



Analiza działania i badanie czasu reakcji układu hamulcowego motocykla

KAMIL KRAKOWIAK¹, ANDRZEJ DĘBOWSKI²

¹Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Instytut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej, ul. gen. S. Kaliskiego 2,
00-908 Warszawa, kamil.krakowiak@wat.edu.pl

²Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Instytut Pojazdów i Transportu, ul. gen. S. Kaliskiego 2,
00-908 Warszawa, andrzej.debowski@wat.edu.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono opis oraz metodykę badań układów hamulcowych w pojazdach jednośladowych. Zaprezentowano dokumentację oraz dyrektywę, na bazie której przeprowadzane są badania układów hamulcowych motocykli. Na tej podstawie zapisano definicje trzech głównych rodzajów hamulców poddawanych badaniom. Opisano dwa główne typy badań przeprowadzanych na podstawie Dyrektywy Rady 93/14/EWG z dnia 5 kwietnia 1993 roku w sprawie hamowania dwu- lub trzykołowych pojazdów silnikowych. Wskazano podstawowe warunki, w jakich przeprowadzane są badania typu 0 oraz 1, a także badania z mokrym układem hamulcowym. Opisano budowę stanowiska, które posłużyło do wyznaczenia wartości siły oraz ciśnienia występującego na pojedynczym zacisku hamulcowym obwodu hamulcowego w badanym motocyklu. W dalszej części artykułu przedstawiono metodykę opracowania wyników badań stanowiskowych. Przeanalizowano działanie każdego obwodu hamulcowego oddzielnie. Zaprezentowano wykresy opisujące wyznaczone czasy reakcji dla obydwu obwodów hamowania.

Słowa kluczowe: układ hamulcowy, czas reakcji, badania układu hamulcowego motocykla, wartość ciśnienia w układzie hamulcowym

DOI: 10.5604/01.3001.0053.6746

1. Wprowadzenie

Obecnie pojazdy jednośladowe są bardzo powszechne i często spotykane w ruchu drogowym. Zaliczamy do nich m.in.: większość rowerów, motocykle, z wykluczeniem motocykli z wózkiem bocznym, motorowery, a także bardzo popularne hulajnogi elektryczne. Bezsporną zaletą tego typu pojazdów jest niewielka szerokość, dzięki czemu poruszanie się nimi w ruchu miejskim jest dużo łatwiejsze niż w przypadku pojazdów wielośladowych. Dzięki jednośladowej konstrukcji możliwy jest także odmienny sposób manewrowania niż w pojazdach dwuśladowych — przez balansowanie zarówno motocyklem, jak i ciałem przez kierującego. Jednocześnie wynika z tego podstawowa wada jednośladow, którą jest łatwość utraty stateczności i panowania nad pojazdem. Jest to spowodowane tym, że przy niskich prędkościach występuje mały moment żyroskopowy. Wraz ze wzrostem prędkości pojazdu wartość momentu żyroskopowego wytwarzanego przez obracające się koła motocykla wzrasta, co powoduje większą stabilność jednośladu. Mała powierzchnia styku koła z jezdnią, może być przyczyną powstawania drgań typu *capsize* [1].

Jednym z najważniejszych i najczęściej wykonywanych manewrów w ruchu drogowym jest manewr hamowania. Na jego skuteczność oraz przebieg wpływ ma nie tylko sprawność i stan techniczny układu hamulcowego motocykla, lecz także czynnik ludzki. W momencie wystąpienia sytuacji awaryjnych, w których celem kierowcy jest zredukowanie prędkości lub nawet zatrzymanie pojazdu, aby uniknąć kolizji drogowej, czynnik ludzki odgrywa znaczącą rolę. Najważniejszy jest wtedy czas reakcji kierowcy (czas, jaki upływa od chwili zauważenia zagrożenia do uruchomienia układu hamulcowego pojazdu) [2]. Z wymienionych wcześniej pojazdów jednośladowych największą dynamiką charakteryzują się motocykle, stąd też układ hamulcowy odgrywa w nich bardzo istotną rolę. Przez ostatnie dekady producenci motocykli intensywnie rozwijali ich konstrukcję, co przyczyniło się do zwiększania wskaźnika mocy do masy pojazdu, tym samym wymusiło rozwój układów hamulcowych. Obecnie każdy nowo wyprodukowany motocykl dopuszczony na rynek europejski musi być wyposażony w minimum jeden system wspomagający hamowanie. Aktualnie najczęściej stosowanym systemem wspomagającym hamowanie jest CBS lub ABS [3, 4, 5, 6].

System CBS to w bezpośrednim tłumaczeniu kombinowany układ hamulcowy. Obecnie jest najczęściej spotykany w motocyklach z silnikami o małej pojemności skokowej, ponieważ w większości pojazdów standardem jest system ABS. Kombinowany układ hamulcowy powoduje, że przez naciśnięcie dźwigni przedniego lub tylnego hamulca część siły hamowania jest przekazywana na drugi obwód hamulcowy. Układ hamulcowy CBS bazuje na mechanizmie, który jest połączony z przednim kołem i dodatkową pompą hamulcową [5, 6]. Wspomaganie odpowiada za przenoszenie płynu hamulcowego pomiędzy obwodami hamulcowymi podczas hamowania. Każdy zacisk w systemie ma trzy tłoki: tłoki środkowe, zewnętrzne tłoki przedniego koła

i zewnętrzne tłoki tylnego koła. Takie rozwiązanie umożliwia stabilizację motocykla przez odpowiednie sterowanie ciśnieniem pomiędzy obwodami hamowania [7].

Układy hamulcowe, znajdujące się we współczesnych motocyklach, podlegają restrykcyjnym procedurom badań, a także wymaganiom technicznym określonym w Dyrektywie Rady 93/14/EWG z dnia 5 kwietnia 1993 roku w sprawie hamowania dwu- lub trzykołowych pojazdów silnikowych oraz Regulaminie nr 78 Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych [10, 13, 16, 17]. Według zapisów dokumentacji układ hamulcowy motocykla oznacza połączenie części innych niż silnik, których działanie ma na celu stopniowe ujemne przyspieszenie pojazdu znajdującego się w ruchu albo spowodowanie zatrzymania go, lub też utrzymanie go w bezruchu, jeśli został już zatrzymany. Układ hamulcowy musi pozwalać na trzy sposoby hamowania: zasadnicze, pomocnicze (jeśli ma zastosowanie) oraz postojowe (jeśli ma zastosowanie). Hamowanie zasadnicze musi umożliwiać kontrolę ruchu pojazdu oraz bezpieczne zatrzymanie go szybko i skutecznie, niezależnie od prędkości lub obciążenia pojazdu, na dowolnym nachyleniu powierzchni w górę lub w dół. Stopniowe działanie takiego hamowania musi być możliwe [9]. Kierowca musi być w stanie wykonać czynność hamowania ze swojego siedzenia bez zdejmowania rąk z urządzenia kierującego. Hamowanie pomocnicze (awaryjne) musi umożliwiać zatrzymanie pojazdu na rozsądnym odcinku w przypadku niesprawności hamowania zasadniczego. Stopniowe działanie takiego hamowania musi być możliwe. Kierowca musi być w stanie wykonać taką czynność ze swojego siedzenia, trzymając co najmniej jedną rękę na urządzeniu kierującym [8]. Dla celów tych przepisów zakłada się, że w jednym momencie nie może zdarzyć się więcej niż jedna niesprawność hamowania zasadniczego. Hamulec postojowy musi umożliwiać zatrzymanie pojazdu nieruchomego na nachylonej w górę lub w dół powierzchni, nawet podczas nieobecności kierowcy. Części robocze są wówczas utrzymywane w zamkniętej pozycji przez urządzenie całkowicie mechaniczne. Kierowca musi być w stanie wykonać taką czynność hamowania ze swojego siedzenia [6]. Elementy, z których składa się układ hamulcowy, to m.in.: przewody hydrauliczne, pompa hamulcowa, tarcze hamulcowe, zaciski oraz wkładki cierne. W układzie hamulcowym motocykla wszystkie elementy składają się na ogólną sprawność całego układu, jednak najważniejszą rolę odgrywają pompa hamulcowa, przewody hydrauliczne oraz zaciski hamulcowe przenoszące siłę hamowania na tarcze [11, 18]. Z tego względu przeprowadzono badania, które miały wskazać wartości siły i ciśnienia występujące podczas hamowania.

W związku z tym artykuł dotyczy opisu przeprowadzonych badań stanowiskowych mających na celu wyznaczenie średniego czasu zadziałania układu hamulcowego. Aby osiągnąć powyższe wyniki, konieczne było sprawdzenie wartości siły i ciśnienia występujących w układzie hamulcowym. W związku z bardzo szerokim obszarem badań układów hamulcowych, zawartych w regulaminach i dyrektywie, w artykule nie uwzględniono ich pełnego zakresu. Do wykonania pomiarów opisanych w treści pracy posłużono się motocyklem, który nie znajdował się w ruchu postępowym. Takie rozwiązanie było wystarczające, aby osiągnąć zamierzone cele.

2. Badanie hamowania oraz skuteczności układów hamulcowych

Skuteczność ustalona dla układów hamulcowych bazuje na drodze hamowania i/lub na średnim całkowitym zmniejszeniu prędkości. Skuteczność układu hamulcowego określana jest pomiarem drogi hamowania w odniesieniu do prędkości początkowej pojazdu i/lub pomiarem średniego całkowitego spowolnienia podczas badania. Droga hamowania to odległość przebyta przez pojazd od momentu, kiedy kierowca zaczyna uruchamiać urządzenie do sterowania i kontroli układu hamulcowego, aż do momentu zatrzymania pojazdu. Prędkość początkowa pojazdu (v_1) to prędkość uzyskiwana w momencie, kiedy kierowca zaczyna uruchamiać urządzenie do sterowania i kontroli układu hamulcowego; prędkość ta jest nie mniejsza niż 98% prędkości zalecanej dla danego badania [12]. Średnie całkowite spowolnienie prędkości (d_m) jest obliczane jako uśrednione zmniejszenie prędkości w odniesieniu do odległości na odcinku $v_b - v_e$ zgodnie z następującym wzorem:

$$d_m = \frac{v_b^2 - v_e^2}{25,92(S_e - S_b)} \text{ m/s}^2, \quad (1)$$

gdzie: d_m — średnie całkowite spowolnienie,
 v_b — prędkość pojazdu odpowiadająca $0,8 v_1$ w [km/h],
 v_e — prędkość pojazdu odpowiadająca $0,1 v_1$ w [km/h],
 S_b — odległość przebyta między v_1 a v_b w metrach,
 S_e — odległość przebyta między v_1 a v_e w metrach.

Prędkość i odległość są określane dzięki przyrządom działającym z dokładnością do $\pm 1\%$ przy prędkości zalecanej dla badania. Wartość d_m może być wskazana innymi metodami niż pomiar prędkości i odległości; w tym przypadku dokładność d_m zawiera się w granicach $\pm 3\%$. W przypadku homologacji pojazdu skuteczność hamowania musi być mierzona podczas badań drogowych, które są przeprowadzane w następujących warunkach:

- stan pojazdu w odniesieniu do jego masy musi być ustalony dla każdego typu badania oraz określony w sprawozdaniu z badania;
- badanie musi być przeprowadzone przy prędkości i w sposób ustalony dla każdego typu badania: jeśli maksymalna prędkość pojazdu nie odpowiada prędkości ustalonej, wówczas badanie musi zostać przeprowadzone w zapewnionych warunkach alternatywnych;
- ustalona skuteczność musi być uzyskana bez blokowania koła (kół), bez odchylenia od kierunku jazdy pojazdu oraz bez żadnych nieprawidłowych drgań;
- podczas badania siła oddziaływania na urządzenie do sterowania i kontroli hamulców w celu uzyskania ustalonej skuteczności nie może przekroczyć maksimum określonego dla kategorii badanego pojazdu [13].

Hamowanie zasadnicze jest podstawowym rodzajem hamowania stosowanym nie tylko w motocyklach, lecz także we wszystkich innych pojazdach silnikowych. Proces badania hamowania zasadniczego jest ściśle określony w Dyrektywie Rady 93/14/EWG i musi zostać przeprowadzony w następujących warunkach:

- w momencie rozpoczęcia badania lub każdej serii badań opony muszą być zimne, a ich ciśnienie musi być takie, jakie jest ustalone dla faktycznego stanu obciążenia kół, gdy pojazd jest nieruchomy;
- jeżeli wymagane jest badanie w stanie z ładunkiem, pojazd musi być obciążony ładunkiem rozłożonym zgodnie z zaleceniami producenta;
- hamulce muszą być zimne we wszystkich badaniach typu 0: hamulec jest uważany za zimny, jeżeli temperatura zmierzona na tarczy lub na zewnętrznej stronie bębna jest niższa niż 100°C;
- kierowca musi siedzieć na siodełku jak przy normalnej jeździe oraz przez cały czas trwania badania musi utrzymać taką samą pozycję;
- obszar do przeprowadzania badania musi być równy, suchy, o powierzchni dającej dobrą przyczepność;
- badanie musi być przeprowadzane w momencie, kiedy nie ma wiatru mogącego wpłynąć na jego wyniki [13, 19].

Dyrektywa Rady 93/14/EWG z dnia 5 kwietnia 1993 roku w sprawie hamowania dwu- lub trzykołowych pojazdów silnikowych narzuca przeprowadzenie badań typu 0 i 1. Badanie typu 0 określa skuteczność układu hamulcowego z wykorzystaniem zimnych hamulców niepracujących w temperaturze roboczej. Badanie to dla motocykli z załączonym silnikiem musi być przeprowadzane w warunkach bez ładunku i przy różnych prędkościach, z których najniższa jest równa 30% prędkości maksymalnej pojazdu, a najwyższa 80% prędkości maksymalnej lub 160 km/h, w zależności od tego, która z tych wartości jest niższa. Mierzy się maksymalne możliwe wartości skuteczności, które wraz z zachowaniem się pojazdu muszą zostać zapisane w sprawozdaniu z badania. W przypadku gdy można zastosować oddzielnie dwa układy hamowania zasadniczego, muszą być one badane razem i równocześnie, z pojazdem bez ładunku [13]. Przepisy specjalne odnoszą się także do badań z mokrymi hamulcami. W przypadku gdy hamulce są osłonięte, nie jest konieczne przeprowadzanie badań typu 0 na pojazdach wyposażonych w hamulce bębnowe lub hamulce w pełni osłonięte nienarażone na działanie wody w normalnych warunkach. W przypadku odsłoniętych hamulców tarczowych strumień wody musi być skierowany na powierzchnię tarczy z wyprzedzeniem 45° w stosunku do wkładek ciernych. Natężenie przepływu strumienia wody musi wynosić 15 l/h dla każdego hamulca [13, 19].

Badanie typu 1 określa ubytek skuteczności hamowania. Hamulce zasadnicze wszystkich motocykli (z przyczepą boczną lub bez), także trzykołowych, muszą być badane serią powtarzanych zatrzymań w warunkach pojazdu z ładunkiem, zgodnie z wymaganiami określonymi w dyrektywie. W przypadku pojazdów wyposażonych

w układ hamulcowy mieszany układ hamowania zasadniczego wystarczy poddać badaniu typu 1. Badanie ubytku skuteczności przeprowadza się w serii dziesięciu powtarzalnych zatrzymań. Pojazd oraz hamulec (hamulce), które są badane, muszą być w znacznym stopniu pozbawione wilgoci, a hamulec (hamulce) musi być zimny. Hamulec uważa się za zimny, gdy temperatura mierzona na tarczy lub na zewnętrznej bębna wynosi poniżej 100°C. Początkowa prędkość badania wynosi:

- w przypadku badania hamulca lub hamulców przednich 70% maksymalnej prędkości pojazdu lub 100 km/h, w zależności od tego, która jest niższa;
- w przypadku badania hamulca lub hamulców tylnych 70% maksymalnej prędkości pojazdu lub 80 km/h, w zależności od tego, która jest niższa;
- w przypadku badania układu hamulcowego mieszanego 70% maksymalnej prędkości pojazdu lub 100 km/h, w zależności od tego, która jest niższa [13].

Odległość między rozpoczęciem jednego zatrzymania i rozpoczęciem następnego wynosi tysiąc metrów.

Na końcu badania typu 1 skuteczność resztkowa układu hamowania zasadniczego musi zostać zmierzona w takich samych warunkach (w szczególności przy możliwie jak najbardziej stałej sile na urządzeniu do sterowania i kontroli o średniej wartości nieprzekraczającej średniej siły faktycznie stosowanej) jak dla badania typu 0 z silnikiem odłączonym od układu przeniesienia napędu (warunki temperatury mogą być różne). Taka skuteczność resztkowa nie może być: jeżeli została wyrażona jako ujemne przyspieszenie, niższa niż 60% wartości ujemnego przyspieszenia otrzymanego podczas badania typu 0 lub jeżeli została wyrażona jako droga hamowania, wyższa niż wartość drogi hamowania obliczona zgodnie z następującym wzorem:

$$S_2 = 1,67 S_1 - 0,67aV \quad (2)$$

gdzie: S_1 — droga hamowania otrzymana podczas badania typu 0,
 S_2 — droga hamowania zarejestrowana podczas badania skuteczności resztkowej,
 a — 0,1,
 V — prędkość początkowa przy rozpoczęciu hamowania.

3. Aparatura pomiarowa

W celu analizy czasu narastania ciśnienia w danym obwodzie hamulcowym zbadano zmiany wartości napięcia występujące podczas sterowania suwakiem potencjometru w danym zakresie jego pracy. Otrzymane wartości napięcia zostały przekształcone w wyniki ciśnienia, a z nich wyznaczono wartość siły występującą w obwodach układu hamulcowego.

Do realizacji pomiaru wartości ciśnienia występującego w układzie hamulcowym użyto tensometrycznych czujników ciśnienia względnego CL1 pochodzących z Zakładu Elektroniki Pomiarowej Wielkości Nielektrycznych. Parametry techniczne potencjometru przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Podstawowe parametry techniczne potencjometru 50KBX2 [14]

Parametr techniczny	Wartość
Wartość rezystancji	50 [k Ω]
Charakterystyka rezystancji	Liniowa
Wyjście potencjometryczne	Stereo
Obciążenie elektryczne	0,05 [W]
Długość osi	26,5 [mm]
Tolerancja plus/minus	20%
Rezystancja tolerancji	100 [M Ω] (500 V/DC)
Rodzaj	Potencjometr logarytmiczny
Tłumienie	80 [dB] (10 k Ω), 90 [dB] (50 k Ω), 100 [dB] (100 k Ω)
Żywotność	15 tys. cykli
Dopasowanie kanałów	(-40 do 0 dB) = korzystniej 3 [dB]

Czujniki tensometryczne mocowane są bezpośrednio na membranie pomiarowej, która ugina się pod naporem mierzonego medium. Wyniki były rejestrowane z częstotliwością 1 kHz za pomocą karty akwizycji danych USB DAQmx 6009 i aplikacji pomiarowej opracowanej z wykorzystaniem środowiska programistycznego LabVIEW. Badanie ograniczało się do pomiaru wartości napięcia zarejestrowanej za pomocą czujnika potencjometrycznego (rejestracja przemieszczenia dźwigni hamulca) oraz tensometrycznych czujników ciśnienia. Otrzymane wyniki zostały przekształcone za pomocą obliczeń analitycznych do wartości otrzymanego ciśnienia oraz siły na pojedynczym tłoczku zacisku hamulcowego.

Wszystkie elementy były zasilane za pomocą stabilizowanego zasilacza laboratoryjnego. Dźwignie przedniego oraz tylnego hamulca naciskano ze zmienną siłą w różnych odstępach czasu, aby odzwierciedlić rzeczywiste sytuacje drogowe. Sterowanie suwakiem potencjometru odbywało się przez ciągnięcie tego suwaka przez połączoną z nim dźwignię hamulca (zob. rys. 3). Wartość napięcia wyjściowego mostka jest wprost proporcjonalna do ciśnienia odkształcającego membranę. Zaletą czujników tensometrycznych jest odporność na uderzenia i wibracje, wysoka czułość oraz dokładność pomiaru. Czujnik umożliwia pomiar ciśnień statycznych i wolnozmiennych, zapewnia wysoką stabilność i powtarzalność w szerokim zakresie temperatur pracy [15].

Czujniki ciśnienia zostały zamocowane do zacisków hamulcowych w miejscu, w którym przykręcone są przewody hamulcowe. Sposób montażu został przedstawiony na rysunkach 1 i 2.

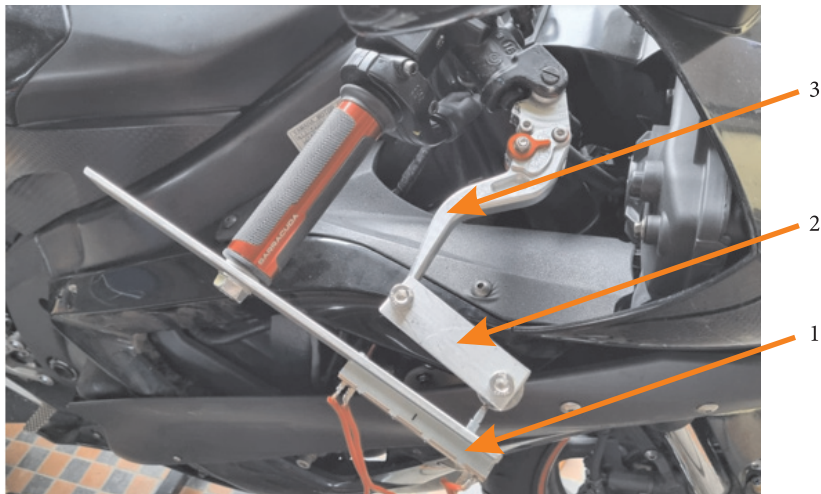


Rys. 1. Widok tensometrycznego czujnika ciśnienia zamontowanego w przednim obwodzie hamulcowym motocykla

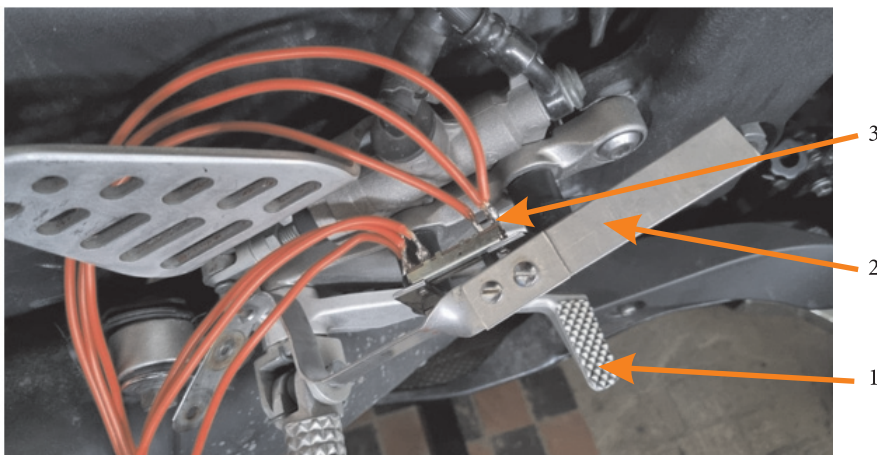


Rys. 2. Widok tensometrycznego czujnika ciśnienia zamontowanego w tylnym obwodzie hamulcowym motocykla

Do pomiaru czasów narastania ciśnienia w układzie hamulcowym wykorzystano potencjometry logarytmiczne 50KBX2 oraz B50K. Potencjometr 50KBX2 został użyty do pomiarów w tylnym obwodzie hamulcowym motocykla, natomiast potencjometr B50K przedstawiony na rysunku 3 posłużył do przeprowadzenia pomiarów w przednim obwodzie hamulcowym. Suwak potencjometru był sterowany przez ruch dźwigni uruchamiającej działanie tylnego lub przedniego układu hamulcowego.



Rys. 3. Sposób montażu potencjometru w przednim obwodzie hamulcowym: 1 — potencjometr, 2 — łącznik przegubowy, 3 — dźwignia hamulca przedniego



Rys. 4. Sposób montażu potencjometru w tylnym obwodzie hamulcowym: 1 — dźwignia hamulca tylnego, 2 — łącznik potencjometru, 3 — potencjometr

Płaskownik, do którego przykręcony został potencjometr, zamocowano w miejscu ciężarka kierownicy. Dzięki takiemu rozwiązaniu zapewniono dużą sztywność zamontowanych elementów w celu osiągnięcia dużej dokładności wykonanych pomiarów.

Potencjometr logarytmiczny 50KBX2, znajdujący się na rysunku 4, służący do pomiaru czasów narastania ciśnienia w tylnym obwodzie hamulcowym został przykręcony w miejscu, w którym mocowana jest pompa hamulcowa. W celu zapewnienia miejsca dla posuwu suwaka potencjometru został on przesunięty względem oryginalnego mocowania pompy za pomocą krótkich płaskowników, a następnie przykręcony do nich za pomocą śrub o średnicy 2 mm.

Przed przystąpieniem do badań zmierzono wartości rezystancji obydwu potencjometrów za pomocą multimetru. Ponieważ potencjometry mają wartości rezystancji równe 50 k Ω , zakres pomiarowy został ustawiony na 200 k Ω . Potencjometry były zasilane napięciem o wartości 10 V. W wykorzystanych do badań tensometrycznych czujnikach ciśnienia stała mostka wynosi 1,6 mV/V (dla przedniego obwodu hamulcowego) i 1 mV/V (dla tylnego obwodu hamulcowego). Przy nominalnym (maksymalnym) obciążeniu czujnika sygnał wyjściowy równa się 1 mV/1,6 mV na każdy 1 V zasilania mostka. Podczas badań czujnik zasilany był napięciem 10 V, tak więc wyjściowe napięcie zmieniało się w zakresie 0-16 mV dla czujników wykorzystanych w przednim obwodzie hamulcowym oraz 0-10 mV dla czujnika wykorzystanego w tylnym obwodzie hamulcowym, w zależności od obciążenia mostka znajdującego się wewnątrz czujnika ciśnienia. Wartość zmian napięcia określana jest przez stałą mostka k wyrażaną w jednostkach [mV/V]. Dla czujnika tensometrycznego o nominalnym ciśnieniu równym 16 MPa (dla przedniego obwodu hamulcowego) i 10 MPa (dla tylnego obwodu hamulcowego) i stałej 1,6 mV/V oraz 1 mV/V zasilanego napięciem 10 V zmierzoną wartość ciśnienia wyznaczono z zależności:

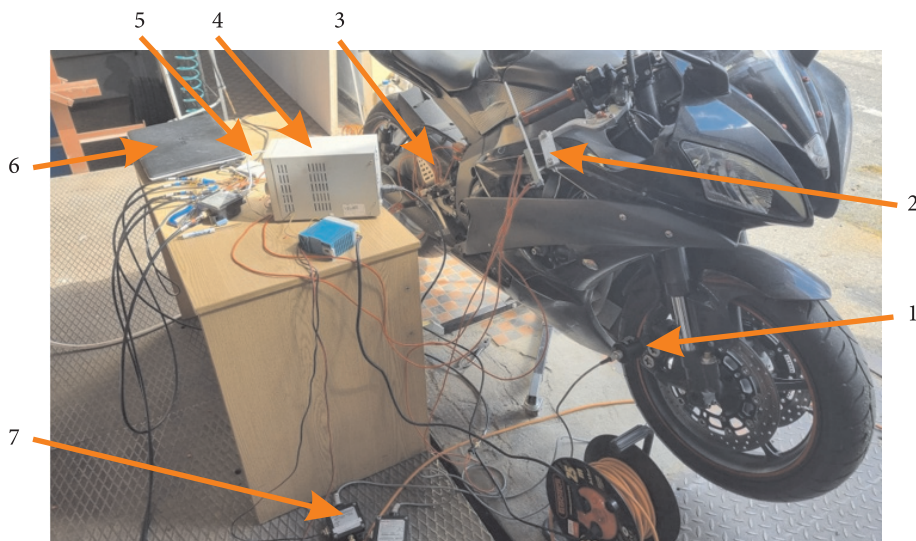
$$p_x \text{ [MPa]} = \frac{(U_m \cdot U_{zm} \cdot Z_c)}{S_m}, \quad (3)$$

gdzie: p_x — ciśnienie [MPa],
 U_m — napięcie mierzone [V],
 S_m — stała mostka [mV/V],
 U_{zm} — napięcie zasilania mostka [V],
 Z_c — zakres czujnika [MPa].

Z powyższej zależności wyznaczono wartości maksymalnego ciśnienia zmierzonego za pomocą tensometrycznych czujników ciśnienia. Dla przedniego prawego czujnika ciśnienia maksymalna wartość wyniosła 2,3 MPa, a dla lewego 3,95 MPa.

Dla czujnika ciśnienia w tylnym obwodzie hamulcowym maksymalne ciśnienie wyniosło 2,2 MPa. Następnie wyznaczono siłę występującą na pojedynczym tłoczku zacisku hamulcowego.

Średnica pojedynczego tłoczka w zaciskach hamulcowych motocykla, na którym zostały przeprowadzone badania, wynosi 28 mm. Średnica tłoczka w pompie hamulcowej przedniego oraz tylnego obwodu hamulcowego badanego motocykla to 8 mm. Powierzchnia dźwigni hamulca przedniego równa jest 13 mm^2 , a hamulca tylnego 18 mm^2 . Liczba tłoczków w przednich zaciskach hamulcowych wynosi cztery, natomiast w tylnym jeden. Otrzymane wyniki wartości siły dla zacisków hamulcowych zostały więc podzielone przez liczbę tłoczków znajdujących się w danym zacisku hamulcowym. Maksymalna wartość siły wyniosła zatem dla pojedynczego tłoczka w prawym przednim zacisku hamulcowym 0,95 kN, dla tłoczka w lewym przednim zacisku hamulcowym parametr ten osiągnął wartość 1,19 kN. W tylnym zacisku maksymalna wartość siły działająca na pojedynczy tłoczek hamulcowy była równa 0,87 kN. Różnica osiągniętej siły w zaciskach przedniego oraz tylnego obwodu hamowania wyniosła zatem 0,32 kN. Stanowisko badawcze, na którym dokonano wyżej opisanych pomiarów, przedstawiono na rysunku 5.

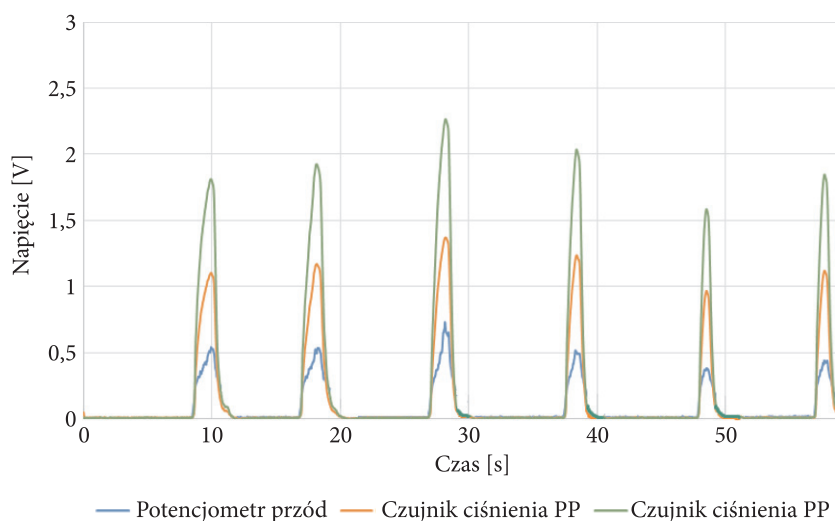


Rys. 5. Stanowisko pomiarowe: 1 — przetwornik ciśnienia przedniego obwodu hamulcowego, 2 — potencjometr przedniego obwodu hamulcowego, 3 — potencjometr tylnego obwodu hamulcowego, 4 — zasilacz laboratoryjny, 5 — karta akwizycji danych, 6 — laptop z oprogramowaniem rejestrującym wyniki pomiarów, 7 — wzmacniacz tensometrycznego czujnika ciśnienia

Do rejestracji zmian napięcia z czujników tensometrycznych i potencjometrycznych zastosowano częstotliwość próbkowania o wartości 1 kHz.

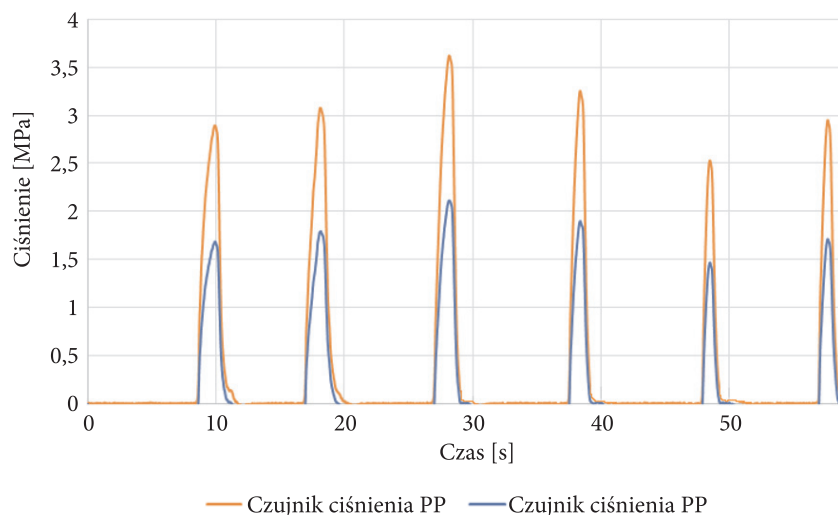
4. Wyniki badań stanowiskowych dla przedniego obwodu hamowania

Na rysunku 6 przedstawiono pomiary napięcia zmierzonego na potencjometrze w przednim obwodzie hamowania oraz dwóch tensometrycznych czujnikach ciśnienia. Każdy z pomiarów wykonano w jednakowym okresie, jednak zauważalne są różnice w wartości zmierzonego napięcia dla poszczególnych pomiarów oraz elementów układu. Ponieważ napięcie wzrastało wraz z siłą przyłożoną do dźwigni hamulca, na wykresie widoczne są wyraźne różnice w wartościach napięcia pomiędzy poszczególnymi pomiarami i przyrządami użytymi do badań.

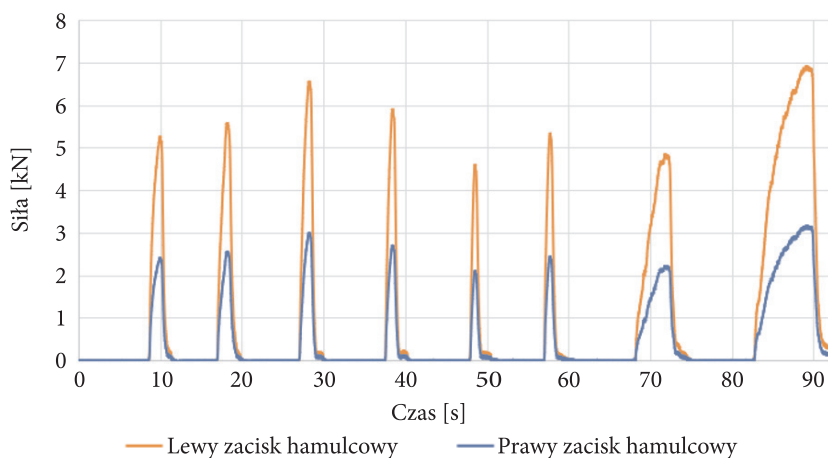


Rys. 6. Zestawienie przebiegów narastania wartości napięcia w obwodzie hamowania przedniego koła

Filtrowanie wyników pomiarów zwiększyło dokładność odczytu otrzymanych wyników, co ułatwiło wyznaczenie opóźnienia czasowego występującego pomiędzy narastaniem napięcia w potencjometrze a czujnikami ciśnienia. Różnica czasu wynosi średnio 0,2 sekundy. Wyraźnie widać także, że prawy czujnik ciśnienia zarejestrował średnio o połowę niższe wartości napięcia niż czujnik lewy. Kolejnym etapem w przedstawieniu wyników pomiarów było wyznaczenie ciśnienia oraz siły występującej w obwodzie hamowania przedniego koła podczas badań. Wyniki pomiarów znajdują się na rysunku 7.



Rys. 7. Zestawienie przebiegów zmian wartości ciśnienia w funkcji czasu w obwodzie hamowania przedniego koła



Rys. 8. Zestawienie przebiegów zmian wartości siły w obwodzie hamowania przedniego koła na pojedynczym tłoczku w przednich zaciskach hamulcowych

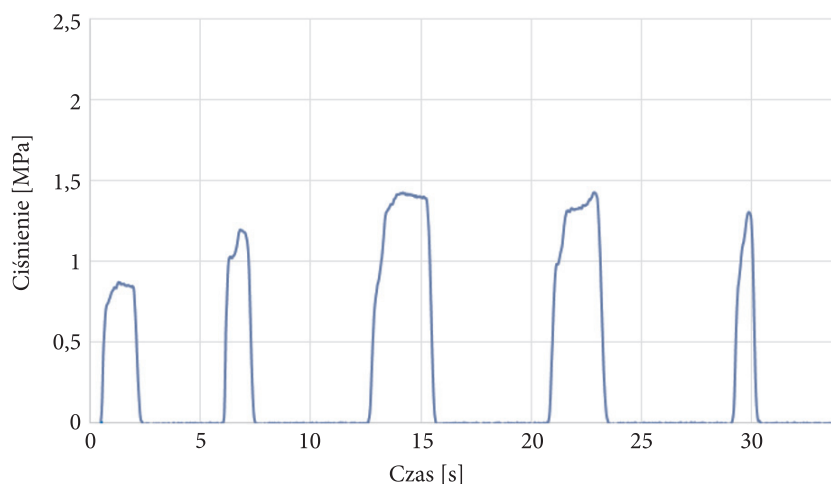
Z otrzymanych wyników widocznych na rysunku 8 można odczytać, że pierwsze wzrosty wartości siły charakteryzowały się podobnie jak w przypadku ciśnienia stałym czasem przyłożenia, natomiast w dalszym etapie pomiarów czas ten wydłużył się trzykrotnie. Wartość otrzymanej siły w obwodzie nie wzrosła wprost proporcjonalnie do czasu jej przyłożenia.

5. Wyniki badań stanowiskowych dla tylnego obwodu hamowania

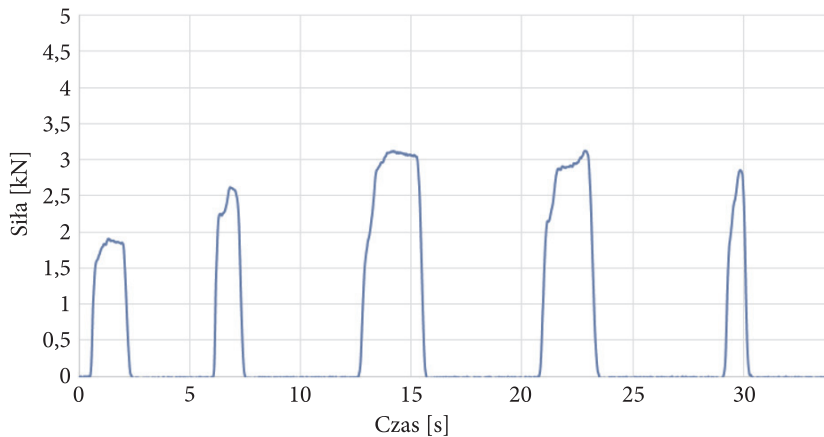
W obwodzie hamowania tylnego koła metodyka przeprowadzanych badań oraz opracowania wyników pomiarów była analogiczna do obwodu hamowania koła przedniego. Wyniki zarejestrowanego napięcia wskazują jednak na większe różnice wartości pomiędzy potencjometrem a czujnikiem ciśnienia niż w przypadku poprzedniego układu.

Badania tylnego obwodu hamulcowego charakteryzowały się większymi zakłóceniami wyników niż w przypadku obwodu przedniego. Wynikać to mogło z kalibracji elementów pomiarowych wykorzystanych do badań. Świadczyć może o tym duża nieregularność skoków napięcia w przebiegu charakteryzującym wyniki zarejestrowane przez potencjometr.

Na rysunkach 9 i 10 przedstawione zostały przebiegi wartości ciśnienia oraz siły w funkcji czasu dla tylnego obwodu hamulcowego po filtrowaniu. Można zobaczyć, że pomimo prezentacji innych wartości wyników badań ich przebiegi mają bardzo zbliżony kształt. Jest to spowodowane tym, że ze względu na jedną tarczę hamulcową w tylnym obwodzie hamulcowym motocykla do pomiarów został wykorzystany tylko jeden czujnik ciśnienia. Wykresy zostały przedstawione w innej skali, odpowiedniej dla uzyskanych wartości, jednak mają takie same przebiegi. Tak samo jak w przypadku wyników badań przedniego obwodu hamulcowego również tutaj widoczne są różne czasy trwania przyłożonej siły oraz wzrostu ciśnienia. Oznacza to, że również w tym przypadku czas uruchomienia hamulca w danym badaniu był inny od pozostałych.



Rys. 9. Przebieg zmian wartości ciśnienia w funkcji czasu w tylnym obwodzie hamulcowym



Rys. 10. Przebieg zmian wartości siły w funkcji czasu na pojedynczym tłoczku w tylnym zacisku hamulcowym

6. Analiza wyników badań pod kątem czasu reakcji układu hamulcowego

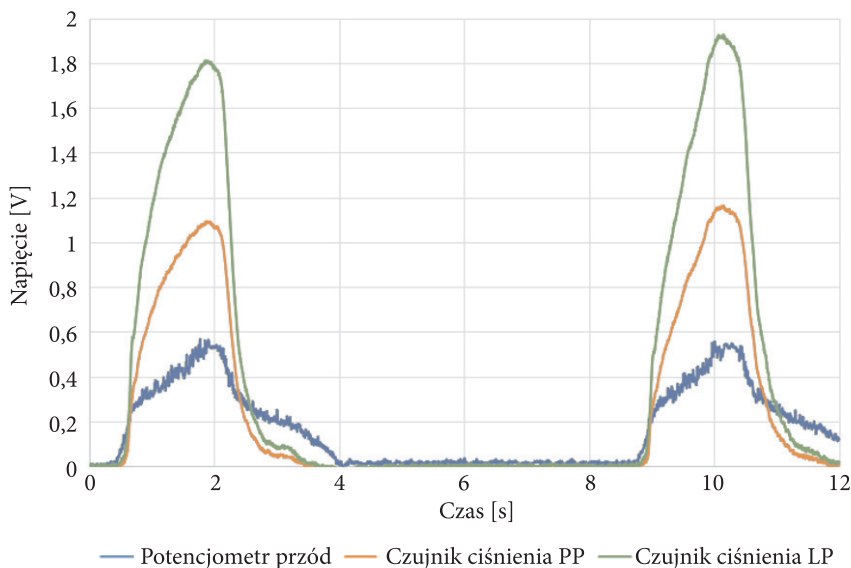
Dla każdego z wyżej wymienionych urządzeń pomiarowych zostały zarejestrowane wyniki pomiarów w serii trwającej 100 sekund. W celu usunięcia sygnałów zakłóceń z przebiegów wykorzystano filtr dolnoprzepustowy Butterwortha czwartego rzędu o częstotliwości zaporowej wynoszącej 40 Hz. Filtrowanie zostało zastosowane dla serii wyników otrzymanych z każdego urządzenia pomiarowego i jednego wybranego przebiegu narastania oraz opadania siły w danym obwodzie hamulcowym.

Do badań reakcji obwodu hamowania przedniego i tylnego koła wykorzystane zostały potencjometry o liniowej charakterystyce rezystancji. Wartość rezystancji dla obydwu potencjometrów jest równa 50 k Ω . Dane potencjometru użytego do badań w obwodzie hamowania przedniego koła:

- minimalne położenie suwaka potencjometru to wartość sygnału równa 0,04 V,
- maksymalne położenie suwaka potencjometru to wartość sygnału równa 0,79 V,
- skok suwaka potencjometru jest równy 50 mm.

Dane potencjometru wykorzystanego do badań w obwodzie hamowania tylnego koła:

- minimalne położenie suwaka potencjometru to wartość sygnału równa 0 V,
- maksymalne położenie suwaka potencjometru to wartość sygnału równa 0,95 V,
- skok suwaka potencjometru jest równy 5 mm.

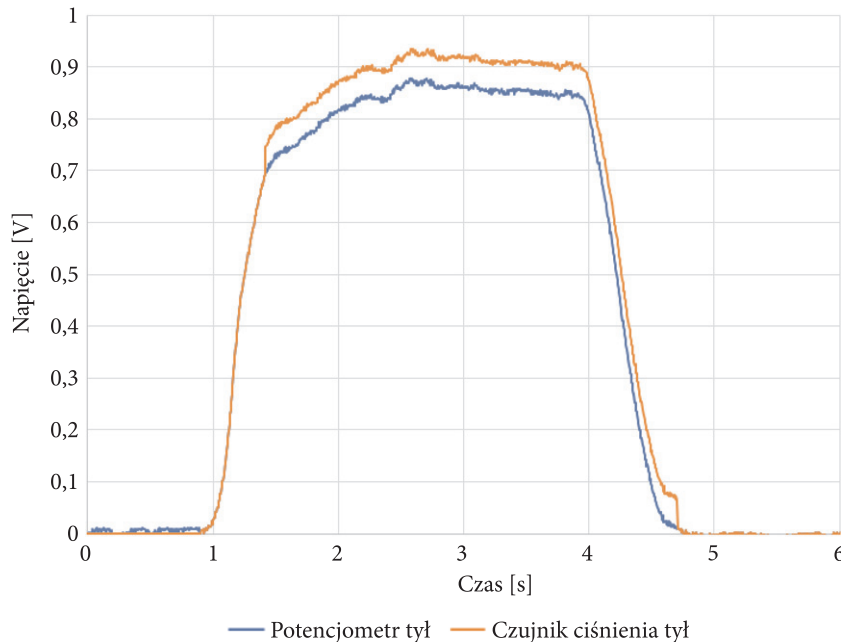


Rys. 11. Zestawienie przebiegów czasów narastania napięcia dla aparatury pomiarowej w obwodzie hamowania przedniego koła

Na podstawie danych odczytanych z potencjometru oraz obydwu tensometrycznych czujników ciśnienia zaprezentowanych na rysunku 12 można zobaczyć, że pierwsze skoki wartości napięcia zostały zarejestrowane w dziewiątej sekundzie od momentu rozpoczęcia pomiarów. Różnica czasów narastania wartości napięcia pomiędzy potencjometrem a czujnikami ciśnienia wynosi średnio 0,2 sekundy. Można zatem zauważyć, że jest to czas, jaki upływa od momentu uruchomienia układu hamulcowego do momentu narastania ciśnienia w zaciskach hamulcowych i rozpoczęcia procesu hamowania.

Na podstawie danych odczytanych z potencjometru oraz tensometrycznego czujnika ciśnienia, przedstawionych na rysunku 12, można zauważyć, że różnica czasów narastania wartości napięcia pomiędzy potencjometrem a czujnikiem ciśnienia, podobnie jak w przypadku przedniego układu hamulcowego, wyniosła średnio 0,2 sekundy. Jest to czas, jaki upłynął od momentu uruchomienia tylnego układu hamulcowego do momentu narastania ciśnienia w zacisku hamulcowym i rozpoczęcia procesu hamowania. Można zatem wywnioskować, że pomiary tylnego układu hamulcowego pomimo występowania zniekształceń dla badań z użyciem potencjometru charakteryzowały się dużą dokładnością pomiarową w zakresie rejestrowania wartości narastania napięcia, ponieważ otrzymane wyniki badań mają odzwierciedlenie w rzeczywistych warunkach drogowych, gdzie czas reakcji układu hamulcowego również szacowany jest na poziomie 0,2 sekundy. Czas reakcji samego

kierowcy to średnio 0,8 sekundy. Sumaryczny czas zadziałania układu hamulcowego przyjmuje zatem średnią wartość równą jedną sekundę, więc motocyklista poruszający się z prędkością 60 km/h podczas wystąpienia nagłej sytuacji na drodze przebędzie odległość ponad 16 metrów bez zmniejszenia prędkości swojego pojazdu.



Rys. 12. Porównanie czasów narastania napięcia dla potencjometru oraz czujnika ciśnienia w obwodzie hamowania tylnego koła

7. Wnioski i podsumowanie

Badania stanowiskowe zaprezentowane w artykule nie były przeprowadzane na motocyklu znajdującym się w ruchu, stąd też nie odnoszą się do badań zawartych w Dyrektywie Rady 93/14/EWG z dnia 5 kwietnia 1993 roku w sprawie hamowania dwu- lub trzykołowych pojazdów silnikowych. Podczas ich przeprowadzania skupiono się głównie na wyznaczeniu czasu reakcji układu hamulcowego, co wymagało wyznaczenia siły i ciśnienia w tym układzie. Wyniki przedstawiono za pomocą odpowiednich wykresów. Opisana została metodyka przeprowadzonych badań oraz aparatura wykorzystana na stanowisku badawczym.

Ponadto można stwierdzić, że:

- przeprowadzone badania układu hamulcowego pozwoliły na wyznaczenie maksymalnej wartości siły oraz ciśnienia występujących w układzie hamulcowym podczas awaryjnej sytuacji drogowej;
- najwyższa wartość ciśnienia została osiągnięta w lewym przednim zacisku hamulcowym i wyniosła 3,95 MPa. Różnica ciśnienia pomiędzy tylnym i przednim obwodem hamowania wyniosła 1,75 MPa;
- najwyższa wartość siły na pojedynczym tłoczku w przednim obwodzie hamowania wyniosła 1,19 kN, natomiast w tylnym obwodzie wartość ta to 0,87 kN;
- różnica siły otrzymanej na lewym oraz prawym zacisku hamulcowym w przednim obwodzie hamowania wyniosła 0,24 kN, natomiast różnica pomiędzy tylnym i przednim obwodem hamowania jest równa 0,32 kN;
- otrzymane wyniki pomiarów wskazują, że czas, jaki upływa od momentu uruchomienia układu hamulcowego przez motocyklistę do chwili zadziałania układu, wynosi średnio 0,2 sekundy;
- średni czas rozpozczęcia manewru hamowania w warunkach ruchu drogowego to jedna sekunda, przy założeniu, że średni czas reakcji kierowcy wynosi 0,8 sekundy [20].

Źródło finansowania pracy — środki własne autorów.

Artykuł wpłynął do redakcji 1.12.2022. Zatwierdzono do publikacji 15.03.2023.

Kamil Krakowiak <https://orcid.org/0000-0001-8188-4263>

Andrzej Dębowski <https://orcid.org/0000-0003-1446-4415>

LITERATURA

- [1] DĘBOWSKI A., *Drgania skrętne i ich tłumienie w układzie kierowniczym motocykla*, Wydawnictwo Wojskowej Akademii Technicznej, Warszawa 2021.
- [2] PROCHOWSKI L., *Mechanika ruchu [Mechanics of movement]*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2016.
- [3] TADEJ M., CZECH P., HORNIAK A., GUSTOF P., JĘDRUSIK D., *Proces hamowania sportowych motocykli wyposażonych w dwuobwodowy system hamulcowy*, *Autobusy: Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, 17, 12, 2016, 454-461.
- [4] BORAWSKI A., SZPICA D., MIECZKOWSKI G., BORAWSKA E., AWAD M.M., SHALABY R.M., SALLAH M., *Theoretical Analysis of the Motorcycle Front Brake Heating Process during High Initial Speed Emergency Braking*, *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 6, 4, 2020.
- [5] RIZZI M., STRANDROTH J., KULLGREN A., TINGVALL C., FILDES B., *Effectiveness of motorcycle Antilock Braking Systems, (ABS) in reducing crashes, the first cross-national study*, *Traffic Injury Prevention*, 16, 2, 2015, 177-183..
- [6] IDZIOR M., KORZIK M., *Badania opóźnienia hamowania motocykli*, *Autobusy: Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, 17, 12, 2016, 185-188.

- [7] WITKIEWICZ M., OW CZARZ M., TARYMA S., *Analiza porównawcza drogi hamowania motocykla z włączonym i wyłączonym układem ABS*, Autobusy: Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, 7-8, 2017, 229-232.
- [8] ÖSTREICHER M., SCHULTHEIS M., *A method for testing of brake systems of motor vehicles*, United States Patent, No. US10330546B2, 2019.
- [9] WISEMAN Y., *Efficient Embedded Computing Component for Anti-Lock Braking System*, Computer Science Department, Bar-Ilan University, 2018.
- [10] Regulamin nr 78 Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (EKG ONZ) – Jednolite przepisy dotyczące homologacji pojazdów kategorii L1, L2, L3, L4 i L5 w odniesieniu do układu hamulcowego [2015/145].
- [11] SKRZYPCZYK P., KAŁUŻA R., CZECH P., *Proces hamowania motocykli typu enduro i szosowo-turystycznych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria „Transport”, z. 87, 2015, 49-62.
- [12] IDZIOR M., KORZIK M., *Badania opóźnienia hamowania motocykli*, Autobusy: Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, 17, 12, 2016, 185-188.
- [13] Dyrektywa Rady 93/14/EWG z dnia 5 kwietnia 1993 roku w sprawie hamowania dwu- lub trzykołowych pojazdów silnikowych.
- [14] Strona internetowa firmy Conrad Sourcing Platform, <https://www.conrad.pl/> [dostęp: 11.05.2022 r.].
- [15] Strona internetowa firmy ACSE, <https://acse.pl/> [dostęp: 11.05.2022 r.].
- [16] Dz.U. 2003 nr 32 poz. 262 Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 31 grudnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia.
- [17] Dz.U. 2003 Nr 227 poz. 2250 Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 16 grudnia 2003 r. w sprawie zakresu i sposobu przeprowadzania badań technicznych pojazdów oraz wzorów dokumentów stosowanych przy tych badaniach.
- [18] ZHAO X., WANG S., MA J., GAO Q., YU M., *Identification of driver's braking intention based on a hybrid model of GHMM and GGAP-RBFNN*, Neural Computing and Applications, 31, 1, 2019, 161-174.
- [19] NAITO A., MIYAJIMA CH., NISHINO T., KITAOKA N., TAKEDA K., *Driver evaluation based on classification of rapid decelerating patterns*, 2009 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, December 2009.
- [20] Strona internetowa dotycząca prawa jazdy, <https://prawko-torun.pl/> [dostęp: 10.05.2022 r.].

K. KRAKOWIAK, A. DĘBOWSKI

Analysis of operation and reaction time of a motorcycle braking system

Abstract. The paper presents a description and methodology of testing brake systems in single-track vehicles. The construction of the stand, which was used to determine the value of force and pressure on a single brake caliper of the brake circuit in the tested motorcycle, was described. The following section presents the methodology of elaborating the results of bench tests. The operation of each circuit was analysed separately. Graphs describing the determined response times for both braking circuits are presented. The obtained results of bench tests show that the average time of activation of the braking system from the moment of applying force to the brake lever to reaching the full value of the braking force is 0.2 seconds.

Keywords: braking system, reaction time, motorcycle brake system testing, brake system pressure value
DOI: 10.5604/01.3001.0053.6746

