
1. Układ hamulcowy

1.1. Wiadomości wstępne

Układ hamulcowy jest jednym z głównych układów mających decydujący wpływ na bezpieczeństwo ruchu drogowego. Jego zadaniami są **zmniejszenie prędkości** lub **zatrzymanie pojazdu**, a także **unieruchomienie go na postoju**.

Współczesnym układom hamulcowym stawia się szereg wymagań, jak np.:

- niezawodność działania;
- duża skuteczność w różnych warunkach drogowych;
- krótki czas uruchamiania (od momentu przyłożenia siły uruchamiającej do zadziałania układu);
- odpowiedni rozdział sił hamowania na poszczególne koła;
- stateczność ruchu pojazdu w trakcie hamowania, czyli zdolność pojazdu do utrzymania w trakcie hamowania założonego przez kierowcę toru jazdy (także w przypadku zablokowania kół);
- proporcjonalne, płynne zwiększanie siły hamowania w stosunku do wzrastającej siły uruchamiającej układ;
- pełne odhamowanie, czyli zanik efektu hamowania po odjęciu siły uruchamiającej hamulce;
- duża trwałość i łatwość obsługi;
- niski poziom hałasu.

1.2. Mechanika ruchu samochodu podczas hamowania

Podczas hamowania wypadkowa wszystkich sił działających na pojazd ma zwrot przeciwny do kierunku jazdy. Siła napędowa przestaje wówczas działać na koła pojazdu, a jego poruszanie odbywa się kosztem nagromadzonej wcześniej energii kinetycznej. Proces hamowania występuje w przypadku:

- odłączenia układu przeniesienia napędu od silnika (np. poprzez wciśnięcie pedału sprzęgła lub przełączenie dźwigni zmiany biegów w położenie neutralne) – opory ruchu pochłaniają zapas energii kinetycznej i pojazd zaczyna zwalniać, lecz takie działanie jest mało efektywne;

- hamowania silnikiem (poprzez zdjęcie nogi z pedału przyspieszenia bez rozłączania układu napędowego) – hamowanie pojazdu odbywa się z wykorzystaniem oporów stawianych przez układ tłokowo-korbowy niezasilanego paliwem silnika, koła zaczynają napędzać wał korbowy, a sprężane przez tłoki powietrze w cylindrach wywołuje moment hamujący przenoszony na koła napędowe; hamowanie silnikiem idealnie nadaje się do wspomagania procesu hamowania pojazdu, np. podczas zjazdu ze wznieślenia;
- włączenia hamulców ciągłego działania (silnikowych lub zwalniaczy, czyli retarderów);
- włączenia hamulców powodujących powstanie sił hamujących na wszystkich kołach pojazdu (napędzanych i nienapędzanych) – siła hamowania jest regulowana przez kierowcę, a ten sposób hamowania należy do najbardziej skutecznych; hamujący pojazd traci swoją energię w wyniku tarcia okładzin ciernych klocków i szczęk odpowiednio o tarcze i bębny hamulca, a energia mechaniczna pojazdu zostaje zamieniona na energię cieplną elementów ciernych hamulca.

1.2.1. Moment hamujący i siła hamowania

Siła hamowania F_H jest styczna do koła, a jej wartość wynosi

$$F_H = \frac{M_H}{r_d} \text{ [kN]} \quad (1.1)$$

gdzie:

M_H – moment hamujący [kN · m],

r_d – promień dynamiczny koła [m].

Siła hamowania całego pojazdu jest sumą sił hamowania działających na wszystkie koła lub wszystkie osie pojazdu, np.:

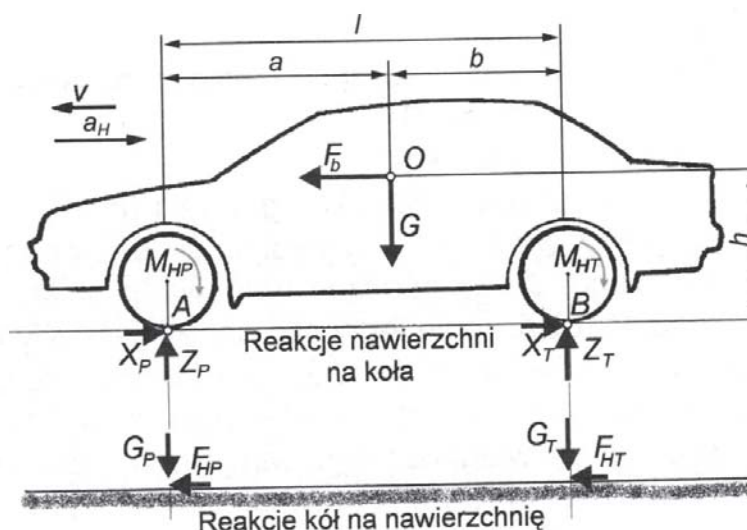
$$F_H = F_{HP} + F_{HT} \text{ [kN]}$$

gdzie F_{HP} , F_{HT} – siły hamowania odpowiednio przedniej i tylnej osi [kN].

Siły hamowania, styczne do każdego z kół w punkcie ich styku z nawierzchnią, działają na nią zgodnie ze zwrotem momentu hamującego, czyli chcą popchnąć ją do przodu. Można się tutaj posłużyć analogicznym przykładem rowerzysty, który chce zatrzymać rower, używając do tego wyłącznie swoich stóp. W trakcie takiego „hamowania nogami”, na nieutwardzonej drodze, buty będą żłobiły bruzdy w miękkim podłożu, spychając piasek w kierunku jazdy. Tak samo jest skierowana siła hamowania działająca na nawierzchnię drogi. Rower zatrzymuje się na skutek reakcji nawierzchni wywieranej na buty rowerzysty. Jest ona skierowana przeciwnie do siły hamowania. Podobnie efektem działania siły hamowania F_H na nawierzchnię drogi jest powstanie stycznych reakcji na kołach (X_P i X_T), których zwrot jest przeciwny do kierunku jazdy (rys. 1.1).

Rys. 1.1. Układ sił działających na pojazd podczas hamowania

G – siła ciężkości pojazdu; G_P , G_T – siły ciężkości przypadające odpowiednio na przednie i tylne koła; F_b – siła oporów bezwładności; M_{HP} , M_{HT} – momenty hamujące przedniej i tylnej osi; F_{HP} , F_{HT} – siły hamowania przedniej i tylnej osi; Z_P i Z_T – reakcje normalne działające odpowiednio na przednie i tylne koła; X_P i X_T – reakcje styczne działające odpowiednio na przednie i tylne koła; v – prędkość pojazdu; a_H – opóźnienie ruchu; O – środek masy samochodu; A , B – punkty styku kół z nawierzchnią drogi; l – rozstaw osi samochodu; a , b , h – współrzędne środka masy samochodu



Tak, jak w przypadku siły napędowej, wartość siły hamowania jest ograniczona przyczepnością kół do nawierzchni. W przypadku gdy siła hamowania przekroczy wartość siły przyczepności, dochodzi do zjawiska ślizgania się kół po nawierzchni drogi. Podczas hamowania zawsze występuje poślizg kół. Najbardziej efektywne hamowanie ma miejsce podczas niewielkiego poślizgu koła (około 15...30%), czyli w sytuacji, gdy siły hamujące zmniejszą prędkość obrotową kół o 15...30% w stosunku do prędkości obrotowej wynikającej z aktualnej prędkości jazdy. Wówczas współczynnik przyczepności kół do nawierzchni osiąga największą wartość. Większy poślizg, prowadzący do zablokowania kół, jest bardzo niebezpieczny z uwagi na możliwość zarzucenia pojazdu i niekontrolowanej zmiany kierunku jazdy. Urządzeniem zapobiegającym blokowaniu kół podczas hamowania jest **układ ABS** (ang. **Anti-Lock Braking System, Anti Blocking System**).

Maksymalna siła hamowania musi spełnić warunek

$$F_H \leq T$$

lub

$$F_H \leq \mu \cdot G \quad (1.2)$$

gdzie:

G – ciężar całego pojazdu [kN],

T – siła przyczepności [kN],

μ – współczynnik przyczepności kół do nawierzchni.

W trakcie hamowania pojazd porusza się ruchem opóźnionym, z ujemnym przyspieszeniem zwanym **opóźnieniem hamowania**. Jest ono źródłem powstawania siły bezwładności F_b , skierowanej zgodnie z ruchem pojazdu i przeciwstawiającej się hamowaniu. Jej wartość wynosi

$$F_b = m \cdot a_H = \frac{G}{g} \cdot a_H \text{ [N]} \quad (1.3)$$

gdzie:

a_H – opóźnienie hamowania (określa zmniejszenie prędkości pojazdu w jednostce czasu) [m/s^2],

m – masa pojazdu [kg],

g – przyspieszenie ziemskie; $g = 9,81$ [m/s^2].

Powyższy wzór nie uwzględnia sił bezwładności mas wirujących układu napędowego. Jeżeli podczas hamowania zostanie wciśnięty pedał sprzęgła, powodując rozłączenie jednostki napędowej, siły te będą niewielkie i można je pominąć, ponieważ o ich wartości będzie decydować wyłącznie masa koła zamachowego silnika. Jeżeli układ napędowy nie zostanie rozłączony, to należy uwzględnić bezwładność mas wirujących przeciwstawiających się hamowaniu pojazdu. Z drugiej strony hamowanie silnikiem powoduje powstawanie wspomnianego już wcześniej momentu hamującego, wspomagającego proces hamowania.

Ponieważ siła bezwładności F_b jest skierowana przeciwnie niż wszystkie pozostałe siły, bilans sił podczas hamowania jest następujący:

$$F_b = X + F_t + F_p + F_w \quad (1.4)$$

gdzie:

X – reakcje styczne drogi działające na koła pojazdu [kN],

F_t – siła oporów toczenia [kN],

F_p – siła oporów powietrza [kN],

F_w – siła oporów wzniesienia [kN].

Przy założeniu, że pojazd porusza się po poziomej drodze, można przyjąć, że siła oporów wzniesienia $F_w = 0$. Stosując dalsze uproszczenia, można pominąć siły oporów toczenia F_t i oporów powietrza F_p z uwagi na to, że są one nieporównywalnie małe w stosunku do siły bezwładności F_b i reakcji jezdni X . Wobec powyższego ostateczny bilans sił podczas hamowania jest następujący:

$$F_b = X$$

$$\text{ponieważ } F_H = X \quad F_b = \frac{G}{g} \cdot a_H \quad \text{oraz} \quad F_H \leq \mu \cdot G$$

to po podstawieniu otrzymuje się

$$F_H = \frac{G}{g} a_H \leq \mu \cdot G \quad (1.5)$$

Wynika stąd warunek ograniczający maksymalną wartość opóźnienia hamowania

$$a_H \leq \mu \cdot g$$

Przeciętna wartość współczynnika przyczepności μ nawet dla najlepszych nawierzchni jest na ogół mniejsza od 1 (dla suchego betonu może osiągnąć 1,19), a więc

$$aH < g$$

czyli

$$aH \leq 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (1.6)$$

Graniczną wartość opóźnienia hamowania aH na drodze o danym współczynniku przyczepności p można uzyskać pod warunkiem pełnego wykorzystania przyczepności wszystkich kół pojazdu. Ze względów bezpieczeństwa nie należy dopuszczać w trakcie jazdy do utraty przyczepności żadnego z nich. Graniczne wartości sił przyczepności poszczególnych kół są różne i uzależnione od ich obciążenia. Wynika z tego, że o maksymalnej wartości opóźnienia hamowania będzie decydować przyczepność najmniej obciążonej osi samochodu.

Z pierwszej części podręcznika, w której opisano układ przeniesienia napędu, wiadomo, że maksymalna siła napędowa na kołach także jest uzależniona od ich przyczepności do nawierzchni (współczynnika p) oraz przenoszonego obciążenia (siły normalnej G). Jeśli porównać procesy rozpędzania i hamowania tego samego pojazdu w tych samych warunkach drogowych, okaże się, że trudniej uzyskać jego przyspieszenie niż go zatrzymać. Oznacza to dłuższy czas potrzebny do uzyskania określonej prędkości podczas ruszania niż czas zatrzymania się pojazdu rozpędzonego do tej samej prędkości. Spowodowane jest to m.in. faktem, że siła napędowa działa w większości pojazdów tylko na dwa koła, natomiast siły hamujące są przyłożone do wszystkich kół.

Na najniższym biegu, dla którego przełożenie jest największe, na kołach pojazdu uzyskuje się największą siłę napędową. Umożliwia ona osiągnięcie największego przyspieszenia. Niestety, zredukowana wówczas przez skrzynkę biegów prędkość obrotowa silnika nie pozwala na uzyskanie dużych prędkości pojazdu. Dlatego też podczas przyspieszania konieczne jest przełączanie biegów, a to z kolei pociąga za sobą zmniejszenie siły napędowej (mniejsze przełożenie) i przyspieszenia. Dla samochodów osobowych maksymalne wartości osiąganych przyspieszeń a wynoszą na I biegu 2,5...5,5 m/s², natomiast na biegu II już tylko 1,6...2,8 m/s². Tymczasem dla samochodu osobowego średnie opóźnienie hamowania aH od prędkości początkowej 80 km/h do całkowitego zatrzymania wynosi około 5,8 m/s² [70],

1.2.2. Przebieg procesu hamowania

Na przebieg i końcowy efekt hamowania mają wpływ trzy ogniwa, biorące udział w tym procesie:

- **kierowca**, decydujący o momencie uruchomienia hamulców i o intensywności hamowania;
- **pojazd**, a głównie stan techniczny jego układu hamulcowego (np. wielkości luzów i skoku jałowego pedału hamulca, stan elementów ciernych, szczelność układu hydraulicznego lub pneumatycznego itp.) oraz ogumienia;