m,min} = 0,00047 \cdot v^2 + 60 \text{ oraz } F_{m,max} = 0,00047 \cdot v^2 + 90 \quad (10.5)$$

$$\sigma_{max} \leq 0,3 \cdot F_m \quad (10.6)$$

Wartości graniczne F_m odpowiadające prędkościom występującym w analizowanych seriach zestawiono w tabeli 10.12.

Tabela 10.12. Wartości graniczne F_m dla prędkości występujących w analizowanych seriach

v [km/h]	3 kV DC: $F_{m,min}$ [N]	3 kV DC: $F_{m,max}$ [N]	25 kV AC: $F_{m,min}$ [N]	25 kV AC: $F_{m,max}$ [N]
80	94,61	116,21	63,01	93,01
100	97,20	119,70	64,70	94,70
120	100,37	123,97	66,77	96,77
140	104,11	129,01	69,21	99,21
160	108,43	134,83	72,03	102,03

We wszystkich analizowanych seriach nominalne wartości F_m znajdowały się w odpowiednich przedziałach granicznych, a wartości σ pozostawały poniżej poziomu $0,3F_m$. Zestawienie to potwierdza możliwość zastosowania opracowanej metodyki do jednolitej oceny wyników uzyskanych w różnych konfiguracjach i warunkach przejazdu.

Porównanie wartości nominalnych z granicami liczbowymi nie jest samo w sobie równoważne formalnemu stwierdzeniu zgodności w sensie metrologicznym. Wniosek formalny powinien być odnoszony do właściwego wydania dokumentu odniesienia, warunków jego stosowania oraz reguły decyzji obowiązującej w danym badaniu.

Ocenę zgodności przedstawionych wyników z wartościami granicznymi przeprowadzono z zastosowaniem reguły prostej akceptacji (*simple acceptance*) zgodnie z ILAC-G8:09/2019 [94]. W przyjętej regule granica akceptacji jest tożsama z granicą tolerancji ($AL = TL$), a więc nie stosuje się dodatkowego pasma ochronnego ($w = 0$). Oznacza to, że nominalną wartość wyniku porównuje się bezpośrednio z właściwą wartością graniczną określoną w dokumencie odniesienia. Jednocześnie niepewność rozszerzona $U(F_c)$ pozostaje elementem charakterystyki metrologicznej wyniku i umożliwia ocenę jego wiarygodności, lecz w zastosowanej regule decyzji nie zmienia granic przedziału akceptacji. Zastosowanie tej reguły należy odróżnić od reguł wykorzystujących pasmo ochronne, w których granica akceptacji jest przesunięta względem granicy tolerancji w celu ograniczenia ryzyka błędnej decyzji.

Metrologiczna interpretacja wyników wymaga równoległego uwzględnienia niepewności wyznaczania F_c . Dla konfiguracji pomiarowej z odbierakiem EC ENGINEERING typu 160T-3kVDC, wersja 160T-01, wykorzystanej w reprezentatywnej kampanii 3 kV DC i objętej budżetem niepewności przedstawionym w rozdziale 7, uzyskano $u_c(F_c) = 2,846$ N oraz $U(F_c) = 5,692$ N dla $k = 2$. Wartości te stanowią charakterystykę metrologiczną tej konfiguracji i nie są automatycznie

przypisywane kampaniom realizowanym z odmiennym odbierakiem, konfiguracją aparatury lub innymi parametrami modelu.

Niepewność $U(F_c)$ i odchylenie standardowe σ opisują różne właściwości wyniku. $U(F_c)$ charakteryzuje niepewność metody wyznaczania chwilowej siły stykowej, natomiast σ opisuje zmienność przebiegu $F_c(t)$ na analizowanym odcinku. Z tego względu wielkości tych nie należy utożsamiać ani zastępować jedną drugą.

10.7 Synteza eksperymentalnej weryfikacji metodyki

Przeprowadzone badania pozwoliły zweryfikować opracowaną metodykę na poziomie kompletnej konfiguracji pomiarowej i w rzeczywistych warunkach jazdy. Laboratoryjna kwalifikacja wykazała, że nominalne wartości wskaźnika J przekraczają poziom 90 % zarówno dla wymuszenia centralnego, jak i przesuniętego o około 250 mm, przy czym wynik poza osią potwierdził większą wrażliwość konfiguracji na miejsce przyłożenia wymuszenia.

Badania aerodynamiczne wykazały, że $F_{corr,aero}(v)$ może różnić się nie tylko wartością, lecz także znakiem i stopniem asymetrii kierunkowej. Stanowi to bezpośrednie potwierdzenie zasadności wyznaczania korekcji dla konkretnej konfiguracji i warunków przejazdu zamiast przyjmowania uniwersalnej wartości charakterystycznej dla typu odbieraka.

Powiązanie reprezentatywnego punktu kampanii 3 kV DC z budżetem przedstawionym w rozdziale 7 zapewnia jednoznaczną relację pomiędzy wynikiem eksperymentalnym a jego oceną metrologiczną.

Wyniki przejazdów 3 kV DC i 25 kV AC potwierdziły możliwość stosowania tego samego modelu pomiarowo-analitycznego w zróżnicowanych warunkach sieciowych. W analizowanych seriach nominalne wartości F_m znajdowały się w odpowiednich granicach liczbowych, a σ pozostawało poniżej $0,3F_m$. Jednocześnie lokalne maksima σ oraz różny wpływ kierunku jazdy pokazują, że metodyka zachowuje informację o zmienności procesu zamiast sprowadzać wynik do pojedynczej wartości uśrednionej.

Ujęcie wyników wraz z niepewnością F_c domyka metrologiczny ciąg rozprawy: od kwalifikacji torów i kompletnej konfiguracji, przez wyznaczenie korekcji aerodynamicznej, do wyniku siły stykowej z informacją o jego wiarygodności. Zakres weryfikacji obejmuje warunki rzeczywiście przebadane w niniejszej pracy, szersze uogólnienie metodyki wymaga zachowania tej samej procedury kwalifikacji dla nowych konfiguracji.

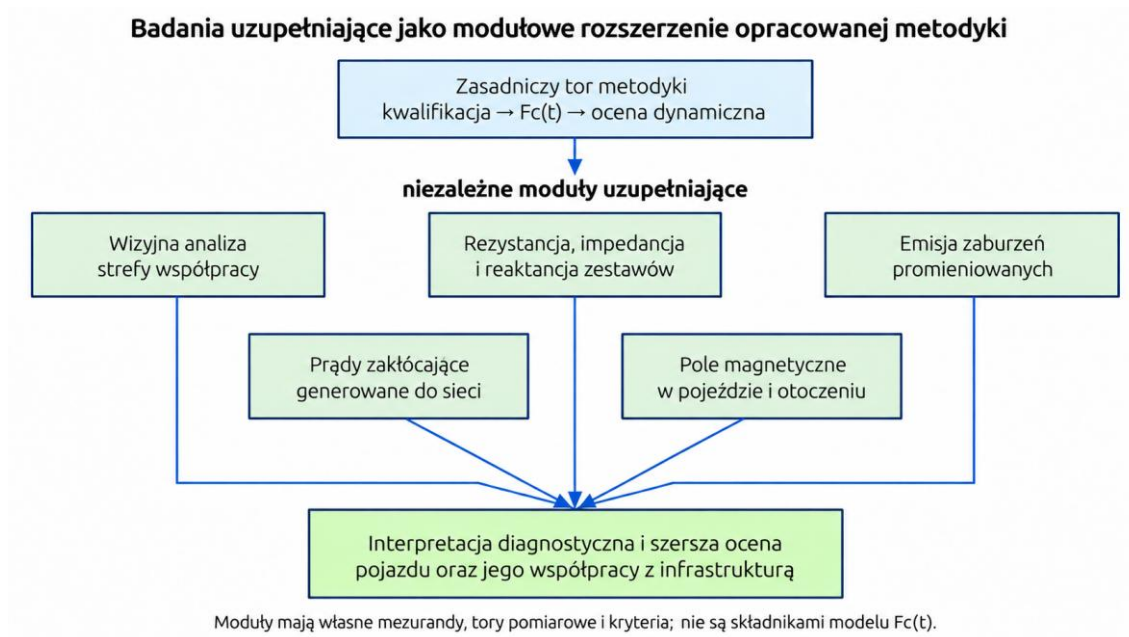
11 Eksperymentalna realizacja modułów badań uzupełniających w opracowanej metodyce

11.1 Modułowa koncepcja i zakres badań uzupełniających

Zarówno w koncepcji metodyki przedstawionej w rozdziale 3, jak i w jej realizacji sprzętowej i proceduralnej opisanej w rozdziałach 4–6 przyjęto strukturę modułową. Główny tok postępowania obejmuje przygotowanie i kwalifikację konfiguracji pomiarowej, wyznaczenie chwilowej siły stykowej $F_c(t)$ oraz ocenę parametrów dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią jezdnią. Odrębny blok stanowią moduły badań uzupełniających, uwzględnione już na schemacie koncepcyjnym metodyki (rys. 3.1). Wyniki uzyskiwane w ramach tych modułów nie stanowią wielkości wejściowych modelu pomiaru chwilowej siły stykowej $F_c(t)$, lecz dostarczają informacji z innych domen pomiarowych, istotnych dla interpretacji zachowania badanego pojazdu oraz jego współpracy z infrastrukturą kolejową.

W ramach pracy autor przeprowadził badania uzupełniające obejmujące wizyjną analizę strefy współpracy odbieraka z przewodem jezdniowym, pomiary rezystancji, impedancji i reaktancji zestawów kołowych, badania emisji zaburzeń promieniowanych, pomiary prądów zakłócających generowanych do sieci trakcyjnej oraz pomiary pola magnetycznego. Zakres poszczególnych modułów dobierano do celu konkretnej kampanii badawczej. Takie rozdzielenie odpowiada wielodomenowemu charakterowi współczesnych badań pojazdów szynowych, w których zagadnienia mechaniczne, elektryczne i kompatybilności elektromagnetycznej wymagają odrębnych mezurandów, torów pomiarowych i kryteriów oceny [116].

W niniejszym rozdziale przedstawiono reprezentatywne wyniki badań wykonanych przez autora. W kilku modułach wykorzystano wyniki kampanii pojazdu wyposażonego w odbierak Panto300, co pozwala pokazać rozszerzenie zasadniczych badań dynamicznych o niezależne pomiary elektryczne i elektromagnetyczne. Dodatkowo dla pomiarów pola magnetycznego przedstawiono wyniki EZT typu 48WEc, aby wykazać możliwość zastosowania tego samego modułu w innej konfiguracji pojazdu. Zestawienie nie oznacza łączenia wyników różnych kampanii w jeden wynik oceny, lecz służy pokazaniu konfigurowalnego charakteru opracowanej metodyki. Uszczegółowienie modułowego bloku badań uzupełniających przedstawiono na rys. 11.1, natomiast funkcję poszczególnych modułów, ich podstawowe wielkości oraz reprezentatywne przykłady zestawiono w tab. 11.1.



Rys. 11.1. Uszczegółowienie modułowego bloku badań uzupełniających w opracowanej metodyce

Tabela 11.1. Funkcja poszczególnych modułów badań uzupełniających

Moduł	Wielkość / obserwacja	Rola w ocenie	Reprezentatywny przykład
wizyjna analiza	obraz strefy współpracy, położenie przewodu, widoczne zjawiska łukowe	wsparcie interpretacji wyników dynamicznych	EZT z odbierakiem Panto300
R, Z i X zestawów kołowych	$R, Z(f), X(f)$	ocena właściwości elektrycznych istotnych dla obwodów torowych	kampania pojazdu z Panto300
emisja zaburzeń promieniowanych	$H(f), E(f)$, tło elektromagnetyczne	ocena emisji kompletnego pojazdu do otoczenia	kampania pojazdu z Panto300
prądy zakłócające do sieci	$I_z(f), I_t, U_t, v$	ocena kompatybilności z systemami detekcji wykorzystującymi obwody torowe	kampania pojazdu z Panto300
pole magnetyczne	$B(f), BDC$	ocena środowiska elektromagnetycznego w pojeździe i jego otoczeniu	EZT typu 48WEc

11.2 Wizyjna analiza współpracy odbieraka z siecią trakcyjną

Moduł wizyjny stanowi bezpośrednie uzupełnienie pomiarów mechanicznych wykonywanych podczas jazdy. Kamera umieszczona na dachu pojazdu umożliwia obserwację strefy współpracy ślizgacza z przewodem jezdny, dokumentowanie położenia przewodu względem odbieraka oraz identyfikację widocznych zjawisk łukowych i innych zdarzeń nietypowych. Literatura dotycząca automatycznej inspekcji

sieci jezdnej oraz systemów pantograf–sieć potwierdza rosnące znaczenie pokładowych systemów wizyjnych jako niezależnego źródła informacji diagnostycznej [117], [118]. Zastosowanie analizy obrazu do rozpoznawania zjawisk łukowych jest również rozwijane w metodach opartych na przetwarzaniu sekwencji wizyjnych [119]. Własne prace autora w tym obszarze obejmowały ponadto system wizyjny do analizy położenia sieci trakcyjnej względem odbieraka prądu [11].

Jako reprezentatywny przypadek wykorzystano jazdy pojazdu wyposażonego w odbierak Panto300. Autor analizował zapis z przejazdu o długości około 80 km. W analizowanym materiale nie stwierdzono zjawisk łukowych ani przerw zasilania, które w źródłowej ocenie można byłoby powiązać z niewłaściwą współpracą odbieraka z przewodem jezdny. Po zakończeniu jazdy powierzchnie nakładek ślizgowych nie wykazywały śladów nadpaleń ani opisanych w materiale z badań uszkodzeń mechanicznych. Przykład obrazu rejestrowanego przez kamerę dachową podczas tej kampanii przedstawiono na rys. 11.2.



Rys. 11.2. Przykład obrazu z kamery dachowej podczas jazdy pojazdu z odbierakiem Panto300

Wynik analizy obrazu nie zastępuje oceny $F_c(t)$ i nie stanowi dodatkowego składnika modelu siły stykowej. Jego znaczenie polega na dostarczeniu niezależnej informacji obserwacyjnej, która może wspierać interpretację sygnałów pomiarowych albo wskazać zdarzenie wymagające odrębnej analizy. Jednocześnie z samego zapisu standardowej kamery nie należy wnioskować o wszystkich krótkotrwałych utratach kontaktu elektrycznego, jeżeli nie zastosowano i nie zwalidowano odpowiedniej metody ich detekcji.

11.3 Badania rezystancji, impedancji i reaktancji zestawów kołowych

Badania rezystancji, impedancji i reaktancji zestawów kołowych dotyczą właściwości elektrycznych całego pojazdu, a nie samego odbieraka prądu. W modułowej strukturze metodyki pełnią funkcję uzupełniającą, ponieważ pozwalają ocenić właściwości istotne dla współpracy pojazdu z systemami detekcji pociągu wykorzystującymi obwody torowe. Znaczenie niskiej rezystancji elektrycznej w obwodzie koło–szyna dla niezawodności obwodów torowych wskazywane jest również w literaturze dotyczącej bezpieczeństwa systemów detekcji pociągu [120]. Metodykę wyznaczania R , Z i X dla zestawów kołowych oraz jej podstawy normatywne autor współopracował i opublikował odrębnie [121].

W przedstawionej kampanii autor wykonał pomiary dla czterech zestawów kołowych oznaczonych jako osie 11–14. Rezystancję R wyznaczano prądem stałym, natomiast moduł impedancji Z mierzono dla częstotliwości od 0,5 do 40 kHz. Natężenie prądu podczas zasadniczych pomiarów wynosiło co najmniej 10 A. Na podstawie zmierzonych R i Z wyznaczano reaktancję X zgodnie z zależnościami:

$$R = \frac{\Delta U}{I} \text{ } [\Omega]; Z = \frac{\Delta U}{I} \text{ } [\Omega]; X = \sqrt{Z^2 - R^2} \text{ } [\Omega] \quad (11.1)$$

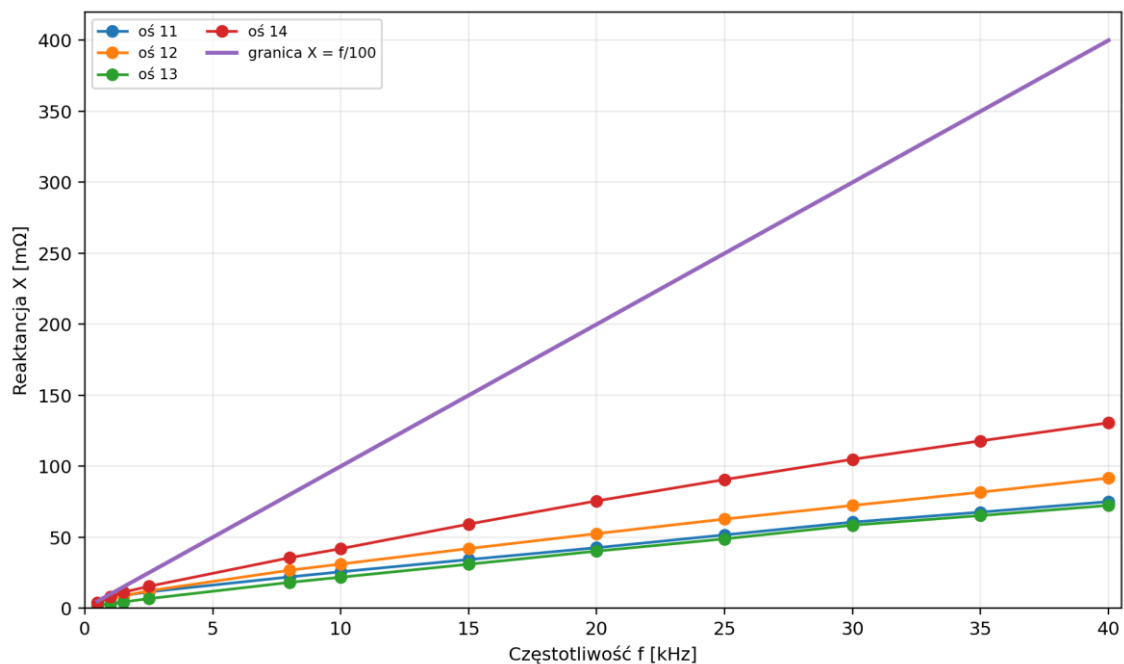
- ΔU – zmierzony spadek napięcia [V],
- I – natężenie prądu pomiarowego [A],
- R – rezystancję zestawu kołowego [Ω],
- Z – moduł impedancji [Ω],
- X – reaktancja [Ω].

Formalne odniesienie do granicy $f/100$ [m Ω] przeprowadzono dla reaktancji X , zgodnie z metodyką opisaną w [121]. Wybrane wartości R , Z i X dla badanych zestawów kołowych zestawiono w tab. 11.2.

Tabela 11.2. Wybrane wyniki pomiarów rezystancji, impedancji i reaktancji zestawów kołowych

Oś	R – prąd stały [mΩ]	Z przy 40 kHz [mΩ]	X przy 40 kHz [mΩ]	Granica R [mΩ]	Granica X przy 40 kHz [mΩ]
11	0,08	75,12	75,12	50	400
12	0,11	91,69	91,69	50	400
13	0,20	72,47	72,47	50	400
14	0,12	130,64	130,64	50	400

Przebieg wyznaczonej reaktancji w pełnym zakresie częstotliwości przedstawiono na rys. 11.3. Dla wszystkich czterech zestawów kołowych wartości $X(f)$ pozostawały poniżej granicy $f/100$ [mΩ]. Największą wartość w badanym zakresie uzyskano dla osi 14 przy 40 kHz, wyniosła ona 130,64 mΩ, czyli około 32,7 % wartości granicznej 400 mΩ. Wartości rezystancji stałoprądowej również były wielokrotnie niższe od poziomu 0,05 Ω. Wynik ten odnosi się do kompatybilności elektrycznej pojazdu z obwodami torowymi i nie jest kryterium oceny dynamicznej współpracy odbieraka z siecią.



Rys. 11.3. Reaktancja X zestawów kołowych w funkcji częstotliwości na tle wartości granicznej

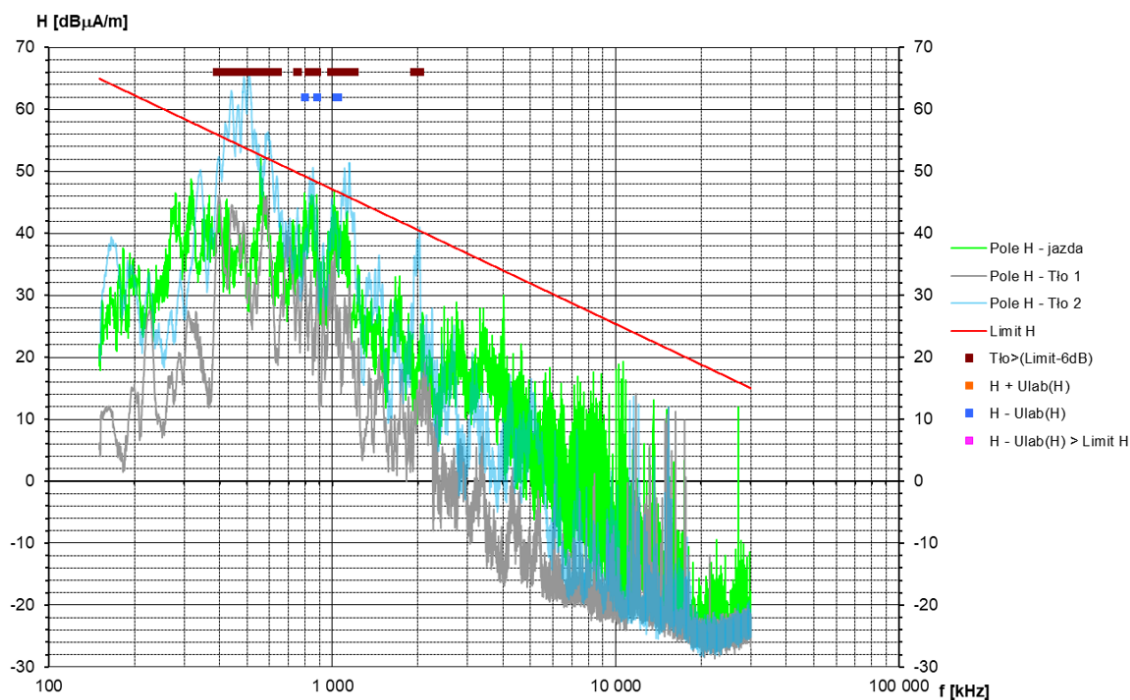
Przykład pokazuje odrębność funkcjonalną tego modułu, wynik nie wpływa na obliczenie $F_c(t)$, lecz dostarcza informacji o innym obszarze współpracy pojazdu

z infrastrukturą. Dzięki temu nieprawidłowości dotyczące detekcji pojazdu nie są utożsamiane z problemami dynamicznej współpracy odbieraka z siecią trakcyjną.

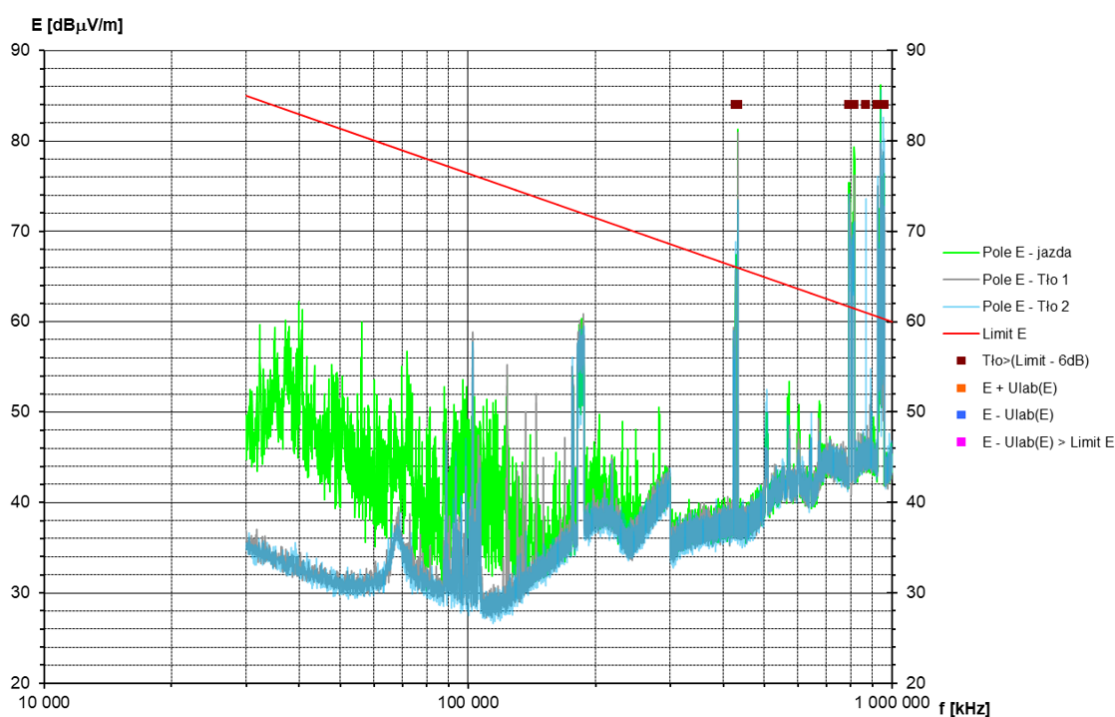
11.4 Badania emisji zaburzeń promieniowanych

Kolejny moduł obejmuje ocenę emisji zaburzeń promieniowanych przez kompletny pojazd. Kolejowe środowisko elektromagnetyczne ma charakter wieloźródłowy, a literatura rozróżnia zaburzenia promieniowane i przewodzone oraz podkreśla trudność jednoznacznego przypisania emisji pojedynczemu podzespołowi [116]. Z tego względu wynik tego badania charakteryzuje pojazd jako całość i nie powinien być utożsamiany wyłącznie z emisją układu pantograf-sieć. W reprezentatywnej kampanii obejmującej pojazd z odbierakiem Panto300 pomiary wykonano na Torze Doświadczalnym w Żmigrodzie w zakresie od 150 kHz do 1 GHz, zgodnie z PN-EN 50121-2:2017 [122] i PN-EN 50121-3-1:2017 [123]. Rejestrowano składową magnetyczną H oraz składowe pola elektrycznego E , wykorzystując odpowiednio antenę pętlową, dwustożkową i logarytmiczno-okresową.

W ocenie wyników uwzględniano poziom tła elektromagnetycznego rejestrowany przed i po pomiarze pojazdu. Pasma, w których tło uniemożliwiało wiarygodną ocenę emisji badanego obiektu zgodnie z kryteriami źródłowej procedury, wyłączano z formalnej oceny. Reprezentatywny wynik pola H zarejestrowany podczas jazdy przedstawiono na rys. 11.4, natomiast odpowiadający mu wynik pola E na rys. 11.5. Takie postępowanie jest spójne z ogólną zasadą rozdzielania źródła badanego od zaburzeń obecnych w środowisku pomiarowym, szczególnie istotną w badaniach EMC prowadzonych w systemie kolejowym [116].



Rys. 11.4. Zaburzenia promieniowane pola H zarejestrowane podczas jazdy – reprezentatywny wynik kampanii EMC



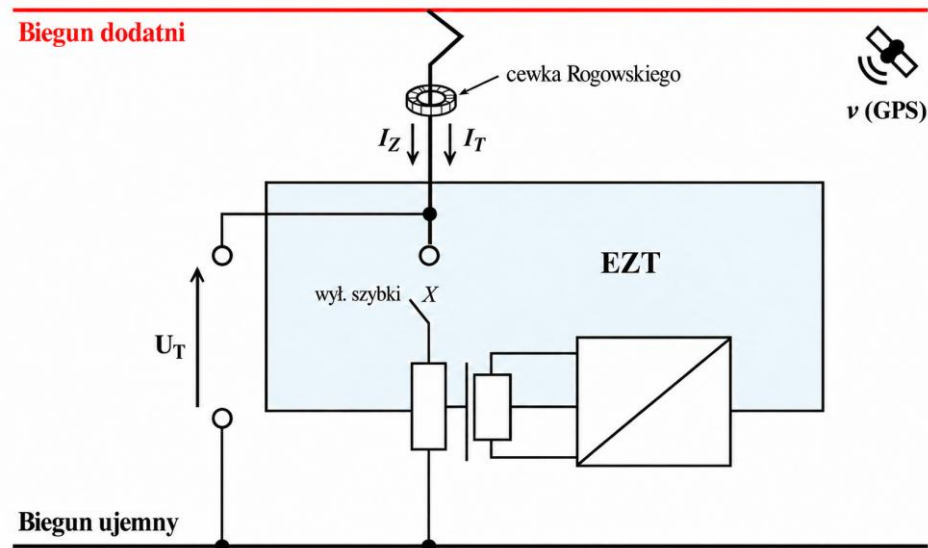
Rys. 11.5. Zaburzenia promieniowane pola E zarejestrowane podczas jazdy – reprezentatywny wynik kampanii EMC

W przeprowadzonych badaniach podwyższone poziomy stwierdzone na postoju przy 27 MHz i w paśmie 843–856 MHz oraz podczas jazdy przy 953 MHz powiązano z zewnętrznymi systemami radiokomunikacyjnymi oraz urządzeniami ETCS, a nie z emisją badanego pojazdu. Po uwzględnieniu kryteriów oceny tła poziomy przypisane badanemu EZT nie przekraczały wartości dopuszczalnych zastosowanych w tej kampanii. Przykład ten pokazuje diagnostyczną rolę modułu EMC, pozwala odróżnić emisję badanego pojazdu od składników środowiska elektromagnetycznego, lecz nie identyfikuje automatycznie udziału poszczególnych źródeł wewnątrz pojazdu.

11.5 Badania prądów zakłócających generowanych do sieci trakcyjnej

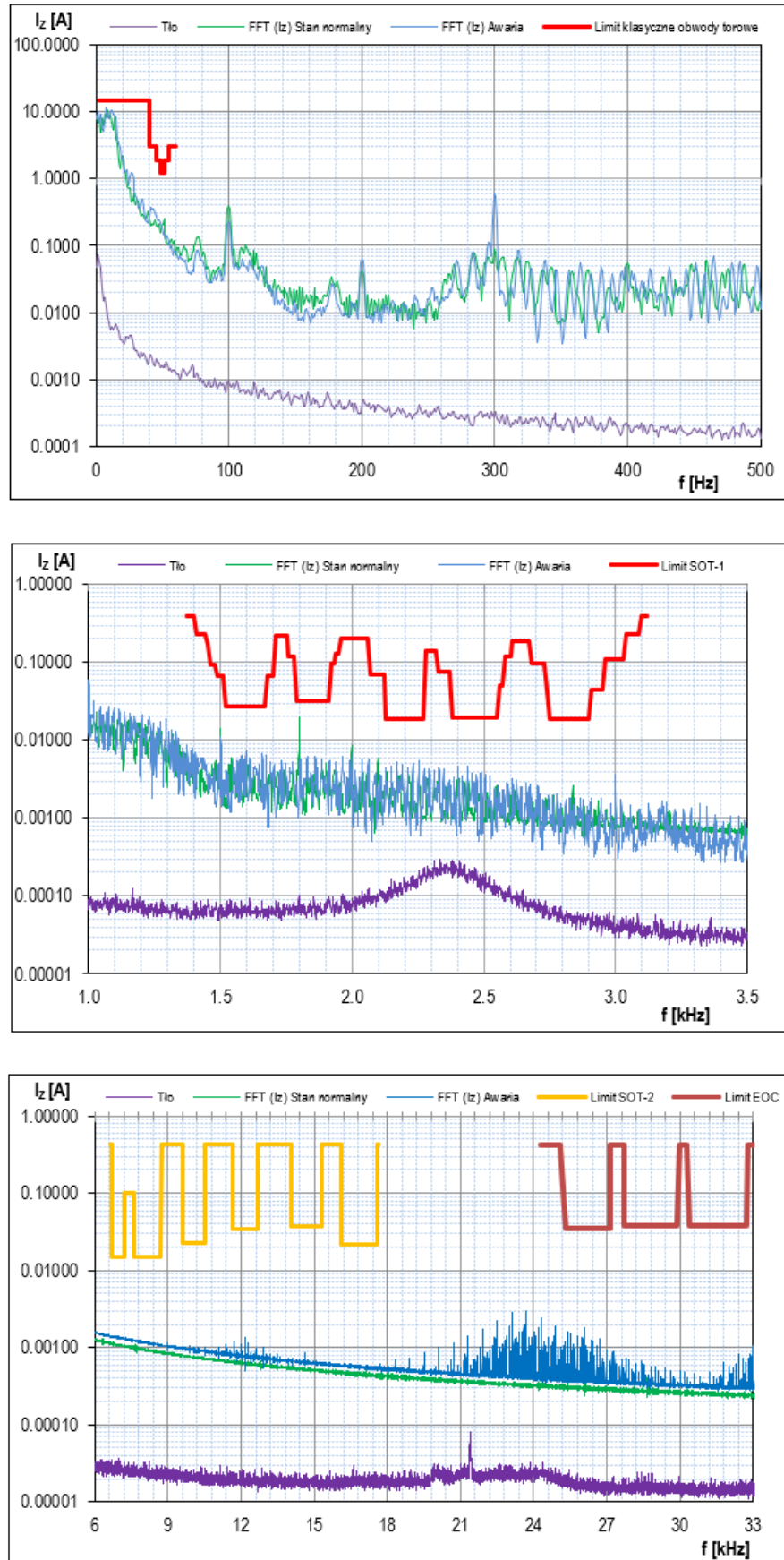
Moduł prądów zakłócających służy ocenie kompatybilności elektromagnetycznej pojazdu z systemami detekcji pociągu wykorzystującymi obwody torowe. Oddziaływanie trakcyjnych prądów zakłócających na obwody torowe jest przedmiotem badań modelowych i eksperymentalnych [124], a charakterystyki harmoniczne pojazdu zależą m.in. od stanu pracy, obciążenia oraz warunków zasilania [125]. Jako reprezentatywny przykład przedstawiono wyniki kampanii pojazdu wyposażonego w odbierak Panto300, w której autor wykonywał próby na postoju, przy stałych prędkościach oraz podczas rozruchu, wybiegu i hamowania elektrodynamicznego, zarówno w stanie normalnym, jak i w stanie awaryjnym symulowanym przez wyłączenie części układu napędowego.

Podczas badań autor rejestrował składową zmienną prądu trakcyjnego I_z , prąd trakcyjny I_t , napięcie sieci trakcyjnej U_t oraz prędkość pojazdu v . Do przetwarzania sygnałów stosowano dwa algorytmy: analizę FFT oraz filtry pasmowoprzepustowe BPF. W rozprawie przedstawiono reprezentatywny zestaw wyników FFT, ponieważ pozwala on czytelnie porównać widma dla stanu normalnego i symulowanego stanu awaryjnego. Uproszczony schemat toru pomiarowego przedstawiono na rys. 11.6. Problematykę pomiaru prądów zakłócających i kompatybilności taboru z systemami detekcji pociągu wykorzystującymi obwody torowe autor opisał również w [126].



Rys. 11.6. Schemat toru pomiarowego wykorzystywanego do badań prądów zakłócających generowanych do sieci trakcyjnej

Szczególnie użyteczny diagnostycznie jest wariant porównujący stan normalny i stan awaryjny w tej samej próbie ruchowej. Na rys. 11.7 zestawiono widma I_z podczas rozruchu, wybiegu i hamowania elektrodynamicznego w trzech podzakresach częstotliwości: $0 \div 500$ Hz, $1 \div 3,5$ kHz oraz $6 \div 33$ kHz. W każdym przypadku pokazano jednocześnie tło, przebieg dla stanu normalnego, przebieg dla stanu awaryjnego oraz właściwe poziomy graniczne. Takie zestawienie pozwala powiązać zmianę widma z określonym stanem elektrycznym układu napędowego, bez przypisywania tych zmian mechanicznej jakości kontaktu odbieraka z przewodem jezdny.



Rys. 11.7. Porównanie harmonicznych prądu I_z dla stanu normalnego i awaryjnego podczas rozruchu, wybiegu i hamowania elektrodynamicznego

W przedstawionej kampanii maksymalne wartości prądów zakłócających generowanych do sieci trakcyjnej nie przekraczały wartości dopuszczalnych zastosowanych w badaniu w paśmie od 0 do 33 kHz. Z punktu widzenia opracowanej metodyki istotna jest jednak przede wszystkim odrębność tego modułu. Jego mezurandem jest widmo prądu zakłócającego, a kryteria odnoszą się do kompatybilności z systemami detekcji pociągu, nie do parametrów $F_c(t)$. Włączenie takiego modułu do wspólnej kampanii umożliwia rozszerzenie diagnostyki pojazdu bez modyfikowania zasadniczego toru wyznaczania siły stykowej.

Moduł prądów zakłócających pozostaje zatem funkcjonalnie niezależny od modelu $F_c(t)$, ale może być uruchamiany w tej samej kampanii badawczej i wykorzystywany do szerszej interpretacji zachowania elektrycznego pojazdu.

11.6 Pomiary pola magnetycznego w pojeździe i jego otoczeniu

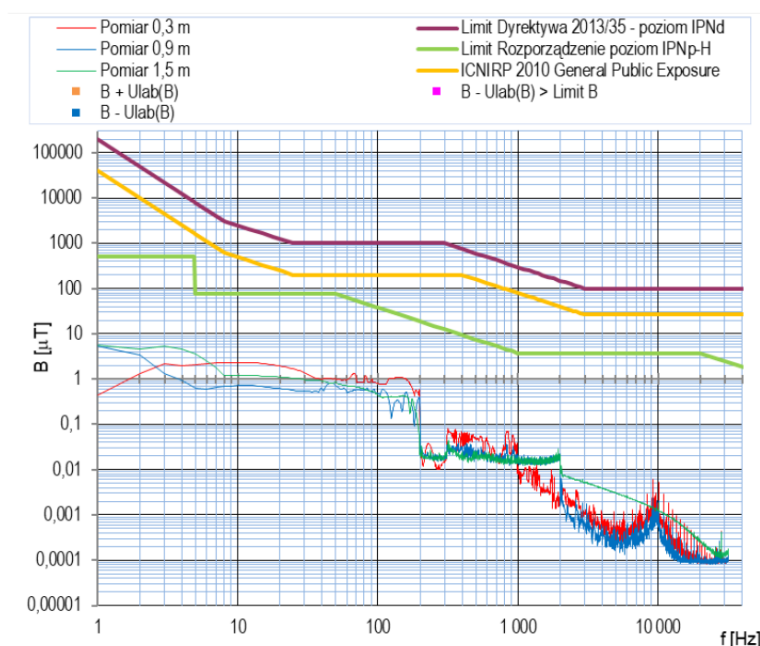
Ostatni z przedstawionych modułów obejmuje pomiary pola magnetycznego wewnątrz pojazdu i w jego otoczeniu zgodnie z wymaganiami [127]. Jako reprezentatywny przykład wykorzystano badania elektrycznego zespołu trakcyjnego typu 48WEc wykonane przez autora: pomiary na postoju przeprowadzono 26 ÷ 27.10.2021 r. na stacji Bydgoszcz Fabryczna, a pomiary podczas jazd testowych 3 ÷ 5.11.2021 r. na trasie Mińsk Mazowiecki-Siedlce-Mińsk Mazowiecki. Badanie to demonstrowało możliwość zastosowania modułu elektromagnetycznego w konfiguracji innego pojazdu niż wykorzystana w pozostałych przykładach rozdziału.

Dla pola o częstotliwościach od 0 do 1 Hz stosowano teslametr hallotronowy RX-25 z sondą trójosiową, natomiast dla wyższych częstotliwości analizator pola EFA-300 pracujący w trybie analizy widma FFT. Pomiary wykonywano w kabinach maszynisty, w przestrzeni pasażerskiej oraz na zewnątrz pojazdu na kilku wysokościach. Częstotliwościowa ocena ekspozycji jest istotna, ponieważ poziomy odniesienia dla pól zmiennych zależą od częstotliwości [128], [129]. Własne badania autora dotyczące techniki pomiaru i oceny pól magnetycznych generowanych przez pojazdy trakcyjne opisano również w [39]. Maksymalne wartości indukcji magnetycznej w wybranych strefach pojazdu zestawiono w tab. 11.3.

Tabela 11.3. Maksymalne wartości indukcji magnetycznej w wybranych strefach EZT 48WEc dla pola $0 \div 1$ Hz.

Strefa	Maksimum – postój [μ T]	Maksimum – jazda [μ T]	Uwagi
Kabiny maszynisty	106	112	pomiary na wysokości 0,9 i 1,5 m
Przestrzeń pasażerska	116	178	pomiary na wysokości 0,3; 0,9 i 1,5 m
Na zewnątrz pojazdu	95	—	pomiary postojowe na wysokości 0,5; 1,5 i 2,5 m

Największą z zestawionych wartości podczas jazdy $178 \mu\text{T}$ zarejestrowano w przestrzeni pasażerskiej w członie B, w punkcie P11 na wysokości 1,5 m. Dla pola $0 \div 1$ Hz wszystkie wartości zarejestrowane w kampanii 48WEc pozostawały poniżej poziomu $500 \mu\text{T}$ zastosowanego w źródłowej ocenie. Dla pomiarów widmowych wyniki odnoszono do częstotliwościowo zależnych poziomów właściwych dla dokumentów zastosowanych w kampanii [130], [131]. Należy przy tym rozdzielić formalne wymagania dotyczące narażenia pracowników od poziomów odniesienia dla ogółu ludności; wytyczne ICNIRP [128], [129], [132] mogą stanowić dodatkowe odniesienie naukowe, lecz nie zastępują reguły decyzji przyjętej w konkretnym badaniu. Przykładowy wynik analizy widmowej pola magnetycznego zarejestrowany podczas jazdy EZT 48WEc przedstawiono na rys. 11.8.



Rys. 11.8. Widmowy pomiar pola magnetycznego w członie A, punkt P1, podczas jazdy EZT 48WEc

W źródłowej ocenie wyniki uzyskane w badanych punktach i pasmach częstotliwości nie przekraczały odpowiednich poziomów zastosowanych w kampanii. Moduł pola magnetycznego nie służy do weryfikowania modelu $F_c(t)$. Jego funkcją jest rozszerzenie programu o odrębną ocenę środowiska elektromagnetycznego pojazdu oraz wskazanie lokalnych obszarów podwyższonego pola.

11.7 Synteza modułowej realizacji badań uzupełniających

Przedstawione wyniki pokazują praktyczną realizację bloku badań uzupełniających przewidzianego w koncepcji metodyki. Każdy moduł ma własny mezurand, tor pomiarowy, sposób przetwarzania danych i kryterium interpretacji, a jednocześnie może zostać włączony do wspólnego programu badawczego bez ingerencji w model wyznaczania chwilowej siły stykowej $F_c(t)$. Na tym polega przyjęta w pracy modułowość: zakres badań można rozszerzać odpowiednio do obiektu i celu oceny, zachowując rozdzielanie modeli pomiaru oraz właściwych im kryteriów.

Wizyjna analiza dostarczyła niezależnej informacji obserwacyjnej o strefie współpracy odbieraka z siecią. Pomiary R , Z i X pozwoliły ocenić właściwości elektryczne zestawów kołowych istotne dla obwodów torowych. Badania emisji zaburzeń promieniowanych umożliwiły oddzielenie emisji badanego pojazdu od składników tła elektromagnetycznego. Analiza prądów zakłócających pozwoliła porównać stan normalny i symulowany stan awaryjny układu napędowego, natomiast pomiary pola magnetycznego rozszerzyły ocenę o środowisko elektromagnetyczne wewnątrz pojazdu i w jego otoczeniu. Zasadność takiego wielodomenowego podejścia znajduje potwierdzenie w literaturze dotyczącej diagnostyki systemu pantograf–sieć, kompatybilności elektromagnetycznej i współpracy pojazdów z systemami detekcji pociągu [120]–[132].

Wykorzystanie przykładów pochodzących z różnych kampanii nie oznacza łączenia wyników w jeden wynik oceny ani przypisywania ich jednemu odbierakowi. Pokazuje natomiast możliwość uruchamiania poszczególnych modułów dla różnych konfiguracji pojazdów, zgodnie z potrzebą konkretnego programu badawczego. Jest to cecha wdrożeniowa metodyki, moduły mogą być dobierane niezależnie, a ich wyniki mogą następnie stanowić dodatkowy kontekst diagnostyczny dla wyników badań zasadniczych.

Wyniki przedstawione w rozdziałach 9–11 tworzą trzy kolejne poziomy części eksperymentalnej rozprawy. Rozdział 9 dokumentuje kwalifikację statyczną wybranych

konfiguracji pojazd–odbierak, rozdział 10 przedstawia eksperymentalną weryfikację głównego toru pomiarowo-analitycznego w badaniach dynamicznych, a niniejszy rozdział potwierdza możliwość praktycznej realizacji modułów uzupełniających przewidzianych w koncepcji i procedurze metodyki. Łączna interpretacja tych wyników stanowi podstawę dyskusji przedstawionej w kolejnym rozdziale.

12 Dyskusja wyników, weryfikacja tezy i wdrożenie metodyki

W rozdziałach 2–11 przedstawiono kolejne elementy procesu prowadzącego od identyfikacji uwarunkowań dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną, poprzez opracowanie koncepcji i techniczną realizację układu pomiarowego, do eksperymentalnej weryfikacji metodyki w rzeczywistych warunkach jazdy. Celem niniejszego rozdziału nie jest ponowne zestawienie wszystkich wyników szczegółowych, lecz ich syntetyczna interpretacja w odniesieniu do problemu badawczego, celu i tezy rozprawy oraz do wdrożeniowego charakteru wykonanych prac.

Przyjęto, że o wartości opracowanej metodyki decyduje łączne spełnienie trzech grup przesłanek. Pierwsza dotyczy poprawności pomiarowej i metrologicznej, a więc możliwości pozyskania wielkości wejściowych, kwalifikacji kompletnej konfiguracji pomiarowej, uwzględnienia oddziaływań bezwładnościowych i aerodynamicznych oraz przypisania wynikowi ilościowej informacji o niepewności. Druga obejmuje eksperymentalne potwierdzenie działania metodyki dla rzeczywistych konfiguracji pojazd–odbierak–sieć. Trzecia dotyczy zdolności do zastosowania rozwiązania w praktyce laboratoryjnej i jego proceduralnej formalizacji. Dopiero rozpatrywanie tych płaszczyzn łącznie pozwala ocenić, czy opracowany proces realizuje cel rozprawy bez utożsamiania zgodności z wymaganiami normatywnymi z oryginalnym wkładem wynikającym z rozprawy.

W dyskusji zachowano rozróżnienie pomiędzy elementami wynikającymi bezpośrednio z dokumentów odniesienia a rozwiązaniami opracowanymi w ramach rozprawy. Postać równania wyznaczania siły stykowej oraz wymagania dotyczące badań pozostają zgodne z PN-EN 50317 [18], [19]. Oryginalność pracy odnosi się do sposobu połączenia wymagań normatywnych, konfiguracji aparatury, pozyskania i przetwarzania danych, kwalifikacji kompletnego oprzyrządowanego odbieraka, wyznaczania wielkości zależnych od konkretnej konfiguracji oraz ilościowej oceny niepewności w jeden proces możliwy do zastosowania w badaniach.

12.1 Synteza wyników eksperymentalnej weryfikacji metodyki

Punktem wyjścia do oceny wyników jest przyjęta w rozdziale 3 architektura metodyki. Jej rdzeń stanowi proces wyznaczania chwilowej siły stykowej $F_c(t)$, oparty na zsynchronizowanych sygnałach torów pomiaru siły i przyspieszenia oraz na korekcji aerodynamicznej właściwej dla badanej konfiguracji. Wielkości elektryczne,

środowiskowe i dane obrazowe pełnią funkcje towarzyszące albo są wykorzystywane w odrębnych modułach badań uzupełniających. Takie rozdzielenie pozwoliło uniknąć przypisywania wszystkim rejestrowanym wielkościom tego samego statusu w modelu pomiaru, a jednocześnie zachować możliwość rozszerzonej interpretacji zachowania badanego systemu.

Techniczna realizacja metodyki wymagała opracowania konfigurowalnego układu pomiarowego, którego podstawowy tor dynamiczny obejmuje cztery tory pomiaru siły oraz cztery tory pomiaru przyspieszenia ze wspólną podstawą czasu. Rozwiązania mechaniczne służące integracji czujników z odbierakiem poddano projektowej weryfikacji metodą elementów skończonych przed wykonaniem modułów. Analiza MES nie została potraktowana jako samodzielny dowód przydatności metrologicznej układu, lecz jako etap projektowania i identyfikacji miejsc krytycznych, poprzedzający laboratoryjną i terenową kwalifikację kompletnej konfiguracji.

Wyniki badań statycznych potwierdziły, w zakresie wykonanych sprawdzeń, prawidłową geometrię, zakres roboczy i regulację analizowanych konfiguracji odbieraków przed przejściem do badań dynamicznych. Ich rola w ciągu dowodowym rozprawy jest istotna, lecz pomocnicza względem głównej tezy, tj. polega na ograniczeniu ryzyka przypisania niewłaściwej geometrii lub regulacji odbieraka efektów obserwowanych później w przebiegu siły stykowej. Nie stanowią natomiast składnika równania $F_c(t)$.

Laboratoryjna ocena właściwości dynamicznych kompletnej oprzyrządowanej konfiguracji wykazała nominalne wartości wskaźnika J równe 97,57 % dla wymuszenia centralnego i 94,36 % dla wymuszenia przesuniętego o około 250 mm. Odpowiadające im niepewności rozszerzone $U(J)$, dla $k = 2$, wyniosły odpowiednio 5,58 p.p. i 6,48 p.p. W obu położeniach nominalna wartość J przekraczała wymagany poziom 90 %. Wynik poza ośią wskazał jednocześnie większą wrażliwość kompletnej konfiguracji na miejsce przyłożenia wymuszenia, co potwierdza zasadność badania układu jako całości, a nie wyłączenie oceny parametrów pojedynczych przetworników.

Badania aerodynamiczne pełniły dwie rozdzielone funkcje. Po pierwsze, służyły kwalifikacyjnej ocenie wpływu zabudowy aparatury na całkowitą średnią siłę unoszącą. Maksymalna wartość względnej zmiany $\delta_{sys,aero}(v)$ w analizowanym zakresie prędkości wyniosła 4,2 %, a więc była niższa od wartości granicznej 5% wynikającej z PN-EN 50317 [18], [19]. Po drugie, na podstawie równoczesnej rejestracji sił w linkach

uwiązujących i wskazań czterech torów FBG wyznaczano korekcję $F_{corr,aero}(v)$ dla danego punktu prędkości i kierunku jazdy. Rozdzielenie tych dwóch celów ma znaczenie interpretacyjne: pierwsza wielkość kwalifikuje wpływ wyposażenia, druga jest wielkością wejściową modelu $F_c(t)$.

Porównanie charakterystyk aerodynamicznych uzyskanych w różnych kampaniach wykazało, że $F_{corr,aero}(v)$ nie może być traktowana jako stała przypisana do typu odbieraka. Dla serii 25 kV AC w jednym kierunku wartość korekcji zmieniała znak wraz ze wzrostem prędkości, natomiast w przeciwnym kierunku pozostała dodatnia; przy 160 km/h różnica pomiędzy kierunkami wyniosła 17,73 N. Wyniku tego nie należy przypisywać wyłącznie systemowi zasilania, ponieważ kampanie dotyczyły odmiennych konfiguracji. Stanowi on natomiast mocny argument za każdorazowym przypisaniem charakterystyki aerodynamicznej do badanej konfiguracji oraz odpowiadających jej warunków przejazdu.

Eksperymentalną weryfikację procesu przeprowadzono na sześciu seriach badań dynamicznych. Trzy serie wykonano w systemie 3 kV DC, a trzy w systemie 25 kV AC; każda obejmowała dwa kierunki jazdy i pięć poziomów prędkości od 80 do 160 km/h. W analizowanych seriach nominalne wartości średniej siły stykowej F_m znajdowały się w odpowiednich granicach liczbowych, a odchylenie standardowe σ pozostawało poniżej poziomu $0,3F_m$. Jednocześnie lokalne maksima σ występowały przy różnych prędkościach i nie tworzyły prostych zależności monotonicznych. Wynik ten jest istotny, ponieważ pokazuje, że metodyka zachowuje informację o rzeczywistej zmienności procesu i nie redukuje oceny do pojedynczej wartości uśrednionej.

Ocena metrologiczna została powiązana z wynikiem eksperymentalnym. Dla reprezentatywnej konfiguracji z odbierakiem 160T-3kVDC uzyskano złożoną niepewność standardową $u_c(F_c) = 2,846$ N oraz niepewność rozszerzoną $U(F_c) = 5,692$ N dla $k = 2$. Wartość ta charakteryzuje wskazaną konfigurację i warunki przyjęte w budżecie, dlatego nie jest automatycznie przenoszona na odmienne odbieraki lub kampanie. Takie ograniczenie stanowi element poprawności metrologicznej, a nie słabość rozwiązania.

Badania uzupełniające zrealizowane w ramach modułowej koncepcji objęły analizę wizyjną strefy styku, badania rezystancji, impedancji i reaktancji zestawów kołowych, pomiary emisji zaburzeń promieniowanych, prądów zakłócających generowanych do sieci trakcyjnej oraz pola magnetycznego w pojeździe i jego otoczeniu. Wyniki tych

badania nie są wejściami modelu $F_c(t)$ i nie tworzą jednego wspólnego kryterium zgodności. Ich znaczenie polega na dostarczeniu dodatkowej informacji diagnostycznej, interpretowanej według kryteriów właściwych dla danego rodzaju badania.

Tabela 12.1. Zestawienie wyników stanowiących podstawę oceny opracowanej metodyki

Obszar	Wynik / dowód eksperymentalny	Znaczenie dla metodyki
architektura pomiarowa	konfigurowalny system; rdzeń $F_c(t)$: 4 tory siły + 4 tory przyspieszenia, wspólna podstawa czasu	możliwość rzeczywistego pozyskania i synchronizacji wielkości wejściowych modelu
kwalifikacja dynamiczna	$J = 97,57$ % centralnie i $94,36$ % przy przesunięciu ok. 250 mm; $U(J) = 5,58$ i $6,48$ p.p. dla $k = 2$	ocena odpowiedzi dynamicznej kompletnej oprzyrządowanej konfiguracji; J nie jest współczynnikiem korekcyjnym $F_c(t)$
wpływ zabudowy	maks. $\delta_{sys,aero}(v) = 4,2$ % przy wymaganiu ≤ 5 %	potwierdzenie spełnienia warunku dotyczącego wpływu układu pomiarowego na całkowitą średnią siłę unoszącą w badanej konfiguracji
korekcja aerodynamiczna	wyznaczana z równoczesnych pomiarów $F_s(v)$ i średniej z sumy torów FBG; zależna od prędkości, kierunku i konfiguracji	ograniczenie ryzyka przypisania oddziaływań aerodynamicznych zmianom współpracy dynamicznej
badania dynamiczne	6 serii: 3 kV DC i 25 kV AC, 80–160 km/h, po 2 kierunki i 5 poziomów prędkości	eksperymentalna weryfikacja tego samego procesu pomiarowo-analitycznego w zróżnicowanych warunkach
niepewność $F_c(t)$	dla konfiguracji 160T-3kVDC: $u_c(F_c) = 2,846$ N; $U(F_c) = 5,692$ N, $k = 2$	ilościowa informacja o wiarygodności metrologicznej wyniku, przypisana do konkretnej konfiguracji
moduły uzupełniające	wideo, R/Z/X zestawów kołowych, emisja promieniowana, prądy zakłócające, pole magnetyczne	rozszerzenie informacji diagnostycznej bez włączania tych wyników do modelu $F_c(t)$

Zestawienie wyników wskazuje, że weryfikacja nie opiera się na pojedynczej wartości lub pojedynczym przejeździe. Tworzy ją ciąg wzajemnie powiązanych działań: kwalifikacja obiektu i układu, ocena odpowiedzi dynamicznej kompletnej konfiguracji, wyznaczenie właściwych wielkości aerodynamicznych, rekonstrukcja $F_c(t)$, analiza parametrów statystycznych, ocena niepewności i odniesienie wyników do odpowiednich kryteriów. Taki ciąg odpowiada charakterowi problemu sformułowanego w rozdziale 1 i stanowi podstawę dalszej dyskusji metrologicznej.

12.2 Dyskusja znaczenia metrologicznego opracowanej metodyki

Podstawą właściwej oceny metrologicznej, wykraczającej poza proste zestawienie wyników pomiarów, jest rozdzielenie funkcji poszczególnych działań związanych z aparaturą. Wzorcowanie torów pomiarowych dostarcza informacji o ich właściwościach metrologicznych i zapewnia spójność pomiarową w zakresie objętym wzorcowaniem. Kontrola funkcjonalna po montażu służy sprawdzeniu poprawności konfiguracji. Laboratoryjne badanie według pkt 7.5 PN-EN 50317 [18] dotyczy natomiast odpowiedzi dynamicznej kompletnego oprzyrządowanego odbieraka. Zastępowanie jednego z tych etapów drugim prowadziłoby do błędnej interpretacji znaczenia uzyskanych wyników.

W tym kontekście szczególnej interpretacji wymaga wskaźnik J . W PN-EN 50317 [18], [19] wielkość ta została określona jako „dokładność wartości bezwzględnej funkcji przenoszenia”. W rozprawie stosuje się określenie „wskaźnik J ”, aby nie utożsamiać normowej nazwy tej wielkości z metrologicznym pojęciem dokładności pomiaru. J służy do oceny właściwości dynamicznych kompletnej oprzyrządowanej konfiguracji i nie jest współczynnikiem korekcyjnym stosowanym następnie do przeliczania siły stykowej. W modelu $F_c(t)$ nie występuje mnożenie sygnału przez J ani korekcja wyniku o wartość $1/J$. Spełnienie kryterium J jest warunkiem potwierdzenia, że odpowiedź dynamiczna oprzyrządowanej konfiguracji jest odpowiednia dla realizacji pomiaru zgodnie z przyjętą procedurą.

Równanie chwilowej siły stykowej zachowuje postać wynikającą z PN-EN 50317 [18], [19]. W przyjętej notacji $F_c(t)$ jest sumą chwilowych wskazań torów pomiaru siły $F_z(t)$, składnika bezwładnościowego $F_a(t)$, wyznaczanego na podstawie przyspieszeń elementów znajdujących się pomiędzy punktem styku a czujnikami siły, oraz korekcji aerodynamicznej $F_{corr,aero}(v)$. Oryginalny wkład rozprawy nie polega zatem na zmianie równania normowego, ale na zaprojektowaniu i zweryfikowaniu sposobu uzyskania jego wielkości wejściowych dla rzeczywistej konfiguracji pomiarowej oraz na powiązaniu wyniku z oceną niepewności.

Znaczenie członu bezwładnościowego wynika z faktu, że czujniki siły nie są zlokalizowane bezpośrednio w punkcie kontaktu ślizgacza z przewodem jezdny. Masa elementów znajdujących się ponad poziomem pomiaru uczestniczy w ruchu dynamicznym, a jej przyspieszenie powoduje powstanie składowej, której nieuwzględnienie obciążałoby wynik zależnością od ruchu własnego elementów

odbieraka. Zastosowanie czterech torów przyspieszenia i wspólnej podstawy czasu z torami siły umożliwia wyznaczenie tej składowej w tym samym przebiegu czasowym, w którym rekonstruowana jest $F_c(t)$.

Analogicznie, korekcja aerodynamiczna nie ma charakteru uniwersalnej poprawki przypisanej do typu odbieraka. Jej wartość wynika z relacji pomiędzy całkowitą średnią siłą unoszącą a średnią w czasie z sumy wskazań torów FBG, zarejestrowanych podczas tego samego badania aerodynamicznego. Takie równoczesne pozyskanie wielkości ogranicza wpływ niekontrolowanych różnic warunków pomiędzy pomiarami i zapewnia bezpośrednie powiązanie danych wykorzystanych do wyznaczenia $F_{corr,aero}(v)$. Wyniki kampanii 3 kV DC i 25 kV AC pokazują przy tym, że pominięcie zależności od kierunku i konfiguracji mogłoby prowadzić do błędnej korekcji końcowego przebiegu.

Istotne jest również rozróżnienie korekcji $F_{corr,aero}(v)$ od kwalifikacyjnej oceny aerodynamicznego wpływu zabudowy. Wartość $\delta_{sys,aero}(v)$ określa, czy zainstalowany układ pomiarowy nie zmienia całkowitej średniej siły unoszącej ponad dopuszczalny poziom. $F_{corr,aero}(v)$ jest natomiast składnikiem równania $F_c(t)$. W badanej konfiguracji maksymalna wartość $\delta_{sys,aero}(v)$ wyniosła 4,2 %, co potwierdziło spełnienie kryterium 5 % w analizowanym zakresie prędkości. Wynik ten nie zastępuje jednak wyznaczenia samej korekcji i nie może być z nią utożsamiany.

Kolejny element dotyczy sposobu traktowania niepewności. W rozprawie wynik pomiaru nie jest utożsamiany wyłącznie z wartością $F_c(t)$ lub z parametrami statystycznymi wyznaczonymi z tego przebiegu. Dla reprezentatywnej konfiguracji wyznaczono $U(F_c) = 5,692$ N przy $k = 2$. Informacja ta pozwala scharakteryzować jakość pomiarowego wyznaczenia siły stykowej w warunkach określonych w budżecie. Niepewność nie stanowi jednak „rezerwy” dodawanej do zmierzonego przebiegu ani uniwersalnego marginesu dla wszystkich kampanii.

Szczególnie ważne jest rozdzielenie $U(F_c)$ i odchylenia standardowego σ . Odchylenie standardowe opisuje zmienność przebiegu siły stykowej na analizowanym odcinku i jest parametrem charakteryzującym rzeczywiste zachowanie układu pantograf–sieć. $U(F_c)$ opisuje natomiast niepewność pomiarowego wyznaczenia chwilowej siły stykowej. Wielkości te odpowiadają na różne pytania i nie powinny być wzajemnie zastępowane. Dzięki temu możliwe jest jednoczesne zachowanie informacji o dynamice badanego zjawiska oraz o wiarygodności sposobu jego pomiaru.

W analizie niepewności wskaźnika J przyjęto uproszczone łączenie niepewności poszczególnych składników bez budowania pełnej macierzy kowariancji dla wszystkich punktów częstotliwości. Uproszczenie to nie oznacza założenia fizycznej niezależności wszystkich wielkości. W szczególności wspólne składowe typu B mogą powodować korelacje pomiędzy punktami, a sąsiednie przyrosty częstotliwości zawierają wspólną wartość częstotliwości i mogą wykazywać ujemną kowariancję. Wykazano, że pominięcie tej ujemnej kowariancji zwiększa częstotliwościową część oszacowania, a więc ma charakter konserwatywny. Dodatkowe obliczenie kontrolne, oparte na równoczesnej zmianie wartości sił w granicach przyjętych niepewności, nie zmieniło końcowej oceny.

Takie podejście jest istotne z punktu widzenia obrony przyjętego modelu niepewności. Nie przedstawia ono założeń upraszczających jako dowiedzionej niezależności wielkości, lecz wskazuje ich znaczenie i wpływ na wynik. W dalszym rozwoju metodyki możliwe jest rozszerzenie tego elementu o jawne modelowanie wybranych kowariancji lub analizę propagacji metodą Monte Carlo, jednak dla zakresu przedstawionego w rozprawie przeprowadzone sprawdzenie pozwala ocenić wpływ uproszczenia na końcowy wniosek.

Metrologicznego znaczenia opracowanej metodyki nie należy więc sprowadzać do stwierdzenia, że „zwiększa dokładność” pomiaru. Trafniejsze jest wskazanie, że porządkuje źródła wpływu na wynik, rozdziela kwalifikację aparatury od właściwego pomiaru, wymaga wyznaczenia wielkości zależnych od konfiguracji, umożliwia ilościowe przypisanie niepewności do wyniku oraz prześledzenie zależności pomiędzy danymi wejściowymi, przebiegiem $F_c(t)$ i parametrami wykorzystywanymi w ocenie. Taki sposób formułowania wyniku jest bezpośrednio związany z problemem wiarygodności badań pojazdów.

Na tle metod omówionych w podrozdziale 2.5 opracowana metodyka pełni odmienną funkcję niż modele numeryczne, stanowiska HIL oraz metody diagnostyczne. Modele MES/MBD i rozwiązania HIL umożliwiają analizę wpływu parametrów oraz kontrolowane odtwarzanie warunków współpracy, natomiast w niniejszej pracy przedmiotem weryfikacji jest kompletny proces pomiarowy realizowany na pojeździe. Z kolei metody wizyjne, elektryczne i elektromagnetyczne dostarczają informacji komplementarnych, lecz nie zastępują pomiarowego wyznaczania siły stykowej. Opracowana metodyka nie stanowi więc alternatywy dla tych podejść, lecz porządkuje

sposób uzyskania, kwalifikacji i metrologicznej interpretacji wyników wymaganych w badaniach pojazdów.

Ostatecznie wartość metrologiczna rozwiązania wynika z połączenia trzech mechanizmów: ograniczania znanych oddziaływań poprzez właściwy projekt i kwalifikację układu, wprowadzania korekcji tam, gdzie istnieje model i podstawa eksperymentalna, oraz uwzględniania pozostałych istotnych wpływów w budżecie niepewności. Żaden z tych mechanizmów samodzielnie nie gwarantuje wiarygodności wyniku. Ich spójne zastosowanie tworzy natomiast podstawę do interpretacji wyniku w warunkach badań certyfikacyjnych i oceny zgodności.

12.3 Zakres stosowalności i granice uogólnienia

Zakres stosowalności opracowanej metodyki należy rozpatrywać na dwóch poziomach: przenoszalności procedury oraz przenoszalności wartości liczbowych. Architektura procesu, obejmująca przygotowanie obiektu, konfigurację i wzorcowanie właściwych torów pomiarowych, kontrolę funkcjonalną, laboratoryjną ocenę kompletnej konfiguracji, wyznaczenie oddziaływań aerodynamicznych, pomiary podczas jazdy, przetwarzanie danych oraz ocenę niepewności, może być adaptowana do kolejnych obiektów. Nie oznacza to jednak, że parametry wyznaczone dla jednej konfiguracji mogą być bezpośrednio zastosowane do innej.

Eksperymentalna część rozprawy potwierdza stosowalność opracowanej metodyki dla analizowanych konfiguracji w systemach 3 kV DC i 25 kV AC oraz w zakresie prędkości od 80 do 160 km/h. Wykorzystanie w badaniach dynamicznych odbieraków 160T-3kVDC oraz AX-NG 054, eksploatowanych w odmiennych warunkach sieciowych, potwierdza możliwość rekonfiguracji procesu badawczego stosownie do badanego obiektu i warunków prowadzenia pomiarów. Zakres przeprowadzonej walidacji eksperymentalnej obejmował konfiguracje i warunki analizowane w rozprawie. Zastosowanie metodyki do innych typów odbieraków, zakresów prędkości lub systemów zasilania wymaga odpowiedniego przygotowania oraz oceny danej konfiguracji pomiarowej, zgodnie z przyjętą architekturą rozwiązania.

W szczególności wartości J oraz charakterystyki $|H(f_i)|$ odnoszą się do odpowiedzi dynamicznej kompletnego oprzyrządowanego odbieraka w badanej konfiguracji. Zmiana konstrukcji odbieraka, położenia czujników, elementów mocujących albo masy części znajdujących się ponad czujnikami może wpływać na tę odpowiedź. Z tego względu

wynik J nie powinien być traktowany jako parametr systemu pomiarowego rozpatrywanego w oderwaniu od badanego obiektu, lecz jako wynik oceny dynamicznej danej kompletnej konfiguracji.

Analogiczna zależność od konfiguracji występuje w przypadku korekcji aerodynamicznej. Wyniki uzyskane w rozdziale 10 wykazały różnice wartości, znaku oraz asymetrii kierunkowej pomiędzy analizowanymi konfiguracjami. W konsekwencji $F_{corr,aero}(v)$ należy wyznaczać dla danej konfiguracji obejmującej odbierak, sposób zabudowy aparatury oraz warunki prowadzenia badania, w tym wysokość, prędkość i kierunek przejazdu. Wykorzystanie charakterystyki aerodynamicznej wyznaczonej dla innej konfiguracji bez odrębnej weryfikacji nie byłoby uzasadnione wynikami eksperymentalnymi uzyskanymi w niniejszej pracy.

Również budżet niepewności należy traktować jako model odnoszący się do określonego procesu pomiarowego. Wartość $U(F_c) = 5,692$ N jest wynikiem oceny niepewności przeprowadzonej dla analizowanego przypadku związanego z konfiguracją 160T-3kVDC i nie stanowi wartości uniwersalnej. Przy zastosowaniu metodyki do kolejnego odbieraka należy zweryfikować dane ze wzorcowania, wartości mas i współczynników występujących w modelu, charakterystykę aerodynamiczną, konfigurację torów pomiarowych, warunki rejestracji oraz pozostałe istotne wielkości wpływające. Przenoszalna jest zatem struktura postępowania i sposób budowy budżetu niepewności, a nie jego wynik liczbowy.

Ostrożności wymaga również interpretacja różnic pomiędzy seriami badań przeprowadzonymi w systemach 3 kV DC i 25 kV AC. Badania nie zostały zaprojektowane jako eksperyment, w którym system zasilania stanowił jedyną zmienną. Serie różniły się odbierakiem, siecią trakcyjną, miejscem oraz warunkami prowadzenia przejazdów. Obserwowane różnice $F_c(t)$, σ oraz $F_{corr,aero}(v)$ mogą zatem służyć do oceny działania metodyki w odmiennych konfiguracjach badawczych, nie stanowią natomiast podstawy do wyodrębnienia wpływu samego rodzaju systemu zasilania na dynamiczną współpracę odbieraka z siecią jezdnią.

Modułowość badań uzupełniających również należy interpretować funkcjonalnie. Poszczególne moduły mogą być dobierane odpowiednio do celu danej kampanii badawczej i zależnie od jej zakresu, realizowane w odrębnych badaniach. Nie jest wymagane, aby każdorazowo wszystkie moduły były realizowane równocześnie z pomiarem $F_c(t)$. Ich wyniki nie są łączone w jeden syntetyczny wskaźnik jakości

systemu odbioru prądu, lecz pozostają odrębnymi wynikami ocenianymi w odpowiednich domenach pomiarowych. Takie rozwiązanie zwiększa elastyczność metodyki bez naruszania jednoznaczności głównego toru oceny dynamicznej.

Granice uogólnienia wyników można zatem określić następująco: rozprawa uzasadnia przenoszenie koncepcji oraz struktury procedury na kolejne obiekty po odpowiednim przygotowaniu i ocenie właściwej konfiguracji badawczej, nie uzasadnia natomiast automatycznego przenoszenia parametrów zależnych od konfiguracji. Tak określony zakres pozostaje zgodny z wdrożeniowym celem pracy, ponieważ rozwiązanie praktyczne nie wymaga niezmienności parametrów dla wszystkich pojazdów i warunków eksploatacji, lecz powinno zapewniać sposób ich wiarygodnego wyznaczenia dla badanego obiektu i danej konfiguracji pomiarowej.

12.4 Weryfikacja tezy rozprawy

W rozdziale 1 sformułowano tezę, zgodnie z którą: „Opracowana metodyka pomiarowo-analityczna badań dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną, obejmująca konfigurowalny układ pomiarowy, ocenę właściwości dynamicznych kompletnej oprzyrządowanej konfiguracji, uwzględnienie członu bezwładnościowego i korekcji siły aerodynamicznej oraz ilościową ocenę niepewności, umożliwia wiarygodne wyznaczenie chwilowej siły stykowej $F_c(t)$ i wykorzystanie uzyskanych wyników do oceny zdolności eksploatacyjnej systemu odbioru prądu w badaniach prowadzonych na potrzeby certyfikacji i oceny zgodności.”

Weryfikację tezy oparto na sześciu kryteriach określonych we wprowadzeniu. Zestawienie ich z wynikami przedstawionymi w rozprawie pokazano w tabeli 12.2. Przyjęto przy tym, że teza może zostać uznana za pozytywnie zweryfikowaną wtedy, gdy wszystkie jej znaczące elementy mają odrębne potwierdzenie eksperymentalne lub metrologiczne i tworzą spójny ciąg prowadzący od pomiaru do wyniku oraz jego zastosowania.

Tabela 12.2. Weryfikacja tezy rozprawy na podstawie kryteriów przyjętych w rozdziale 1

Kryterium weryfikacji	Dowód w rozprawie	Miejsce	Wynik weryfikacji
zbudowanie i zastosowanie konfigurowalnego układu pomiarowego zapewniającego wielkości wejściowe do $F_c(t)$.	opracowano modułową architekturę i zrealizowano rdzeń pomiarowy z czterema torami siły i czterema torami przyspieszenia; układ zastosowano na rzeczywistych odbierakach i w badaniach podczas jazdy.	rozdz. 4, 6, 8, 10	potwierdzono przez realizację układu i jego zastosowanie w badaniach
ocena właściwości dynamicznych kompletnej oprzyrządowanej konfiguracji.	wyznaczono $ H(f_i) $ i J w paśmie badania; $J = 97,57\%$ centralnie i $94,36\%$ przy przesunięciu ok. 250 mm, nominalnie powyżej 90 %.	rozdz. 5.2, 7.2, 10.2	potwierdzono w badaniu laboratoryjnym kompletnej konfiguracji
eksperymentalne określenie oddziaływań aerodynamicznych i właściwe uwzględnienie ich w wyniku.	wyznaczono $\delta_{sys,aero}(v)$, którego maksimum wyniosło 4,2%, oraz $F_{corr,aero}(v)$ z równoczesnych pomiarów $F_s(v)$ i torów FBG; wykazano zależność korekcji od konfiguracji i kierunku.	rozdz. 5.3, 6.3, 7.3–7.4, 10.3	potwierdzono eksperymentalnie w badaniach aerodynamicznych
rekonstrukcja $F_c(t)$, wyznaczenie parametrów wynikowych i odniesienie do właściwych kryteriów.	przeanalizowano 6 serii dla 3 kV DC i 25 kV AC; wyznaczono F_m , σ i wielkości pochodne, a ocenę względem granic przeprowadzono z zastosowaniem przyjętej reguły prostej akceptacji.	rozdz. 5, 6, 10.4–10.6	potwierdzono w badaniach terenowych i ocenie wyników
ilościowa ocena niepewności najważniejszych wielkości wynikowych.	opracowano budżety m.in. dla J , wielkości aerodynamicznych i $F_c(t)$; dla reprezentatywnej konfiguracji 160T-3kVDC uzyskano $U(F_c) = 5,692\text{ N}$, $k = 2$.	rozdz. 7, 10.6	potwierdzono przez ilościową ocenę niepewności
zastosowanie kompletnego procesu w badaniach oraz udokumentowanie wdrożenia.	metodykę wykorzystano w kampaniach badań pojazdów; zastosowanie udokumentowano raportami i sprawozdaniami, a procedurę sformalizowano w instrukcji IP-BLT-70 w systemie zarządzania laboratorium.	rozdz. 10, 11 i 12.5 oraz dokumentacja wdrożeniowa	potwierdzono dokumentacją rzeczywistych zastosowań i formalizacji procedury

Pierwsze kryterium zostało zweryfikowane poprzez przejście od koncepcji modułowej do działającego układu pomiarowego, który zastosowano na rzeczywistych obiektach. Jest to istotne, ponieważ teza nie dotyczy wyłącznie możliwości teoretycznego zapisania modelu $F_c(t)$, lecz możliwości pozyskania jego wejść w warunkach właściwych dla badań pojazdów. Rozwiązania konstrukcyjne, tory pomiarowe, akwizycja, synchronizacja i procedury przygotowania tworzą w tym ujęciu jeden system funkcjonalny.

Drugie i trzecie kryterium odnoszą się do wpływu konfiguracji na wynik. Laboratoryjne wyznaczenie odpowiedzi dynamicznej oraz badania aerodynamiczne wykazały, że wielkości istotne dla wiarygodności pomiaru nie powinny być traktowane jako stałe właściwości samego typu czujnika lub odbieraka. Wskaźnik J kwalifikuje kompletną konfigurację, a $F_{corr,aero}(v)$ wymaga wyznaczenia dla właściwego układu i warunków. Wyniki te bezpośrednio wspierają przyjęte w tezie założenie o konieczności uwzględnienia właściwości dynamicznych i aerodynamicznych konkretnej konfiguracji.

Czwarte i piąte kryterium potwierdzono przez wyznaczenie $F_c(t)$ w rzeczywistych przejazdach oraz przez przypisanie wynikowi ilościowej informacji o niepewności. Sześć analizowanych serii pokazało możliwość stosowania wspólnej struktury procesu dla dwóch systemów zasilania i różnych odbieraków, przy zachowaniu informacji o prędkości, kierunku oraz konfiguracji. Budżet $U(F_c)$ nie został przedstawiony jako wartość uniwersalna, lecz powiązано go z reprezentatywnym rzeczywistym punktem kampanii 3 kV DC. Takie jednoznaczne powiązanie danych eksperymentalnych z oceną metrologiczną jest szczególnie istotne dla wiarygodności końcowego wyniku.

Szóste kryterium ma charakter wdrożeniowy. Dokumentacja przedstawiona w podrozdziale 12.5 potwierdza, że rozwiązanie nie pozostało na etapie demonstratora lub jednorazowej próby. Było wykorzystywane w kolejnych badaniach pojazdów, a opracowana procedura została sformalizowana w dokumentacji systemu zarządzania laboratorium. Wdrożenie stanowi zatem niezależne potwierdzenie praktycznej wykonalności procesu opisanego w rozprawie.

Łączna ocena sześciu kryteriów pozwala uznać tezę rozprawy za pozytywnie zweryfikowaną w granicach określonych zakresem przeprowadzonych badań. Podstawą tego wniosku nie jest pojedynczy rezultat ani samo spełnienie wymagań normy, lecz zgodność rezultatów projektowych, pomiarowych, metrologicznych, eksperymentalnych i wdrożeniowych. Jednocześnie weryfikacja tezy nie oznacza, że wartości parametrów uzyskane dla badanych konfiguracji są uniwersalne; potwierdza, że opracowana metodyka umożliwia ich wiarygodne wyznaczenie po właściwym przygotowaniu i kwalifikacji konkretnego układu.

12.5 Wdrożenie metodyki do praktyki badawczej

Wdrożeniowy charakter rozprawy wymaga rozróżnienia pomiędzy potencjalną możliwością zastosowania rozwiązania a jego rzeczywistym wykorzystaniem. Wdrożenie rozpatrywano jako przejście od opracowanej koncepcji i aparatury do powtarzalnego stosowania procesu w badaniach pojazdów, udokumentowanego zapisami technicznymi, oraz do formalizacji procedury w systemie zarządzania laboratorium. Tak rozumiane wdrożenie obejmuje rozwiązania sprzętowe, pomiarowe, analityczne i proceduralne, lecz nie jest utożsamiane z samym faktem posiadania aparatury.

Dokumentacja wdrożeniowa obejmuje raporty i sprawozdania z badań współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną dla kolejnych pojazdów oraz instrukcję badawczą IP-BLT-70. Dokumenty pochodzą z różnych okresów i dotyczą różnych obiektów, co pozwala wykazać powtarzalność praktycznego zastosowania rozwiązania, a nie jedynie jego jednorazową demonstrację. Zestawienie dokumentów przedstawiono w tabeli 12.3.

Tabela 12.3. Dokumenty potwierdzające praktyczne zastosowanie i formalizację opracowanego procesu badawczego

Dokument	Obiekt / przedmiot badań	Zakres czasowy / data	Znaczenie dla wdrożenia
RP-2121, wyd. 01	elektryczny zespół trakcyjny typu 48WEc – badania współpracy odbieraka z siecią trakcyjną.	badania 26.10–06.12.2023; raport 30.12.2023	udokumentowane zastosowanie opracowanego procesu w badaniu pojazdu szynowego.
RP-2396, wyd. 01	dwuczłonowy spalinowo-elektryczny zespół trakcyjny typu 227M – badania współpracy odbieraka z siecią trakcyjną.	badania 23.02–20.12.2023; raport 28.02.2024	udokumentowane zastosowanie opracowanego procesu w projekcie badawczym dla pojazdu typu 227M.
DBL-2024-3272-05-BLT, wyd. 01	lokomotywa dwunapędowa typu 111DE – badania współpracy odbieraka z siecią trakcyjną.	badania 10–21.10.2024 oraz 06–08.02.2025; wydanie 31.03.2025	kolejne udokumentowane zastosowanie procesu dla odmiennego typu pojazdu i konfiguracji badawczej.
DBL-2025-3207-06-BLT, wyd. 01	elektryczny zespół trakcyjny typu 655-5 – badania współpracy odbieraka z siecią trakcyjną.	badania 31.07.2025 oraz 16–20.09.2025; wydanie 24.10.2025	udokumentowane zastosowanie procesu w kampanii obejmującej m.in. tor Faurei i linię nr 800 w Rumunii; kampania jest bezpośrednio powiązana z wynikami 25 kV AC analizowanymi w rozdziale 10.
DBL-2026-0014-06-BLT, wyd. 01	lokomotywa EuroDual E9000 East Corridor – badania współpracy odbieraka z siecią trakcyjną.	badania 28.11.2025, 06.02.2026, 11–12.02.2026 i 16-17.02.2026; wydanie 10.03.2026	potwierdzenie dalszego stosowania procesu w kolejnej kampanii i dla kolejnego obiektu.
IP-BLT-70, rew. 1	instrukcja badań statycznych odbieraka oraz dynamicznej współpracy pantografu z siecią jezdnią górną.	data wydania i stosowania 07.01.2025	Formalizacja procedury badawczej w systemie zarządzania Łukasiewicz–PIT posiadającego akredytację AB 053.

Raporty RP-2121 i RP-2396 dokumentują badania zrealizowane w 2023 r. odpowiednio dla elektrycznego zespołu trakcyjnego typu 48WEc oraz pojazdu typu 227M. Kolejne sprawozdania dotyczą lokomotywy 111DE, zespołu trakcyjnego 655-5 oraz lokomotywy EuroDual E9000 East Corridor. Zestawienie obiektów potwierdza, że opracowany proces był stosowany w różnych projektach i nie pozostał rozwiązaniem przypisanym do jednego pojazdu lub jednej kampanii.

Szczególne znaczenie ma dokument DBL-2025-3207-06-BLT dotyczący pojazdu 655-5. Obejmuje on badania realizowane m.in. na torze testowym w Faurei oraz na linii nr 800 w Rumunii, a więc środowisko, z którym bezpośrednio powiązano serie 25 kV AC przedstawione w rozdziale 10. Pozwala to połączyć eksperymentalną weryfikację metodyki przedstawioną w rozprawie z dokumentacją rzeczywistej działalności badawczej. Nie wszystkie raporty wymienione w tabeli 12.3 stanowią źródło danych szczegółowo analizowanych w rozdziale 10; ich funkcją jest udokumentowanie kolejnych praktycznych zastosowań rozwiązania.

Drugim poziomem wdrożenia jest formalizacja proceduralna. Elementem formalizacji opracowanego procesu było wprowadzenie Instrukcji Badań odbieraka IP-BLT-70 do systemu zarządzania laboratorium Sieci Badawczej Łukasiewicz – Poznańskiego Instytutu Technologicznego, posiadającego akredytację PCA nr AB 053. Instrukcja dotyczy badań statycznych odbieraka oraz badań dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią jezdnią i została wydana do stosowania 7 stycznia 2025 r. Oznacza to przejście od procedur stosowanych w ramach poszczególnych projektów do rozwiązania sformalizowanego w dokumentacji organizacyjnej laboratorium.

Włączenie instrukcji do systemu zarządzania potwierdza formalizację opracowanej procedury. Nie jest ono jednak równoznaczne z objęciem całej metodyki zakresem akredytacji, który wynika z odrębnie określonego zakresu działalności akredytowanej. Rozróżnienie to pozwala precyzyjnie określić rzeczywisty zakres wdrożenia opracowanego rozwiązania.

Praktycznym rezultatem wdrożenia jest możliwość prowadzenia kolejnych kampanii badawczych według uporządkowanego ciągu działań obejmującego identyfikację i przygotowanie obiektu, konfigurację aparatury, potwierdzenie właściwości metrologicznych odpowiednich torów pomiarowych, ocenę kompletnej konfiguracji, realizację pomiarów, zabezpieczenie danych, ich przetwarzanie oraz dokumentowanie

wyników. Modułowa struktura metodyki umożliwi dostosowanie wyposażenia do badanego odbieraka i zakresu badań przy zachowaniu spójnej logiki procesu.

Na podstawie przedstawionej dokumentacji wdrożenie można określić jako praktyczne i proceduralne. Obejmuje ono zarówno zastosowanie opracowanego procesu w badaniach, jak i jego formalizację w dokumentacji systemu zarządzania. Jest to zgodne z celem rozprawy, zakładającym nie tylko opracowanie i eksperymentalną weryfikację metodyki, lecz także jej wykorzystanie w badaniach prowadzonych na potrzeby certyfikacji i oceny zgodności.

12.6 Ograniczenia i kierunki dalszego rozwoju

Pozytywna weryfikacja tezy oraz udokumentowane wdrożenie metodyki odnoszą się do zakresu badań przeprowadzonych w ramach rozprawy. Określenie granic uogólnienia uzyskanych wyników pozwala właściwie interpretować ich znaczenie oraz wskazać kierunki dalszego rozwoju metodyki. Zakres ten wyznaczają przede wszystkim liczba przebadanych konfiguracji, zakres prędkości, zależność części parametrów od badanego obiektu oraz zakres przeprowadzonej ilościowej oceny niepewności.

Eksperymentalna weryfikacja dynamiczna objęła konfiguracje pracujące w systemach 3 kV DC i 25 kV AC oraz w zakresie prędkości od 80 do 160 km/h. Przyjęta architektura układu pomiarowego i struktura procedury umożliwiają dostosowanie metodyki do innych warunków prowadzenia badań, w tym również do systemu 15 kV AC, przy czym każda nowa konfiguracja wymaga odpowiedniego przygotowania i odrębnej oceny. Naturalnym kierunkiem dalszych badań jest rozszerzenie weryfikacji na kolejne typy odbieraków, odmienne rozwiązania mechanicznego mocowania czujników, szersze zakresy prędkości, w tym charakterystyczne dla kolei dużych prędkości, oraz kampanie prowadzone w innych systemach zasilania.

Drugim ograniczeniem zakresu uogólnienia jest zależność wartości J , $F_{corr,aero}(v)$ oraz $U(F_c)$ od danej konfiguracji badawczej i warunków realizacji pomiarów. Zależność ta wynika z właściwości badanego układu oraz przyjętego procesu pomiarowego i nie powinna być zastępowana poszukiwaniem jednej wartości uniwersalnej. Kierunkiem dalszego rozwoju metodyki może być opracowanie efektywnego sposobu ponownej oceny konfiguracji po wprowadzeniu zmian oraz utworzenie uporządkowanej bazy charakterystyk wraz z jednoznaczną identyfikacją warunków ich wyznaczenia. Taka baza mogłaby w przyszłości wspierać określanie zakresu badań wymaganych po zmianach

konstrukcyjnych lub pomiarowych oraz ocenę, w jakich przypadkach konieczne jest pełne powtórzenie procedury, a w jakich wystarczające może być przeprowadzenie wybranych działań potwierdzających.

W obszarze analizy niepewności możliwe jest dalsze uszczegółowienie modelu zależności pomiędzy wielkościami wejściowymi. W szczególności zasadne może być ilościowe rozpoznanie kowariancji pomiędzy składnikami mającymi wspólne źródła wpływu oraz porównanie wyników klasycznej propagacji niepewności z wynikami analizy numerycznej, np. metodą Monte Carlo. Rozszerzenie takie byłoby szczególnie wartościowe w przypadkach, w których wynik znajduje się w pobliżu granicy przyjętej w regule decyzji, a sposób odwzorowania zależności pomiędzy wielkościami wejściowymi może wpływać na końcową ocenę zgodności.

Analizy MES wykorzystane w projektowaniu elementów mocujących stanowiły narzędzie wspomagające ocenę konstrukcyjną projektowanych rozwiązań. Zastosowane modele liniowo-sprężyste umożliwiły lokalizację obszarów zwiększonych naprężeń, ocenę sztywności oraz porównanie wariantów geometrii. Nie zastępowały jednak oceny wykonanych elementów w rzeczywistym układzie. Dalszy rozwój analiz może obejmować bardziej szczegółowe odwzorowanie lokalnych połączeń oraz porównanie wyników obliczeń z pomiarami odkształceń lub przemieszczeń, jeżeli w przypadku nowych konstrukcji będzie to uzasadnione poziomem obciążeń i geometrią elementów.

W przypadku badań uzupełniających jednym z kierunków dalszego rozwoju jest zwiększenie stopnia synchronizacji danych pochodzących z różnych domen pomiarowych, w szczególności powiązanie zdarzeń obserwowanych w obrazie strefy styku z przebiegami wielkości mechanicznych i elektrycznych. Automatyczna detekcja utraty kontaktu oraz zjawisk łukowych może wspierać identyfikację krótkotrwałych zdarzeń i ich korelację z pozostałymi sygnałami pomiarowymi. Rozwój takich metod wymaga jednak zgromadzenia odpowiednio licznego zbioru wiarygodnie zidentyfikowanych i oznaczonych danych referencyjnych.

Metody uczenia maszynowego mogą w dalszej perspektywie wspomagać klasyfikację zdarzeń oraz analizę dużych zbiorów sygnałów, nie powinny jednak zastępować fizycznych i metrologicznych podstaw opracowanej metodyki. Każdy nowy moduł lub algorytm powinien mieć jednoznacznie określoną funkcję oraz miejsce w procesie pomiarowym i ocenie wyników, tak aby zachować rozdzielenie pomiędzy

wielkościami wejściowymi do modelu $F_c(t)$, kryteriami oceny zgodności oraz wynikami badań uzupełniających.

Przeprowadzona dyskusja potwierdza, że opracowana metodyka została zweryfikowana eksperymentalnie w zakresie objętym rozprawą, a możliwość jej praktycznego stosowania znajduje potwierdzenie w realizacji badań oraz formalizacji procedury. Jednocześnie określenie granic uogólnienia wyników pozwala zachować ich właściwą interpretację i nie przypisywać im zakresu stosowalności wykraczającego poza przeprowadzoną weryfikację. Stanowi to podstawę do syntetycznego podsumowania pracy i sformułowania wniosków końcowych w rozdziale 13.

13 Podsumowanie i wnioski końcowe

13.1 Podsumowanie pracy

Celem rozprawy było opracowanie, eksperymentalna weryfikacja i wdrożenie konfigurowalnej metodyki pomiarowo-analitycznej badań dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną. Realizacja tego celu wymagała powiązania analizy wymagań normatywnych, przygotowania i kwalifikacji układu pomiarowego, oceny kompletnej oprzyrządowanej konfiguracji, wyznaczania wielkości zależnych od tej konfiguracji oraz oceny niepewności w ramach metodyki umożliwiającej wiarygodne wyznaczanie chwilowej siły stykowej $F_c(t)$ i wykorzystanie wyników do oceny zdolności eksploatacyjnej systemu odbioru prądu.

Głównym osiągnięciem naukowym rozprawy jest opracowanie i eksperymentalna weryfikacja autorskiej, konfigurowalnej metodyki pomiarowo-analitycznej, w której wyznaczanie chwilowej siły stykowej $F_c(t)$ powiązано z właściwościami kompletnego oprzyrządowanego odbieraka, uwzględnieniem korekcji siły aerodynamicznej i ilościową oceną niepewności wyniku. Oryginalny wkład autora obejmuje opracowanie modułowej architektury i sposobu integracji układu pomiarowego, projektową weryfikację jego elementów, sposób realizacji badań i modele niepewności oraz eksperymentalne sprawdzenie opracowanego procesu w warunkach laboratoryjnych i terenowych.

Na podstawie analizy stanu wiedzy i dokumentów odniesienia opracowano strukturę metodyki, w której jednoznacznie rozdzielono wielkości mierzone, wielkości wyznaczane oraz kryteria oceny. Rdzeń procesu stanowi wyznaczanie chwilowej siły stykowej $F_c(t)$ zgodnie z postacią równania wynikającą z PN-EN 50317 [18], [19], z wykorzystaniem sumy wskazań torów pomiaru siły, członu bezwładnościowego wyznaczanego na podstawie pomiarów przyspieszeń i masy m_{above} oraz korekcji siły aerodynamicznej $F_{corr,aero}(v)$. Opracowano sposób wyznaczania siły stykowej na podstawie tego równania, obejmujący zsynchronizowane pozyskiwanie i przetwarzanie sygnałów pomiarowych, wyznaczanie członu bezwładnościowego oraz uwzględnianie korekcji aerodynamicznej właściwej dla badanej konfiguracji.

Do realizacji metodyki opracowano autorski, modułowy układ pomiarowy obejmujący cztery tory pomiaru siły i cztery tory pomiaru przyspieszenia, wyposażone w czujniki światłowodowe FBG i wykorzystujące wspólną podstawę czasu. Opracowano również rozwiązania konstrukcyjne umożliwiające integrację czujników z różnymi

konstrukcjami odbieraków prądu. Elementy mechaniczne projektowano iteracyjnie z wykorzystaniem analiz MES. Przed wykonaniem modułów porównano warianty konstrukcyjne pod względem rozkładów naprężeń, przemieszczeń i sztywności, a wyniki analiz wykorzystano do doboru geometrii elementów mocujących. Właściwości kompletnej oprzyrządowanej konfiguracji oceniano następnie eksperymentalnie.

Przygotowanie i ocena konfiguracji obejmowały badania statyczne, wzorcowanie torów pomiarowych, kontrolę funkcjonalną po montażu oraz laboratoryjne badanie właściwości dynamicznych kompletnej oprzyrządowanej odbieraka. Wyznaczono wartość bezwzględną funkcji przenoszenia, a wartości wskaźnika J wyniosły 97,57% dla wymuszenia centralnego oraz 94,36% dla wymuszenia przesuniętego o około 250 mm. Obie wartości nominalne przekroczyły wymagany poziom 90% przy zastosowaniu reguły prostej akceptacji. Zróżnicowanie uzyskanych wyników potwierdziło znaczenie położenia wymuszenia podczas laboratoryjnej oceny odpowiedzi dynamicznej kompletnej oprzyrządowanej odbieraka.

Oddziaływania aerodynamiczne rozpatrywano w dwóch odrębnych aspektach. Oceniono wpływ zabudowy układu pomiarowego na całkowitą średnią siłę unoszącą, uzyskując maksymalną względną zmianę $\delta_{sys,aero}(v) = 4,2\%$ w analizowanym zakresie prędkości, poniżej wymaganej wartości 5%. Niezależnie wyznaczano korekcję $F_{corr,aero}(v)$ na podstawie równoczesnej rejestracji sił w linkach uwiązujących oraz wskazań torów FBG podczas tego samego pomiaru aerodynamicznego. Wyznaczone charakterystyki korekcji wykazały zależność od prędkości, kierunku jazdy oraz konfiguracji, co uzasadnia potrzebę ich wyznaczania dla konfiguracji i warunków odpowiadających danemu badaniu. W serii 25 kV AC korekcja w jednym z kierunków zmieniła znak wraz ze wzrostem prędkości, a przy 160 km/h różnica pomiędzy kierunkami wyniosła 17,73 N.

Eksperymentalną weryfikację przeprowadzono w sześciu seriach badań dynamicznych wykonanych w systemach 3 kV DC i 25 kV AC, w dwóch kierunkach jazdy oraz dla prędkości od 80 do 160 km/h. Na podstawie zarejestrowanych sygnałów wyznaczono przebiegi $F_c(t)$, średnią siłę stykową F_m , odchylenie standardowe σ oraz wielkości pochodne wykorzystywane w ocenie. We wszystkich analizowanych seriach nominalne wartości średniej siły stykowej F_m mieściły się w odpowiednich przedziałach granicznych, a wartości odchylenia standardowego σ pozostawały poniżej poziomu $0,3F_m$. Ocenę wyników względem przyjętych kryteriów przeprowadzono

z zastosowaniem reguły prostej akceptacji. Zastosowanie wspólnej struktury procesu dla różnych konfiguracji potwierdziło możliwość jego praktycznej realizacji, przy czym uzyskane wartości liczbowe pozostają właściwe dla określonego obiektu, konfiguracji i warunków badania.

Integralną częścią opracowanej metodyki jest ilościowa ocena niepewności. Opracowano modele i budżety niepewności dla kluczowych wielkości wynikowych, wykorzystując dane ze wzorcowania torów pomiarowych, wyniki eksperymentalne oraz zidentyfikowane wielkości wpływające. Dla reprezentatywnej konfiguracji 160T-3kVDC uzyskano złożoną niepewność standardową $u_c(F_c) = 2,846$ N oraz niepewność rozszerzoną $U(F_c) = 5,692$ N dla $k = 2$. Opracowane modele i sposób budowy budżetów stanowią podstawę ilościowej oceny niepewności w kolejnych zastosowaniach metodyki, po uwzględnieniu właściwego modelu pomiaru, parametrów danej konfiguracji oraz warunków badań.

Opracowaną metodykę rozszerzono o moduły badań wizyjnych, elektrycznych i elektromagnetycznych. Przeprowadzono analizę obrazu współpracy odbieraka z siecią trakcyjną, badania rezystancji, impedancji i reaktancji zestawów kołowych, pomiary emisji zaburzeń promieniowanych i prądów zakłócających oraz pomiary pola magnetycznego w pojeździe i jego otoczeniu. Badania te pozwoliły rozszerzyć zakres oceny o dodatkowe aspekty funkcjonowania pojazdów szynowych. W badaniach prądów zakłócających porównano między innymi widma zarejestrowane podczas normalnej pracy układu napędowego oraz w symulowanym stanie awaryjnym. Zastosowanie opracowanych modułów potwierdziło możliwość dostosowania zakresu badań do badanego pojazdu i celu oceny, z zachowaniem właściwych dla poszczególnych badań procedur pomiarowych i kryteriów oceny.

Opracowaną metodykę wdrożono do praktyki badawczej, stosując ją w kolejnych kampaniach obejmujących pojazdy 48WEc, 227M, 111DE, 655-5 oraz EuroDual E9000 East Corridor. Zastosowania te udokumentowano w raportach i sprawozdaniach z badań. Metodykę ujęto również w Instrukcji Badań odbieraka IP-BLT-70, wprowadzonej do systemu zarządzania laboratorium Sieci Badawczej Łukasiewicz - Poznańskiego Instytutu Technologicznego. Szczegółowy opis wdrożenia wraz z dokumentacją jego zastosowania przedstawiono w podrozdziale 12.5.

Przeprowadzone prace pozwoliły ponadto określić zasady adaptacji metodyki do kolejnych konfiguracji pomiarowych. Obejmują one kwalifikację kompletnego układu,

wyznaczenie właściwych dla danej konfiguracji wartości wskaźnika J i charakterystyki korekcji aerodynamicznej $F_{corr,aero}(v)$ oraz ocenę niepewności pomiaru. Opracowana metodyka łączy w ten sposób możliwość dostosowania układu i przebiegu badań do kolejnych obiektów z oceną właściwości zastosowanej konfiguracji pomiarowej.

13.2 Wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonych analiz, prac projektowych, badań laboratoryjnych i terenowych oraz oceny metrologicznej sformułowano następujące wnioski końcowe:

1) Opracowana metodyka uwzględnia wpływ właściwości kompletnej konfiguracji pomiarowej na wiarygodność wyznaczania chwilowej siły stykowej $F_c(t)$. Ocena wiarygodności wyniku wymaga uwzględnienia właściwości badanego pojazdu i odbieraka prądu, sposobu zabudowy czujników, elementów mocujących i aparatury oraz warunków realizacji pomiaru. Z tego względu wzorcowanie torów pomiarowych, kontrola funkcjonalna oraz eksperymentalna ocena odpowiedzi dynamicznej kompletnego oprzyrządowanego odbieraka pełnią odrębne i wzajemnie uzupełniające się funkcje.

2) Odpowiedź dynamiczna kompletnego oprzyrządowanego odbieraka jest zależna od konfiguracji i warunków realizacji badania. Wyznaczone wartości wskaźnika J wyniosły 97,57% i 94,36% dla dwóch położzeń wymuszenia. Obie wartości nominalne przekroczyły wymagany poziom 90%, a ocenę przeprowadzono z zastosowaniem reguły prostej akceptacji. Różnica uzyskanych wartości wskazuje na znaczenie położenia wymuszenia przy wyznaczaniu wskaźnika J dla oprzyrządowanego odbieraka.

3) Wpływ zabudowy aparatury pomiarowej na średnią siłę unoszącą oraz korekcja aerodynamiczna $F_{corr,aero}(v)$ stanowią dwa odrębne elementy procesu badawczego. Maksymalna względna zmiana siły unoszącej spowodowana zabudową aparatury wyniosła 4,2%, przy dopuszczalnym poziomie 5%. W analizowanej serii 25 kV AC korekcja aerodynamiczna zmieniała się wraz z prędkością i kierunkiem jazdy, a różnica pomiędzy kierunkami przy 160 km/h wyniosła 17,73 N. Wyniki uzasadniają wyznaczanie korekcji właściwej dla badanej konfiguracji i warunków przejazdu.

4) Opracowany sposób wyznaczania siły stykowej $F_c(t)$, oparty na równaniu określonym w PN-EN 50317 [18], [19] i uwzględniający $F_z(t)$, $F_a(t)$ oraz $F_{corr,aero}(v)$, został zrealizowany w konfigurowalnym układzie pomiarowym. Synchronizacja sygnałów z czterech torów pomiaru siły i czterech torów pomiaru przyspieszenia,

wyznaczenie członu bezwładnościowego oraz uwzględnienie eksperymentalnie określonej korekcji aerodynamicznej umożliwiły uzyskanie przebiegów $F_c(t)$ i parametrów wykorzystywanych w ocenie współpracy dynamicznej.

5) Ilościowa ocena niepewności stanowi integralny element opracowanej metodyki i jest powiązana z przyjętym modelem wyznaczania siły stykowej $F_c(t)$. W budżetach niepewności uwzględniono właściwości torów pomiarowych, parametry modelu oraz wpływ konfiguracji układu i warunków badania. Dla reprezentatywnej konfiguracji 160T-3kVDC uzyskano niepewność rozszerzoną $U(F_c) = 5,692$ N przy $k = 2$. Opracowany sposób oceny niepewności może być stosowany w kolejnych badaniach z uwzględnieniem parametrów danej konfiguracji i właściwych dla niej źródeł niepewności.

6) Opracowane i zweryfikowane eksperymentalnie moduły badań uzupełniających rozszerzyły zakres oceny pojazdów o analizę obrazu strefy styku, parametry elektryczne zestawów kołowych, emisję zaburzeń promieniowanych, prądy zakłócające i pole magnetyczne. Przyjęta struktura metodyki umożliwia dobór zakresu badań do badanego pojazdu i celu oceny, przy zachowaniu właściwych dla poszczególnych badań modeli pomiaru i kryteriów interpretacji wyników.

7) Wykazano możliwość zastosowania opracowanej metodyki do innych konfiguracji pomiarowych, przy zachowaniu jej struktury i zasad postępowania badawczego. Opracowano zasady adaptacji metodyki do kolejnych obiektów, obejmujące przygotowanie i kwalifikację konfiguracji pomiarowej, wyznaczenie właściwych dla niej parametrów dynamicznych i charakterystyki korekcji aerodynamicznej oraz ocenę niepewności. Wielkości zależne od konfiguracji wymagają przy jej zmianie ponownego wyznaczenia lub oceny. Zastosowanie metodyki w kolejnych kampaniach badawczych oraz jej formalizacja w Instrukcji Badań odbieraka IP-BLT-70 potwierdzają jej wdrożenie do badań prowadzonych na potrzeby certyfikacji i oceny zgodności.

Przeprowadzone badania i analizy pozwalają stwierdzić, że główny cel rozprawy został osiągnięty. Opracowano konfigurowalną metodykę pomiarowo-analityczną badań dynamicznej współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną, określono warunki jej wiarygodnej realizacji, zweryfikowano ją eksperymentalnie w badaniach laboratoryjnych i terenowych oraz wykorzystano uzyskane wyniki do oceny zdolności eksploatacyjnej systemu odbioru prądu w analizowanych warunkach.

Teza rozprawy została pozytywnie zweryfikowana zgodnie z przyjętymi kryteriami i w zakresie przeprowadzonych badań. Podstawą tego wniosku jest łączne potwierdzenie możliwości wyznaczania $F_c(t)$ na rzeczywistym obiekcie, oceny odpowiedzi dynamicznej kompletnej oprzyrządowanej konfiguracji, uwzględnienia oddziaływań bezwładnościowych i aerodynamicznych, ilościowej oceny niepewności, wykorzystania wyników do oceny zdolności eksploatacyjnej oraz praktycznego zastosowania opracowanego procesu badawczego.

Oryginalnym wkładem naukowym rozprawy jest opracowanie i eksperymentalna weryfikacja autorskiej metodyki integrującej konfigurowalny układ pomiarowy, ocenę właściwości dynamicznych kompletnego oprzyrządowanego odbieraka, eksperymentalne wyznaczanie korekcji aerodynamicznej, pomiar siły stykowej oraz ilościową ocenę niepewności w spójny proces pomiarowo-analityczny. Zastosowanie metodyki w badaniach pojazdów szynowych i jej formalizacja w Instrukcji Badań odbieraka IP-BLT-70 potwierdzają osiągnięcie celu wdrożeniowego rozprawy.

LITERATURA

- [1] A. Wilk, K. Karwowski, S. Judek, M. Mizan, *Modelowanie i symulacja dynamiki ruchu trakcyjnego odbieraka prądu*, „Przegląd Elektrotechniczny”, 2016, R. 92, nr 10, s. 243–248, doi: 10.15199/48.2016.10.55.
- [2] S. Judek, K. Karwowski, M. Mizan, A. Wilk, *Modelowanie współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną*, „Przegląd Elektrotechniczny”, 2015, R. 91, nr 11, s. 248–253, doi: 10.15199/48.2015.11.58.
- [3] P. Zdziebko, T. Uhl, *Finite element analysis of pantograph-catenary dynamic interaction*, „Archives of Transport”, 2016, t. 39, nr 3, s. 77–85, doi: 10.5604/08669546.1225451.
- [4] M. Kaniewski, M. Cichoński, *Mathematical model of pantograph cooperation with two degrees of freedom with a catenary system*, „MATEC Web of Conferences” 2019, t. 294, art. 05005.
- [5] V. Kuznetsov, *Modelowanie współpracy dynamicznej sieci jezdnej i odbieraków prądu na bazie metody elementów skończonych*, „Prace Instytutu Kolejnictwa” 2021, z. 168, s. 9–18.
- [6] Z. Liu, H. Wang, H. Yang, and Y. Song, *A systematic literature review on active control technology of pantograph-catenary system in high-speed railway*, „High-Speed Railway” 2026, t. 4, nr 2, s. 109–123, doi: 10.1016/j.hspr.2025.11.004.
- [7] S. Bruni, G. Bucca, A. Facchinetti, S. Gregori, J. Pombo, *Recent developments on pantograph-overhead line interaction*, „Vehicle System Dynamics” 2025, t. 63, nr 7, s. 1358–1394, doi: 10.1080/00423114.2025.2484453.
- [8] Z. Liu, Y. Song, S. Gao, H. Wang, *Review of Perspectives on Pantograph-Catenary Interaction Research for High-Speed Railways Operating at 400 km/h and Above*, „IEEE Transactions on Transportation Electrification” 2024, t. 10, nr 3, s. 7236–7257, doi: 10.1109/TTE.2023.3346379.
- [9] M. Tur, S. Gregori, A. Correcher, J. Gil, A. Pedrosa, F.J. Fuenmayor, *Hardware-in-the-Loop pantograph tests with general overhead contact line geometry*, „Mechatronics” 2024, t. 102, art. 103231, doi: 10.1016/j.mechatronics.2024.103231.
- [10] M. Sitarz, A. Hełka, A. Mańka, A. Adamiec, *Badania dopuszczeniowe i eksploatacyjne odbieraków prądu*, „Przegląd Komunikacyjny” 2012, R. 67, nr 7/8, s. 58–62.
- [11] A. Konieczka, D. Stachowiak, A. Garczarek, W. Dominiak, *System wizyjny do analizy położenia sieci trakcyjnej względem odbieraka prądu*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2024, R. 100, nr 7, s. 169–173.
- [12] Y. Yan, H. Liu, L. Gan, R. Zhu, *A novel arc detection and identification method in pantograph-catenary system based on deep learning*, „Scientific Reports” 2025, t. 15, nr 1, art. 3511, doi: 10.1038/s41598-025-88109-x.
- [13] K. Huang, D. Su, *Extended Pantograph-Catenary Arc Modeling and an Analysis of the Vehicular-Grounding Electromagnetic Transients of Electric Multiple Units*, „Energies”, 2024, R. 17, nr 7, doi:10.3390/en17071512.
- [14] S. Judek, K. Karwowski, M. Mizan, *Diagnostyka i monitoring odbioru prądu z sieci trakcyjnej*, „Pojazdy Szynowe” 2011, nr 3, s. 76–85, doi: 10.53502/RAIL-139554.
- [15] K. Karwowski, *Diagnostyka sieci trakcyjnej i monitoring odbieraków prądu*, [w:] *Prace Naukowe. Monografia II Kongresu Elektryki Polskiej*, t. II, red. A. Szelaąg, Warszawa 2016, s. 191–202.

- [16] Q. Luo, S. Bruni, G. Bucca, G. Mei, G. Chen, W. Zhang, *Wear performance of pantograph–overhead catenary system: a review*, „Railway Engineering Science” 2026, s. 1–20, doi: 10.1007/s40534-026-00429-4.
- [17] X. Qin, Y. Cheng, Y. Yao, H. Duan, G. Jing, J. Wang, *Machine learning in railway catenary inspection: A review of data processing techniques*, „High-Speed Railw” 2026, doi: 10.1016/j.hspr.2025.12.002.
- [18] PN-EN 50317:2012 Zastosowania kolejowe – Systemy odbioru prądu – Wymagania dotyczące walidacji wyników pomiarów oddziaływania dynamicznego pomiędzy pantografem a siecią jezdnią górną.
- [19] PN-EN 50317:2012/A1:2023-05 Zastosowania kolejowe – Systemy odbioru prądu – Wymagania dotyczące walidacji wyników pomiarów oddziaływania dynamicznego pomiędzy pantografem a siecią jezdnią górną.
- [20] PN-EN 50367:2021-06/A2:2026-02 Zastosowania kolejowe – Urządzenia stacyjne i tabor kolejowy – Kryteria w celu osiągnięcia kompatybilności technicznej między pantografami a siecią jezdnią górną.
- [21] Rozporządzenie Komisji (UE) NR 1301/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Energia” systemu kolei w Unii (Tekst mający znaczenie dla EOG) (Dz.U. L 356 z 12.12.2014, s. 179) zmienione przez Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2023/1694 z dnia 10 sierpnia 2023 r. [M3].
- [22] Rozporządzenie Komisji (UE) NR 1302/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu „Tabor – lokomotywy i tabor pasażerski” systemu kolei w Unii Europejskiej (Tekst mający znaczenie dla EOG) (Dz.U. L 356 z 12.12.2014, s. 228) zmienione przez Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2025/674 z dnia 4 kwietnia 2025 r. [M6].
- [23] K. Głowacki, E. Onderka, *Sieci trakcyjne*, Zakład Projektowo-Budowlany „Emtrak”, 2002.
- [24] G. Wu, G. Gao, W. Wei, Z. Yang, *The Electrical Contact of the Pantograph-Catenary System: Theory and Application*, Springer Singapore, 2019, doi: 10.1007/978-981-13-6589-8.
- [25] F. Kiessling, R. Puschmann, A. Schmieder, E. Schneider, *Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance*, wyd. 3, 2018.
- [26] *Instrukcja utrzymania sieci trakcyjnej Iet-2*, PKP PLK, dostęp: 22. 05. 2023, https://www.plk-sa.pl/files/public/user_upload/pdf/Akty_prawne_i_przepisy/Instrukcje/Wydruk/Iet/WCAG_Iet-2.pdf.
- [27] *Wytyczne projektowania i warunki odbioru sieci trakcyjnej z uwzględnieniem standardów i wymogów dla linii interoperacyjnych Iet-107*, PKP PLK, dostęp: 22. 12. 2024, https://www.plk-sa.pl/files/public/user_upload/pdf/Akty_prawne_i_przepisy/Instrukcje/Wydruk/Iet/Iet-107.pdf.
- [28] *Przewody do trakcji elektrycznej*, ELTRIM, dostęp: 16. 01. 2024, <https://www.eltrim.com.pl/u/przewody-do-trakcji-elektrycznej-26>
- [29] M. Głowacz, M. Kaniewski, A. Rojek, *Power Supply System Implemented on Polish High Speed Lines and Pantograph-OCL Interaction Quality Assessment Based on Tests Performed on PKP Network*, „Transportation Research Procedia” 2016, t. 14, s. 1967–1976, doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.164.

- [30] Wabtec, *Heavy Rail Pantograph PANTO300*, Wabtec Corporation, dostęp: 22. 08. 2026, <https://www.wabteccorp.com/Power-Collection-Panto300?inline>.
- [31] A. Garczarek, D. Stachowiak, *Badania statyczne odbieraków prądu w procesie produkcji oraz w trakcie eksploatacji*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2022, R. 98, nr 9, s. 62–66, doi: 10.15199/48.2022.09.12.
- [32] A. Wilk, *Novel method of estimation of inertial and dissipative parameters of a railway pantograph model*, *Vehicle System Dynamics*, 2022, t. 60, nr 7, s. 2413–2435, doi: 10.1080/00423114.2021.1901942.
- [33] M. Kuźniar, *Damage Caused by Material Defects of Carbon Composites Used on Various Types of Railway Pantographs*, „Materials” 2023, t. 16, nr 5, doi: 10.3390/ma16051839.
- [34] Stemman-Technik GmbH, *Pantographs series Fb 700 / Fb 800*, dostęp: 22. 08. 2026, https://www.stemmann.com/en/products/roof_mounted_pantographs/local_traffic/fb_700_fb.
- [35] S. Hedayati Kia, F. Bartolini, A. Mpanda-Mabwe, R. Ceschi, *Pantograph-Catenary Interaction Model Comparison*, [w:] *IECON 2010 – 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2010, s. 1584–1589, doi: 10.1109/IECON.2010.5675448.
- [36] J. Zhang, J. Yi, W. Liu, *Study of Time-Frequency Characteristics of Contact Force Signal and Parameter Sensitivity of Catenary of High-Speed Railway*, „IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement” 2022, t. 71.
- [37] *Active Control of the Pantograph-Catenary Interaction in a Finite Element Model*, Institute for Dynamic Systems and Control Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, 2013.
- [38] PN-EN 50367:2021-06 Zastosowania kolejowe – Urządzenia stacyjne i tabor kolejowy – Kryteria w celu osiągnięcia kompatybilności technicznej między pantografami a siecią jezdnią górną.
- [39] A. Garczarek, D. Stachowiak, *Badanie i analiza pól magnetycznych generowanych przez pojazdy trakcyjne w odniesieniu do narażenia ludzi*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2022, R. 98, nr 8, s. 179–184.
- [40] PN-EN 50318:2019-02/A1 Zastosowania kolejowe. Systemy odbioru prądu. Walidacja symulacji oddziaływania dynamicznego pomiędzy pantografem a siecią jezdnią górną.
- [41] PN-EN 50206-1:2010 Zastosowania kolejowe – Tabor – Pantografy: Charakterystyki i badania – Część 1: Pantografy pojazdów linii głównych.
- [42] PN-EN 50405:2016-06/A1:2016-12 Zastosowania kolejowe Systemy odbioru prądu Pantografy, metody badań nakładek stykowych.
- [43] X. Wang, Y. Song, H. Yang, J. Yao, H. Wang, Z. Liu, *Koopman Neural Operator-based surrogate modelling for high-frequency dynamics of high-speed rail pantographs*, „Mechanical Systems and Signal Processing” 2026 t. 258, art. 114780, doi: 10.1016/j.ymssp.2026.114780.
- [44] T. Xing, X. Wang, L. Pan, Y. Song, D. Zhang, Q. Yu, *Effect of Structural Parameters on Pantograph-Catenary Interaction Performance in High-Speed Railways*, „Infrastructures” 2026, t. 11, nr 3, art. 88, doi: 10.3390/infrastructures11030088.
- [45] H. Wei, N. Zhou, X. Zhi, *Contact force identification in pantograph-catenary system via elastic support beam theory and enhanced l1 sparse regularization*

- scheme, „Scientific Reports” 2026, t. 16, art. 17489, doi: 10.1038/s41598-026-46728-y.
- [46] P. Rajaganesan, R. Arcos, A. Clot, *Study on effective modelling of rigid catenary and the influence of parameters on the dynamic forces acting on the pantograph*, „Engineering Structures” 2026, t. 353, art. 122199, doi: 10.1016/j.engstruct.2026.122199.
- [47] Z. Xu, Y. Song, J. Xiong, G. Lin, *Flexible Pantograph Collector Modeling and Its Effects in High-Speed Catenary-Pantograph Interaction*, „IEEE Trans. Instrum. Meas.” 2025, t. 74, s. 1–11, doi: 10.1109/TIM.2025.3568942.
- [48] Y. Cheng, *Surrogate modeling of pantograph-catenary system interactions*, „Mech. Syst. Signal Process.” 2025, t. 224, art. 112134, doi: 10.1016/j.ymssp.2024.112134.
- [49] M. Simarro, S. Postigo, P. Reyes, R. J. Luque, P. V. Bačić, J. J. Castillo, *A study on the dynamic response of the double pantograph interaction with rigid catenary*, „Eng. Struct.” 2025 t. 334, art. 120234, doi: 10.1016/j.engstruct.2025.120234.
- [50] W. Chu, H. Wang, Y. Song, Z. Liu, *FENet: A Physics-Informed Dynamics Prediction Model of Pantograph-Catenary Systems in Electric Railway*, „IET Intell. Transp. Syst.” 2025 t. 19, nr 1, doi: 10.1049/itr2.70059.
- [51] C. Yang, *Impact of Damaged Dropper on Pantograph–Catenary Current Collection Quality in High-Speed Railways*, „Inventions”, 2026, t. 11, art. 26, doi: 10.3390/inventions11020026.
- [52] J. Gil, M. Tur, S. Gregori, A. Correcher, A. M. Pedrosa, F. J. Fuenmayor, *Hardware-in-the-loop simulations of a railway pantograph with a finite element periodic catenary model*, „Vehicle System Dynamics” 2024, t. 62, nr 3, s. 695–718, doi: 10.1080/00423114.2023.2190031.
- [53] L. Wang, Y. Liang, D. Zhang, X. Wang, T. Xing, Y. Song, *Analysis of Pantograph–Catenary Current Collection Performance Under Speed-Upgrading Operating Conditions*, „Vehicles” 2026, t. 8, art. 95, doi: 10.3390/vehicles8050095.
- [54] L. Pan, L. Chen, Y. Xu, B. Dong, X. Guo, W. Zhu, *Study on the Influence of Different Dropper Models in Pantograph–Catenary System on Dropper Load Simulation*, „Machines” 2025, t. 13 nr 9, art. 874, doi: 10.3390/machines13090874.
- [55] Z. Zhang, M. Zhang, *Multi-parameter optimizations of elastic chain catenary based on response surface methodology for high-speed railway*, „Front. Mech. Eng.”, 2025, t. 11, art. 1547120, doi: 10.3389/fmech.2025.1547120.
- [56] P. Zdziebko, A. Martowicz, T. Uhl, *Multi-domain approach to modeling pantograph-catenary interaction*, *Ekspluat. Niezawodn. – Maint. Reliab.* 2022, t. 24, nr.1, s. 130–139, doi: 10.17531/ein.2022.1.15.
- [57] P. Zdziebko, *Analiza dynamicznej interakcji sieci trakcyjnej i odbieraka prądu z wykorzystaniem symulacji hybrydowej*, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków, 2019.
- [58] P. Ramalho, P. Antunes, J. Ambrósio, P. Oliveira, *Development of a mechatronic pantograph for improved contact with railway catenaries in conventional networks*, „Veh. Syst. Dyn.” 2025, doi: 10.1080/00423114.2025.2513452.
- [59] Z. Li, C. Chen, H. Song, G. Yang, J. Yang, H. Yao, *Computational fluid dynamics-multibody system dynamics bidirectional coupling calculation and flow-induced vibration evaluation of a high-speed pantograph-catenary system*,

- „Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.” 2025, t. 19, nr 1, art. 2512954, doi: 10.1080/19942060.2025.2512954.
- [60] G. Yang, X. Shen, G. Kong, X. Wang, J. Niu, *A coupling dynamic model of rigid catenary and pantograph for subway operation in tunnel with aerodynamic forces and its application*, „Veh. Syst. Dyn.” 2025, doi: 10.1080/00423114.2025.2553037.
- [61] F. F. Jackson, *Modelling dynamic pantograph loads with combined numerical analysis*, „Railw. Eng. Sci.” 2024, t. 32, nr 1, s. 81–94, doi: 10.1007/s40534-023-00318-0.
- [62] Z. Jia, Y. Guo, G. Yang, J. Mao, *Prediction of coupling effect between pantograph and tunnel resulting from car body vibration using an aerodynamic and multi-body dynamic coupling approach*, „Veh. Syst. Dyn.” 2024, t. 62, nr 1, s. 114–128, doi: 10.1080/00423114.2023.2189125.
- [63] L. Pan, Y. Xu, Z. Liu, C. Xiao, *A Fast Simulation Model of Pantograph–Stitched-Catenary Interaction in Long-Distance Travel*, „Appl. Sci.” 2024, doi: 10.3390/app142210160.
- [64] Y. Xu, Z. D. Liu, S. Stichel, W. D. Zhu, J. L. Lei, Y. Yao, *A comparative study on the influence of typical track failures on high-speed pantograph-catenary interaction dynamics*, „Veh. Syst. Dyn.” 2024, t. 62, nr 11, s. 2883–2911, doi: 10.1080/00423114.2024.2305295.
- [65] H. Wang, D. Zheng, W. Yan, *A double-gated recurrent unit neural network for contact force prediction in pantograph-catenary systems*, „Front. Mech. Eng.” 2026, t. 12, art. 1860081, doi: 10.3389/fmech.2026.1860081.
- [66] Z. Hu, L. Chen, Y. Song, F. Duan, Z. Liu, Z. Fan, *Parameter identification of overhead conductor rail support and its influence on the contact forces*, „Veh. Syst. Dyn.” 2025, t. 63, nr 10, s. 1938–1961, doi: 10.1080/00423114.2024.2393341.
- [67] X. Wang, Y. Song, H. Yang, H. Wang, B. Lu, Z. Liu, *A time-frequency dual-domain deep learning approach for high-speed pantograph-catenary dynamic performance prediction*, „Mech. Syst. Signal Process.” 2025, t. 238, art. 113258, doi: 10.1016/j.ymssp.2025.113258.
- [68] F. He, J. Zhang, *Research on time–frequency characteristics of contact force based on wavelet transform*, „IET Electr. Syst. Transp.” 2022, t. 12, nr 4, s. 287–297, doi: 10.1049/els2.12053.
- [69] C. Sanchez-Rebollo, J. R. Jimenez-Octavio, A. Carnicero, *Active control strategy on a catenary–pantograph validated model*, „Veh. Syst. Dyn.” 2013 t. 51, nr 4, s. 554–569, doi: 10.1080/00423114.2013.764455.
- [70] Y. Song, H. Ouyang, Z. Liu, G. Mei, H. Wang, X. Lu, *Active control of contact force for high-speed railway pantograph-catenary based on multi-body pantograph model*, „Mech. Mach. Theory” 2017, t. 115, s. 35–59, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.04.014.
- [71] Z. Liu, H. Wang, H. Chen, X. Wang, Y. Song, Z. Han, *Active pantograph in high-speed railway: Review, challenges, and applications*, „Control Eng. Pract.” 2023, t. 141, art. 105692, doi: 10.1016/j.conengprac.2023.105692.
- [72] M. Wang, Y. Xu, L. Pan, W. Z. Liu, Z. Zhou, *Active Control Method for Pantograph-Catenary System Based on Neural Network PID Under Crosswind Conditions*, „Machines” 2025, nr 13, dostęp: 02. 01. 2026, <https://doi.org/10.3390/machines13100897>

- [73] H. Wang, Z. Liu, Z. Han, Y. Wu, D. Liu, *Rapid Adaptation for Active Pantograph Control in High-Speed Railway via Deep Meta Reinforcement Learning*, „IEEE Trans. Cybern.” 2024, t. 54, nr 5, s. 2811–2823, doi: 10.1109/TCYB.2023.3271900.
- [74] F. Resta, A. Facchinetti, A. Collina, G. Bucca, *On the use of a hardware in the loop set-up for pantograph dynamics evaluation*, „Veh. Syst. Dyn.” 2008, t. 46, s. 1039–1052, doi: 10.1080/00423110802037891.
- [75] A. Facchinetti, S. Bruni, *Hardware-in-the-loop hybrid simulation of pantograph–catenary interaction*, J. Sound Vib. 2012, t. 331, nr 12, s. 2783–2797, doi: 10.1016/j.jsv.2012.01.033.
- [76] S. Gregori, M. Tur, A. Pedrosa, J. E. Tarancón, F. J. Fuenmayor, *A modal coordinate catenary model for the real-time simulation of the pantograph–catenary dynamic interaction*, „Finite Elem. Anal. Des.” 2019, t. 162, s. 1–12, doi: 10.1016/j.finel.2019.05.001.
- [77] J. Gil, M. Tur, S. Gregori, A. Correcher, F. J. Fuenmayor, *Finite element periodic catenary model to perform HIL pantograph tests considering non-linear dropper behaviour*, „Finite Elem. Anal. Des.” 2022, t. 210, art. 103816, doi: 10.1016/j.finel.2022.103816.
- [78] T. Jin, Z. Shen, H. Geng, *Optimized YOLOv11m for real-time high-speed railway catenary defect detection*, „Sci. Rep.” 2026, t. 16, art. 200, doi: 10.1038/s41598-025-29172-2.
- [79] J. A. Sainz-Aja, *Real-Time Rail Electrification Systems Monitoring: A Review of Technologies*, „Sensors” 2025, t. 25, art. 6625, doi: 10.3390/s25216625.
- [80] J. Zhong, W. Liu, *A Robust Defect Detection Method for Catenary Components Based on Structure-Guided Denoising Diffusion Model*, „IEEE Trans. Instrum. Meas.” 2025, doi: 10.1109/TIM.2025.3545883.
- [81] P. Dai, H. Li, F. Wang, X. Tian, H. Wang, X. Xu, *Key technologies of China high-speed comprehensive inspection train: CIT450*, „Railw. Eng. Sci.” 2025, t. 33, nr 3, s. 414–440, doi: 10.1007/s40534-024-00362-4.
- [82] W. Wei, Y. Wan, K. Zeng, Z. Li, Z. Yang, K. Liu, *A Dual-Modal Pantograph–Catenary Arc Detection Method Based on Sound-Optic Fusion*, „IEEE Trans. Plasma Sci.” 2026, t. 54, nr 2, s. 649–656, doi: 10.1109/tps.2026.3652513.
- [83] J. Yan, Y. Cheng, F. Zhang, N. Zhou, H. Wang, B. Jin, *Multimodal Imitation Learning for Arc Detection in Complex Railway Environments*, „IEEE Trans. Instrum. Meas.” 2025, t. 74, s. 1–13, doi: 10.1109/TIM.2025.3556896.
- [84] Y. Liu, W. Quan, X. Lu, X. Liu, S. Gao, H. Zhao, *A Novel Arcing Detection Model of Pantograph–Catenary for High-Speed Train in Complex Scenes*, „IEEE Trans. Instrum. Meas.” 2023, t. 72, s. 1–13, doi: 10.1109/TIM.2023.3267365.
- [85] M. S. Elbelkasi, E. A. Badran, N. I. Elkalashy, M. H. Abdel-Rahman, *Novel image-free arc detection method for pantograph–catenary systems based on direct DWT–ANN signal analysis*, „Sci. Rep.” 2026, t. 16, art. 19166, doi: 10.1038/s41598-026-56456-y.
- [86] Y. Du, Y. Jiao, H. Li, Q. Chen, *Pantograph–Catenary Arc Detection Based on Electrical Parameter Transient Variations Correlated With Current–Zero Arc Phenomena*, „IEEE Trans. Instrum. Meas.” 2025, t. 74, art. 2545611, s. 1–11, doi: 10.1109/tim.2025.3602598.
- [87] W. Wei, K. Zeng, Y. Wan, L. Xia, H. Zhang, Z. Yang, *A pantograph–catenary arcing detection method based on the fusion of current and electromagnetic radiation*, „Eng. Res. Express” 2025, t. 7, nr 3, doi: 10.1088/2631-8695/adf9c0.

- [88] L. Shi, J. Liang, Y. Liu, Y. Zhao, X. Li, *Electromagnetic Environment Assessment and Safety Research of Railway Mobile Catenary*, „Electronics”, 2024, t. 13, nr 4, art. 740, dostęp: 02. 01. 2026, <https://doi.org/10.3390/electronics13040740>.
- [89] M. Ziółkowski, *Analiza i synteza wybranych układów ekranujących pola elektromagnetyczne niskiej i średniej częstotliwości*. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie: Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, 2011.
- [90] P. Jabłoński, *Analiza statycznego i harmonicznego pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu struktur cienkościennych z wykorzystaniem metody elementów brzegowych*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2013.
- [91] J.H. Lee, T. W. Park, H. K. Oh, Y. G. Kim, *Analysis of dynamic interaction between catenary and pantograph with experimental verification and performance evaluation in new high-speed line*, „Vehicle System Dynamics” 2015, t. 53, nr 8, s. 1117–1134, doi: 10.1080/00423114.2015.1025797.
- [92] N. Wasilewska, P. Nowak, R. Szewczyk, *Pomiar parametrów filtrów elektronicznych typu MEMS z automatycznym wyznaczaniem niepewności*, „Pomiary Autom. Robot.” 2022, t. 26, nr 3, s. 43–48, doi: 10.14313/PAR_245/43.
- [93] ISO/IEC 17025:2018-02 Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących.
- [94] International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC), *ILAC-G8:09/2019 Guidelines on Decision Rules and Statements of Conformity*, 2019 r.
- [95] *International Vocabulary of Metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*, JCGM 200:2012, 2012, doi: 10.59161/JCGM200-2012.
- [96] *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*, JCGM 100:2008(E), 2008, doi: 10.59161/JCGM100-2008E.
- [97] *Opracowanie danych pomiarowych – Przewodnik wyrażania niepewności pomiaru*, JCGM 100:2008, Warszawa 2019.
- [98] C. Elster, A. Link, *Uncertainty evaluation for dynamic measurements modelled by a linear time-invariant system*, „Metrologia” 2008, t. 45, nr 4, s. 464–473, doi: 10.1088/0026-1394/45/4/013.
- [99] G. Wubbeler, A. Link, T. Bruns, C. Elster, “Impact of correlation in the measured frequency response on the results of a dynamic calibration” w F. Pavese, M. Bär, A. B. Forbes, J.-M. Linares, C. Perruchet, N. F. Zhang, *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing VIII*, in Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences, t. 78, s. 369–374, Singapore: World Scientific, 2009. doi: 10.1142/9789812839527_0052.
- [100] *Guide to the expression of uncertainty in measurement – Part 6: Developing and using measurement models*, JCGM GUM-6:2020, 2020, doi: 10.59161/JCGMGUM-6-2020.
- [101] C. Schlegel, G. Kieckenap, B. Glockner, A. Buss, R. Kümme, *Traceable periodic force calibration*, „Metrologia” 2012, t. 49, nr 3, s. 224–235, doi: 10.1088/0026-1394/49/3/224.
- [102] N. Medina, J. de Vicente, *Force Sensor Characterization Under Sinusoidal Excitations*, „Sensors” 2014, t. 14, nr 10, s. 18454–18473, doi: 10.3390/s141018454.

- [103] N. Vlajic, A. Chijioke, *Traceable Dynamic Calibration of Force Transducers by Primary Means*, „Metrologia” 2016, t. 53, nr 4, s. 136–148, doi: 10.1088/0026-1394/53/4/S136.
- [104] C. Schlegel, G. Kiekenap, H. Kahmann, R. Kumme, *Mechanical influences in sinusoidal force measurement*, „Acta IMEKO” 2015, t. 4, nr 2, s. 57–61, doi: 10.21014/acta_imeko.v4i2.206.
- [105] D. Roske, J. Ala-Hiio, A. Knott, N. Medina, M. Woźniak, *Tools for uncertainty calculations in force measurement*, „Acta IMEKO” 2017, t. 6, nr 1, s. 59–63, doi: 10.21014/acta_imeko.v6i1.413.
- [106] P. Fotowicz, *Niepewność pomiaru*, [w:] *Vademecum 2022*, Główny Urząd Miar, 2022.
- [107] *Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method*, JCGM 101:2008, 2008. doi: 10.59161/JCGM101-2008.
- [108] *Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment*, JCGM 106:2012, 2012. doi: 10.59161/JCGM106-2012.
- [109] M. Tan, N. Zhou, Y. Cheng, J. Wang, W. Zhang, D. Zou, *A temperature-compensated fiber Bragg grating sensor system based on digital filtering for monitoring the pantograph–catenary contact force*, „Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit” 2019, t. 233, nr 2, s. 187–200, doi: 10.1177/0954409718786143.
- [110] E. Brambilla, M. Carnevale, A. Facchinetti, D. Rocchi, *Influence of train roof boundary layer on the pantograph aerodynamic uplift: A proposal for a simplified evaluation method*, „J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.” 2022, t. 231, art. 105212, doi: 10.1016/j.jweia.2022.105212.
- [111] *The International System of Units (SI)*. BIPM, 9th edition (aktualizacja 2026) 2019.
- [112] *Międzynarodowy Układ Jednostek Miar SI*, Bureau International des Poids et Mesures / Główny Urząd Miar, Warszawa, 2023.
- [113] PN-EN 12663-1+A2:2024-04 – Kolejnictwo – Wymagania konstrukcyjne dotyczące pudeł kolejowych pojazdów szynowych – Część 1: Lokomotywy i tabor pasażerski (i metoda alternatywna dla wagonów towarowych).
- [114] PN-EN 50367:2021-06/A1:2023-07 Zastosowania kolejowe – Urządzenia stacyjne i tabor kolejowy – Kryteria w celu osiągnięcia kompatybilności technicznej między pantografami a siecią jezdnią górną.
- [115] Załącznik 12 Regulamin Sieci 2022/2023, Wykaz materiałów, z których mogą być wykonane nakładki ślizgowe odbieraka prądu (pantografu) pojazdu trakcyjnego do kontaktu z siecią trakcyjną PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.
- [116] S. Midya, R. Thottappillil, *An overview of electromagnetic compatibility challenges in European Rail Traffic Management System*, „Transp. Res. Part C Emerg. Technol.” 2008, t. 16, nr 5, s. 515–534, doi: 10.1016/j.trc.2007.11.001.
- [117] L. Yu, S. Gao, D. Zhang, G. Kang, Z. Dong, R. Clive, *A Survey on Automatic Inspections of Overhead Contact Lines by Computer Vision*, „IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.” 2022, t. 23, nr 8, s. 10104–10125, doi: 10.1109/TITS.2021.3119023.
- [118] L. Biyu, K. Gaoqiang, W. Hu, L. Haitao, L. Jun, W. Junping, *Toward Reliable High-Speed Railway Pantograph-Catenary System State Detection: Multitask Deep Neural Networks With Runtime Reliability Monitoring*, „IEEE Trans. Instrum. Meas.” 2024, t. 73, s. 1–11, doi: 10.1109/TIM.2023.3334367.

- [119] S. Huang, Y. Zhai, M. Zhan, X. Hou, *Arc detection and recognition in pantograph–catenary system based on convolutional neural network*, „Inf. Sci.” 2019, t. 501, s. 363–376, doi: 10.1016/j.ins.2019.06.006.
- [120] J. L. Wybo, *Track circuit reliability assessment for preventing railway accidents*, „Saf. Sci.” 2018, t. 110, cz. B, s. 268–275, doi: 10.1016/j.ssci.2018.03.022.
- [121] A. Garczarek, K. Woźniak, T. Olejniczak, R. Waśkowicz, D. Stachowiak, *Determination of the reactance of rail vehicles wheelsets*, „Rail Veh. Szyn.” 2023, nr 1–2, s. 32–37, doi: 10.53502/RAIL-168083.
- [122] PN-EN 50121-2:2017-06 Zastosowania kolejowe – Kompatybilność elektromagnetyczna – Część 2: Oddziaływania systemu kolejowego na otoczenie.
- [123] PN-EN 50121-3-1:2017-05/A1:2019-07 Zastosowania kolejowe – Kompatybilność elektromagnetyczna – Część 3-1: Tabor – Pociąg i kompletny pojazd.
- [124] V. Havryliuk, R. Nibaruta, J. Muhammad K., *Electromagnetic Compatibility of Track Circuits with Parallel Traction Network*, presented at the 2022 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe, IEEE, 2022. doi: 10.1109/EMCEurope51680.2022.9901264.
- [125] A. Mariscotti, *Experimental characterisation of active and non-active harmonic power flow of AC rolling stock and interaction with the supply network*, „IET Electr. Syst. Transp.”, 2021, t. 11, s. 109–120, doi: 10.1049/els2.12009.
- [126] A. Garczarek, D. Stachowiak, *Measurements and Analysis of Electromagnetic Compatibility of Railway Rolling Stock with Train Detection Systems Using Track Circuits*, „Energies” 2025, t. 18, nr 11, doi: 10.3390/en18112705.
- [127] PN-EN 50500:2008/A1:2015-10 Procedury pomiarów poziomów pól magnetycznych generowanych przez urządzenia elektroniczne i elektryczne w środowisku kolejowym w odniesieniu do narażenia ludzi.
- [128] ICNIRP, *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*, 1998, dostęp: 02. 01. 2026, <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPemfgdl.pdf>
- [129] ICNIRP *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz – 100 kHz)*. Publikacja w „Health Physics” 99(6):818-836, 2010.
- [130] 2013/35/UE Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 26 czerwca 2013 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na zagrożenia spowodowane czynnikami fizycznymi (polami elektromagnetycznymi) uchylająca dyrektywę 2004/40/WE.
- [131] Dz.U. 2018 r. poz. 1286 Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy.
- [132] 1999/519/EC Council recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz).