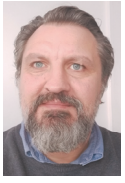


Sławomir Tarkowski

Badania eksperymentalne hamowania hulajnóg napędzanych silnikiem elektrycznym na suchej nawierzchni z kostki brukowej

Streszczenie
W artykule poruszono zagadnienia dotyczące bezpieczeństwa ruchu w aspekcie wykorzystania lekkich osobistych środków transportu. Omówiono podstawowe zagadnienia dotyczące regulacji prawnych związanych z mikromobilnością, a także układy odpowiedzialne za hamowanie w hulajnogach elektrycznych. Zasadniczą częścią artykułu jest omówienie badań eksperymentalnych hamowania dwóch wybranych modeli hulajnóg elektrycznych wyposażonych w rożne układy hamulcowe. W badaniach mierzono długość drogi hamowania, a następnie obliczano opóźnienie hamowania.

Słowa kluczowe
Hulajnogi elektryczne, hamowanie, opóźnienie hamowania, badania eksperymentalne, mikromobilność, lekkie osobiste środki transportu.

Otrzymano 9 października 2024 r., zatwierdzono do druku 18 listopada 2024 r.
DOI.10.4467/15053520PnD.24.010.20916

1. Wprowadzenie

W ostatnim czasie, w szczególności na obszarach miast, obserwuje się coraz większą liczbę lekkich osobistych środków transportu wykorzystywanych do przemieszczania się. Pomijając rowery (również te wspomagane silnikami elektrycznymi) do pojazdów tych zaliczyć można: hulajnogi napędzane silnikiem elektrycznym, deskorolki i monocykle elektryczne, hoverboardy oraz sagwaye. Zwiększenie popularności tych pojazdów można tłumaczyć skutecznością polityki zrównoważonego transportu prowadzonego przez władze samorządowe i rozwoju usług współdzielenia, szczególnie hulajnóg elektrycznych. Z drugiej strony wynika ona ze zwiększenia dostępności tych urządzeń na rynku, a także ich różnorodności i mody na ekomobilność. Wykorzystanie tych urządzeń zwiększa efektywność transportową i jest atrakcyjną ekonomicznie alternatywą. Z publikowanych w In-

Dr inż. Sławomir Tarkowski, Politechnika Lubelska, ORCID: 0000-0002-2110-7136.

ternecie informacji wynika, że łączna liczba hulajnóg elektrycznych dostępnych w usługach współdzielenia w czerwcu 2023 r. była równa 104,5 tys. sztuk, a usługa ta oferowana była w 196 miejscowościach [8]. Porównując to do analogicznego okresu w roku poprzednim stanowi to przyrost o 44% oferowanych pojazdów i o 32% liczby miejscowości, w których była oferowana usługa współdzielenia. Brak jest dostępnych danych dotyczących hulajnóg pozostających w rękach prywatnych i użytkowanych indywidualnie.

Obserwowane tendencje należy uważnie śledzić, szczególnie w kontekście potencjalnego zagrożenia dotyczącego obniżenia poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego. Dane o wypadkach z udziałem hulajnóg elektrycznych i urządzeń transportu osobistego są w Polsce oficjalnie zbierane od 2022 roku. Zgodnie z raportami Bursztynowicz-Pietrzak [2] oraz Zielińskiej i Skoczyńskiego [5] w roku 2022, w 555 wypadkach zginęły 3 osoby, a rannych zostało 448 osób – w 164 przypadkach obrażenia miały charakter ciężki. Z porównania danych opublikowanych za lata 2022 i 2023 wynika, że od stycznia do czerwca 2022 roku w 241 wypadkach tych pojazdów zginęły 3 osoby, a 194 zostały ranne – w tym 76 ciężko, natomiast w analogicznym okresie 2023 roku w 232 wypadkach zginęły 2 osoby, a 187 zostało rannych – w tym 58 ciężko. Uwzględniając sposób zbierania danych, na podstawie których opracowywane są doroczne statystyki, uzasadnione jest twierdzenie, iż nie dają one pełnego obrazu dotyczącego realnego poziomu bezpieczeństwa. W funkcjonującym systemie nie jest możliwe ujawnienie wszystkich zdarzeń, np. tych, w których zabezpieczeniu nie bierze udziału Policja, a ranna osoba zgłosiła się do lekarza pierwszego kontaktu lub na Szpitalnym Oddziale Ratunkowym. W raporcie Busztynowicz-Pietrzak [2] nie wyodrębniono ponadto kategorii zdarzeń, do których doszło wyłącznie pomiędzy niechronionymi uczestnikami ruchu. Jako niepokojące należy uznać zwiększającą się liczbę doniesień prasowych dotyczących zdarzeń z udziałem hulajnóg elektrycznych i urządzeń transportu osobistego. Jak podaje Budzik [1] w 2022 r. miało miejsce 60 przypadków najechania przez użytkownika hulajnogi na osobę pieszą. W zdarzeniach tych 59 osób zostało rannych. W 2022 r. doszło również do 37 wypadków z rowerzystami, spowodowanych przez użytkowników hulajnóg (31 osób rannych). Przyjmując racjonalny punkt widzenia należy już w chwili obecnej podejmować działania zmierzające w kierunku zwiększenia poziomu bezpieczeństwa związanego z wykorzystaniem lekkich osobistych środków transportu. Pierwszym krokiem w tym kierunku była nowelizacja przepisów ustawy *Prawo o ruchu drogowym*[1] (dalej także jako p.r.d.) i rozporządzenia *w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia*[2].

[1] Dz.U. z 2021 r., poz. 2328 oraz Dz.U. z 2022 r., poz.1002 i poz.1715).
[2] Dz.U. z 2021 r., poz. 1877.

W niedalekiej perspektywie należy spodziewać się zwiększenia liczby przypadków, w których będzie zachodzić konieczność przedstawienia organom procesowym ekspertyz dotyczących przebiegu i okoliczności zdarzeń z udziałem lekkich osobistych środków transportu, w tym hulajnóg elektrycznych. W chwili obecnej literatura fachowa nie dostarcza wystarczającej ilości danych, które można byłoby wykorzystać w sposób wpisujący się w „poprawność procesową". Z tego powodu uzasadnione jest prowadzenie w tym zakresie badań, ich publikacja oraz merytoryczna dyskusja w środowisku biegłych. Celem artykułu jest przedstawienie podstawowych zagadnień dotyczących hulajnóg elektrycznych oraz badań eksperymentalnych, których przedmiotem było awaryjne hamowanie hulajnóg.

2. Normy prawne określające zasady poruszania się przy wykorzystaniu wybranych lekkich osobistych środków transportu

Wobec zauważalnej tendencji wzrostowej natężenia ruchu lekkich osobistych środków transportu, uregulowano zasady związane z ich wykorzystaniem. W p.r.d. zdefiniowano następujące – nowe – grupy pojazdów:

- urządzenie wspomagające ruch (dalej także jako UWR) – urządzenie lub sprzęt sportowo-rekreacyjny, przeznaczone do poruszania się osoby w pozycji stojącej, napędzane siłą mięśni (art. 2, pkt. 18a),
- hulajnoga elektryczna – pojazd napędzany elektrycznie, dwuosiowy, z kierownicą, bez siedzenia i pedałów, konstrukcyjnie przeznaczony do poruszania się wyłącznie przez kierującego znajdującego się na tym pojeździe (art. 2, pkt. 47b),
- urządzenie transportu osobistego (dalej także jako UTO) – pojazd napędzany elektrycznie, z wyłączeniem hulajnogi elektrycznej, bez siedzenia i pedałów, konstrukcyjnie przeznaczony do poruszania się wyłącznie przez kierującego znajdującego się na tym pojeździe (art. 2 pkt. 47c).

Jasno określona została określona również definicja roweru. Jest to pojazd o szerokości nieprzekraczającej 0,9 m poruszany siłą mięśni osoby jadącej tym pojazdem; rower może być wyposażony w uruchamiany naciskiem na pedały pomocniczy napęd elektryczny zasilany prądem o napięciu nie wyższym niż 48 V o znamionowej mocy ciągłej nie większej niż 250 W, którego moc wyjściowa zmniejsza się stopniowo i spada do zera po przekroczeniu prędkości 25 km/h (art. 2 pkt. 47).

W p.r.d. określono również zasady poruszania się tymi pojazdami:

- użytkownik urządzenia wspomagającego ruch powinien korzystać z drogi dla pieszych, drogi dla pieszych i rowerów lub drogi dla rowerów; korzystając z drogi dla pieszych lub drogi dla pieszych i rowerów należy poruszać się z prędkością zbliżoną do prędkości pieszego, zachować szczególną ostrożność, ustępować pierwszeństwa pieszemu oraz nie utrudniać jego ruchu; przekraczając jezdnię, drogę dla rowerów lub torowisko, należy zachować szczególną ostrożność oraz korzystać z przejazdu dla rowerów, a w przypadku jego braku –

z przejścia dla pieszych albo przejścia sugerowanego, na zasadach określonych dla ruchu pieszych (art. 15a),

- użytkownik elektrycznej hulajnogi powinien korzystać z jezdni, po której ruch pojazdów jest dozwolony z prędkością nie większą niż 30 km/h – w przypadku gdy brakuje drogi dla rowerów, drogi dla pieszych i rowerów oraz pasa ruchu dla rowerów; korzystać wyjątkowo z drogi dla pieszych, gdy droga dla pieszych jest usytuowana wzdłuż jezdni, po której ruch pojazdów jest dozwolony z prędkością większą niż 30 km/h i brakuje drogi dla rowerów, drogi dla pieszych i rowerów oraz pasa ruchu dla rowerów (art. 33a),
- użytkownik urządzenia transportu osobistego powinien: korzystać z drogi dla rowerów lub drogi dla pieszych i rowerów jeżeli jest ona wyznaczona dla kierunku, w którym się porusza lub zamierza skręcić; korzystając z drogi dla pieszych i rowerów użytkownik jest obowiązany zachować szczególną ostrożność i ustępować pierwszeństwa pieszemu; korzystanie z drogi dla pieszych przez kierującego urządzeniem transportu osobistego jest dozwolone wyjątkowo, gdy brakuje drogi dla rowerów oraz drogi dla pieszych i rowerów (art. 33b).

W art. 20 p.r.d. określono dopuszczalną prędkość hulajnogi elektrycznej i UTO na 20 km/h (nie określono jednak ograniczenia dla UWR i – w dalszym ciągu – dla rowerów). Z opracowania Europejskiego Centrum Konsumenckiego [7] wynika, że w większości krajów Unii Europejskiej dopuszcza się maksymalną prędkość UTO 25 km/h – co jest zgodne z normą EN 17128:2020 [6]. W art. 33c p.r.d. wskazano, że kierujący hulajnogą elektryczną lub UTO – korzystając z drogi dla pieszych – jest obowiązany jechać z prędkością zbliżoną do prędkości pieszego, zachować szczególną ostrożność, ustępować pierwszeństwa pieszemu oraz nie utrudniać jego ruchu.

Sposób w jaki określono definicje typów wymienionych wcześniej urządzeń transportowych powoduje, że nie podlegają one obowiązkowi i procedurze homologacji typu pojazdu. Kluczowym jest tu warunek „kierowania wyłącznie w pozycji stojącej", który wpisuje się w art. 2 pkt. 2h-j Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) *w sprawie homologacji i nadzoru rynku pojazdów dwu lub trzykołowych oraz czterokołowców*[3] [11]. W rozporządzeniu *w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia* uszczegółowiono wymagania dla pojazdów, które wpisują się w definicję hulajnogi elektrycznej i UTO. Ich szerokość nie może przekraczać 0,9 m, a długość 1,4 m. Masa własna hulajnogi elektrycznej nie może przekroczyć 30 kg (nie określono dopuszczalnej masy dla UTO). Powinny być one ponadto wyposażone co najmniej:

- w jedno światło pozycyjne barwy białej lub żółtej selektywnej – z przodu, jedno światło odblaskowe barwy czerwonej o kształcie innym niż trójkąt oraz w jedno światło pozycyjne barwy czerwonej – z tyłu, w jedno światło odblaskowe barwy białej lub żółtej samochodowej, widoczne po obu stronach z boku,

[3] Dz.U. UE L 60 z 2.03.2013 r.

- w jeden skutecznie działający hamulec i dzwonek lub inny sygnał ostrzegawczy o nieprzeraźliwym dźwięku.

Zasady określone w tym rozporządzeniu *w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia* dopuszczają demontowanie świateł pozycyjnych, jeżeli kierujący nie jest obowiązany do ich używania podczas jazdy. Dopuszczone są również migające światła pozycyjne. Dla hulajnogi elektrycznej i UTO wymagane jest konstrukcyjne ograniczenie prędkości do 20 km/h oraz wyposażenie w numer rozpoznawczy lub kod graficzny umożliwiający identyfikację – nadany i umieszczony przez producenta w sposób trwały na ramie lub innym podobnym podstawowym elemencie konstrukcyjnym.

Z uwagi na to, że hulajnogi elektryczne nie podlegają procedurze homologacji typu pojazdu, to nie podlegają obowiązkowi rejestracji w celu dopuszczenia do ruchu drogowego. Jak podaje Tałach [4], w reakcji na rosnące ryzyko dotyczące poziomu bezpieczeństwa ruchu (obserwowany wzrost liczby obrażeń związanych z poruszaniem się na pojazdach tego typu i zakłócanie porządku ruchu) od 1 kwietnia 2024 r. Łotwa wprowadziła obowiązek rejestrowania hulajnóg elektrycznych. Rejestracja dokonywana jest na stronie internetowej Dyrekcji Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego lub osobiście w urzędzie, po przedstawieniu dokumentacji technicznej pojazdu. Wprowadzono również obowiązek noszenia kasku i odzieży ochronnej dla kierujących poniżej 17. roku życia. Działania zmierzające do uregulowania zasad użytkowania hulajnóg elektrycznych i kontroli ruchu prowadzone są również w Hiszpanii, gdzie dopuszczone do sprzedaży i ruchu urządzenia tego typu określone są na liście opracowanej przez rządowy urząd *Dirección General de Tráfico* [9]. Hulajnogi te muszą być ponadto oznaczone unikalnym, trwałym i dobrze widocznym oznaczeniem fabrycznym, obejmującym m.in. dane o maksymalnej prędkości, numer seryjny lub identyfikacyjny, numer certyfikatu, rok produkcji, markę i model. Jednocześnie – w ramach prób – prowadzone są uliczne kontrole hulajnóg przy wykorzystaniu urządzeń pomiarowych. Kontroli podlega moc silnika i rozwijana prędkość [10].

3. Układy hamulcowe w hulajnogach elektrycznych

Zgodnie z przywołanymi powyżej źródłami, hulajnogi elektryczne nie podlegają procedurze homologacji, a dla układów hamulcowych nie zostały określone żadne wymagania, na podstawie których możliwe byłoby określenie w sposób wymierny parametrów skuteczności hamowania. Jedyne (jednak niemierzalne) wymaganie określono w rozporządzeniu *w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia*, zgodnie z którym hamulec winien „działać skutecznie". Zadanie hamowania w hulajnogach elektrycznych realizowane jest przez przynajmniej jeden z niżej wymienionych układów, przy czym spotykane są również ich kombinacje:

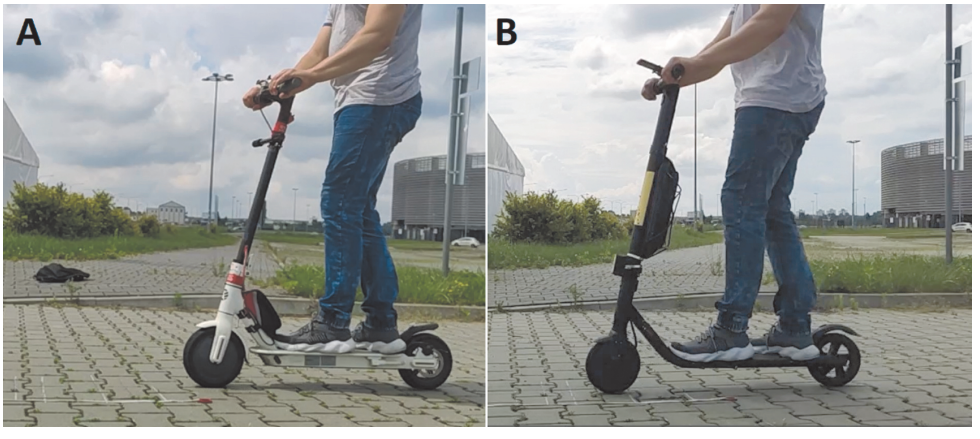
- hamulec cierny – tarczowy, bębnowy oraz cierny działający na oponę tylnego koła (tzw. nożny),
- hamulec elektroniczny (w tym regeneracyjny, pozwalający na odzyskiwanie energii mechanicznej i jej zamianę na energię elektryczną).

Za najskuteczniejsze hamulce uznać należy kolejno tarczowe i bębnowe (ze wszystkimi znanymi zaletami i wadami wynikającymi z ich konstrukcji, np. masa, możliwość kontroli stanu technicznego i regulacji, odporność na czynniki zewnętrzne). Mogą być one sterowane hydraulicznie lub mechanicznie za pomocą dźwigni zamontowanej na kierownicy. Ze względów bezpieczeństwa i stabilności w trakcie hamowania nie stosuje się ich na kole przednim. Zasada działania hamulca ciernego działającego na oponę tylnego koła oparta jest o tarcie pomiędzy tylnym błotnikiem (zamontowanym na zawiasie, który jest elementem ciernym), a oponą tylnego koła. Hamowanie inicjowane jest za pomocą nacisku stopy na błotnik. Taki sposób hamowania należy uznać za potencjalnie niebezpieczny, ponieważ wymaga on przesunięcia jednej ze stóp znajdujących się na pokładzie hulajnogi, co w sytuacji krytycznej może spowodować zaburzenie stateczności w trakcie gwałtownego manewru. Należy również podkreślić, iż w warunkach poruszania się po zanieczyszczonej lub mokrej nawierzchni, skuteczność działania takiego hamulca znacznie maleje. Zasada działania hamulca elektronicznego opiera się na wprowadzeniu silnika w taki stan pracy, w którym powstaje moment elektromagnetyczny skierowany przeciwnie do kierunku prędkości kątowej jego wirnika. Uruchomienie tego hamulca przez kierującego może odbywać się za pomocą przycisku umieszczonego na kierownicy lub za pomocą czujnika sprzężonego z dźwignią hamulca ciernego (gdy zastosowany jest hamulec tarczowy lub bębnowy). W takim przypadku hamulcem elektronicznym hamowane jest wyłącznie koło napędowe. Konstrukcje, w których stosowane są wyłącznie hamulce elektroniczne są spotykane niezwykle rzadko. Nie można ich traktować jako układów zapewniających skuteczne hamowanie w sytuacjach awaryjnych. W przypadku układów, w których uruchomienie hamulca elektronicznego następuje za pomocą układu sprzężonego z dźwignią hamulca ciernego, warunkiem poprawnej i niezawodnej pracy takiego układu jest właściwa regulacja naciągu linki. Na podstawie obserwacji i rozmów z użytkownikami hulajnóg można stwierdzić, że efektywność hamowania i zachowanie stabilności w trakcie hamowania realizowanego w sposób nagły i gwałtowny zależy od techniki hamowania i umiejętnego ustawienia ciała – podobnie jak w przypadku hamowania motocyklami.

4. Badania eksperymentalne

4.1. Metodyka badań

Badania opisane w niniejszym artykule zostały wykonane w 2020 r. w ramach pracy magisterskiej Soniaka [3], której promotorem był autor niniejszego artykułu. Określenie czasu wykonywania badań jest o tyle istotną informacją, że nie obowiązywały wówczas przepisy obowiązujące aktualnie. W badaniach wykorzystano dwie hulajnogi elektryczne (ryc. 1). Pierwszą z nich była Xiaomi M365, prywatna hulajnoga magistranta, w której czynności serwisowe i regulacyjne były wykonywane regularnie (w dalszej części artykułu będzie oznaczana jako „hulajnoga A"). Drugą z hulajnóg była Segway Ninebot ES4, dostępna w usłudze współdzielenia (w dalszej części artykułu będzie oznaczana jako „hulajnoga B").



Ryc. 1. Sylwetki hulajnóg wykorzystanych w badaniach [3].

Hulajnoga A posiadała układ hamulcowy z tylnym hamulcem tarczowym i przednim hamulcem regeneracyjnym. Oba hamulce uruchamiane były za pomocą jednej dźwigni, znajdującej się na lewym ramieniu kierownicy (hamulec zintegrowany). Baterie zasilania umieszczono pod podestem. Hulajnoga wyposażona była w opony pneumatyczne o średnicy 8,5", a jej masa własna wynosiła 12,5 kg. Maksymalna prędkość hulajnogi była równa 25 km/h. Hulajnoga B posiadała układ hamulcowy cierny działający na oponę tylnego koła i przedni hamulec regeneracyjny. Hamulec regeneracyjny uruchamiany był za pomocą dźwigni zamontowanej na lewym ramieniu kierownicy. Baterie zasilania umieszczono na sztycy kierownicy. Hulajnoga wyposażona była w opony pneumatyczne o średnicy 9,3", a jej masa własna wynosiła 14 kg. Maksymalna prędkość hulajnogi była równa 29 km/h.

Jako miarę, na podstawie której analizowano rezultaty badań, przyjęto długość drogi hamowania. Początkowo wykorzystywano aparaturę umożliwiającą pomiar opóźnienia, ale w trakcie prowadzenia jednej z prób doszło do przewrócenia się

hulajnogi, w związku z czym – obawiając się o ewentualne uszkodzenie aparatury pomiarowej zamontowanej na podeście pojazdu – odstąpiono od jej dalszego wykorzystywania. Badania prowadzono na suchej nawierzchni z kostki brukowej. Pomiary były realizowane z prędkości 18 km/h i 25 km/h, którą określano na podstawie wskazań opartych na GPS i wyświetlanych na urządzeniu zamontowanym na kierownicy. Rozpoczęcie hamowania następowało w czasie 2–3 s po rozpędzeniu pojazdu do założonej prędkości, a zakończenie pomiaru następowało w chwili zatrzymania się hulajnogi. W celu zapewnienia jak największej dokładności pomiaru długości drogi hamowania wyznaczono obszar, na którym manewr miał zostać rozpoczęty i oznaczono na nim 15 równoległych linii, rozmieszczonych co 10 cm (ryc. 1). Po obu stronach obszaru ustawiono kamery, których zadaniem było monitorowanie zmian ustawienia dłoni na kierownicy i rozpoczęcia hamowania. W przypadku hamowania realizowanego hulajnogą B, hamowanie realizowane było na dwa sposoby: obydwoma hamulcami jednocześnie oraz wyłącznie za pomocą hamulca regeneracyjnego (nie wymuszał on przemieszczania stóp na podeście, co w trakcie manewru o charakterze awaryjnym może utrudniać zachowanie równowagi). Długość drogi hamowania określano za pomocą taśmy mierniczej (o podziałce 1 cm), przy uwzględnieniu rozpoczęcia hamowania ręką lub nogą i ręką – w oparciu analizę materiału wideo i oznaczenia na podłożu. W każdym z przejazdów kierującym była ta sama osoba o masie 92 kg.

4.2. Wyniki badań i ich analiza

Wyniki badań przestawiono w tabeli 1. Wskazane w tabeli wartości zmierzonej długości drogi hamowania zaokrąglone zostały do 0,1 m.

Tabela 1. Wyniki badań długości drogi hamowania (sucha nawierzchnia z kostki brukowej).

Prędkość początkowa [km/h]	18			25		
Hulajnoga	A	B	B	A	B	B
Hamulce	oba hamulce	oba hamulce	regeneracyjny	oba hamulce	oba hamulce	regeneracyjny
S_{hmin} [m]	2,3	3,5	7,2	5,4	6,5	11,3
S_{hmax} [m]	3,3	4,5	8,4	6,4	7,7	13,1
$S_{śr}$ [m]	2,8	4,0	7,9	6,0	7,2	12,7
σ_S [m]	0,30	0,27	0,32	0,33	0,44	0,56

W przypadku badania prowadzonego z prędkości początkowej 18 km/h, dla każdego z przyjętych sposobów hamowania wykonano po 17 prób. Długość drogi hamowania S_h hulajnogi A mieściła się w przedziale 2,3–3,3 m. Obliczona wartość

średnia $S_{śr}$ była równa 2,8 m, a odchylenie standardowe σ_S było równe 0,3 m. Długość drogi hamowania S_h hulajnogi B hamowanej dwoma hamulcami mieściła się w przedziale 3,5–4,5 m. Obliczona wartość średnia $S_{śr}$ była równa 4,0 m, a odchylenie standardowe σ_S było równe 0,27 m. Długość drogi hamowania S_h hulajnogi B hamowanej wyłącznie hamulcem regeneracyjnym mieściła się w przedziale 7,2–8,4 m. Obliczona wartość średnia $S_{śr}$ była równa 7,9 m, a odchylenie standardowe σ_S było równe 0,32 m. Porównanie wyników uzyskanych podczas hamowania hulajnóg przy wykorzystaniu obu hamulców potwierdza przewidywalną większą skuteczność układu wykorzystanego w hulajnodze A (hamulec tarczowy tylnego koła i elektroniczny – rekuperacyjny w przednim kole). W trakcie hamowania tą hulajnogą występowała jednak tendencja do blokowania tylnego koła i zaburzenia stateczności. Była ona nieco trudniejsza do opanowania w porównaniu do hulajnogi B, na której w trakcie hamowania hamulcem mechanicznym tylnego koła należało przesuwać jedną z nóg na podeście. Rozrzut wyników definiowany odchyleniem standardowym σ_S był na porównywalnym poziomie.

W przypadku badania prowadzonego z prędkości początkowej 25 km/h, dla każdego z przyjętych sposobów hamowania wykonano po 12 prób. Długość drogi hamowania S_h hulajnogi A mieściła się w przedziale 5,4–6,4 m. Obliczona wartość średnia $S_{śr}$ była równa 6,0 m, a odchylenie standardowe σ_S było równe 0,33 m. Długość drogi hamowania S_h hulajnogi B hamowanej obydwoma hamulcami mieściła się w przedziale 6,5–7,7 m. Obliczona wartość średnia $S_{śr}$ była równa 7,2 m, a odchylenie standardowe σ_S było równe 0,44 m. Długość drogi hamowania S_h hulajnogi B hamowanej wyłącznie hamulcem regeneracyjnym mieściła się w przedziale 11,3–13,1 m. Obliczona wartość średnia $S_{śr}$ była równa 12,7 m, a odchylenie standardowe σ_S było równe 0,56 m. Porównanie wyników uzyskanych podczas hamowania hulajnóg z prędkości 25 km/h przy wykorzystaniu obu hamulców potwierdza – tak jak w poprzednim przypadku – większą skuteczność układu wykorzystanego w hulajnodze A (hamulec tarczowy i elektroniczny w przednim kole) w stosunku do układu w hulajnodze B. Przy większej prędkości początkowej rozrzut wyników, definiowany odchyleniem standardowym σ_S, był większy i proporcjonalny do długości drogi hamowania.

Z uwagi na przyjętą metodykę identyfikacji rozpoczęcia hamowania oraz pomiaru długości i zaokrąglenia tej wartości w tabeli 1 należy przyjąć, że dokładność określenia długości drogi hamowania była równa 0,15 m. Na tej podstawie można stwierdzić, że maksymalna wartość błędu względnego pomiaru była równa ok. 4,6% (taka wartość błędu dotyczyła najkrótszego zmierzonego odcinka w przypadku hamowania hulajnogą A z prędkości początkowej 18 km/h przy wykorzystaniu obu hamulców).

W tabeli 2 przestawiono wyniki obliczeń wartości opóźnienia hamowania a_h i czasu hamowania t_h, które pozwalają na bardziej czytelne porównanie wyników. Należy podkreślić, że parametry te nie są wynikiem pomiaru, lecz zostały obliczone

w oparciu o powszechnie znane zależności fizyczne (1), (2), na podstawie określonej wartości średniej długości drogi zatrzymania $S_{śr}$ i przy znanej prędkości początkowej V_0.

$$a_h = \frac{V_0^2}{2 \cdot S_{śr}} \tag{1}$$

$$t_h = \frac{V_0}{a_h} \tag{2}$$

Tabela 2. Obliczone wartości opóźnienia a_h i czasu hamowania t_h (sucha nawierzchnia z kostki brukowej).

Prędkość początkowa [km/h]	18			25		
Hulajnoga	A	B	B	A	B	B
Hamulce	oba hamulce	oba hamulce	regeneracyjny	oba hamulce	oba hamulce	regeneracyjny
Opóźnienie [m/s2]	4,5	3,1	1,6	4,0	3,3	1,9
Czas hamowania [s]	1,1	1,6	3,2	1,7	2,1	3,7

5. Dyskusja i podsumowanie

Biorąc pod uwagę tendencje wykorzystania hulajnóg elektrycznych należy spodziewać się zwiększenia liczby zdarzeń z udziałem takich pojazdów, w których użytkownicy będą doznawać obrażeń. Dostęp do danych, na podstawie których możliwe jest opisanie specyfiki ruchu i zachowania się takich środków transportu, jest warunkiem koniecznym dla działań zmierzających nie tylko do zwiększenia poziomu bezpieczeństwa, ale także w przypadkach, w których zachodzić będzie konieczność wypowiedzenia się w kwestii przyczyn zdarzeń i możliwości ich uniknięcia. Badania prowadzone w kierunkach związanych z określeniem tych parametrów są więc uzasadnione i konieczne.

Wyniki obliczonych wartości opóźnienia hamowania potwierdzają artykułowany wcześniej wniosek dotyczący większej skuteczności układu hamulcowego, w jaki wyposażona była hulajnoga A w porównaniu do hulajnogi B. Na uwagę zasługuje zmniejszenie wartości osiąganego opóźnienia w hulajnodze A w sytuacji, w której hamowanie realizowane było przy większej prędkości początkowej. Problem ten nie był przedmiotem szczególnych analiz na etapie opracowania niniejszego artykułu. Wskazywane zależności nie uwzględniają zagadnienia dokładności pomiarów i ich możliwego wpływu na dokładność obliczeń parametrów przedstawionych w tabeli 2. Należy jednak zaznaczyć, że wyniki analizowane były z taką samą precyzją dla obu hulajnóg i dla obu przyjętych scenariuszy wykorzystania układu hamulcowego.

Odnosząc się do rezultatów badań hulajnogi B należy stwierdzić, że nie zaobserwowano zmniejszenia wartości opóźnienia hamowania wraz ze wzrostem prędkości początkowej (jak w przypadku hulajnogi A). W przypadku hamowania hulajnogi B przy wykorzystywaniu obu hamulców, średnia wartość opóźnienia hamowania z prędkości początkowej 25 km/h była nieznacznie większa w porównaniu do hamowania z prędkości 18 km/h. Analogiczną tendencję można zauważyć w przypadku hamowania wyłącznie hamulcem regeneracyjnym. Jako prawdopodobną przyczynę takiego stanu można wskazać zwiększenie skuteczności działania hamulca elektronicznego wraz ze zwiększeniem długości czasu jego działania lub prędkości.

Wykorzystując wartości opóźnień podane w tabeli 2 w rekonstrukcji wypadku należy zachować rozwagę, ponieważ są one wynikiem obliczeń, zrealizowanych na podstawie średniej wartości długości drogi hamowania zmierzonej eksperymentalnie. W ocenie autora w toku omawianych tu badań nie uwzględniono ponadto wszystkich możliwych zmiennych, które potencjalnie mogą mieć wpływ na jego wynik (stan i typ nawierzchni, położenie środka ciężkości, typ ogumienia, sposób regulacji linki hamulcowej – w przypadku zintegrowanego systemu uruchamiania układu, itd.). W przypadku sporządzania ekspertyzy dotyczącej przebiegu wypadku, warunki jego zaistnienia mogą różnić się od panujących w trakcie omawianych badań. Z punktu widzenia praktyki eksploatacyjnej i ewentualnego opiniowania, z ostrożnością należy także podchodzić do zagadnienia hamowania z wykorzystaniem hamulca regeneracyjnego. Nie ustalono przyczyny występowania różnic wartości opóźnienia hamowania w zależności od zmian prędkości początkowej. Rozważając możliwą przyczynę zmniejszenia opóźnienia hamowania w hulajnodze A wraz z niewielkim zwiększeniem prędkości początkowej, jako mało prawdopodobne uznano, by związane to było ze skutkiem oddziaływań tribologicznych. Sformułowano hipotezę, w której jako potencjalną przyczynę wskazuje się problem z odprowadzeniem energii, której rekuperować „już" nie można, a także przegrzanie układu elektrycznego. Zagadnienia te nie były jednak przedmiotem szczegółowej analizy i nie weryfikowano tej hipotezy. Przy aktualnym stanie wiedzy wskazuje się powściągliwość w odniesieniu do prezentowanych wyników w przypadkach analizy wypadków, w których poziom naładowania baterii w hulajnodze (z układem odzyskiwania energii) był wysoki oraz gdy hamowanie wykonywane było na odcinku przebiegającym na spadku.

Hulajnogi elektryczne należy uznać za stosunkowo nowy środek transportu, z którym specjaliści zajmujący się rekonstrukcją wypadków spotykają się w praktyce eksperckiej. Należy zauważyć, że specyfika kierowania hulajnogą jest inna niż w pozostałych pojazdach jednośladowych. Kierowca utrzymuje pozycję stojącą, a jego sylwetka nie jest ograniczana przez żadne elementy konstrukcyjne (jak np. na skuterze lub rowerze). W dokonywanej w ekspertyzach ocenie możliwości uniknięcia wypadku przez użytkowników hulajnóg elektrycznych należałoby rozważać

nie tyle jej zatrzymanie, a zmniejszenie prędkości do prędkości ruchu pieszego. Przy prędkości jazdy zbliżonej do prędkości ruchu pieszego obiektywnie łatwym jest zejście z podestu hulajnogi i kontynuowanie czynności obronnych „pieszo". Ryzyko wystąpienia poważnych obrażeń – jeżeli rozważamy zderzenia pomiędzy niechronionymi uczestnikami ruchu – jest wówczas statystycznie małe.

Bibliografia

1. Budzik, T. (2023). *Wypadki na elektrycznych hulajnogach – jest ich więcej niż można było sądzić*. https://e.autokult.pl/wypadki-na-elektrycznych-hulajnogach-jest-ich-wiecej-niz-mozna-bylo-sadzic,6881645567392672a
2. Bursztynowicz-Pietrzak, D. (2024). *Stan bezpieczeństwa ruchu drogowego oraz działania realizowane w tym zakresie w 2023 r.* https://www.krbrd.gov.pl/wp-content/uploads/2024/05/Stan-bezpieczenstwa-ruchu-drogowego-oraz-dzialania-realizowane-w-tym-zakresie-w-2023-r.pdf
3. Soniak, A. (2020). *Ocena wybranych parametrów dynamiki ruchu hulajnogi z napędem elektrycznym* [Nieopublikowana praca magisterska]. Politechnika Lubelska.
4. Tałach, S. (2024). *Hulajnogi elektryczne będzie trzeba rejestrować? Znamy plany ministerstwa.* https://biznes.interia.pl/gospodarka/news-hulajnogi-elektryczne-bedzie-trzeba-rejestrowac-znamy-plany-,nId,7506013
5. Zielińska, A., Skoczyński, P. (2023). Stan bezpieczeństwa ruchu drogowego w Polsce w 2023 roku. Analiza wpływu zmian w ustawie Prawo o ruchu drogowym wprowadzonych w 2021 roku na bezpieczeństwo ruchu drogowego. https://www.krbrd.gov.pl/wp-content/uploads/2024/07/STAN-BEZPIECZENSTWA-RUCHU-DROGOWEGO-W-POLSCE-W-2023-ROKU-analiza-przed-i-po.pdf
6. Europejski Komitet Normalizacyjny. (2020). *Lekkie pojazdy silnikowe do przewozu osób i towarów oraz związane z nimi urządzenia, które nie podlegają homologacji typu do użytku na drogach – Lekkie pojazdy elektryczne osobiste (PLEV) – Wymagania i metody badań* (PN-EN 17128:2020).
7. Europejskie Centrum Konsumenckie. (2023). *Przegląd przepisów dla e-hulajnóg w Europie.* https://konsument.gov.pl/przeglad-przepisow-dla-e-hulajnog-w-europie/
8. B.a. (2023). „Pękło" 100 tysięcy. E-hulajnóg na minuty w Polsce nadal przybywa, cztery firmy dzielą tort. *Smartride.pl*. https://smartride.pl/peklo-100-tysiecy-e-hulajnog-na-minuty-w-polsce-nadal-przybywa-cztery-firmy-dziela-tort/
9. B.a. (2024). Elektryczne hulajnogi tylko z certyfikatem – Hiszpania wprowadziła nowe przepisy sprzętowe regulujące mikromobilność. *Smartride.pl*. https://smartride.pl/elektryczne-hulajnogi-tylko-z-certyfikatem-hiszpania-wprowadzila-nowe-przepisy-sprzetowe-regulujace-mikromobilnosc/
10. B.a. (2024). Hiszpania postraszyła: uliczna łapanka i kontrole elektrycznych hulajnóg na dynamometrze. Film zaniepokoił użytkowników w Polsce. *Smartride.pl*. https://smartride.pl/hiszpania-postraszyla-uliczna-kontrola-elektrycznych-hulajnog-na-dynamometrze-film-zaniepokoil-uzytkownikow-w-polsce/

Akty prawne

1. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 168/2013 z dnia 15 stycznia 2013 r. *w sprawie homologacji i nadzoru rynku pojazdów dwu lub trzykołowych oraz czterokołowców* (Dz.U. UE L 60 z 2.03.2013 r.).
2. Rozporządzenie ministra infrastruktury z dnia 6 października 2021 r. *zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia* (Dz.U. z 2021 r., poz. 1877).
3. Ustawa z dnia 20 czerwca 1997 r. *Prawo o ruchu drogowym* (Dz.U. z 2021 r., poz. 2328 oraz Dz.U. z 2022 r., poz. 1002 i poz. 1715).

* * *

Experimental studies on electro-motor driven scooters braking on dry cobblestone road surfaces

Abstract
The aim of the paper is to discuss the issues of safety in the context of the use of lightweight personal transportation vehicles. The main aspects of legal regulations concerning micromobility are introduced together with braking systems implemented in electric scooters. The essential part of the paper is devoted to discussion of the experimental studies on the braking of two models of electric scooters with different braking systems. In the tests first the braking distance was measured and next braking deceleration was calculated.

Key words
Electric scooters, braking, braking deceleration, experimental studies, micromobility, lightweight personal transportation vehicles.