

Dr inż. Zbigniew Kamiński

Dr inż. Jarosław Czaban

Faculty of Mechanical Engineering
Białystok University of Technology
Wiejska str. 45C, 15-351 Białystok, Poland
E-mail: z.kaminski@pb.edu.pl, j.czaban@pb.edu.pl

Diagnostyka układu hamulcowego ciągnika rolniczego

w ramach badań homologacyjnych

Diagnosis of agricultural tractor braking system

during the approval tests

Streszczenie: W pracy opisano wymagania dotyczące badań homologacyjnych ciągników rolniczych w zakresie hamowania, uwzględniające propozycje przepisów opracowywanych przez grupę roboczą Komisji Europejskiej ds. ciągników rolniczych (Working Group on Agricultural Tractors - WGAT). Przedstawiono program i metodykę badań skuteczności układu hamulcowego ciągnika oraz jego instalacji powietrznej do zasilania i sterowania hamulcami pojazdu ciągniętego. Zamieszczono przykłady testów diagnostycznych prototypowego ciągnika z hamulcami uruchamianymi hydraulicznie. Opisanie testy diagnostyczne mogą być w całości lub częściowo wykorzystane do opracowania programu badań kwalifikacyjnych ciągników na liniach produkcyjnych oraz programu okresowych badań technicznych ciągników eksploatowanych.

Słowa kluczowe: ciągnik rolniczy, badania homologacyjne, diagnostyka, hamulce, instalacja pneumatyczna hamulcowa

1. Wprowadzenie

Badania homologacyjne są integralną częścią procedury urzędowej, stanowiącej o dopuszczeniu homologowanego pojazdu do ruchu na drogach publicznych. Badania homologacyjne przeprowadzają tylko upoważnione placówki badawcze zgodnie z metodami testów opisanych w odpowiednich regulaminach. Celem testów diagnostycznych nowo produkowanych pojazdów, jak i eksploatowanych pojazdów, jest kontrola i ocena stanu technicznego zespołów mających istotny wpływ na sprawność techniczną pojazdu w świetle stawianych im wymagań.

Ze względu na bezpieczeństwo ruchu drogowego układy hamulcowe pojazdów rolniczych muszą spełniać szereg wymagań dotyczących między innymi skuteczności hamowania, działania nadążnego podczas hamowań powolnych oraz dużej szybkości działania podczas hamowań nagłych (czas reakcji mniejszy równy 0,6 s). Przeprowadzone w Wielkiej Brytanii badania zestawów ciągnikowych z przyczepami wyposażonymi w hydrauliczne układy hamulcowe [14] wykazały, że aż 90% eksploatowanych przyczep nie osiąga wymaganej wartości wskaźnika skuteczności hamowania ($\alpha=0,25$); po dokonaniu niezbędnej regulacji udział przyczep nieosiągających wymaganego wskaźnika hamowania zmalał do 40%. Szczególnie niebezpieczne jest eksploatowanie zestawów pojazdów niekompatybilnych ze względu na różną skuteczność działania ich układów hamulcowych

(asynchronia hamowania) [12]. Eksploatacja szybkobieżnego, nowoczesnego ciągnika rolniczego posiadającego hamulce o dużej skuteczności z przyczepą o małej skuteczności hamowania prowadzi z jednej strony do przyspieszonego zużycia i przedwczesnego uszkodzenia układu hamulcowego przyczepy, z drugiej zaś powoduje przeciążenie, nagłe zużycie i ewentualne uszkodzenie układu hamulcowego ciągnika [14]. Niekompatybilność układów hamulcowych pojazdów w zestawach ciągnikowych powodująca składanie się zespołu pojazdów lub jego zarzucanie podczas hamowania była w Wielkiej Brytanii w latach 1999-2004 przyczyną około 9,7% tragicznych wypadków drogowych z udziałem pojazdów rolniczych [4].

W Polsce powszechnie stosuje się w przyczepach rolniczych pneumatyczne układy hamulcowe. Dlatego ciągniki rolnicze używane do transportu, niezależnie od konstrukcji hamulców własnych (hydrauliczne-rys.1, mechaniczne, pneumatyczne), wyposażane są w instalacje pneumatyczne do hamowania ciągnionych przyczep. Starsze ciągniki wyposażone są w pneumatyczne instalacje hamulcowe jedнопrzewodowe, w nowszych są to zazwyczaj układy kombinowane, umożliwiające użytkowanie zarówno starszych przyczep wyposażonych w pneumatyczne układy hamulcowe jedнопrzewodowe, jak i użytkowanie nowych przyczep wyposażonych w pneumatyczne układy hamulcowe dwuprzewodowe. Zalecenie stosowania układów dwuprzewodowych oraz zwiększenie wskaźnika hamowania ciągników do 0,45 wprowadzono w 2004 roku w ramach nowelizacji przepisów dotyczących homologacji ciągników rolniczych w zakresie hamowania [6], [13], ze względu na zwiększenie maksymalnej dopuszczalnej prędkości jazdy do 40 km/h dla ciągników kategorii T1-T4, a powyżej 40 km/h dla ciągników kategorii T5. W praktyce zdarza się, że ciągniki kategorii T5 jeżdżą z prędkością ok. 60-70 km/h.

Niezadawalający stan wdrażania nowych przepisów, przyzwolenie na kontynuowanie produkcji przyczep z przestarzałymi jedнопrzewodowymi pneumatycznymi układami hamulcowymi oraz eksploatacja pojazdów rolniczych z niesprawnymi lub niekompatybilnymi instalacjami hamulcowymi, a nawet bez układu hamulcowego w przyczepach leśnych [11], stanowi istotne zagrożenie dla bezpieczeństwa ruchu drogowego z ich udziałem. W Polsce każdego roku spośród około 900 wypadków z udziałem pojazdów rolniczych 90-100 ma skutki tragiczne [5]. Dlatego niektórzy [2] postulują wręcz zalegalizowanie modernizacji pneumatycznych układów hamulcowych ciągników rolniczych i przyczep oraz wprowadzenie nadzoru układów hamulcowych, realizowanego przez Stację Kontroli Pojazdów.

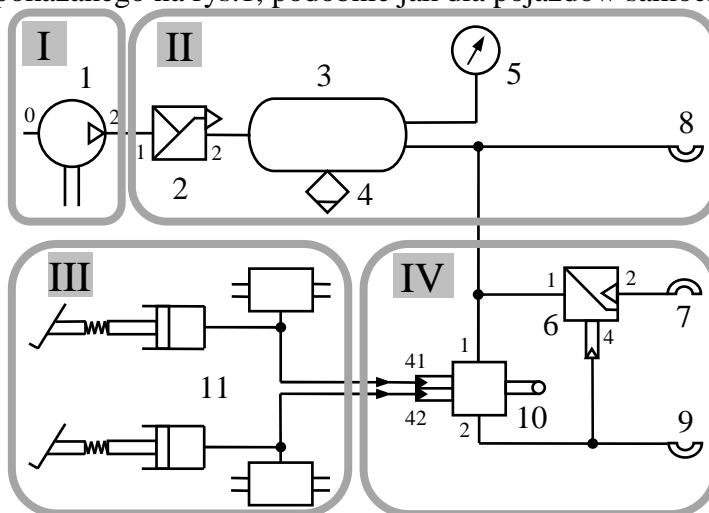
Od kilku lat w Unii Europejskiej kontynuowane są prace nad kompleksową propozycją ujednoczenia przepisów technicznych w zakresie hamowania pojazdów rolniczych i leśnych, wzorowaną na Regulaminie 13 Europejskiej Komisji Gospodarczej dla pojazdów samochodowych [8]. W najnowszych propozycjach grupy roboczej ds. ciągników rolniczych (WGAT) [7] zakłada się między innymi zwiększenie wskaźnika skuteczności hamowania $\geq 0,5$ dla ciągników rolniczych poruszających się z prędkością powyżej 30 km/h oraz przyczep i holowanych maszyn rolniczych o DMC powyżej 1,5 tony (przyczepy kategorii R2, R3, R4, maszyny rolnicze holowane kategorii S2). Postuluje się także, podobnie jak w przypadku zestawu pojazdów drogowych, wprowadzenie pasm kompatybilności, czyli dopuszczalnych zmian wartości wskaźnika hamowania w funkcji ciśnienia na złączu łączącym magistralę sterującą ciągnika i przyczepę, dla ciągników poruszających się z prędkością powyżej 30 km/h oraz przyczep o DMC powyżej 3,5 tony (kategoria R3 i R4) i holowanych maszyn rolniczych kategorii S2.

Kluczową kwestią poprawy jakości i bezpieczeństwa środków transportu dla sektora rolniczego i leśnego, w świetle opisanego stanu technicznego i prawnego ich układów hamulcowych, wydaje się doskonalenie metod i narzędzi diagnozowania układów hamulcowych pojazdów rolniczych w ramach badań homologacyjnych, kwalifikacyjnych i

okresowych badań technicznych. W niniejszej pracy opisano metodykę diagnozowania układów hamulcowych ciągników rolniczych w ramach badań homologacyjnych wg programu [9] uwzględniającego wymagania regulaminu dla pojazdów rolniczych i leśnych opracowywanego przez WGAT [7] oraz przepisy Regulaminu 13 Europejskiej Komisji Gospodarczej [8] dla pojazdów samochodowych. Zamieszczono przykładowe wyniki badań ciągnika z hamulcami uruchamianymi hydraulicznie.

2. Wymagania stawiane układom hamulcowym

Aktualne wymagania dotyczące układów hamulcowych ciągników zawarte w przepisach obowiązujących [6], [8], [10], [13] i proponowanych [7] można pogrupować według schematu pokazanego na rys.1, podobnie jak dla pojazdów samochodowych [1].



Rys.1 Schemat podziału układu hamulcowego ciągnika ze względu na stawiane wymagania: I – źródło energii, II – rozdział i zapewnienie wymaganego poziomu energii, III – układ hamulcowy ciągnika, IV – sterowanie hamulcami przyczepy (połączenie instalacji powietrznych ciągnika i przyczepy), 1 – sprężarka, 2 – regulator ciśnienia, 3 – zbiornik powietrza, 4 – zawór odwadniający, 5 – manometr, 6 – zawór sterujący hamulcami przyczepy inwersyjny, 7 – złącze przewodów typu A (czarne), 8 – złącze zasilające (czerwone), 9 – złącze sterujące (żółte), 10 – zawór sterujący hamulcami przyczepy, 11 – hydrauliczny układ hamulcowy ciągnika

Grupa I i II wymagań odnosi się do zespołu zasilającego (sprężarka, regulator ciśnienia, zbiorniki sprężonego powietrza), zaś grupa IV dotyczy zespołu sterującego pneumatycznego układu hamulcowego. Wymagania III grupy dotyczą zasadniczego i postojowego układu hamulcowego ciągnika.

2.1. Źródło energii

Jako kryterium oceny wydajności sprężarki (I – na rys.1) w zespole zasilającym przyjmuje się czas napełnienia zbiornika ciągnika oraz zbiornika zastępczego, podłączonego do złącza zasilającego, do wartości ciśnienia p określonej przez wytwórcę, przy której pojazd uzyskuje skuteczność hamowania przypisaną hamulcom roboczym. Pojemność zbiornika zastępczego imitującego pojemność instalacji zasilającej przyczepy wylicza się z zależności:

$$V = 20 \cdot R / p_{\max} \quad [\text{dm}^3] \quad (1)$$

gdzie: p_{max} – maksymalna wartość ciśnienia regulowanego w układzie [bar], R – dopuszczalna maksymalna masa przypadająca na wszystkie osie przyczepy [t].

Podany w tabeli 1 czas t_1 i t_2 napełniania zbiorników odpowiednio do 65% i 100% wartości ciśnienia p powinien być mierzony w czasie pracy sprężarki przy maksymalnej mocy lub maksymalnej prędkości obrotowej silnika spalinowego. Wartość ciśnienia p jest zazwyczaj równa minimalnej wartości ciśnienia regulowanego p_{min} . Jeżeli w ciągniku zastosowano dodatkowe zbiorniki do akumulowania energii potrzebnej do napędu urządzeń nienależących do układu hamulcowego, a ich pojemność przekracza 20% łącznej pojemności zbiorników układu hamulcowego, to wtedy według nowych przepisów [7] należy jeszcze określić czas t_3 potrzebny do napełnienia zbiornika najniekorzystniej usytuowanego względem sprężarki.

Tab.1. Czas napełniania zespołu zasilającego podczas sprawdzania sprężarki [7], [8], [10]

Opcja powietrznej instalacji zasilającej	Czas napełniania [min]		
	t_1 przy 65% p	t_2 przy p	t_3 przy p
Instalacja pojazdu przystosowanego do ciągnięcia przyczepy	6	9	11
Instalacja pojazdu nieprzystosowanego do ciągnięcia przyczepy	3	6	8

2.2. Rozdział i zapewnienie wymaganego poziomu energii

Utrzymanie niezbędnego poziomu energii w zespole zasilającym (II – na rys.1) instalacji pneumatycznej ciągnika zależy od pojemności zbiornika sprężonego powietrza, parametrów regulatora ciśnienia (tj. wartości minimalnego p_{min} i maksymalnego p_{max} ciśnienia regulowanego), a w układach wysokociśnieniowych również od reduktora ciśnienia.

Przy niepracującej sprężarce i początkowym ciśnieniu w zbiorniku równym p , po ośmiu pełnych uruchomieniach hamulca roboczego wartość ciśnienia w zbiorniku nie powinna być niższa od niezbędnej do uzyskania skuteczności hamulca awaryjnego. Miejscem pomiaru ciśnienia kontrolnego jest zbiornik sprężonego powietrza o pojemności 0,5 dm³ podłączony do przewodu sterującego i odpowietrzany przed każdym kolejnym zahamowaniem; przewód zasilający powinien być zaślepiiony. W ciągnikach przystosowanych do ciągnięcia przyczep ciśnienie w przewodzie sterującym po 8 bezpośrednio po sobie następujących zahamowaniach, powinno mieć wartość nie mniejszą niż połowa wartości otrzymanej po pierwszym zahamowaniu.

Dla układów jednoprzewodowych pojemność zbiornika powinna być tak dobrana, aby po pełnym jednorazowym zahamowaniu i odhamowaniu spadek ciśnienia od wartości minimalnej nie był większy niż 0,5 bar [10]. Ciśnienie jest mierzone na końcu przewodu o długości 2,5 m i średnicy wewnętrznej 13 mm podłączonego do złącza zasilająco-sterującego ciągnika (przewód imitujący pojemność przewodu zasilająco-sterującego przyczepy).

2.3. Układ hamulcowy ciągnika

Hamulce (III – na rys.1) mają decydujący wpływ na bezpieczeństwo jazdy w normalnych warunkach eksploatacji, dlatego stawia się im szczególne wymagania. Dotyczą one skuteczności hamowania hamulców zimnych i nagranych, szybkości działania, kompatybilności układów hamulcowych pojazdów tworzących zestaw drogowy oraz konstrukcji układu.

Skuteczność przypisana dla układu hamulcowego powinna być określana na podstawie drogi zatrzymania s_z lub średniej wartości w pełni rozwiniętego opóźnienia d_m :

$$s_z = \frac{v}{3.6} \left(t_o + \frac{1}{2} t_n \right) + \frac{1}{2} \frac{(v/3.6)^2}{d_m} \quad [m] \quad (2)$$

gdzie: v – prędkość początkowa [km/h]; t_o – czas uruchamiania hamulców zwany czasem zwłoki układu hamulcowego [s]; t_n – czas narastania opóźnienia hamowania [s], d_m – w pełni rozwinięte opóźnienie hamowania [m/s^2].

Wymagania dotyczące hamulców zimnych ciągnika (test typu 0) zestawiono w tabeli 2. Wymagane opóźnienia dotyczące hamulców awaryjnych podano w nawiasach.

Tab. 2. Wymagania skuteczności hamulców roboczych i awaryjnych ciągników w badaniach z zimnymi hamulcami - (test typu 0); zalecany sposób sprawdzania wyróżniono szarym tłem

Kategoria pojazdu	s_z [m]	d_m [m/s^2]	$z = d_m/g$	Warunki
Wymagania obowiązujące [10], [13]				
T1÷T5	$\leq 0,15 v + v^2/116$	≥ 4.5	≥ 0.45	
Propozycja grupy WGAT [7]				
T1÷T4	$\leq 0,15 v + v^2/116$	≥ 4.5 (1.5)	≥ 0.45	$v_{max} \leq 30$ km/h
T1÷T4, T5	$\leq 0,15 v + v^2/130$	≥ 5.0 (2.2)	≥ 0.50	$v_{max} > 30$ km/h

Prędkość początkowa v nie może być mniejsza niż 98% prędkości przypisanej dla danych badań (prędkości maksymalnej). Średnie w pełni rozwinięte opóźnienie d_m należy obliczyć jako opóźnienie średnie odniesione do drogi w przedziale od v_b do v_e zgodnie z następującym wzorem:

$$d_m = \frac{v_b^2 - v_e^2}{25,92(s_e - s_b)} [m/s^2] \quad (3)$$

gdzie: v_b – prędkość pojazdu odpowiadająca $0,8 v$ [km/h]; v_e – prędkość pojazdu odpowiadająca $0,1 v$ [km/h], s_b – droga przebyta między v i v_b [m]; s_e – droga przebyta między v i v_e [m].

Następnie sprawdza się skuteczność hamowania pojazdu z hamulcami nagrzanymi. Jest to tzw. test zanikania (typu I). Po teście typu I z nagrzanymi hamulcami skuteczność hamulców roboczych nie powinna być mniejsza niż 75 % przypisanej i nie mniejsza niż 60 % wartości zmierzonej podczas testu typu 0 (dla hamulców zimnych). Podstawowe różnice między przepisami obecnie obowiązującymi a proponowanymi wynikają ze sposobu i warunków nagrzewania hamulców. Według obowiązujących wymagań [13] nagrzanie hamulców powinno być przeprowadzone w taki sposób, aby energia w nich tracona odpowiadała energii potrzebnej do utrzymania prędkości pojazdu na poziomie $80\% \pm 5\%$ prędkości maksymalnej na 1 km odcinku drogi o pochyleniu 10%.

W proponowanych przepisach [7] test zanikania hamulców nagrzanym ciągników powinien być wykonany z wielokrotnym hamowaniem, poprzez kolejne włączenia i wyłączenia hamulców. Liczbę cykli zahamowań i odhamowań n oraz warunki badań przedstawiono w tabeli 3. Siła przyłożona do organu sterującego powinna być tak dobrana, aby można było uzyskać przy pierwszym zahamowaniu średnią wartość w pełni rozwiniętego opóźnienia równą $3m/s^2$. Siła ta powinna być utrzymana we wszystkich następnych hamowaniach.

Tab.3. Warunki badania skuteczności hamulców roboczych (test typu I z hamulcami nagrzanymi)

Kategoria pojazdu	Warunki			
	v_1 [km/h]	v_2 [km/h]	Δt [s]	n
T	$80\% v_{max}$	$\frac{1}{2} v_1$	60	20

Poszczególne wielkości w tab. 3 oznaczają: v_1 – prędkość na początku hamowania; v_2 – prędkość na końcu hamowania; n – liczba zahamowań; Δt – czas trwania cyklu hamowania, upływający pomiędzy początkiem jednego zahamowania i początkiem następnego.

Układ postojowy ciągników powinien zapewnić ich unieruchomienie na spadku i na wzniesieniu o nachyleniu 18% (dla kategorii T4.3 wartość nachylenia wzniesienia wynosi 40%). W przypadku zespołu pojazdów z niehamowaną przyczepą ciągnik powinien utrzymać zespół pojazdów w bezruchu na spadku i na wzniesieniu o pochyleniu 12%. Wg obowiązujących przepisów masa pojazdu niehamowanego nie może być większa od masy ciągnika i nie może w żadnym razie przekraczać 3 ton. W proponowanych przepisach maksymalna masa zespołu pojazd ciągnący-pojazd ciągnięty niehamowany nie powinna przewyższać maksymalnej masy dopuszczalnej obciążonego ciągnika, pomnożonej przez iloraz przypisanej maksymalnej drogi zatrzymania do drogi zatrzymania wyznaczonej podczas testu typu 0 [7]:

$$P_C \leq P_M \frac{s_p}{s_a} \quad (4)$$

gdzie: P_C – maksymalna masa zespołu ciągnik-pojazd niehamowany, deklarowana przez producenta ciągnika, P_M – maksymalna masa obciążonego ciągnika, s_p – przypisana droga zatrzymania, s_a – osiągnięta droga zatrzymania, zmierzona podczas testu typu 0 (traktor obciążony do swej masy maksymalnej P_M).

W każdym przypadku suma obciążenia wszystkich osi ciągniętego pojazdu niehamowanego nie powinna przekraczać 3,5 tony.

Awaryjny układ hamulcowy ciągnika powinien zmniejszać prędkość pojazdu do zatrzymania z opóźnieniem równym co najmniej $1,5 \text{ m/s}^2$ kiedy $v_{max} \leq 30 \text{ km/h}$ i $2,2 \text{ m/s}^2$ kiedy $v_{max} > 30 \text{ km/h}$. Test efektywności hamulców awaryjnych powinien być wykonany poprzez symulację niesprawności w układzie hamulców roboczych.

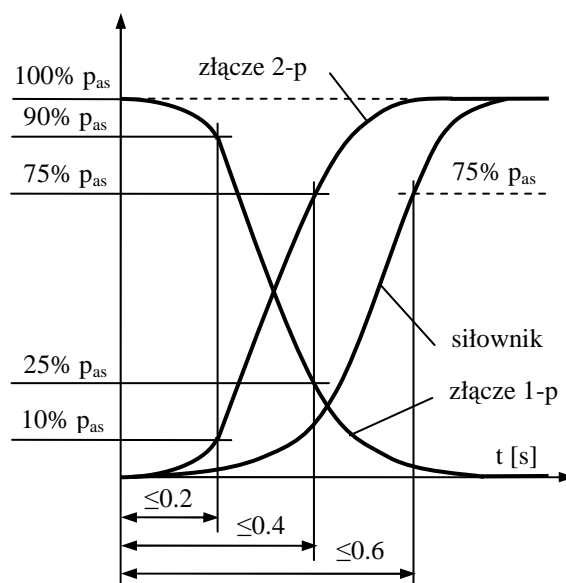
Układom hamulcowym stawia się wymóg działania nadążnego przy hamowaniu powolnym oraz wymóg dużej szybkości działania przy hamowaniu nagłym. Przez pojęcie działanie nadążne rozumie się właściwość układu polegającą na zachowaniu w warunkach stanu ustalonego proporcjonalnej zależności pomiędzy zmianą sygnału wejściowego a wyjściowego. Oznacza to, że ciśnienie w komorach organów wykonawczych powinno zmieniać się proporcjonalnie do przemieszczenia pedału hamulca.

Podczas hamowań nagłych szybkość działania układu hamulcowego ciągnika i przyczepy powinna być taka, aby przypisana skuteczność hamulca roboczego było osiągnięta w czasie nie większym niż 0,6 s. W hydraulicznych układach hamulcowych warunek ten uważa się za spełniony, jeżeli opóźnienie hamowania lub ciśnienie płynu hamulcowego w najbardziej oddalonym siłowniku osiągnie wartość odpowiadającą przypisanej skuteczności hamowania. W hamowaniach nagłych przyjmuje się czas narastania siły na pedale równy 0,2 s.

2.4. Sterowanie hamulcami przyczepy

W układach dwuprzewodowych połączenie pomiędzy instalacją pneumatyczną ciągnika a układem hamulcowym przyczepy jest realizowane za pomocą dwóch przewodów, z których jeden jest przeznaczony do zasilania, a drugi służy do sterowania układem hamulcowym przyczepy. W celu zapewnienia wymienialności ciągników i przyczep ujednolicono wartości ciśnienia w obu przewodach. Przy pełnym uruchomieniu hamulca roboczego ciągnika wartości ciśnienia powinny mieścić się w granicach od 6,5 do 8,5 bar. W układach jednoprzewodowych ciśnienie na złączu powinno wynosić od 5,8 do 6,3 bar.

Sterowanie hamulców przyczepy (**IV** – na rys.1) powinno być realizowane wyłącznie przy jednoczesnym uruchomieniu hamulców pojazdu ciągnącego, dlatego określono wymagane czasy zmian ciśnienia w złączu magistrali sterującej pojazdu ciągnącego. W układzie jedнопrzewodowym czas upływający od rozpoczęcia nacisku na pedał hamulca do momentu gdy ciśnienie w przewodzie sterującym (długości 2,5 m i średnicy wewnętrznej 13 mm) podłączonym od złącza ciągnika zmaleje do 90% minimalnej wartości nie powinien przekraczać 0,2 s, a gdy zmaleje do 25% tej wartości nie powinien przekraczać 0,4 s przy czasie pełnego uruchomienia pedału wynoszącym 0,2 s [10]. W propozycji nowych przepisów [7] nie ma wymogu badania czasu reakcji zespołu sterującego dla układów dwuprzewodowych. Do oceny szybkości działania tego zespołu można wykorzystać przepisy Regulaminu 13 EKG [8]. W układach dwuprzewodowych czas wzrostu ciśnienia w przewodzie sterującym do 10% ciśnienia asymptotycznego nie powinien przekraczać 0,2 s, a do 75% – 0,4 s. Wymagania dotyczące czasu reakcji zespołu sterującego ciągnika zilustrowano na rys. 2.



Rys.2 Przebieg ciśnienia w funkcji czasu oraz wymagane czasy reakcji zespołu sterującego ciągnika

Oprócz wymogów dotyczących szybkości działania stawiane są również wymagania dotyczące kompatybilności układów hamulcowych pojazdów zestawu ciągnikowego [7]. Niedopuszczalne jest hamowanie w zespole pojazdów tylko przyczepy. Odpowiednia synchronia działania hamulców obu pojazdów powinna zapobiegać utracie stateczności kursowej, prowadzącej do składania się zespołu. Warunkiem prawidłowej synchronii hamowania jest taki dobór intensywności hamowania przyczepy w funkcji ciśnienia w przewodzie sterującym, aby w pierwszej fazie hamowania pojawiła się w sprzęgu nieznaczna siła rozciągająca, utrzymująca współosiowość ciągnika i przyczepy.

2.5. Wymagania ogólnotechniczne

Poza wymaganiami warunkującymi dopuszczanie pojazdu do ruchu drogowego, istnieją specyficzne wymagania dotyczące szczelności układu oraz niezawodności i trwałości zespołów, części w różnych warunkach eksploatacji powietrznych układach hamulcowych.

Szczelność układu sprawdza się poprzez pomiar spadku ciśnienia w układzie po określonym upływie czasu. Według [10] spadek ciśnienia w zbiorniku od minimalnej wartości ciśnienia regulowanego nie powinien przekraczać 2% w ciągu 10 min. Znacznie mniej restrykcyjne wymagania stosuje firma Wabco, według której jako dopuszczalny

przyjmuje się spadek ciśnienia o 5% po upływie 3 min w siłownikach hamulcowych napełnionych początkowo do połowy maksymalnej wartości ciśnienia regulowanego [1].

3. Metodyka badań

Celem podstawowym przeprowadzonych testów diagnostycznych było wypróbowanie metod i procedur opracowanego programu badań [9], obejmującego badanie skuteczności hamulców ciągnika oraz badanie jego pneumatycznej instalacji hamulcowej. Program badań instalacji pneumatycznej obejmował sprawdzenie:

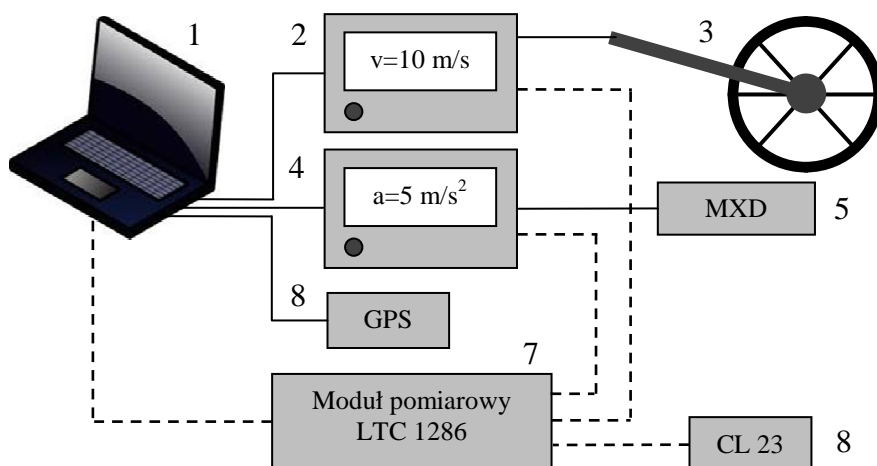
- szczelności układu,
- zakresu pracy regulatora ciśnienia,
- wartości ciśnień na złączach,
- pojemności zbiornika sprężonego powietrza,
- wydatku sprężarki,
- czasu reakcji zespołu sterującego.

Badania wykonano dla prototypowego ciągnika firmy Pronar o mocy 81,6 KM, wyposażonego w hamulce uruchamiane hydraulicznie. Badania powietrznej instalacji hamulcowej ciągnika polegały na rejestracji czasowych przebiegów zmian siły na pedale hamulca i ciśnienia powietrza w wybranych punktach instalacji. Sposób przeprowadzenia pomiarów, warunki badań oraz wymagania stawiane badanemu podzespołowi opisano szczegółowo w pracy [9]. System pomiarowy obejmował:

- komputer klasy Pentium III,
- adapter wejściowo-wyjściowy,
- kartę pomiarową MC1212 firmy Senga, rozdzielczość: 12 bit, dokładność przetwarzania: 0,02% FSR ± 1 LSB,
- tensometryczny czujnik siły CL 23 firmy ZEPWN z przetwornikiem, zakres pomiarowy: 0÷1 kN, klasa dokładności: 0,1,
- przetworniki ciśnienia MBS 32 firmy Danfoss, zakres pomiarowy: 0÷10 bar, klasa dokładności: 0,3,
- obrotomierz cyfrowy DMT-21 (do pomiaru prędkości obrotowej silnika), zakres pomiarowy: 0÷9999, klasa dokładności: 0,2, program „MC1212” do rejestracji i akwizycji pomiarów.

Badania skuteczności hamulców zasadniczych ciągnika polegały na rejestracji drogi, opóźnienia i siły na pedale hamulca podczas procesu hamowania. Do rejestracji zastosowano opisany dokładnie w pracy [3] system pomiarowy (rys. 3), obejmujący:

- komputer przenośny,
- moduł pomiarowy LTC1286,
- tensometryczny czujnik siły CL 23 firmy ZEPWN z przetwornikiem, zakres pomiarowy: 0÷1kN, klasa dokładności: 0,1,
- piąte koło z przetwornikiem obrotowo-impulsowym,
- opóźnieniomierz elektroniczny, zakres pomiarowy: ± 2 g,
- odbiornik GPS Holux GPSlim 236,
- program „POMIAR1286” do rejestracji danych podczas hamowania.

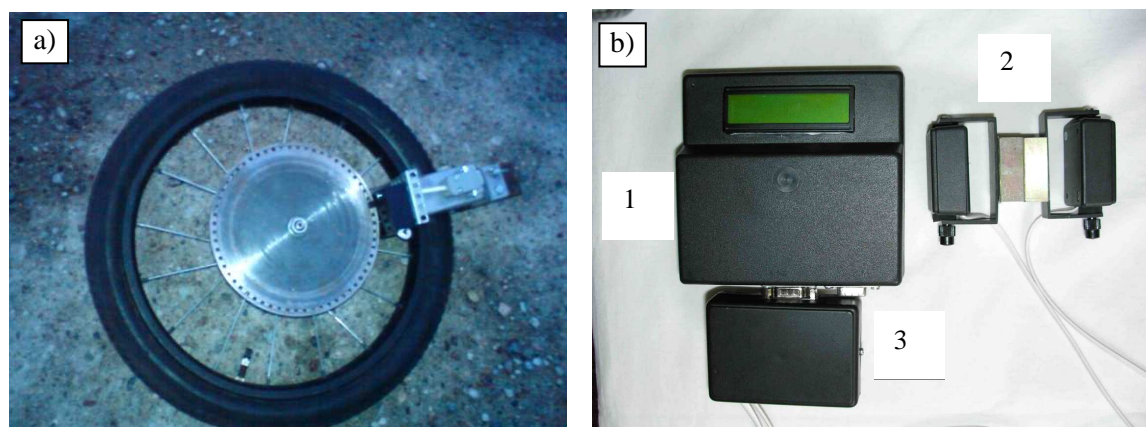


Rys.3. Schemat systemu pomiarowego do badania procesu hamowania pojazdów: 1 – komputer przenośny, 2 – mikrokontroler „piąte koło”, 3 – piąte koło, 4 – opóźniomierz elektroniczny, 5 – czujnik przyspieszenia MXD7202, 6 – odbiornik GPS Holux GPSlim 236, 7 – moduł pomiarowy LTC1286, 8 – czujnik nacisku na pedał hamulca CL23

Zastosowanie modułu pomiarowego LTC1286 wykorzystującego 12-bitowy przetwornik A/C LTC1286 oraz 8 kanałowy multiplekser HCF4051 umożliwiło zwiększenie częstotliwości pomiarów z wyjść analogowych do 10 kHz. Dodatkowo moduł posiadał 8 wyjść i 8 wejść cyfrowych opartych na układach HCF4051 i MC4094. Komunikacja z komputerem przenośnym odbywała się poprzez port LPT lub złącze USB wykorzystujące interfejs SPI synchronicznego przesyłania danych.

Do rejestracji drogi hamowania zastosowano piąte koło, w którym impulsy generowane przez tarczę są rejestrowane przez czujnik optyczny TCST1103 (rys.4-a), a następnie zliczane przez mikrokontroler oparty na układzie ATmega 8 i oprogramowany w języku Bascom. Na podstawie zliczanych impulsów wyznaczano drogę przejechaną przez pojazd, jego chwilową prędkość i przyspieszenie. Układ mikrokontrolera został wyposażony w interfejs RS232 w celu jego kalibracji (zapis wartości promienia tocznego koła oraz liczby impulsów tarczy w pamięci EEPROM) oraz transmisji mierzonych danych do komputera przenośnego.

Opóźnienie hamowania wyznaczano metodą pośrednią poprzez różniczkowanie sygnału prędkości otrzymanego z piątego koła oraz metodą bezpośrednią przy użyciu czujników akcelerometrycznych pokazanych na rys.4-b. Do ich budowy wykorzystano czujniki przyspieszenia MXD7202 firmy MEMSIC, które podłączono poprzez wzmacniacz sygnału do mikrokontrolera wyposażonego w interfejs RS232 do komunikacji z komputerem przenośnym. Schematy elektryczne modułu pomiarowego LTC1286 oraz mikrokontrolerów piątego koła i opóźniomierza zamieszczono w pracy [3]. Do obsługi systemu pomiarowego wykorzystano program „Pomiar1286” napisany w środowisku Delphi.

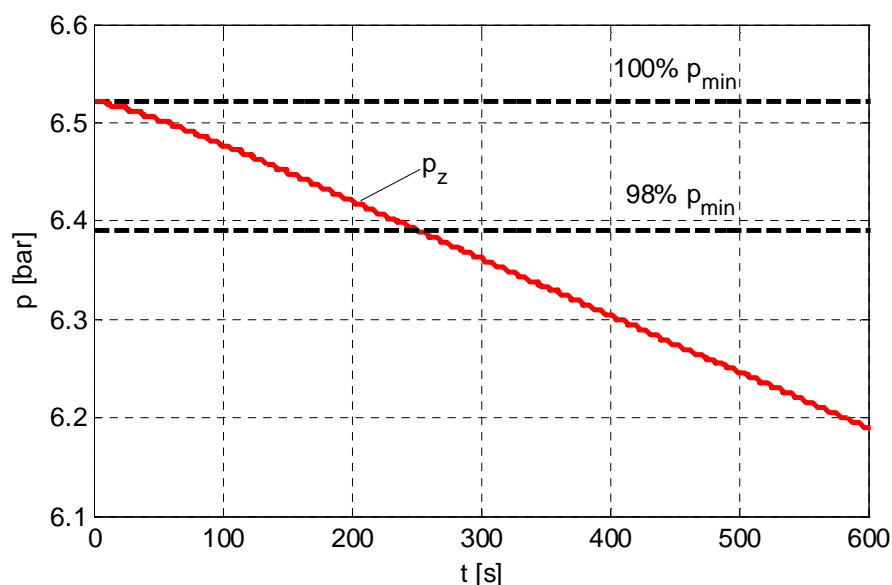


Rys.4. Urządzenia do pomiaru drogi i opóźnienia hamowania: a – tarcza impulsowa piątego koła wraz z czujnikiem optycznym, b – elementy składowe opóźniomierza: 1 – mikrokontroler, 2 – czujniki pomiarowe, 3 – wzmacniacz sygnału

4. Przykłady testów diagnostycznych

4.1. Sprawdzenie szczelności układu

Sprawdzenie szczelności polegało na rejestracji przez 10 min spadku ciśnienia $p_z(t)$ rejestrowanego na złączu zasilającym instalacji dwuprzewodowej od wartości początkowej równej minimalnej wartości ciśnienia regulowanego p_{min} . W przypadku wykrycia nieszczelności (rys.5) konieczne jest zlokalizowanie i usunięcie przecieków przed wykonaniem kolejnych testów.

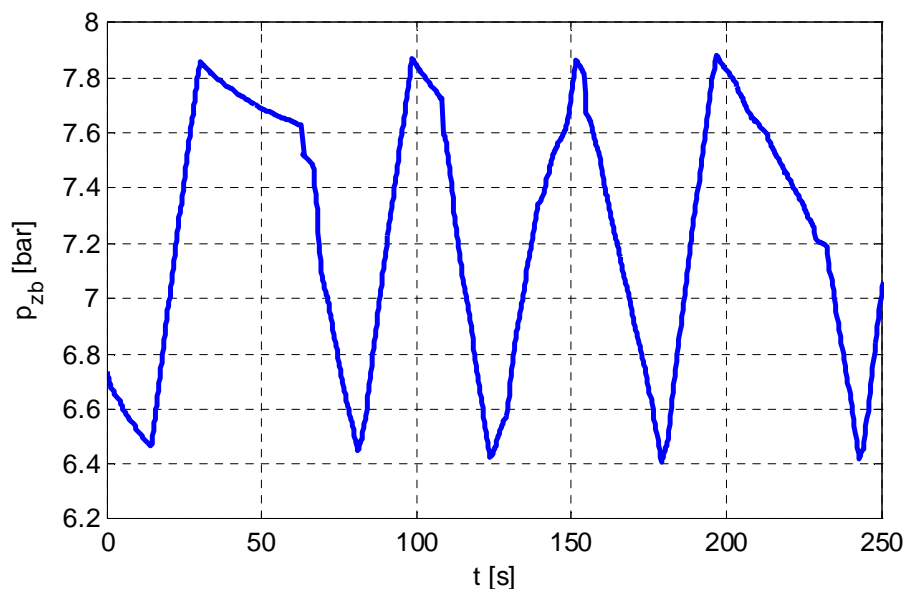


Rys. 5. Sprawdzenie szczelności instalacji na podstawie przebiegu ciśnienia p_z na złączu zasilającym

4.2. Sprawdzenie pracy regulatora ciśnienia

Sprawdzenie regulatora przeprowadzono przy pracującym silniku rejestrując zmiany ciśnienia w zbiorniku sprężonego powietrza ciągnika, odpowietrzanego przez zawór odwadniający. Do złącza sterującego instalacji dwuprzewodowej podłączano zasobnik o pojemności $385 \pm 5 \text{ cm}^3$, stanowiący równoważnik pojemności przewodu zasilającego

przyczepy o długości 2,5 m i średnicy 13 mm. Na podstawie zarejestrowanego przebiegu zmian ciśnienia p_{zb} (rys.6) wyznaczano wartości ciśnienia włączania $p_{min}=6,40\div6,47$ (według specyfikacji $6,5\div6,8$ bar) i ciśnienia wyłączenia $p_{max}=7,85\div7,88$ bar (według specyfikacji $8\pm0,2$ bar) regulatora przy poziomie ufności 95%. Badania wykazały konieczność regulacji ciśnienia włączania. W wyniku badań stwierdzono niewłaściwe, niezgodne ze specyfikacją wartości ciśnienia włączania regulatora Visteon 51 10 018. Nie stwierdzono natomiast żadnych nieprawidłowości w jego cyklicznej pracy.

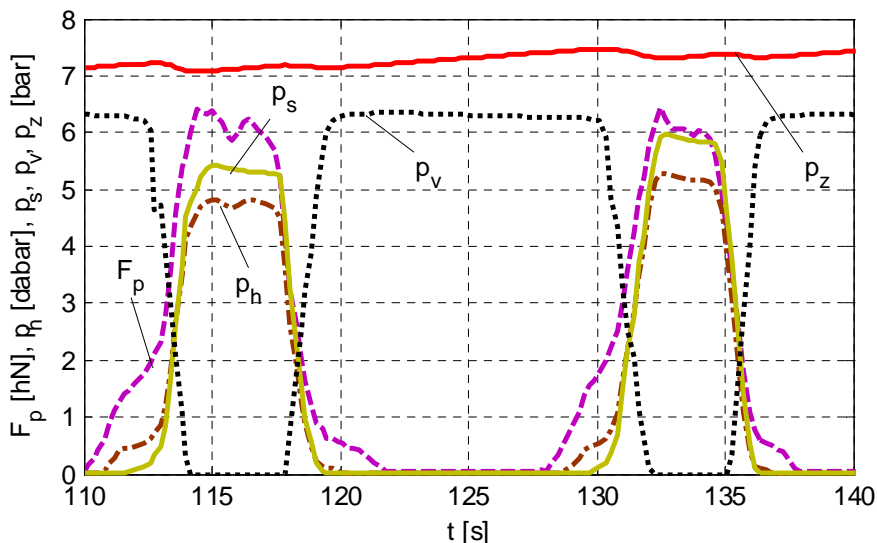


Rys. 6. Przykładowy przebieg zmian ciśnienia p_{zb} w zbiorniku instalacji pneumatycznej podczas sprawdzania regulatora Visteon 51 10 018

4.3. Sprawdzenie ciśnienia na złączach

Sprawdzenie wartości ciśnienia p_s na złączu sterującym i ciśnienia p_z na złączu zasilającym układu dwuprzewodowego oraz ciśnienia p_v na złączu układu jednoprzewodowego polegało na cyklicznym hamowaniu i odhamowaniu przy pracującym silniku. Wycinek przykładowego przebiegu czasowego siły F_p na pedale hamulca, ciśnienia p_h w hydraulicznej instalacji hamulcowej, ciśnienia p_{zb} w zbiorniku oraz ciśnienia na złączach zarejestrowanego podczas badań ciągnika pokazano na rys.7.

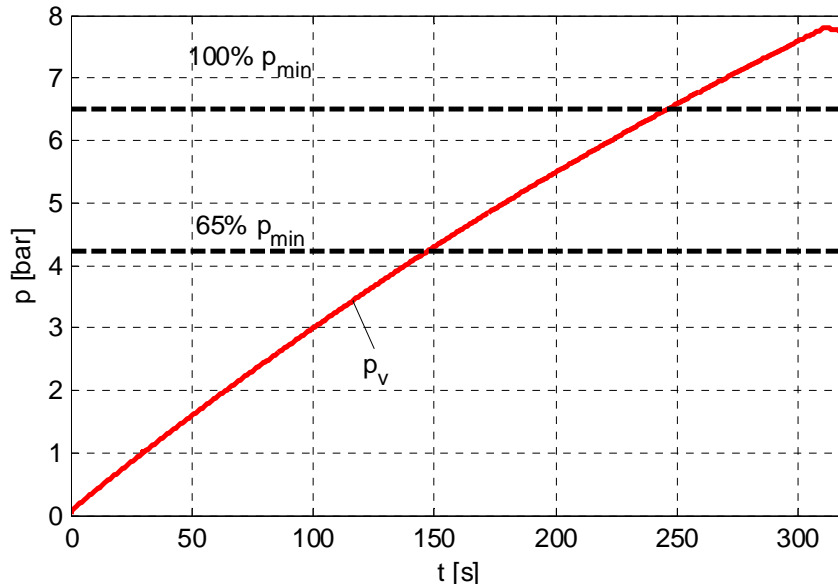
Wyznaczone na podstawie pomiarów zmiany ciśnienia w układzie dwuprzewodowym zawierały się w przedziale $6,43\div7,87$ bar, zaś w układzie jednoprzewodowym - w przedziale $6,08\div6,41$ bar. Zaniżenie wartości minimalnego ciśnienia regulowanego w układzie dwuprzewodowym (poniżej wymaganych 6,5 bar) wynika ze zbyt niskiej, nieodpowiadającej specyfikacji technicznej, wartości ciśnienia włączania regulatora.



Rys.7. Przykładowe przebiegi mierzonych wielkości podczas sprawdzania ciśnienia na złączach instalacji powietrznej: F_p – siła na pedale hamulca, p_s , p_z , p_v – ciśnienie na złączu sterującym, złączu zasilającym i złączu jedнопrzewodowym, p_h – ciśnienie w instalacji hydraulicznej hamulców zasadniczych

4.4. Sprawdzenie wydátku sprężarki

Badania polegały na rejestracji zmian ciśnienia napełniania sprężonym powietrzem zbiornika podłączonego do złącza zasilającego instalacji pneumatycznej ciągnika (rys.8).



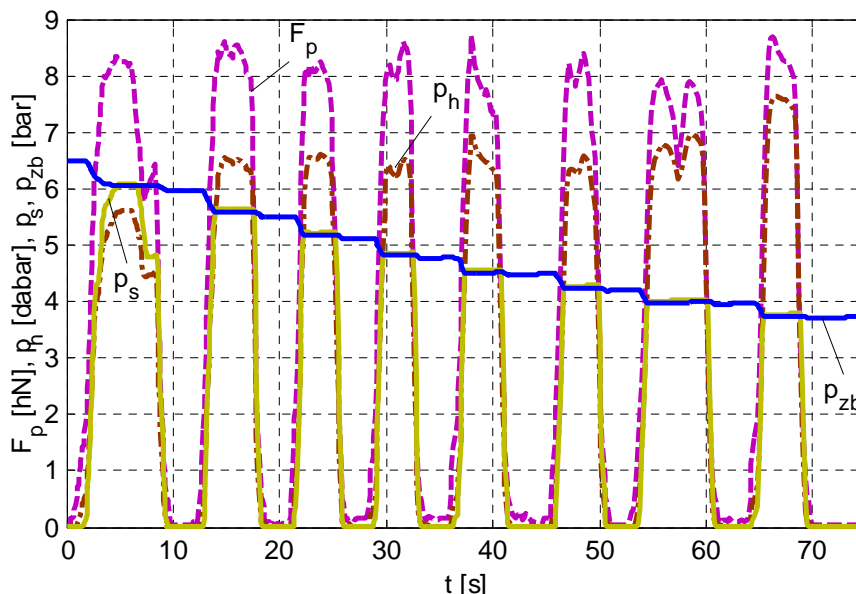
Rys.8. Przykładowy przebieg wzrostu ciśnienia p_v w zbiorniku zastępczym o objętości $V=60,38 \text{ dm}^3$ podczas sprawdzania sprężarki

Czas napełniania zbiornika zastępczego o objętości $V=60,38 \text{ dm}^3$ wyliczonej wg zależności (1), mierzono od chwili uruchomienia rozgrzanego silnika do chwili osiągnięcia wymaganych ciśnień przy maksymalnej prędkości obrotowej silnika $n_s=2450 \text{ obr/min}$. Następnie na podstawie 3 pomiarów wyznaczano średni czas $t_1=147,18\text{s}$ narastania ciśnienia od zera do 65% wartości minimalnego ciśnienia regulowanego oraz czas $t_2=246,23\text{s}$

potrzebny do osiągnięcia 100% wartości tego ciśnienia. Uzyskane wartości są mniejsze od wartości maksymalnych – odpowiednio 360 i 540 s – dopuszczalnych dla ciągników przeznaczonych do ciągnięcia przyczep.

4.5. Sprawdzenie pojemności zbiornika powietrza

Sprawdzenie poprawności doboru zbiornika sprężonego powietrza w układzie dwuprzewodowym polegało na wykonaniu 8 bezpośrednio następujących po sobie pełnych hamowań przy niepracującej sprężarce i pomiarze ciśnienia w zbiorniku kontrolnym o pojemności $0,5 \text{ dm}^3$ podłączonym do złącza sterującego (rys.9).

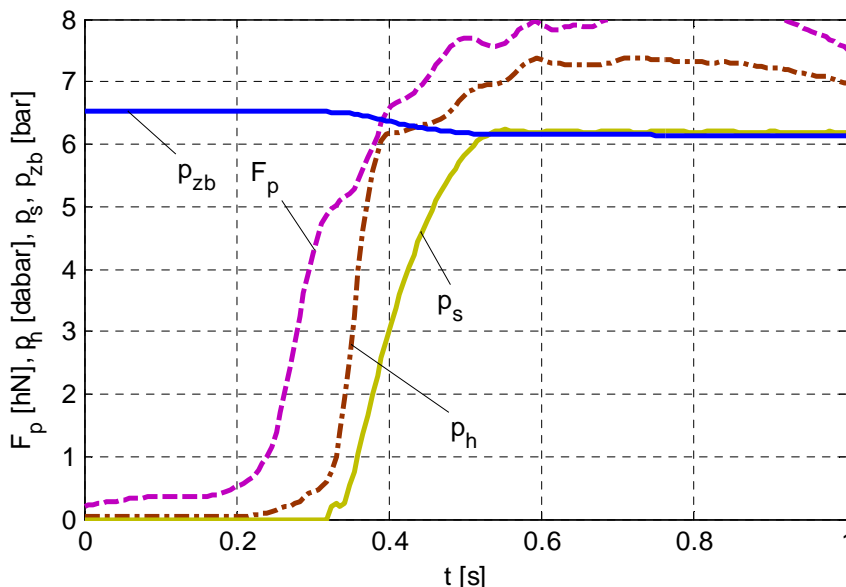


Rys.9. Przykładowy przebieg rejestrowanych wielkości podczas sprawdzania pojemności zbiornika sprężonego powietrza w układzie dwuprzewodowym; F_p – siła na pedale hamulca, p_h – ciśnienie w instalacji hydraulicznej, p_s – ciśnienie na złączu sterującym, p_{zb} – ciśnienie w zbiorniku

Na podstawie 3 zarejestrowanych pomiarów ciśnienia w zbiorniku kontrolnym wyznaczano średnie wartości ciśnienia $p_1=6,08$ bar po pierwszym i ciśnienia $p_8=3,81$ bar po ósmym hamowaniu. Wyniki badania świadczą o poprawności doboru pojemności zbiornika sprężonego powietrza.

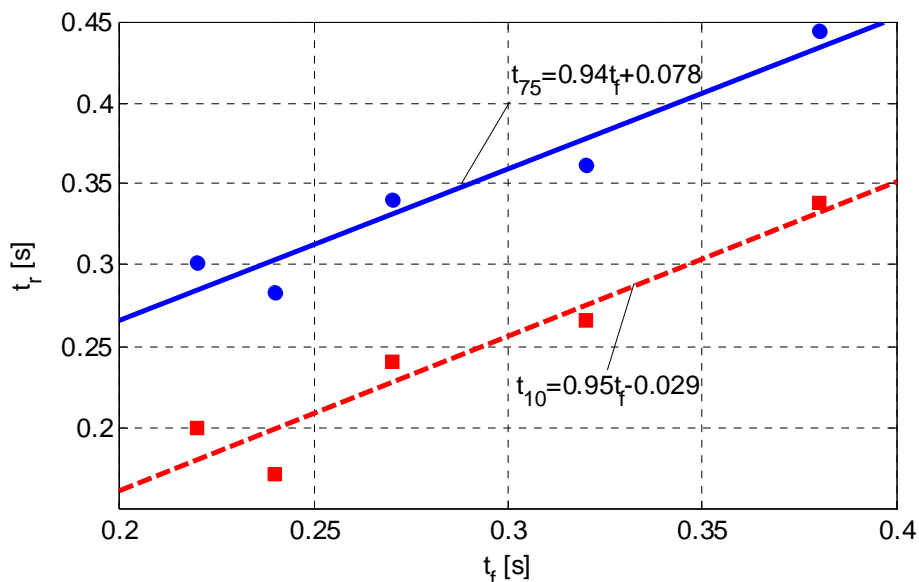
4.6. Sprawdzenie czasu reakcji zespołu sterującego

Czas reakcji zespołu sterującego instalacji hamulcowej ciągnika wyznaczano na podstawie zarejestrowanych zmian siły na pedale hamulca oraz ciśnienia na końcu przewodu o długości 2,5 m i średnicy 13 mm (imitacja przewodu sterującego przyczepy) podłączonego do złącza sterującego podczas badania instalacji dwuprzewodowej lub do złącza zasilająco-sterującego podczas badania instalacji jednoprzewodowej. Przykładowe przebiegi mierzonych wielkości pokazano na rys. 10.



Rys.10. Przykładowy przebieg zarejestrowanych wielkości podczas badania czasu reakcji ciągnika w układzie dwuprzewodowym: F_p – siła na pedale hamulca, p_h – ciśnienie w instalacji hydraulicznej, p_s – ciśnienie na złączu sterującym, p_{zb} – ciśnienie w zbiorniku

Następnie na podstawie zarejestrowanych przebiegów wyznaczano czas reakcji t_{10} i t_{75} , tj. czas osiągnięcia 10 i 75% wartości ciśnienia asymptotycznego, w funkcji czasu uruchamiania pedału hamulca, począwszy od najkrótszych możliwych uruchomień, powiększanych stopniowo do około 0,4 s. Po wyznaczeniu metodą najmniejszych kwadratów równań regresji liniowej czasu reakcji t_r w funkcji czasu t_f zmian siły na pedale hamulca (rys.11), wyliczono czas reakcji odpowiadający czasowi uruchomienia w warunkach hamowania nagłego, to jest przy $t_f=0,2$ s.



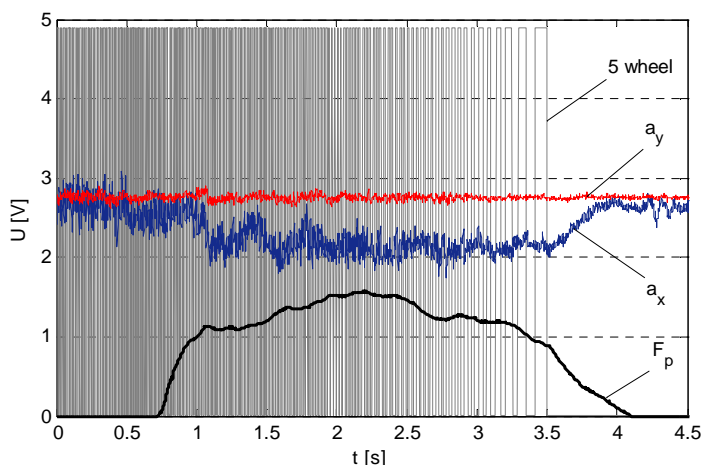
Rys.11. Wpływ czasu t_f narastania siły na pedale hamulca na czas reakcji t_{75} ($R^2=0,9275$) i t_{10} ($R^2=0,9122$) instalacji dwuprzewodowej

Wyznaczone wartości czasu reakcji $t_{10}=0,17$ s i $t_{75}=0,27$ s są niższe od wartości dopuszczalnych, co świadczy o poprawnym doborze elementów kształtujących

charakterystyki dynamiczne układu dwuprzewodowego instalacji hamulcowej badanego ciągnika.

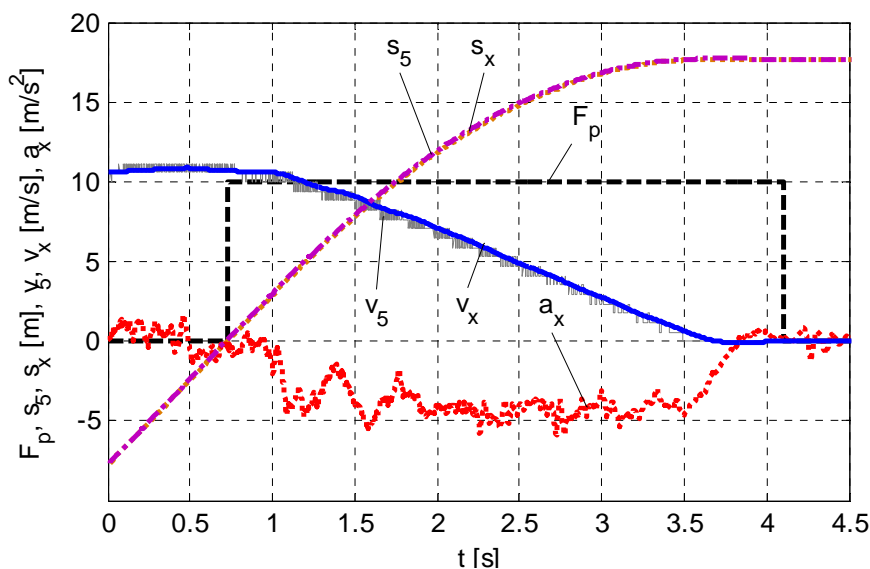
4.7. Sprawdzenie skuteczności zasadniczego układu hamulcowego

Przykładowe przebiegi napięcia z czujnika impulsów z piątego koła, opóźnieniomierza elektronicznego i czujnika nacisku na pedał hamulca zarejestrowane podczas hamowania ciągnika rolniczego z wykorzystaniem opisanego systemu pomiarowego pokazano na rys.12.



Rys.12. Przykład zastosowania systemu pomiarowego w badaniach skuteczności hamowania

Następnie na podstawie zarejestrowanych wielkości wyznaczano drogę, prędkość i opóźnienie hamowania w funkcji czasu (rys.13) oraz obliczano wskaźniki oceny skuteczności zasadniczego układu hamulcowego: drogę zatrzymania i średnie rozwinięte opóźnienie hamowania. W przeprowadzonych badaniach osiągnięto opóźnienia dochodzące do $5,22 \text{ m/s}^2$ (pomiar opóźnieniomierzem), a więc większe od minimalnej wartości $4,5 \text{ m/s}^2$ wymaganej po nowelizacji przepisów.



Rys. 13. Przykładowe wyniki pomiarów podczas sprawdzania skuteczności zasadniczego układu hamulcowego: F_p – znacznik siły na pedale hamulca, s_5 , v_5 – droga i prędkość wyznaczone na podstawie pomiarów z piątego koła, a_x , v_x , s_x – przyspieszenie, prędkość i droga wyznaczone na podstawie pomiarów z opóźnieniomierza elektronicznego

5. Podsumowanie

Opisany w pracy program badań homologacyjnych układów hamulcowych ciągników rolniczych obejmuje najważniejsze aspekty diagnozowania hamulców ciągnika oraz jego instalacji powietrznej do zasilania i sterowania hamulcami pojazdu ciągniętego. Przyjęte w poszczególnych testach diagnostycznych warunki i wymagania są zgodne z propozycjami nowego regulaminu badania hamulców pojazdów rolniczych [7]. Zdaniem autorów w proponowanych przepisach powinno się uwzględnić sprawdzanie czasu reakcji obwodu sterującego instalacji powietrznej ciągnika rolniczego, analogicznie jak w pojazdach użytkowych przeznaczonych do ciągnięcia przyczep.

Przedstawiona metodyka diagnozowania układu hamulcowego może być w całości lub częściowo wykorzystana do opracowania programu badań diagnostycznych nowo produkowanych (badania kwalifikacyjne na liniach produkcyjnych) oraz eksploatowanych ciągników rolniczych (okresowe badania techniczne na Stacji Kontroli Pojazdów). Pozwoli to wyeliminować z ruchu pojazdy z niesprawnymi hamulcami i instalacjami powietrznymi, co powinno poprawić bezpieczeństwo ruchu drogowego z udziałem ciągników agregatowanych z przyczepami i maszynami rolniczymi.

Literatura

1. Biedrzycki L, Opasewicz W. Powietrzne układy hamulcowe. Budowa i diagnostyka. Poradnik serwisowy. Wydawnictwo Instalator Polski, 2003.
2. Bil H, Kieracińska A, Okniński M. Propozycja zmiany w nadzorowaniu instalacji sprężonego powietrza ciągników rolniczych dla poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego w Polsce. VIII Konferencja hamulcowa '2007 . Hamulce pojazdów drogowych. Łódź 8-9, 11, 2007.
3. Czaban J, Kamiński Z. Badanie skuteczności hamulców ciągników rolniczych. Archiwum Motoryzacji, 2010, nr 1, s.15-25.
4. Dodd M, Bartlett R, Knight I. Provision of information and services on the subject of the performance requirements, testing methods and limit values for braking systems of agricultural and forestry tractors, their trailers and interchangeable towed machinery – final report. TRL Unpublished Project Report No. UPR/VE/064/07, UK, Wokingham, 2007.
5. Dubowski A, Pawłowski T. Medium size road units – an innovative approach for improving efficiency and safety of agricultural transportation in Poland and Europe as well. Increasing work efficiency in agriculture, horticulture and forestry. XXXI CIOSTA-CIGR V Congress Proceedings 2005, pp. 154-161.
6. Directive 2003/37/EC of the European Parliament and of the Council of 26 May 2003 on type-approval of agricultural or forestry tractors, their trailers and interchangeable towed machinery, together with their systems, components and separate technical units and repealing Directive 74/150/EEC.

7. Draft Regulation of the European Parliament and the Council on the braking systems of agricultural or forestry tractors, their trailers and interchangeable towed machinery, amending Directive 2003/37/EC, Council Directive 89/173/EEC and repealing Council Directive 76/432/EEC. (17.11.2008)
http://circa.europa.eu/Public/irc/enterprise/automotive/library?l=/agricultural_tractors/meeting_november_2008/99rev16_v1711108pdf/ EN 1.0 &a=d
8. ECE Regulation No. 13. Uniform provisions concerning the approval of vehicles of categories M, N and O with regard to braking. UN Economic Commission for Europe, Geneva, Switzerland, 2001.
9. Kamiński Z, Czaban J. Propozycja programu badań układów hamulcowych ciągników rolniczych (Proposition of exploration program of braking systems of agriculture tractors). MOTROL, 2006, No. 8, pp. 92-100.
10. Polska norma PN-90/R-36123. Ciągniki. Przyczepy i przyczepiane maszyny rolnicze. Powietrzny jednoprzewodowy układ przenoszący hamulców. Wymagania i badania.
11. Przyczepy leśne-przeгляд. Drwal, 2006, nr 1, str. 22-25.
12. Radlinski RW, Flick MA. Tractor and trailer brake system compatibility. SAE Transactions, paper no. 861942, 1986.
13. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dn. 30 grudnia 2003r. w sprawie homologacji ciągników rolniczych (Dz. U. z dnia 15 stycznia 2004 r.). Załącznik nr 3. Wykaz wymagań obowiązujących w homologacji typu. Część B.
14. Scarlett A. In-service assessment of agricultural trailer and trailed appliance braking system condition and performance. The Agricultural Trailer Braking Study. RR697 Research Report, 2009 (<http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr697.pdf>)