

Badania statyczne odbieraków prądu w procesie produkcji oraz w trakcie eksploatacji

Streszczenie. W artykule przedstawiono zagadnienia związane z badaniami odbieraków prądu instalowanych na elektrycznych pojazdach trakcyjnych w odniesieniu do obowiązujących norm i przepisów. Omówiono tematykę pomiarów nacisku statycznego i zaprezentowano skonstruowane stanowisko pomiarowe do badań statycznych odbieraków prądu. Przedstawiono i omówiono charakterystyki statyczne dla wybranych pantografów. Badania przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 50206-1:2010.

Abstract. The article presents issues related to testing current collectors installed on electric traction vehicles in relation to the applicable standards and regulations. The subject of static contact force measurements is discussed and a constructed measuring stand for testing static current collectors is presented. The static characteristics for selected pantographs were presented and discussed. The tests were carried out in accordance with the requirements of the PN-EN 50206-1: 2010 standard. (**Static tests of current collectors in the production process and during operation**).

Słowa kluczowe: pantograf, siła nacisku statycznego, pojazdy trakcyjne, metodyka pomiarów.

Keywords: pantograph, static contact force, traction vehicles, measurement methodology.

Wprowadzenie

Jednym z podstawowych problemów występujących w trakcie eksploatacji elektrycznych pojazdów trakcyjnych jest niezawodność i bezpieczeństwo ich użytkowania. Priorytetową kwestią dla przewoźników kolejowych oraz zarządców infrastruktury jest informacja o stanie sieci trakcyjnej oraz jakości odbieraków prądu [1, 8, 10]. O niezawodności odbieraków prądu w głównej mierze decyduje nacisk wywierany przez nakładkę stykową na przewód jezdny. Zbyt mały nacisk nakładki stykowych prowadzi w konsekwencji do osłabienia kontaktu z przewodem jezdny, co skutkuje powstawaniem przerw stykowych, zaburzeń w pracy układu napędowego i odbiorników energii elektrycznej zainstalowanych w pojeździe oraz występowaniem bardzo niekorzystnych zjawisk łukowych. Powoduje to nadpalanie zarówno przewodu jak i nakładki stykowych oraz dodatkowo generuje zakłócenia w sieci trakcyjnej i ma także ogromny wpływ na natężenie pola elektromagnetycznego w otoczeniu pojazdu. Zbyt duży nacisk statyczny na przewód jezdny, w połączeniu ze zjawiskami dynamicznymi występującymi podczas jazdy, powoduje nadmierne unoszenie przewodu jezdny oraz szybkie zużywanie części stykowych, nakładka – sieć trakcyjna. Powoduje również powstanie nieakceptowalnego ryzyka zerwania i uszkodzenia sieci trakcyjnej [7, 9].

Nawet krótkotrwały brak kontaktu między pantografem a siecią trakcyjną ma negatywny wpływ na pojazd szynowy i znajdujące się w nim systemy elektroniczne. Dlatego też wzajemne oddziaływanie pantografu i sieci trakcyjnej powinno być badane dynamicznie i statycznie w określonych odstępach czasu. W pracy przedstawiono stanowisko pomiarowe do badań statycznych odbieraków prądu pojazdów szynowych. System pomiarowy został sprawdzony w warunkach laboratoryjnych, a także przetestowany w czasie kilkumiesięcznej eksploatacji w zakładzie zajmującym się badaniami taboru [2].

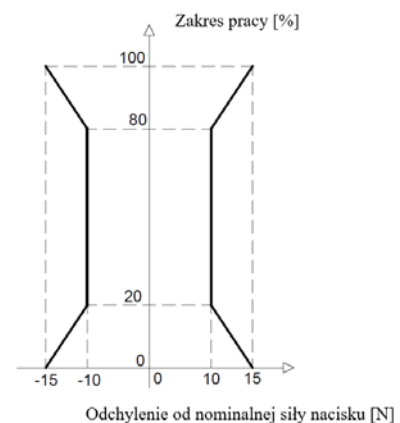
Metodyka badań statycznych odbieraków prądu

Podstawowym dokumentem określającym wymagania dla wszystkich urządzeń stosowanych w taborze systemu kolei w Unii Europejskiej jest 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 [3]. W dokumencie tym zdefiniowano nacisk statyczny pantografu (poziom składnika interoperacyjności) jako nacisk pionowy ku górze wywierany przez ślizgacz pantografu na przewód jezdny i powodowany przez urządzenie unoszące pantograf w momencie, gdy pantograf jest uniesiony podczas postoju pojazdu. Dodatkowo nacisk statyczny wywierany przez pantograf na przewód jezdny w sposób określony powyżej musi być regulowany co najmniej w następujących zakresach (zgodnie z obszarem stosowania pantografu):

- 60 N do 90 N dla systemów zasilania prądem przemiennym,
- 90 N do 120 N dla systemów zasilania prądem stałym 3 kV,
- 70 N do 140 N dla systemów zasilania prądem stałym 1,5 kV.

W przypadku wszystkich pantografów nacisk statyczny należy sprawdzać zgodnie normą PN-EN 50206-1:2010 pkt. 6.3.1. [4]. W punkcie tym określono warunki pomiaru oraz prędkość podnoszenia i opuszczania odbieraka prądu, która powinna wynosić 0,05 m/s z dokładnością 10 %. Wymagania dla siły podano w pkt. 4.4 normy, który w tym zakresie odsyła do załącznika A, w którym graficznie zinterpretowano tolerancje nacisków statycznych. Interpretacje taką przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Graficzna tolerancja nacisków statycznych wg załącznika A normy PN-EN 50206-1 [4]

Średnią wartość siły nacisku statycznego F_{sr} wyznacza się z zależności:

$$(1) \quad F_{sr} = \frac{F_d + F_g}{2}$$

gdzie: F_d – siła nacisku statycznego przy ruchu odbieraka w dół [N], F_g – siła nacisku statycznego przy ruchu odbieraka w górę [N],

oraz siły tarcia suchego F_t , z zależności:

$$(2) \quad F_t = \frac{F_d - F_g}{2}$$

Stanowisko Pomiarowe

Podstawowym założeniem konstrukcyjnym było zbudowanie stanowiska do badań statycznych odbieraków prądu, które spełni wymagania normatywne oraz umożliwi poprawne prowadzenie badań w warunkach stanowiących szczególne zagrożenie dla użytkownika. Do tych warunków zalicza się pracę na wysokości, niewielkie dostępne miejsce umożliwiające montaż aparatury pomiarowej i prowadzenie pomiarów, duże gabaryty badanych odbieraków oraz występowanie dużych sił (w trakcie badań odbieraki zasilane są sprężonym powietrzem). Przyjęto możliwość prowadzenia badań odbieraków prądu zamontowanych na obiektach takich jak elektryczne zespoły trakcyjne, czy tramwaje.

Opracowane stanowisko spełnia wymagania normatywne wymienione poniżej:

- prędkość przesuwu: 3 m/min. \pm 10%,
- zakres wysokości roboczej: 0 \div 3 m,
- pomiar góra/dół,
- pomiar masy nieusprężynowanej: co 0,2 m.

Przyjęto, że stanowisko będzie pracowało w temperaturach dodatnich w przedziale 5 \div 40°C o umiarkowanej wilgotności. Z tego względu dobór obudowy układu jak i jego elementów elektronicznych nie wymagał specjalnego uwzględnienia zabezpieczeń przed zbyt dużą wilgotnością czy skrajnymi temperaturami.

Stanowisko zasilane jest z jednego standardowego obwodu 230 VAC, a w przypadku badań w terenie bez dostępu do sieci zasilającej z zestawu akumulatorów i przetwornicy.

Schemat blokowy stanowiska opracowany na podstawie założeń konstrukcyjnych oraz przyjętych rozwiązań technicznych przedstawiono na rysunku 2.

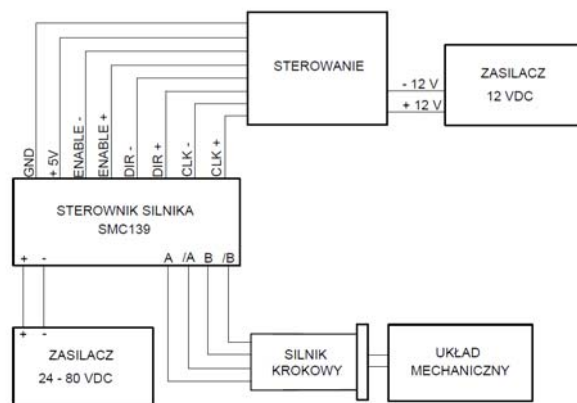
Układ zasilania sterowania zrealizowano dla dużego przedziału napięcia wejściowego (8 \div 50 V) i wyjściowego (0,8 \div 24 V) oraz o obciążalności 3 A na bazie przetwornicy DC/DC. Tak szerokie zakresy stanowią o dużej uniwersalności układu.

Drugą część tego układu oparto na nieregulowanym układzie stabilizacji napięcia 5V/3V3 dostarczającego na wyjście układu napięcie 3,3 V i obciążalności prądowej 0,95 A. Napięcie to jest wykorzystywane do zasilania układu obsługującego kartę SD. Układ z gniazdem karty MicroSD został zabudowany na płycie z myślą o planowanej dalszej rozbudowie stanowiska w przypadku, gdy nie będzie możliwe wykorzystanie komputera PC.

Ze względu na komfort obsługi stanowiska oraz ilość wyświetlanych danych zastosowano wyświetlacz LCD alfanumeryczny typu RC2004C-BIW-ESX 20x4.

Jako podstawę układu logicznego użyto mikrokontroler firmy ATMEL typu ATMEGA644A-AU.

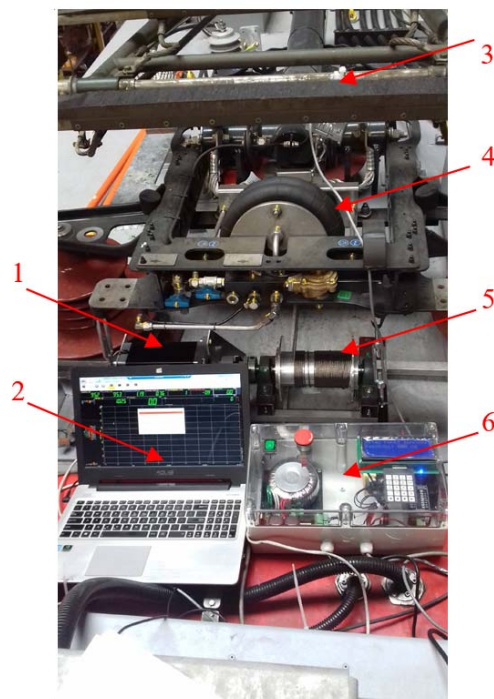
Użyty przy projekcie sterownik silnika typu SMC139 jest urządzeniem zalecanym przez producenta dla wybranego typu silnika krokowego. Przeznaczony jest do współpracy z dwufazowym silnikiem krokowym z uzwojeniem bipolarnym 8-przewodowym.



Rys. 2. Schemat blokowy stanowiska do badań statycznych odbieraków prądu

Sterownik posiada bardzo szeroki zakres możliwości dostosowania go do indywidualnych wymagań użytkownika. Za pomocą mikroprzełączników można ustawić prąd silnika oraz podział kroku. Możliwe jest także ustawienie dodatkowych funkcji takich jak filtr, którego włączenie eliminuje zakłócenia na wejściu CLK (impulsy krótsze niż 0,5 μ s) oraz funkcja redukcji prądu powodująca ograniczenie prądu silnika o 50% w sytuacji, gdy między kolejnymi sygnałami CLK odstęp jest większy niż 0,5 sekundy. W przypadku tego projektu wybrano maksymalny prąd 8,2 A aby uzyskać maksymalny moment trzymający silnika oraz minimalny krok 1/16 w celu uzyskania maksymalnej dokładności przesunięcia liniowego odbieraka w trakcie badań.

Najważniejszym elementem wykonawczym układu jest silnik. W tym przypadku zastosowano silnik krokowy serii 110BYGH601, dla którego moment trzymający wynosi 30 Nm, z uwagi na spodziewane możliwe obciążenie liniowe dochodzące do 40 kg.



Rys. 3. Stanowisko do badań statycznych odbieraków prądu

Do zasilania układu użyto uniwersalnego zasilacza niestabilizowanego z wbudowanym układem Soft Start typu ZN300-L-SS. W zasilaczu zastosowano układ Soft Start, który zapobiega powstawaniu zakłócających impulsów prądu w uzwojeniach transformatora podczas jego załączania. Stosowanie takiego wskazane jest w układach o dużej obciążalności prądowej. Dodatkowo zastosowano dwa kondensatory elektrolityczne o dużej pojemności (6800 μF), które w znacznym stopniu niwelują tętnienia napięcia zasilania.

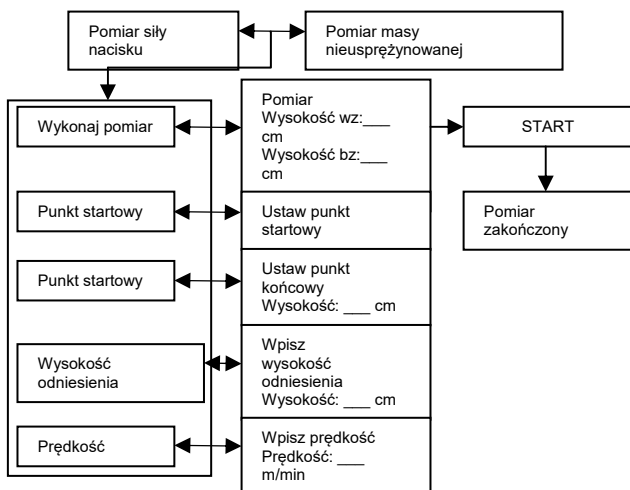
Przy budowie układu mechanicznego, ze względu na masę oraz łatwość obróbki materiału, zdecydowano się na zastosowanie konstrukcji aluminiowych.

Skorzystano również z dostępnych na rynku gotowych elementów jakimi są dwa zestawy łożyskowe typu UCP203 XLZ z oprawą żeliwną oraz dla zapewnienia całkowitego bezpieczeństwa element sprzęgający zaciskowy typu SOZ41-19-19 poddając go modyfikacji uwzględniającej zmianę średnicy wału napędowego silnika.

Widok stanowiska do badań statycznych odbieraków zaprezentowano na rysunku 3.

Do obsługi stanowiska badawczego opracowano dedykowaną aplikację, która składa się z dwóch części. Pierwsza część odpowiedzialna jest za obsługę wyświetlacza alfanumerycznego. Druga obejmuje obsługę sterownika silnika krokowego oraz interfejs użytkownika. Program napisano w języku C w środowisku Eclipse.

Jako interfejs dla użytkownika zastosowano klawiaturę membranową typu QWERTY QW-05 złożoną z 20 przycisków tak dobranych, aby symbole na nich umieszczone sugerowały ich funkcję i czyniły obsługę stanowiska intuicyjną. Po załączeniu stanowiska do zasilania automatycznie na wyświetlaczu pojawia się menu użytkownika, do poruszania się po nim wykorzystano symbole z klawiatury. Schemat poruszania się po interfejsie zamieszczono na rysunku 4.



Rys.4. Schemat interfejsu użytkownika stanowiska do badań statycznych odbieraków prądu

Wyniki i analiza badań

Opracowane stanowisko do badań statycznych odbieraków prądu przetestowano w warunkach rzeczywistych. Próby statyczne odbieraków prądu przeprowadzono w sposób opisany w punkcie 6.3.1 normy PN-EN 50206-1:2010 [4] dla obu kierunków ruchu ślizgacza (w górę i w dół). Dla każdego z odbieraków wykonano kilka prób, w trakcie których uzyskano zbliżone wyniki. W pracy przedstawiono otrzymane wyniki z badań dla wybranych odbieraków prądu typu: Panto300, 160EC, DSA 150 oraz

AKP-4E/RVTM. Charakterystyki statyczne odbieraków prądu typu Panto300, 160Ec oraz DSA 150 otrzymano przy użyciu opracowanego stanowiska. Widok odbieraka prądu typu DSA 150.06 podczas wyznaczania charakterystyki nacisku statycznego zaprezentowano na rysunku 5.



Rys.5. Widok odbieraka typu DSA 150.06 podczas badań statycznych

Charakterystykę statyczną odbieraka prądu typu Panto300 wyznaczono rejestrując wartości siły nacisku statycznego w funkcji wysokości odbieraka w zakresie roboczym od 800 do 2800 mm. W Tabeli 1. zamieszczono wyniki uzyskane w trakcie jednej z prób oraz obliczone średnie wartości siły nacisku statycznego F_{sr} z zależności (1).

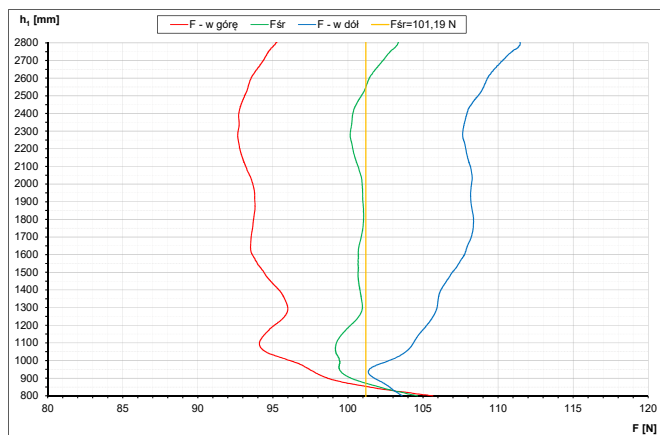
Tabela 1. Zestawienie wyników charakterystyki statycznej odbieraka Panto300

Ruch ślizgacza	Wysokość H_1	Siła nacisku F_d	Ruch ślizgacza	Wysokość H_1	Siła nacisku F_g	Srednia siła nacisku F_{sr}
	h_1	[N]		h_1	[N]	[N]
W dół F_d	2800	111,47	W górę F_g	2800	95,21	103,34
	2600	109,28		2600	93,55	101,42
	2400	107,93		2400	92,73	100,33
	2200	107,85		2200	92,80	100,33
	2000	108,23		2000	93,67	100,95
	1800	108,36		1800	93,71	101,04
	1600	107,76		1600	93,63	100,70
	1400	106,19		1400	95,40	100,80
	1200	105,25		1200	95,10	100,18
	1000	102,74		1000	96,14	99,44
800	103,61	800	105,66	104,64		
Średnia:						101,19

Przebiegi sił nacisku statycznego przy ruchu odbieraka w dół i w górę oraz średnie wartości siły nacisku statycznego w funkcji wysokości uniesienia odbieraka dla przykładowej próby przedstawiono na rysunku 6.

Charakterystykę statyczną odbieraka typu 160EC wyznaczono rejestrując wartości siły nacisku statycznego w funkcji wysokości odbieraka w zakresie roboczym od 600 do 2000 mm. W Tabeli 2 zamieszczono wyniki uzyskane w

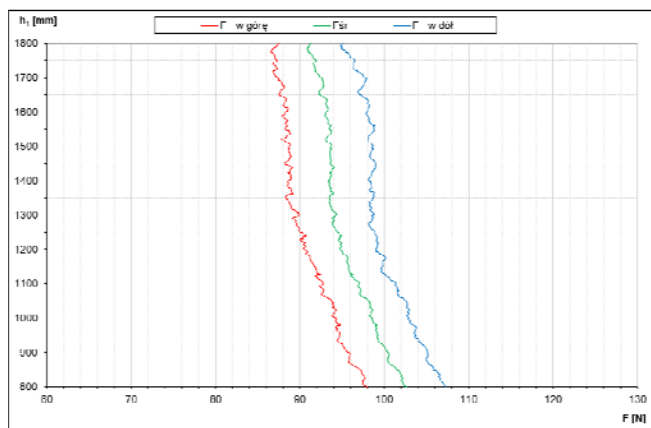
trakcie jednej z prób oraz obliczone średnie wartości siły nacisku statycznego F_{sr} z zależności (1). Charakterystykę nacisku statycznego odbieraka typu 160EC przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 6. Charakterystyka siły nacisku statycznego odbieraka prądu typu Panto300

Tabela 2. Zestawienie wyników pomiarów charakterystyki statycznej odbieraka 160EC

Ruch ślizgacza	Wysokość H_1	Siła nacisku F_d	Ruch ślizgacza	Wysokość H_1	Siła nacisku F_g	Średnia siła nacisku F_{sr}
h_1	[mm]	[N]	h_1	[mm]	[N]	[N]
W dół F_d	1800	95,10	W górę F_g	1800	87,49	91,30
	1600	97,91		1600	88,26	93,09
	1400	98,12		1400	88,54	93,33
	1200	98,98		1200	90,52	94,75
	1000	102,95		1000	94,35	98,65
	800	107,23		800	97,98	102,61
Średnia:						95,62



Rys. 7. Charakterystyka siły nacisku statycznego odbieraka prądu typu 160EC

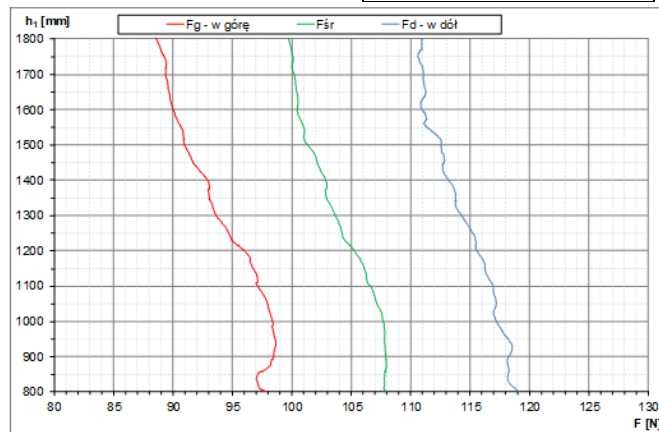
Charakterystykę statyczną odbieraka typu DSA 150 wyznaczono rejestrując wartości siły nacisku statycznego w funkcji wysokości odbieraka od 600 do 2 000 mm. W Tabeli 3 zamieszczono wyniki uzyskane w trakcie badań oraz obliczone średnie wartości siły nacisku statycznego F_{sr} z zależności (1). Charakterystykę nacisku statycznego odbieraka typu 1 DSA 150 pokazano na rysunku 8.

Opracowane stanowisko umożliwia także pomiar masy nieusprężynowanej. Dla każdego z typów odbieraków

sprawdzenie masy zastępczej części ruchomej wykonano zgodnie z warunkami podanymi w pkt. 3.3.14 ppkt. a) normy PN-K-91001:1997 [6]. Odbierak podniesiono do najwyższej wysokości konstrukcyjnej, a następnie opuszczano do najmniejszej wysokości konstrukcyjnej z prędkością ok. 0,05 m/s. Unoszenie wykonano w osi ślizgacza. Na tej podstawie wyznaczono średnie wartości mas zastępczych. Dla wszystkich odbieraków uzyskano prawidłowo wartości masy nieusprężynowanej.

Tabela 3. Zestawienie wyników pomiarów charakterystyki statycznej odbieraka typu DSA 150.06

Ruch ślizgacza	Wysokość H_1	Siła nacisku F_d	Ruch ślizgacza	Wysokość H_1	Siła nacisku F_g	Średnia siła nacisku F_{sr}
h_1	[mm]	[N]	h_1	[mm]	[N]	[N]
W dół F_d	1800	112,66	W górę F_g	1800	89,71	101,18
	1600	112,38		1600	91,30	101,84
	1400	113,49		1400	93,85	103,67
	1200	116,24		1200	97,17	106,70
	1000	118,68		1000	99,89	109,29
	800	120,01		800	99,12	109,57
Średnia:						105,38



Rys. 8. Charakterystyka siły nacisku statycznego odbieraka prądu typu DSA 150.06

Charakterystyki statyczne dla odbieraków prądu typu Panto300, 160Ec oraz DSA 150 otrzymane zostały przy spełnieniu wszystkich wymagań normatywnych (prędkość unoszenia i opuszczania odbieraka wynosiła 3 m/min z niepewnością mniejszą niż wymagane 10%, również niepewność pomiaru wysokości była mniejsza niż wymagane 3%). Niepewność rozszerzona pomiaru siły wynosiła 0,37% i została określona jako standardowa niepewność pomiaru pomnożona przez współczynnik rozszerzenia $k = 2$, który dla rozkładu normalnego odpowiada prawdopodobieństwu rozszerzenia ok. 95 %.

Wyniki przedstawione na rysunkach 6, 7 i 8 uzyskano dla dwóch różnych typów odbieraków przystosowanych do zastosowania w pojazdach kolejowych poruszających się z różnymi prędkościami maksymalnymi, a więc o różnych właściwościach aerodynamicznych (różne siły tarcia) oraz całkowicie różnych zakresach wysokości roboczej. Różnice pomiędzy przedstawionymi charakterystykami statycznymi odbieraków Panto300, 160Ec oraz DSA 150 wynikają tylko z ustawienia filtrów w użytych do zapisu danych rejestratorze.

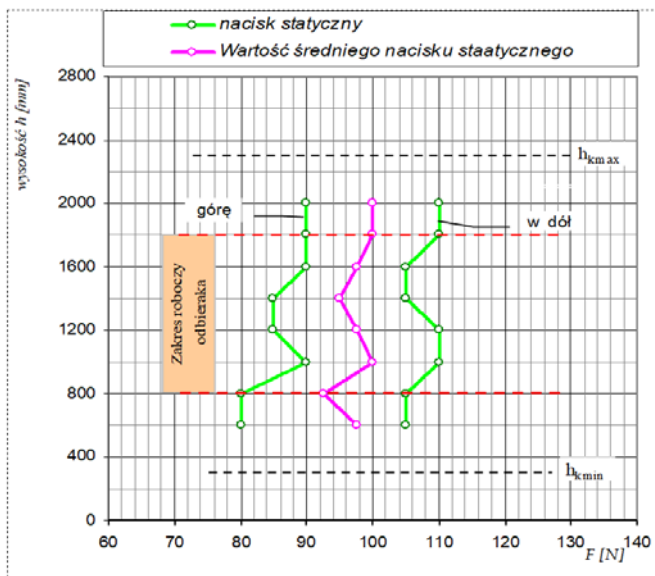
Wymagania dotyczące charakterystyki statycznej podano w punkcie 6.2 normy PN-EN 50367 [5] oraz w Załączniku A normy [4] opisującego zakres tolerancji. W zakresie

robozym średnia wartość siły nacisku statycznego powinna wynosić od 90 do 120 N. Wyznaczone średnie wartości siły nacisku statycznego w zakresie roboczym dla badanych odbieraków mieściły się w tym zakresie.

Przed użyciem skonstruowanego stanowiska do badań statycznych odbieraków prądu prowadzenie tego typu badań w sposób spełniający wymagania normy [4] było bardzo trudne lub wręcz niemożliwe. Dla porównania wyznaczono charakterystykę statyczną odbieraka typu AKP-4E/RyTM bez użycia opracowanego stanowiska. Siłę nacisku statycznego mierzono w kilku punktach zakresu roboczego za pomocą dynamometru sprężynowego starając się utrzymać określoną wysokość odbieraka. Pomierzono wartości siły nacisku statycznego dla różnych wysokości odbieraka (od najwyższego położenia roboczego 1800 mm do najniższego położenia roboczego 800 mm) oraz obliczono wartości średniego nacisku statycznego. W Tabeli 4. zamieszczono wyniki uzyskane w trakcie badań oraz obliczone średnie wartości siły nacisku statycznego F_{sr} z zależności (1). Charakterystykę nacisku statycznego odbieraka typu AKP-4E/RyTM przedstawiono na rysunku 9.

Tabela 4. Zestawienie wyników charakterystyki statycznej odbieraka AKP-4E/RyTM

Ruch ślizgacza	Wysokość H_l	Siła nacisku F_d	Ruch ślizgacza	Wysokość H_l	Siła nacisku F_g	Średnia siła nacisku F_{sr}
h_1	[mm]	[N]	h_1	[mm]	[N]	[N]
W dół F_d	2000	110	W górę F_g	2000	90	100,0
	1800	110		1800	90	100,0
	1600	105		1600	90	97,5
	1400	105		1400	85	95,0
	1200	110		1200	85	97,5
	1000	110		1000	90	100,0
	800	105		800	80	97,5
	600	105		600	80	97,5
Średnia:						97,1



Rys. 9. Charakterystyka siły nacisku statycznego odbieraka prądu typu AKP-4E/RyTM

W zakresie roboczym odbieraka prądu z nakładkami stykowymi węglowymi (od $h_{min} = 800$ mm do $h_{max} = 1800$ mm) wahania średniej siły nacisku statycznego zgodnie

z normą powinny mieścić się w granicach od 90 do 120 N. Dla badanego odbieraka średnia siła nacisku statycznego wynosi 97,1 N. Odchyłka pomiaru wartości średniego nacisku statycznego dla zakresu roboczego odbieraka nie powinna przekraczać ± 5 N. W świetle powyższej analizy wynik sprawdzenia charakterystyki statycznej jest pozytywny, ale wynik nie jest wiarygodny. Prowadzenie pomiarów metodą ręczną nie spełnia żadnych wymagań normatywnych, ponieważ pomiar nie jest prowadzony w sposób ciągły tylko punktowo, również niedokładności pomiaru siły i wysokości są zdecydowanie większe od dopuszczalnych. Ręczna metoda pomiaru dopuszczana jest tylko jako szybki sposób wstępnej kontroli badanych wielkości.

Podsumowanie

Opracowane stanowisko badawcze umożliwia wykonywanie pomiaru nacisku statycznego na przewód jezdny oraz dodatkowo pomiaru masy nieusprężynowanej w warunkach stanowiących szczególne zagrożenie dla użytkownika. System pomiarowy spełnia wymagania normatywne i pozwala na prowadzenie badań odbieraków prądu typu pantograf zamontowanych na obiektach takich jak elektryczne zespoły trakcyjne, czy tramwaje.

Badania stały się powtarzalne niezależnie od warunków zewnętrznych, a uzyskane wyniki pomiarów cechuje duża dokładność.

Autorzy: inż. Adam Garczarek, Sieć Badawcza Łukasiewicz - Poznański Instytut Technologiczny ul. Ewarysta Estkowskiego 6, 61-755 Poznań, E-mail: adam.garczarek@pit.lukasiewicz.gov.pl
dr hab. inż. Dorota Stachowiak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: dorota.stachowiak@put.poznan.pl.

LITERATURA

- [1] K. Karwowski, M. Mizan, and D. Karkosiński, "Monitoring of current collectors on the railway line", *Transport*, vol. 33, no. 1, pp. 177-185, 2018
- [2] OB-610 Opracowanie koncepcji i wykonanie zautomatyzowanego układu do badań statycznych odbieraka prądu. Adam Garczarek. Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”. Poznań, grudzień 2019 r.
- [3] TSI LOC&PAS Rozporządzenie Komisji (UE) NR 1302/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznych specyfikacji interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu „Tabor – lokomotywy i tabor pasażerski” systemu kolei w Unii Europejskiej
- [4] PN-EN 50206-1:2010 Zastosowania kolejowe – Tabor – Pantografy: Charakterystyki i badania – Część 1: Pantografy pojazdów linii głównych
- [5] PN-EN 50367:2012/A1:2017-04 Zastosowania kolejowe – Systemy odbioru prądu – Kryteria techniczne dotyczące wzajemnego oddziaływania między pantografem a siecią jezdnią górną (w celu uzyskania wolnego dostępu)
- [6] PN-K-91001:1997 - Elektryczne pojazdy trakcyjne – Odbieraki prądu – Wymagania i metody badań
- [7] T. Maciolek, "Elastyczna nakładka poprawiająca współpracę pantografu z siecią trakcyjną", *Przegląd Elektrotechniczny*, R89, nr 01a, str. 12-16, 2013
- [8] K.-M. Na, K. Lee, S.-K. Shin, and H. Kim, "Detecting Deformation on Pantograph Contact Strip of Railway Vehicle on Image Processing and Deep Learning," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 23, p. 8509, 2020
- [9] J. Skibicki, Pojazdy elektryczne część II, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2012
- [10] A. Wilk, K. Karwowski, S. Judek, M. Mizan, "Modelowanie i symulacja dynamiki ruchu trakcyjnego odbieraka prądu", *Przegląd Elektrotechniczny*, R92, nr 10, str. 243-248, 2016