



**Maciej
Górowski**

Hamulce w pojazdach szynowych

Podstawowa charakterystyka, budowa i eksploatacja

Streszczenie

Celem artykułu jest przybliżenie tematyki związanej z budową i zasadami działania układów hamulcowych stosowanych w pojazdach szynowych – kolejowych i tramwajowych, ze zwróceniem uwagi na aspekty dotyczące bezpieczeństwa, osiągania odpowiedniej skuteczności hamowania i przyczepności pomiędzy kołem a szyną. Artykuł jest wstępem teoretycznym z zakresu stosowanych rozwiązań i wymagań stawianym układom hamulcowym i układom wspomagającym działanie hamulców w pojazdach szynowych.

Słowa kluczowe

Kolej, tramwaje, hamulce, przyczepność, droga hamowania, poślizg.

Otrzymano 24 sierpnia 2023 r., zatwierdzono do druku 18 września 2023 r.

DOI 10.4467/15053520PnD.23.007.18665

1. Wstęp

Hamulce w pojazdach szynowych, to jeden z najważniejszych układów wpływających na zapewnienie bezpieczeństwa eksploatacji. Duże masy pojazdów szynowych, wysokie prędkości jazdy, gorsze parametry związane z przyczepnością w porównaniu do pojazdów na kołach ogumionych oraz różnorodność taboru z punktu widzenia konfiguracji i przeznaczenia, powodują, że pojazdy szynowe mają wbudowane różnego rodzaju systemy hamowania oraz układy wspomagające, zapewniające osiągnięcie wymaganej skuteczności hamowania.

W niniejszym artykule omówione są: podstawowa charakterystyka, zasady działania i aspekty eksploatacyjne hamulców stosowanych w pojazdach kolejowych oraz tramwajowych.

W pojazdach szynowych siła hamowania wytwarzana może być z wykorzystaniem hamulców ciernych, hamulców dynamicznych i hamulców elektrycznych.

Dr Maciej Górowski, NEWAG IP Management sp. z o. o., Politechnika Krakowska, ORCID 0000-0003-3446-0032.

Odpowiednie rodzaje hamowania mogą być uruchamiane przez prowadzącego pojazd, personel pokładowy, pasażerów, osoby nadzorujące ruch pojazdów jak również samoczynnie przez systemy bezpieczeństwa w przypadku wykrycia nieprawidłowości.

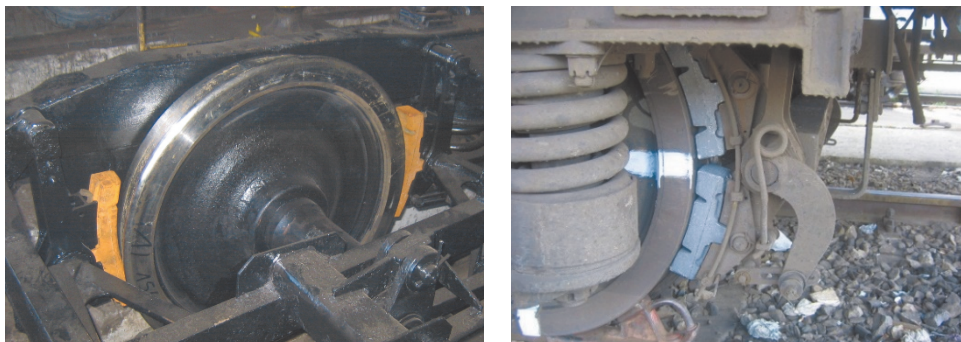
2. Hamulce w pojazdach kolejowych

Według przepisów [1] każdy pojazd kolejowy musi być wyposażony w funkcję hamulca głównego oraz funkcję hamulca postojowego. Ta pierwsza wykorzystywana jest podczas hamowania służbowego (roboczego) oraz nagłego (wdrażanego w sytuacjach niebezpiecznych). Druga ma zapewnić działanie siły hamowania podczas postoju pociągu przez nieograniczony czas i bez dostępności energii na pokładzie. Z punktu widzenia sterowania przepisy wymagają, aby zastosowany układ hamulcowy miał trzy tryby sterowania. Pierwszym z nich – i najważniejszym z punktu widzenia bezpieczeństwa – jest tryb hamowania nagłego, czyli uruchomienia określonej siły hamowania w określonym maksymalnym czasie reakcji, w celu zatrzymania pociągu z określoną skutecznością hamowania. Drugim trybem jest hamowanie służbowe, który umożliwia uruchomienie regulowanej siły hamowania w celu sterowania prędkością pociągu, łącznie z zatrzymaniem i czasowym unieruchomieniem. Trzecim trybem jest hamowanie postojowe, które generuje siłę hamującą zapewniającą utrzymanie pociągu (lub pojazdu) w stanie trwałego unieruchomienia w pozycji stacjonarnej, bez energii dostępnej na pokładzie.

2.1. Hamulce cierne

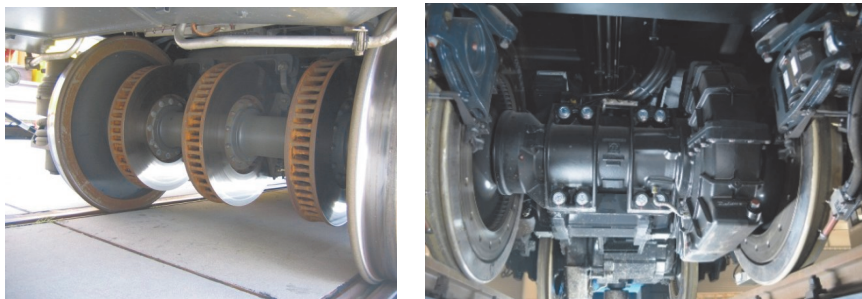
Jak było wspomniane we wstępie, jednym z rodzajów hamulców stosowanych w pojazdach szynowych są hamulce cierne. W pojazdach kolejowych rozróżniamy wśród nich hamulce: klockowe, tarczowe, pasowe oraz szynowe. W hamulcach klockowych tarcie cierne następuje na styku par ciernych: powierzchni tocnych kół i wstawek hamulcowych. Wstawki hamulcowe, czyli elementy bezpośrednio współpracujące ciernie ze stalowym kołem wchodzi w skład tzw. klocków hamulcowych. Stosuje się wstawki cierne wykonane z żeliwa (ryc. 1) oraz materiałów kompozytowych. Pozytywną cechą wstawek żeliwnych jest lepsze odprowadzanie ciepła (około 30–40% ciepła odprowadza wstawka). Cechą wstawek kompozytowych jest niższa cena, brak iskrzenia, duża odporność na zużycie oraz brak piszczenia w końcowej fazie hamowania. W zakresie temperatury wstawka taka odprowadza jednak tylko około 5% ciepła co powoduje, że koło jest bardziej obciążane termicznie. Wstawki kompozytowe są też bardziej wrażliwe na wilgoć oraz wpływają na obniżenie współczynnika przyczepności koła do szyny, gdyż wykazują gorsze właściwości czyszczące koła, niż wstawki żeliwne. W eksploatacji pojazdów ze wstawkami kompozytowymi wielokrotnie dochodziło do sytuacji gorszej skuteczności hamowania, w tym pojawiania się alertów bezpieczeństwa. Głównymi aspektami przemawiającymi za stosowaniem wstawek kompozytowych jest

ich niższa cena oraz ograniczenie emisji hałasu przejeżdżającego taboru. I nie chodzi tylko o hałas w postaci pisku przy hamowaniu, ale również o cichszą jazdę spowodowaną mniejszym chropowaceniem przez wstawkę powierzchni tocznej koła, przez co koło współpracując z szyną generuje mniejszy hałas, kosztem wspomnianego wcześniej lepszego współczynnika przyczepności, charakteryzującego wstawki żeliwne.



Ryc. 1. Hamulce klockowe ze wstawkami żeliwnymi.

Hamulce tarczowe to rozwiązania stosowane powszechnie w nowobudowanych pojazdach kolejowych z budową analogiczną do układów stosowanych w motoryzacji. Tarcze hamulcowe mogą być montowane na osiach zestawów kołowych lub w postaci pary pierścieni ciernych przykręconych do tarcz kół jezdnych (ryc. 2).



Ryc. 2. Tarcze hamulcowe – po lewej montowane na osi, po prawej w postaci pierścieni ciernych zamontowanych na kołach.

Drugie rozwiązanie spotyka się powszechnie w podwoziach pojazdów trakcyjnych (czyli tych z napędem), w których pomiędzy kołami montowane są podzespoły zespołów napędowych, a ich gabaryty często uniemożliwiają zabudowę klasycznych tarcz hamulcowych na osi.

Zamontowanie tarcz hamulcowych na kołach powoduje gorsze parametry wytracania ciepła powstałego podczas hamowania na skutek tarcia, gdyż ciepło odprowadzane jest z uzębienia chłodzącego pierścieni ciernych na koło.

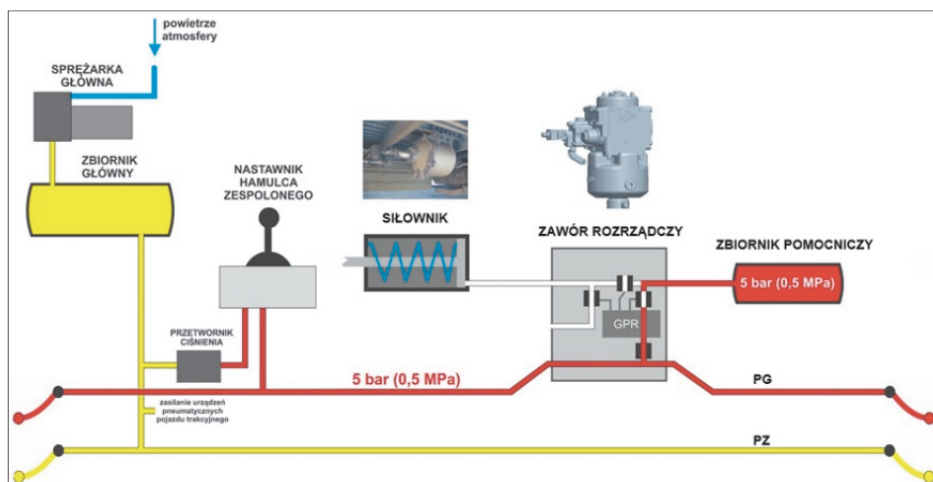
W celu wygenerowania tarcia, do tarcz hamulcowych dociskane są okładziny cierne (odpowiedniki samochodowych klocków hamulcowych) zabudowane na szczękach zaciskowych. Okładziny te wykonywane są z tworzywa sztucznego lub spieków metalicznych.

Hamulce pasowe stosowane są w kolejach górskich, przy napędzie zębatym. Służą do generowania siły hamującej dla koła zębatego, zazębiającego się z szyną zębatą podczas jazdy pojazdu po dużym pochyleniu terenu. Hamulce takie składają się z bębna hamulcowego, na którym zaciskany jest pas z okładziną cierną.

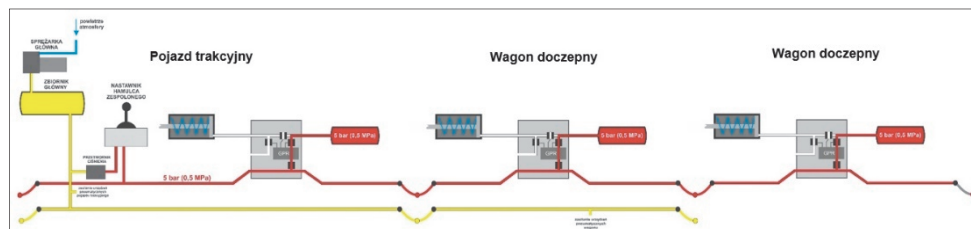
Omówione powyżej hamulce cierne są hamulcami, których skuteczność hamowania jest uzależniona do przyczepności pomiędzy kołem a szyną. W przypadku utraty przyczepności podczas hamowania, uruchamiane są układy likwidacji poślizgu. Oprócz powyższych rozwiązań, w pojazdach kolejowych stosowany może być hamulec cierny, którego skuteczność działania jest niezależna od przyczepności kół. Mowa tu o hamulcu elektromagnetycznym szynowym. Hamulec ten składa się z płozy umieszczonej nad główką szyny, która w chwili uruchomienia hamowania nagłego i przy odpowiednim zakresie prędkości jazdy zostaje opuszczona przez siłowniki pneumatyczne tuż nad szynę. Następnie mieszcząca się w płozie cewka, nawinięta wokół rdzenia, zostaje zasilona energią elektryczną, co powoduje wytworzenie strumienia magnetycznego pomiędzy płozą a szyną i przyciągnięcie płozy do główki szyny. W ten sposób generowana jest siła tarcia powodująca hamowanie. Hamulce szynowe są obowiązkowe w tramwajach. Ich zastosowanie w pojazdach kolejowych wynika z analiz skuteczności hamowania układu hamulcowego. Najczęściej stosuje się je w pojazdach rozwijających prędkości w zakresie 160–280 km/h.

Zasadniczym medium wykorzystywanym do napędu hamulców ciernych (klockowych, tarczowych i pasowych) w kolejnictwie jest sprężone powietrze (w niektórych kolejach wysokogórskich – próżnia). Zastosowanie nadciśnienia wpływa na znaczne oszczędności eksploatacyjne, gdyż pomijany jest aspekt uzupełniania, czy wymiany płynów hamulcowych. Powietrze jest powszechnie dostępne, stąd można z niego korzystać swobodnie i bezkosztowo. Wadą w tym rozwiązaniu jest natomiast ściśliwość powietrza. Warto zwrócić uwagę, że sprężone powietrze nie jest wykorzystywane tylko do celów hamowania. To medium wykorzystuje się również do celów takich jak np. zasilanie syren pneumatycznych, piasecznic, układów toalet, mechanizmów wagonów samowyladowczych, napędu styczników elektrycznych, napędu drzwi pasażerskich czy też nawet zapewnienia amortyzacji drgań fotela maszynisty. Jednak najważniejszym przeznaczeniem jest zasilanie hamulców pneumatycznych (ciernych). Powietrze wymaga odpowiedniego przygotowania, zanim zostanie wykorzystane w pociągu. Sprężarki pokładowe wytwarzają sprężone powietrze, które zanim trafi do układu pneumatycznego jest odpowiednio oczyszczane, osuszane, odolejane i schładzane.

Zasadniczym i obowiązkowym hamulcem, jaki musi być obecnie zastosowany w każdym konwencjonalnym pojeździe kolejowym jest pneumatyczny hamulec typu pośredniego działania, zwany też hamulcem zespolonym (PN). Architektura tego hamulca została opracowana 1869 roku przez Georga Westinghousa i od tamtego czasu podstawowa zasada jego działania jest niezmienną. Przed opracowaniem przez tego amerykańskiego wynalazcę hamulca na sprężone powietrze, hamowanie składu pociągu odbywało się przez niezależne układy hamulcowe w poszczególnych wagonach, uruchamiane przez pracowników zwanych hamulcowymi, na sygnał otrzymany od maszynisty z lokomotywy. Pracownicy ci odpowiednio obracając korbami hamulców ręcznych napędzali przekładnię mechaniczną, która uruchamiała działanie hamulców klockowych. Wynalazek Westinghousa spowodował automatyzację działania układu hamulcowego w całym składzie pociągu, zwiększając jednocześnie bezpieczeństwo eksploatacji. Hamulec zespolony działa na zasadzie przepływu pneumatycznej fali uderzeniowej przez przewód hamulcowy (tzw. przewód główny – PG), zabudowany w każdym pojeździe kolejowym składu pociągu (ryc. 3 i 4).



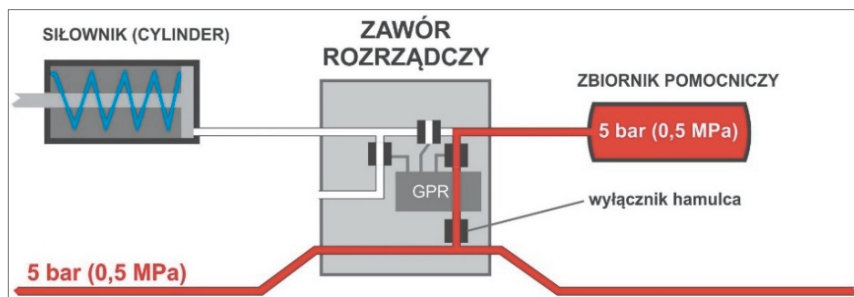
Ryc. 3. Schemat architektury układu pneumatycznego pojazdu trakcyjnego z hamulcem zespolonym (PG – przewód główny, PZ – przewód zasilający).



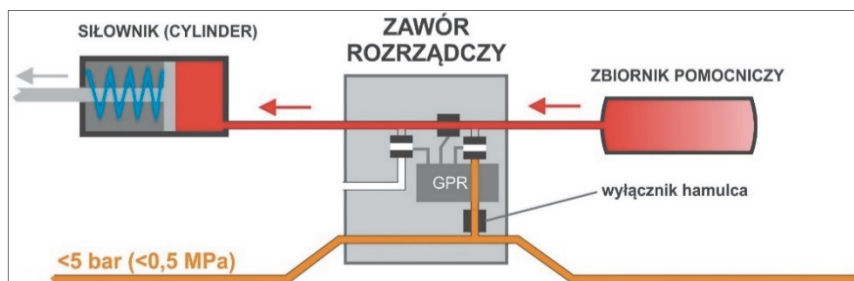
Ryc. 4. Schemat składu pociągu – lokomotywa i dwa wagony (opis jak na ryc. 3).

Ważną zasadą z punktu widzenia bezpieczeństwa jest to, że uruchomienie hamowania następuje na skutek spadku ciśnienia, a odhamowanie następuje, gdy w przewodzie głównym ciśnienie wraca do wartości zasadniczej, czyli 5 bar.

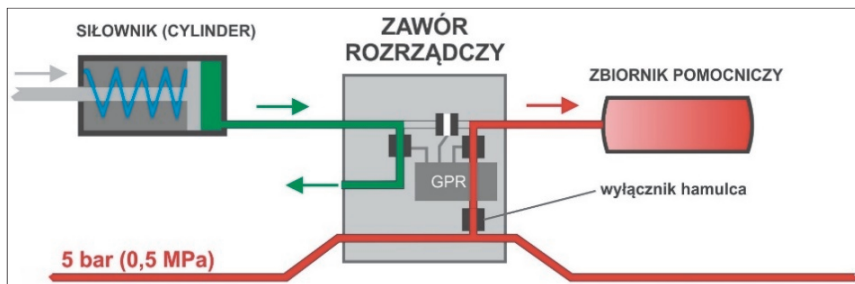
W każdym pojeździe składu pociągu zabudowany jest podłączony do przewodu głównego zawór rozrządczy, zwany także rozdzielaczem powietrza, który jest strategicznym elementem układu hamulca zespolonego. Na podstawie zmian wartości ciśnienia w przewodzie głównym, zawór przesterowuje swoje działanie, odpowiednio uruchamiając układ hamulcowy w danym pojeździe. Do zaworu rozrządczego podłączone są cylindry hamulcowe (siłowniki tłokowe) napędu przekładni mechanicznej hamulca ciernego oraz zbiornik pomocniczy, który pełni rolę zasobnika sprężonego ciśnienia dla potrzeb wykonania hamowania. Jak było wspomniane inicjacja hamowania następuje na skutek spadku ciśnienia powietrza w przewodzie głównym (ryc. 6). W efekcie wytworzenia w tym rurociągu fali uderzeniowej, następuje przesterowanie zaworów rozrządczych w poszczególnych pojazdach składu (ryc. 10). Zawory rozrządcze łączą zbiornik pomocniczy wypełniony sprężonym powietrzem z cylindrami (siłownikami) hamulcowymi (ryc. 5–8). Powietrze napierające na tłoczyska w siłownikach powoduje ruch przekładni mechanicznych hamulców i dociśnięcie par ciernych.



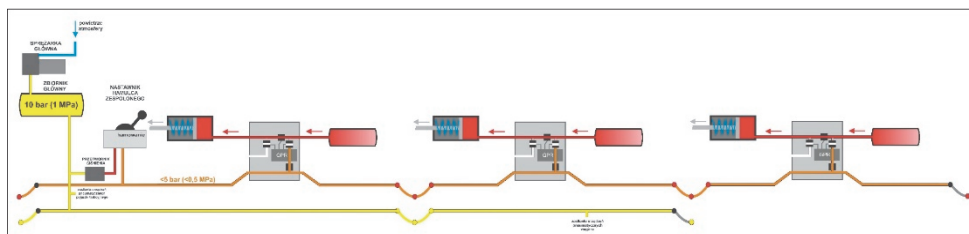
Ryc. 5. Schemat działania hamulca zespolonego – hamulce odhamowane.



Ryc. 6. Schemat działania hamulca zespolonego – hamowanie (spadek ciśnienia w PG).



Ryc. 7. Schemat działania hamulca zespolonego – odhamowanie (luzowanie).



Ryc. 8. Schemat działania hamulca zespolonego – lokomotywa i 2 wagony – hamowanie (opis jak na ryc. 7).

Podwyższenie ciśnienia w przewodzie głównym powoduje takie przesterowanie zaworów rozrządczych, że powietrze z cylindrów hamulcowych jest wypuszczane do atmosfery (tłoczyska się cofają na skutek działania sprężyn powrotnych) i następuje odhamowanie (ryc. 7). Równocześnie w tym samym czasie jest ponownie napełniany zbiornik pomocniczy. Omówiona powyżej architektura hamulca typu pośredniego działania (zespolonego) powoduje, że ten hamulec cechuje teoretyczna niewyczerpalność (podczas odhamowania następuje automatyczne ponowne napełnienie zbiornika pomocniczego, umożliwiające wykonanie kolejnego hamowania) i samoczynność działania (spadek ciśnienia w przewodzie głównym wdraża hamowanie w każdym pojeździe składu). Co istotne, regulacja wartości ciśnienia w przewodzie głównym może odbywać się płynnie, zgodnie z zadaną przez maszynistę intensywnością hamowania czy luzowania. Największe opóźnienie hamowania nastąpi przy całkowitym opróżnieniu przewodu głównego, czyli połączenia go z atmosferą. Taka sytuacja może nastąpić, gdy maszynista wdroży hamowanie nagłe lub systemy bezpieczeństwa wykryją nieprawidłowe zachowanie maszynisty, ale również w sytuacji np. rozerwania składu pociągu, gdy przerwane zostaną sprzęgi między pojazdami, czy też gdy nastąpi użycie hamulca bezpieczeństwa w którymś z pojazdów.

Zasadnicza zasada działania hamulca bezpieczeństwa polega właśnie na tym, że ciągnąc za rączkę hamulca otwieramy zawór na przewodzie głównym i wypusz-

czamy z układu sprężone powietrze, wdrażając tym samym maksymalną siłę hamowania. Przy rozerwaniu składu spadek ciśnienia powoduje hamowanie zarówno części stałej pociągu jak i części oderwanej (spadek ciśnienia następuje w obydwu częściach składu).

Wzrost prędkości jazdy pociągów, ich eksploatacja w długich tunelach oraz na długich mostach i wiaduktach spowodowała, że obecnie produkowane pojazdy mają inaczej zorganizowaną funkcję działania hamulca bezpieczeństwa dla pasażerów. Otóż pociągnięcie za rączkę hamulca wdraża hamowanie bezpieczeństwa, które w każdej chwili maszynista może przerwać, gdy widzi, że zahamowanie składu na danym odcinku mogłoby doprowadzić np. do jeszcze większego niebezpieczeństwa. Przykładową sytuacją może być np. wystąpienie pożaru w pojeździe podczas jazdy w tunelu i wdrożenie hamowania bezpieczeństwa przez pasażera. Zatrzymanie składu w tunelu mogłoby być bardziej niebezpieczne niż kontynuowanie jazdy i dojazd do strefy bezpiecznej ewakuacji.



Ryc. 9. Przycisk wdrażania hamowania nagłego (bezpieczeństwa) na pulpicie maszynisty, który bezpośrednio odpowietrza mechanicznie przewód główny.

Na pulpicie maszynisty znajduje się przycisk „mostkowanie hamulca bezpieczeństwa” (ryc. 10), którego naciśnięcie powoduje przerwanie wdrożonego przez pasażera hamowania nagłego. W pojazdach dużych prędkości hamulec bezpieczeństwa działa całkowicie w funkcji żądania uruchomienia, a decyzję o wdrożeniu hamowania podejmuje maszynista.

Uruchomienie hamowania nagłego z wykorzystaniem zasady działania hamulca zespolonego może nastąpić również poprzez zadziałanie systemów bezpieczeństwa – przykładowo przez stosowany w Polsce układ RADIOSTOP. Uruchomienie tej funkcji przez maszynistę, dyżurnego ruchu z nastawni czy innego pracownika personelu kolejowego powoduje, że hamowanie wdrożone jest przez wszystkie pociągi znajdujące się na danym obszarze nadawania. Analogicznie uruchomienie hamowania nagłego nastąpi przykładowo na skutek braku potwierdze-

nia czujności przez maszynistę (układ czuwaka aktywnego oraz układ samoczynnego hamowania pociągu), czy też zadziałania systemów zarządzania ruchem kolejowym (np. ETCS – *European Train Control System*), które wykryją nieprawidłowość i konieczność jak najszybszego zatrzymania pociągu.

Opisany rodzaj hamulca bezpośrednio odpowiada za bezpieczeństwo dzięki temu, że w zasadniczym zakresie działa – w sposób czysto mechaniczny – wystarczy spadek ciśnienia powietrza, aby hamować. Nie jest do tego potrzebne nawet zasilanie elektryczne. Oczywiście w nowoczesnych pojazdach układ tego hamulca jest kontrolowany przez szereg systemów elektronicznych, które poprzez sterowniki mikroprocesorowe sterują jego pracą. Natomiast zasadnicze działanie, bezpośrednio zapewniające bezpieczeństwo, realizowane jest w oparciu o rozwiązanie z XIX wieku.

Ze względu na to, że opisany powyżej hamulec zespolony odpowiada bezpośrednio za bezpieczeństwo, jest on przede wszystkim weryfikowany podczas eksploatacji, w celu potwierdzenia prawidłowości jego działania. Podczas formowania składu pociągu oraz eksploatacji na linii wykonywane są według wymagań przepisów [2] próby hamulca zespolonego. Podczas próby szczegółowej sprawdza się działanie hamulców w każdym pojeździe składu pociągu. Próba uproszczona wymaga natomiast sprawdzenia działania hamulców w ostatnim pojeździe składu pociągu, co pozwala potwierdzić, że układ hamulca zespolonego działa prawidłowo, gdyż jeżeli hamuje ostatni pojazd to znaczy, że fala uderzeniowa przechodzi przez rurociągi przewodu głównego, przez całą długość składu pociągu. Oczywiście bieżącej weryfikacji podlegają również elementy mechaniczne hamulców ciernych (stan wstawek/okładzin, tarcz) i układu biegowego.

Hamulec pośredniego działania (zespolony), wykorzystywany jest w normalnej eksploatacji do hamowania przede wszystkim w składach wagonowych, czyli takich, gdzie lokomotywa ciągnie wagony. Najlepiej jest to widoczne w składach towarowych, w których wagony nie mają zasilania elektrycznego, stąd sterowanie hamulcem może odbywać się tylko na drodze czysto pneumatycznej przez przewód główny. W innych pociągach mogą być zastosowane dodatkowe systemy hamowania, które często wykorzystywane są w normalnej eksploatacji powodując, że hamulca zespolonego w ogóle nie używa się. Stanowi on jednak zawsze zabezpieczenie na wypadek awarii innych hamulców jako ten zapewniający największe bezpieczeństwo i pewność uruchomienia hamulców.



Ryc. 10. Manometry układu pneumatycznego – ciśnienie w: przewodzie głównym – PG (hamulcowym), cylindrach (siłownikach), przewodzie zasilającym – PZ (zbiorniku głównym), cylindrach hamulca sprężynowego (postojowego).



Ryc. 11. Sprzęgi między pojazdami; głowice czerwone – sprzęg przewodu głównego – PG (hamulcowego).

Przykładowym innym rodzajem hamulca pneumatycznego, który spotkamy w pojazdach trakcyjnych (np. lokomotywach) jest hamulec pneumatyczny bezpośredniego działania – tzw. hamulec dodatkowy (ryc. 12). Działa on tylko na pojazd trakcyjny bez uruchamiania hamowania w składzie pociągu. Maszynista poprzez pulpituowy nastawnik hamulca steruje ciśnieniem w cylindrach (siłownikach) hamulcowych pojazdu, którym steruje.



Ryc. 12. Pulpit maszynisty – nastawnik hamulca zespolonego (lewy) i nastawnik hamulca dodatkowego (prawy).

Dla zapewnienia szybszego i jednoczesnego działania hamulców ciernych we wszystkich pojazdach składu pociągu stosowany może być hamulec elektropneumatyczny (EP). Działa on na zasadzie uruchomienia hamowania na skutek przesłania sygnału elektrycznego do poszczególnych sterowników hamulca w pojazdach. W efekcie w tym samym momencie rozpoczynają hamowanie lub odhamowanie wszystkie układy hamulcowe w poszczególnych pojazdach. W tym rozwiązaniu konieczne jest zastosowanie instalacji elektrycznej (magistrali komunikacyjnej) w każdym z pojazdów, aby sygnały z kabiny maszynisty mogły być przekazywane do wszystkich pojazdów składu. Hamulec elektropneumatyczny powoduje, że proces hamowania i odhamowania odbywa się szybciej. W omówionym wcześniej hamulcu zespolonym prędkość rozchodzenia się fali uderzeniowej sprężonego powietrza przez rurociągi przewodu głównego wynosi około 250 m/s. Zatem najpierw hamowanie uruchamiane jest w lokomotywie, a następnie zgodnie – przebiegiem fali – w kolejnych wagonach. Jak z tego wynika, im dłuższy skład, tym później rozpoczną hamowanie wagony na jego końcu. Należy zauważyć, że długości składów kolejowych w Polsce wynoszą do 600 m, a w innych krajach np. w USA osiągają nawet 1500 m. Analogicznie sprawa wygląda z odhamowaniem. Przy zastosowaniu hamulca elektropneumatycznego takie problemy nie występują, gdyż wszystko dzieje się jednocześnie. Hamulec elektropneumatyczny stanowi uzupełnienie hamulca pneumatycznego zespolonego, przez co zwany jest hamulcem wspomagającym, a jego celem jest skrócenie czasu uruchomienia hamulców.

Jak było wspomniane na początku, w pojazdach kolejowych wymaga się stosowania funkcji hamowania postojowego. W starszego typu pojazdach hamulec

postojowy występuje w postaci korby zabudowanej w nadwoziu, której obracanie wprawia w ruch przekładnię mechaniczną hamulca ciernego i powoduje zaciśnięcie par ciernych, a w efekcie pewne umiejscowienie pojazdu na czas postoju. Jednak w tym rozwiązaniu występuje ryzyko błędu ludzkiego, czyli nieprawidłowe zaciągnięcie hamulca lub jego niezaciągnięcie. Z tego powodu w obecnie budowanych pojazdach powszechnie stosuje się hamulec postojowy sprężynowy. Siłą hamującą wytwarza sprężyna w cylindrze (siłowniku sprężynowym). W celu odhamowania pojazdu należy do cylindra wtłoczyć sprężone powietrze, które naprze na toczysko i przeciwstawi się sile sprężyny. W efekcie tego pojazd zostanie odhamowany. Przy wyłączeniu pojazdu, system sterowania automatycznie odpowietrza cylindry (siłowniki) hamulca sprężynowego, powodując zahamowanie pojazdu. W tym rozwiązaniu zastosowany jest więc również system bezpieczny – brak sprężonego powietrza powoduje, że pojazd jest zahamowany.

Niezależnie od tego, w jaki układ hamulcowy pojazd jest wyposażony, to na czas wyłączenia z eksploatacji pomiędzy szynę i koło wkłada się płozy hamulcowe, dodatkowo zabezpieczające pojazd przed zbiegnięciem. Są to odpowiedniki klinów podkładanych pod koła w transporcie drogowym.

2.2. Hamulce dynamiczne

Poza hamulcami ciernymi, które zapewniają najwyższą skuteczność hamowania, w pojazdach kolejowych stosowane mogą być również hamulce dynamiczne, które wykorzystują do hamowania energię kinetyczną poruszającego się pojazdu. Najpopularniejszym rozwiązaniem jest hamulec elektrodynamiczny (ED), stosowany w pojazdach, do których napędu zastosowane są elektryczne silniki trakcyjne (pojazdy elektryczne, pojazdy spalinowe z przekładnią elektryczną itp.). W hamulcu tym wykorzystywana jest zasada odwrotności działania maszyn elektrycznych. Przy wdrożeniu hamowania silniki trakcyjne zostają wzbudzone do pracy prądnicowej. W efekcie, obracające się w stojanach wirniki indukują napięcie, a wytwarzanie energii powoduje powstanie oporu obrotowego wirników silników, dzięki czemu zmniejszana jest prędkość jazdy. Jednak aby energia elektryczna była produkowana, do obwodu musi być podłączony odbiornik, który ją zużyje. Zasadniczo w hamulcu elektrodynamicznym tym odbiornikiem są oporniki hamowania (ryc. 13), które przekształcają energię elektryczną w energię cieplną (najczęściej bezpowrotnie traconą na elementach oporowych). W nowoczesnych konstrukcjach hamulec elektrodynamiczny powszechnie uzupełniony jest o funkcję rekuperacji energii. Polega ona na tym, że energia produkowana przy hamowaniu jest oddawana do sieci trakcyjnej i inny pojazd ją wykorzystuje lub jest magazynowana w zasobnikach energii (np. superkondensatorach). Jeżeli nie ma możliwości rekuperowania energii, to układ sterowania przełącza jej wytracanie na oporniki hamowania. Szacunkowo dzięki wykorzystaniu prądu wytworzonego przy hamowaniu możliwe jest zmniejszenie zużycia energii przez inny pojazd nawet o około 30%.

Niewątpliwymi zaletami hamulca elektrodynamicznego są: brak współpracy elementów ciernych, ograniczenie używania hamulców ciernych (co przekłada się na ograniczenie ilości wymian par ciernych) oraz możliwość odzyskiwania energii elektrycznej. Do wad tego hamulca należy zaliczyć mniejszą skuteczność hamowania (hamowanie działa tylko na zestawy kołowe napędne, a nie na wszystkie koła w składzie pociągu) oraz zwiększenie temperatury pracy silników trakcyjnych, które nagrzewają się już nie tylko przy rozruchu, ale również przy hamowaniu. To powoduje konieczność stosowania wydajniejszych układów chłodzenia silników trakcyjnych.



Ryc. 13. Kontenery z opornikami hamowania na dachu pojazdu.

W spalinowych pojazdach trakcyjnych, w których do przeniesienia napędu stosowana jest przekładnia hydrauliczna (automatyczna skrzynia biegów), do hamowania może być wykorzystywany hamulec hydrodynamiczny (tzw. retarder).

2.3. Hamulce elektryczne

Do hamulców elektrycznych można zaliczyć np. hamulce na prądy wirowe. Są to rozwiązania stosowane w pojazdach dużych prędkości. Należą jednak do rzadkości ze względu na duże obciążenie prądowe, przegrzewanie szyn na skutek działania prądów wirowych oraz generowanie dużych zakłóceń elektromagnetycznych. Pozytywnymi cechami są: uniezależnienie skuteczności hamowania od przyczepności przy jednoczesnym braku tarcia pomiędzy płożą a szyną (co ma miejsce w typowym hamulcu szynowym) oraz możliwość wykorzystywania do hamowania służbowego.

2.4. Współpraca hamulców i układy pomiaru obciążenia

Nowoczesne układy sterowania hamulcami samoczynnie dobierają rodzaje hamulców jakie są uruchamiane podczas hamowania w odniesieniu do reżimu zadanego przez maszynistę. Przykładowo podczas hamowania elektrycznym zespołem trakcyjnym jako pierwszy uruchamiany jest hamulec elektrodynamiczny. Gdy maszynista zwiększa intensywność hamowania, a system sterowania wykryje, że wydajność tego hamulca jest zbyt mała, aby osiągnąć właściwe opóźnienie hamowania, to proporcjonalnie do potrzeb dołącza hamulec elektropneumatyczny. Istotne z punktu widzenia rodzaju uruchomionych hamulców jest również obciążenie pojazdów. Nowoczesne pojazdy pasażerskie wyposażone są w układy ważące, które w sposób ciągły badają obciążenie pojazdu. W efekcie system sterowania otrzymuje dane o tym, jaki rodzaj hamulców musi uruchomić, by zapewnić oczekiwaną efektywność hamowania. Ciągły pomiar obciążenia w pojazdach pasażerskich jest istotny, gdyż ilość pasażerów zmienia się podczas trasy. W pojazdach towarowych zasadniczo jest stan próżny (pusty skład) lub stan ładowny (skład z ładunkiem), dlatego w takich przypadkach stosowany jest najczęściej układ przestawczy próżny/ładowny, który ustala parametry hamowania dla tych dwóch stanów obciążenia.

W normalnej eksploatacji, w wielu przypadkach, hamulec pneumatyczny zespolony w ogóle może nie być używany, ale jest zabudowany i „czuwa”.

2.5. Drogi hamowania i masy pociągów

Wielu kierowców i pieszych nie zdaje sobie sprawy, że pociąg nie zatrzyma się „w miejscu”. W efekcie braku wyobraźni, często dochodzi do niebezpiecznych i tragicznych zdarzeń na przejazdach kolejowo-drogowych. Droga hamowania pojazdu kolejowego z prędkości 160 km/h wynosi nawet ponad 1000 m. Dla prędkości 100 km/h jest to około 650 m. Z kolei dla prędkości powyżej 200 km/h drogi hamowania wynoszą nawet ponad 3000 m. Samochód na przejeździe kolejowo-drogowym nie ma szans z pociągiem – jego prędkością oraz masą. Najpopularniejsze lokomotywy w Polsce ważą od 70 do 120 t. Całe składy towarowe osiągają masy 4000 t. Pociągi pasażerskie to masy od około 100 nawet do 600 t. Trzeba również pamiętać o bezpieczeństwie pasażerów i ładunków. Według normy EN16185 [3] dopuszcza się największe opóźnienie hamowania wynoszące $1,5 \text{ m/s}^2$, a według EN14198 [4] $2,5 \text{ m/s}^2$, gdy hamowanie jest wspomagane hamulcami szynowymi.

Maszynista widząc na torze przeszkodę uruchamia hamowanie nagłe i w celu ochrony własnego życia bardzo często opuszcza kabinę. Nic więcej zrobić nie może.

3. Hamulce w tramwajach

Współczesne tramwaje to pojazdy elektryczne poruszające się w ruchu miejskim lub podmiejskim. Z punktu widzenia przepisów ruchu drogowego podlegają – jak wszystkie inne pojazdy drogowe – pod zapisy ustawy *prawo o ruchu drogowym* [5]. Ze względu na jazdę po szynach mają zastosowanych wiele rozwiązań analogicznych do tych z pojazdów kolejowych, lecz ogólnie mówiąc – mniejszych gabarytowo. Przykładowo, to typowa średnica koła tramwajowego wynosi 600 mm, natomiast popularna średnica koła wagonu pasażerskiego to 920 mm, a lokomotyw nawet 1250 mm. W tramwajach nie stosuje się również sprężonego powietrza do napędu hamulców ciernych. W zamian stosowane są układy elektro-mechaniczne lub elektrohydrauliczne.

3.1. Rodzaje hamowania

Zgodnie z przepisami [6] każdy tramwaj musi być wyposażony w pięć rodzajów systemów hamowania:

- hamulec roboczy (zwany służbowym),
- hamulec awaryjny,
- hamulec mechaniczny – postojowy,
- hamulec bezpieczeństwa,
- hamulec nagły.

Warto zwrócić uwagę na powyższą nomenklaturę, że hamowanie awaryjne to inny rodzaj hamowania niż hamowanie bezpieczeństwa czy nagłe. Często spotykane jest błędne używanie tych określeń jako synonimów.

Analogicznie jak w pojazdach kolejowych, w tramwajach stosuje się hamulce cierne oraz hamulce dynamiczne – elektrodynamiczne.

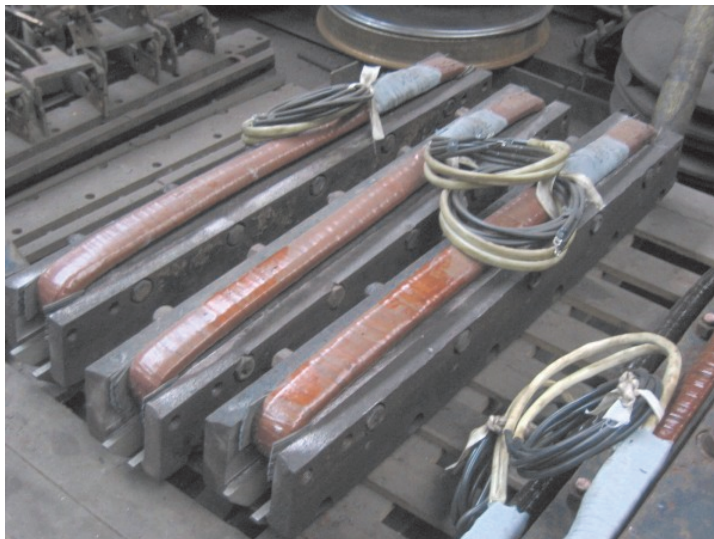
Hamulec roboczy (służbowy) służy do zmniejszania prędkości tramwaju i zatrzymania go w sposób niezawodny, szybki i skuteczny, niezależnie od prędkości i obciążenia oraz pochylenia nawierzchni torowej. Ten rodzaj hamulca zapewnia płynną regulację intensywności hamowania. Zasadniczo do hamowania służbowego wykorzystywany jest hamulec elektrodynamiczny. Jeżeli opóźnienie hamowania generowane hamulcem elektrodynamicznym jest niewystarczające w stosunku do zadanego przez motorniczego reżimu, to hamowanie może być uzupełnione hamowaniem realizowanym przez hamulce cierne. Nowoczesne tramwaje są wyposażone – analogicznie jak pojazdy kolejowe – w układy ważenia, w celu dostosowania siły hamowania i rodzaju używanych hamulców do aktualnego obciążenia. Analogicznie również energia produkowana przez silniki trakcyjne podczas hamowania może być rekuperowana do sieci trakcyjnej lub magazynowana w zasobniku. W przypadku, zbyt wysokiej wartości napięcia w sieci, spowodowanej brakiem odbiornika (innego ruszającego tramwaju), system sterowania przełącza hamowanie elektrodynamiczne rekuperacyjne na układ oporowy, wytracając prąd

na opornikach hamowania. Najnowocześniejsze pojazdy mają zastosowane rozwiązania pozwalające na proporcjonalne hamowanie elektrodynamiczne w odniesieniu do aktualnego obciążenia sieci – częściowo oporowe i częściowo rekuperacyjne. W starszego typu konstrukcjach, pozbawionych funkcji rekuperowania energii, można spotkać układy, w których w okresie zimowym, możliwe jest przełączenie oddawania energii częściowo na grzejniki przestrzeni pasażerskiej pojazdu.

Hamulec awaryjny służy do zatrzymania tramwaju w razie awarii lub braku skuteczności hamulca roboczego. Hamulec ten wykorzystuje hamowanie niezależne od zachowania przyczepności między kołem i szyną. Dlatego też do tego rodzaju hamowania stosuje się elektromagnetyczne hamulce szynowe. Płozy hamulców szynowych zamontowane są w wózkach jezdnych pomiędzy kołami na wysokości ok. 10 mm ponad główkami szyn (ryc. 14). Załączenie hamowania awaryjnego powoduje zasilenie cewek, zabudowanych w płozach (ryc. 15), w wyniku czego wytworzony zostaje strumień magnetyczny, stanowiący siłę przyciągającą – płoza hamulcowa zostaje przyciągnięta do szyny. Siły przyciągania, w zależności od budowy hamulca, wynoszą od 20 do 60 kN dla jednej płozy. Wyłączenie zasilania cewek powoduje, że płozy zostają odciągnięte od szyn przez sprężyny zabierające, które utrzymują płozy w stanie zasadniczym. Warto zauważyć, że zasilanie hamulców szynowych jest realizowane z baterii akumulatorów pokładowych pojazdu, ładowanych z kolei przez przetwornice pokładowe.



Ryc. 14. Elektromagnetyczny hamulec szynowy w wózku tramwaju.



Ryc. 15. Płyty hamulców szynowych z widocznymi cewkami.

Hamulec mechaniczny postojowy służy do dohamowania i unieruchomienia pojazdu na czas postoju, również bez energii dostępnej na pokładzie. W starszych konstrukcjach był to hamulec ręczny zaciągany siłą mięśni. W nowoczesnych tramwajach hamulec ten załącza się automatycznie przy prędkości ok. 5–7 km/h, czyli w końcowej fazie hamowania służbowego (elektrodynamicznego), przy każdym zatrzymaniu. Zacisk par ciernych jest generowany przez siłę sprężyny (tzw. hamulec pasywny). Odhamowanie następuje natomiast w momencie uruchomienia rozruchu.

Hamulec bezpieczeństwa służy do zatrzymania tramwaju przez pasażera w razie zagrożenia bezpieczeństwa. Tramwaje w części pasażerskiej wyposaża się w rączki hamulców bezpieczeństwa. Pociągnięcie za rączkę hamulca powoduje uruchomienie hamulców, które zapewniają uzyskanie właściwego opóźnienia, a co za tym idzie długości drogi hamowania.

Hamowanie nagłe służy do zatrzymania tramwaju z największym opóźnieniem hamowania w sytuacji wystąpienia zagrożenia. Uruchomienie tego rodzaju hamowania jest możliwe tylko przez prowadzącego pojazd (ryc. 16). Uruchamiane w takiej sytuacji są najczęściej wszystkie hamulce, jakie znajdują się na wyposażeniu tramwaju.



Ryc. 16. Nastawnik jazdy i hamowania na pulpicie motorniczego. Przesławienie nastawnika do pozycji czerwonej uruchamia hamowanie nagłe.

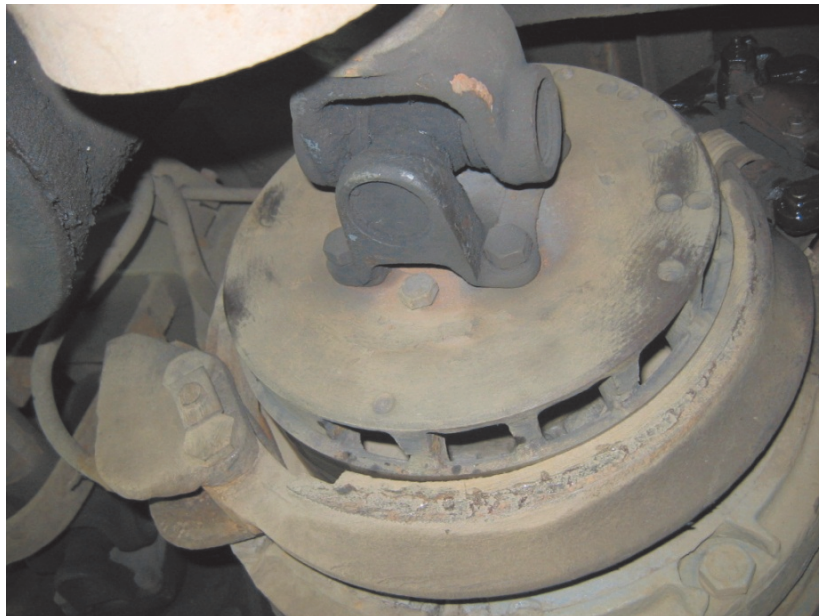
3.2. Charakterystyka hamulców ciernych

W starego typu tramwajach, produkowanych mniej więcej do połowy XX wieku, spotkać można było hamulec klockowy (ryc. 17), analogiczny jak ten kolejowy. Wstawki cierne żeliwne dociskane były do obręczy kół jezdnych, generując tarcie i w efekcie hamowanie. Napęd tego hamulca był ręczny, realizowany przez korbę i mechaniczną przekładnię. Hamulec ten pełnił funkcję mechanicznego hamulca postojowego oraz mógł być stosowany w sytuacjach niebezpiecznych, w celu zintensyfikowania hamowania. W obecnie eksploatowanych liniowo tramwajach hamulca klockowego się już nie spotka. W jego miejsce stosowane są hamulce szczękowo-bębnowe lub najnowocześniejsze – tarczowe.



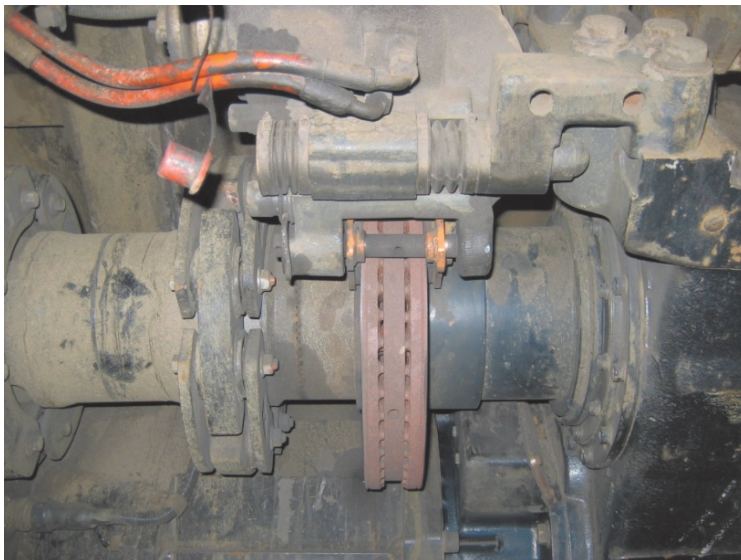
Ryc. 17. Hamulec klockowy w zabytkowym tramwaju (po lewej) i korba do jego uruchamiania.

Hamulce szczękowo-bębnowe można spotkać w wielu tramwajach produkowanych od lat 60. w Polsce oraz krajach byłego bloku wschodniego. Stosowane w nich rozwiązania wywodzą się z amerykańskiego projektu tramwajów PCC, z lat 30. ubiegłego wieku. Tu warto zaznaczyć, że w tamtym okresie USA wiodły prym w zakresie nowoczesnych konstrukcji szybkiebieżnych tramwajów. Omawiany typ hamulca składa się z bębna hamulcowego umieszczonego na wale silnika trakcyjnego, szczęk z okładzinami ciernymi (ryc. 18) oraz elektromagnetycznego luzownika, który przez układ cięgien i krzywek steruje pracą szczęk. W luzowniku znajduje się rdzeń z cewką oraz sprężyna. W stanie beznapięciowym siłę generuje sprężyna, powodująca zaciśnięcie szczęk na bębnie. Zasilenie cewki powoduje przesunięcie rdzenia w luzowniku i przeciwstawienie się sile sprężyny. W efekcie szczęki zostają odciągnięte od bębna i pojazd zostaje odhamowany. Jest to tak zwany pasywny układ działania hamulca, który zapewnia bezpieczeństwo, gdyż w przypadku zaniku zasilania sterującego (pokładowego), następuje automatyczne zahamowanie pojazdu. Hamulec ten wykorzystywany jest jako zatrzymujący i mechaniczny postojowy, gdyż pewnie unieruchamia pojazd na czas postoju. Bierze jednak też udział w innych rodzajach hamowania – np. przy hamowaniu bezpieczeństwa, czy nagłym. W niektórych konstrukcjach cewka luzownika może być zasilana połową lub pełną wartością napięcia sterującego. W efekcie uzyskuje się dwa poziomy siły hamowania.

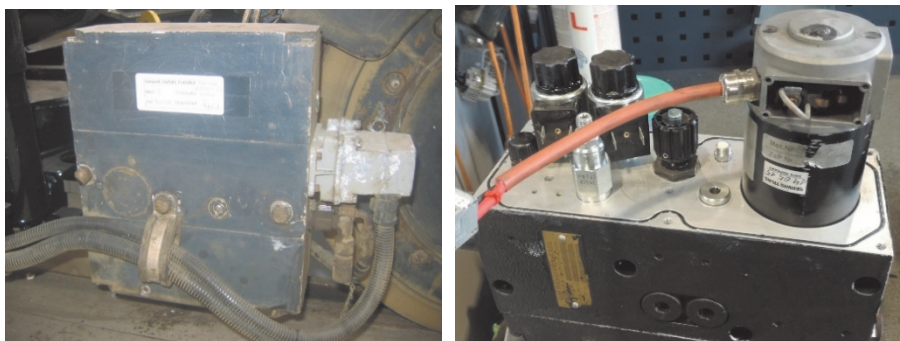


Ryc. 18. Hamulec szczękowo-bębnowy na silniku trakcyjnym.

W obecnie produkowanych wagonach tramwajowych, w zakresie hamulców ciernych, najczęściej stosowane są hamulce tarczowe. W zależności od układu i przeznaczenia stosowane są hamulce tarczowe pasywne i aktywne. Te pierwsze pełnią rolę hamulców postojowych, w których siła hamująca generowana jest przez sprężynę zabudowaną w zacisku hamulca. Odhamowanie hamulca następuje przez zwiększenie ciśnienia oleju hydraulicznego w obwodzie (dla hamulców elektrohydraulicznych) lub zasilenie cewki siłownika (w hamulcach elektromechanicznych). W układach hamulców tarczowych aktywnych stosowany jest klasyczny układ znany z pojazdów samochodowych, a mianowicie intensywność hamowania jest zależna od wartości ciśnienia w obwodzie hydraulicznym. W zakresie hamulców tarczowych elektromechanicznych aktywnych, siłę hamowania realizuje się przez zmianę wartości napięcia sterującego zaciskiem. W związku tym, że hamulce elektrohydrauliczne są obecnie najbardziej rozpowszechnione, poniżej przedstawiono kilka informacji na temat architektury takiego układu. W skład obwodu hydraulicznego wchodzi zaciski hamulcowe (ryc. 19), instalacja hydrauliczna (rurociągi i przewody) oraz agregaty hydrauliczne zwane hydrogeretami. Układy takie są sterowane i kontrolowane przez mikroprocesorowe sterowniki hamulca. Agregat hydrauliczny to podzespół zawierający lokalny zbiornik oleju hydraulicznego, pompę generującą ciśnienie, blok hydrauliczny z liniami hydraulicznymi oraz odpowiednie zawory sterujące wartością ciśnienia w obwodzie (ryc. 20). W hamulcach pasywnych inicjacja rozruchu pojazdu powoduje, że sterownik hamulca uruchamia pompę hamulcową w agregacie, wytwarzając ciśnienie w obwodzie. Pełne odhamowanie następuje po wytworzeniu ciśnienia o wartości około 150 bar w czasie około 2 sekund. Pod koniec hamowania elektrodynamicznego, gdy prędkość pojazdu osiąga 5–7 km/h, następuje proporcjonalne zmniejszanie ciśnienia w obwodzie, przez co sprężyny w zaciskach dociskają okładziny cierne do tarcz hamulcowych, powodując dohamowanie (funkcja hamulca zatrzymującego) i unieruchomienie pojazdu na czas postoju (hamulec mechaniczny postojowy).



Ryc. 19. Zacisk i tarcza hamulca tarczowego hydraulicznego.



Ryc. 20. Agregat hydrauliczny w wózku jezdny tramwaju (po lewej) oraz zawory sterujące i silnik pompy po zdjęciu pokrywy agregatu (po prawej).

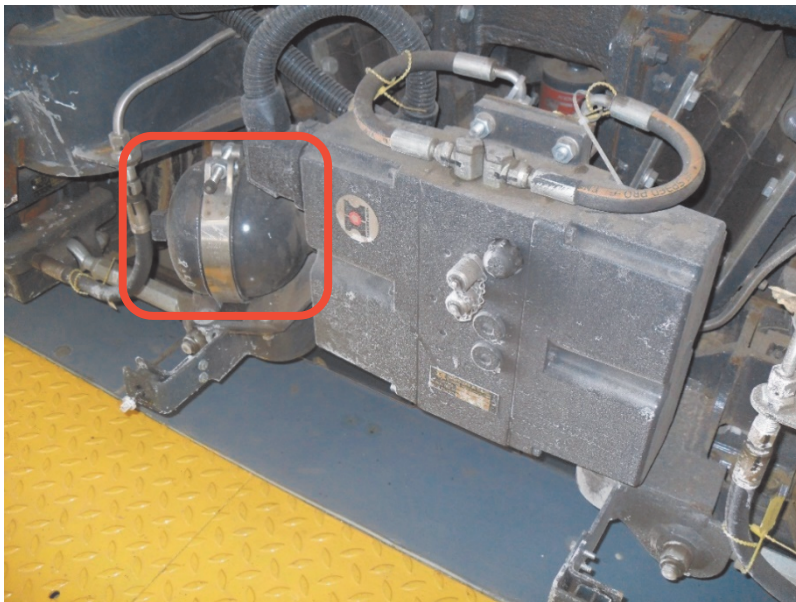
Pasywny układ hamulca zapewnia bezpieczeństwo, gdyż utrzymuje pojazd w stanie zahamowanym nawet przy braku zasilania. Analogicznie jakikolwiek wyciek oleju hydraulicznego powoduje automatyczne wdrożenie hamowania.

W związku z taką zasadą działania hamulców, w sytuacji konieczności awaryjnego odhamowania hamulców postojowych, np. na skutek awarii podstawowych agregatów hydraulicznych (braku możliwości wytworzenia ciśnienia w obwodzie) stosuje się obwody rezerwowe. W takim obwodzie znajduje się awaryjny agregat hydrauliczny (ryc. 21) lub pompa ręczna, które umożliwiają wytworzenie ciśnienia i odhamowanie pojazdu w trybie awaryjnym. Dzięki temu możliwy jest np. zjazd awaryjny tramwaju.



Ryc. 21. Agregaty hamulców pasywnych – po lewej awaryjny, po prawej główny.

Architektura układu hamulców elektrohydraulicznych aktywnych jest analogiczna jak pasywnych, a różnica polega na odwrotnym działaniu zacisków – wzrost ciśnienia generuje hamowanie, czyli analogicznie jak w samochodach. W obwodach takich hamulców bardzo często stosuje się akumulatory ciśnienia (tzw. hydroakumulatory). Są to zbiorniki ciśnieniowe (ryc. 22), w których magazynowane jest ciśnienie oleju hydraulicznego generowane przez pompę agregatu hydraulicznego. Na podstawie aktualnego reżimu pracy hamulców aktywnych, ciśnienie z hydroakumulatora jest przekazywane do zacisków w celu realizacji hamowania. Zastosowanie takiego akumulatora jest istotne z punktu widzenia szybkości uruchomienia hamulców. Gdy ciśnienie w tym zbiorniku spadnie do określonej wartości, następuje ponowne uruchomienie pompy w agregacie hydraulicznym i wzrost ciśnienia do wartości znamionowej. Dzięki takiemu rozwiązaniu natychmiastowo osiągnięta jest odpowiednia skuteczność hamowania, bez zwłoki potrzebnej na wytworzenie ciśnienia przez agregat hydrauliczny. W przypadku wystąpienia poślizgu kół, układ sterowania precyzyjnie reguluje ciśnienie w zaciskach, zmniejszając lub zwiększając jego wartość, w odniesieniu do pomiaru prędkości obrotowej kół. Czyli po zmniejszeniu ciśnienia, czego efektem jest przywrócenie toczenia się kół, akumulator ciśnienia od razu zapewnia ciśnienie do kontynuowania hamowania. Jeżeli pojazd jest wyposażony w hamulce aktywne to w zakresie hamowania służbowego wykorzystywane są one np. do wspomagania hamowania elektrodynamicznego, gdy skuteczność hamulca elektrodynamicznego jest niewystarczająca.



Ryc. 22. Akumulator ciśnienia obok agregatu hydraulicznego hamulców aktywnych.

Do hamulców ciernych zalicza się również omówione powyżej elektromagnetyczne hamulce szynowe. Są one obowiązkowym wyposażeniem każdego tramwaju. Warto zwrócić uwagę, że hamulce te wbrew często spotykanej opinii nie wytwarzają największej możliwej siły hamowania. Według przepisów [6] (patrz rozdział 3.3), wymagana dla nich skuteczność hamowania (hamowanie awaryjne) jest analogiczna jak dla hamowania służbowego. Hamulce szynowe mogą być uruchamiane samodzielnie lub mogą stanowić dopełnienie innych rodzajów hamowania. Ich podstawowa zaleta to uniezależnienie skuteczności hamowania od przyczepności kół do szyn.

Jak wynika z powyższych opisów układy sterowania nowoczesnych tramwajów odpowiednio sterują pracą poszczególnych układów hamulcowych, tak aby uzyskać wymaganą skuteczność hamowania, zgodną z aktualnymi potrzebami eksploatacyjnymi.

W powyższym opisie zaprezentowane zostały powszechnie stosowane rodzaje układów hamulcowych, jakie można spotkać w tramwajach. Różnorodność budowy pojazdów tramwajowych powoduje, że występują również różne inne konfiguracje w zakresie układów hamulcowych (np. ryc. 23), lecz wszystkie bazują na analogicznych układach jak powyżej opisane.



Ryc. 23. Korba hamulca ręcznego w kabinie tramwaju wyposażonego w automatyczny hamulec postojowy (solenoidowy) utrzymywany elektrycznie (bez funkcji pasywnej).

3.3. Wymagania przepisów w odniesieniu do skuteczności hamowania

Obowiązujące w Polsce przepisy [6], określają wymagania długości dróg hamowania oraz opóźnień, jakie muszą być spełnione, aby pojazd tramwajowy mógł być eksploatowany. Badania skuteczności hamowania wykonuje się podczas dopuszczania nowego tramwaju do ruchu (proces homologacji) oraz później, w okresie eksploatacji, w ramach cyklicznych badań technicznych. Tabela 1 prezentuje wymagania dla długości dróg hamowania i opóźnień dla nieobciążonego tramwaju z prędkości 30 km/h do zatrzymania na prostym, poziomym i suchym odcinku toru. Warto zwrócić uwagę, że zgodnie z tymi wymaganiami badaniu podlega pusty tramwaj w dobrych warunkach atmosferycznych. Przy pełnym obciążeniu tramwajów pasażerami oraz niekorzystnych warunkach atmosferycznych (śliskie szyny), czy dodatkowo nachyleniu terenu, długości dróg hamowania znacznie i nieproporcjonalnie się wydłużają.

Tabela 1. Zestawienie wymagań dla dróg i opóźnień hamowania według [6] dla nieobciążonego tramwaju z prędkości 30 km/h do zatrzymania na prostym, poziomym i suchym odcinku toru.

Lp.	Tramwaj wyprodukowany	Rodzaj hamowania	Droga hamowania (m)	Opóźnienie hamowania (m/s ²)
1	2	3	4	5
1	do dnia 31 grudnia 1963 r.	nagle	17,3	2,0
		robocze lub awaryjne	43,4	0,8
2	po dniu 31 grudnia 1963 r.	nagle	17,3	2,0
		robocze lub awaryjne	31,5	1,1
		bezpieczeństwa	34,7	1,0
3	po dniu 1 stycznia 2000 r.	nagle	13,3	2,6
		robocze lub awaryjne	28,9	1,2
		bezpieczeństwa	23,1	1,5
4	po dniu 1 stycznia 2002 r.	nagle	12,4	2,8
		robocze lub awaryjne	26,7	1,3
		bezpieczeństwa	23,1	1,5
5	po dniu 1 stycznia 2005 r.	nagle	11,5	3,0
		robocze lub awaryjne	24,8	1,4
		bezpieczeństwa	19,3	1,8

Droga hamowania zespołu tramwajowego złożonego z tramwaju silnikowego i tramwajów doczepnych biernych może być dłuższa nie więcej niż o 20% w stosunku do wartości podanych w tabeli.

Dla najnowszych tramwajów wymaga się osiągnięcia opóźnienia hamowania wynoszącego 3 m/s².

Warto również wspomnieć, że masy tramwajów zawierają się w zakresie od ponad 10 do nawet 70 ton. Maksymalna długość tramwaju lub składu tramwajowego w Polsce wynosi 65 metrów, a maksymalny dopuszczalny nacisk statyczny osi w pełni obciążonego tramwaju nie może przekraczać 100 kN [6].

Przykładowo trójczłonowy wagon typu 126N „Nevelo” firmy NEWAG (ryc. 24), którego nadwozie oparte jest na czterech dwuosiowych wózkach (8 osi), o długości 31,6 m i pojemności pasażerskiej 225 miejsc, ma masę własną 42,6 t, a jego masa przy maksymalnym obciążeniu wynosi 57,9 t. Średni nacisk statyczny osi w tym wagonie wynosi 71,9 kN. W wagonie tym zastosowane są hamulce elektrohydrauliczne pasywne (wózki napędowe – 4 zespoły zacisków) i hamulce elektrohydrauliczne aktywne (wózki toczne – 8 zespołów zacisków), 8 hamulców szynowych oraz hamulec elektrodynamiczny z funkcją rekuperacji (4 silniki trakcyjne o mocy 105 kW każdy i dwa zespoły oporników hamowania).

Tabela 2 przedstawia wyniki badań dróg i opóźnień hamowania, jakie uzyskane były podczas badania homologacyjnego tramwaju typu 126N „Nevelo”.



Ryc. 24. Wagon tramwajowy typu 126N „Nevelo” produkcji NEWAG SA.

Najbardziej niekorzystną porą roku dla jazdy tramwajów i efektywności ich hamowania jest jesień. Wszystko to z powodu liści opadających z drzew, tworzących na szynach tzw. czarną madę (ryc. 25), wywołującą poślizgi kół.



Ryc. 25. Mada na główce szyny, utrudniająca hamowanie.

Tabela 2. Wyniki pomiarów dróg i opóźnień hamowania tramwaju typu 126N [7].

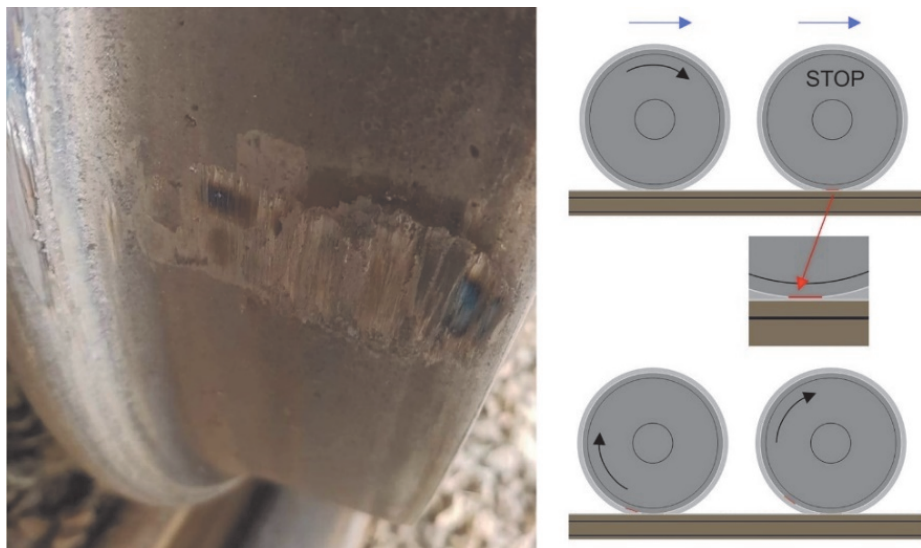
lp.	zakładana prędkość początku hamowania [km/h]	rodzaj hamowania	rzeczywista prędkość początku hamowania [km/h]	droga hamowania [m]	uzyskane opóźnienie [m/s ²]	wymagane opóźnienie [m/s ²]	
1.	30	robocze	27,70	16,05	1,84	1,4	
2.			30,73	24,31	1,50		
3.			32,44	26,88	1,51		
4.			30,89	22,24	1,65		
5.			31,59	24,39	1,58		
6.			30,50	23,10	1,55		
7.			31,82	23,83	1,63		
8.		30,11	15,82	2,21	—		
9.		31,20	15,10	2,49			
10.		31,51	14,67	2,61			
11.		31,20	16,40	2,30			
12.		32,03	14,94	2,65			
13.		32,90	15,00	2,78			
14.		30,89	14,84	2,48			
15.		30,67	10,47	3,47	3,0		
16.		31,20	10,85	3,84			
17.		31,66	10,58	3,66			
18.		29,96	9,18	3,77			
19.		31,07	9,67	3,85			
20.		30,89	10,03	3,67			
21.		31,36	9,85	3,85			
22.		32,17	13,92	2,87	1,4		
23.		30,50	13,30	2,70			
24.		29,49	12,54	2,91			
25.		31,12	10,16	3,68	1,8		
26.		32,28	10,99	3,66			
27.		30,42	9,97	3,58			
28.		31,77	11,49	3,39			
29.		50	robocze	48,58	35,53	2,56	—
30.				47,65	30,93	2,83	
31.			nagle	50,47	25,61	3,84	—
32.				50,25	25,57	3,81	
33.				48,96	25,87	3,64	

4. Układy wykrywania i likwidacji poślizgu oraz aspekty eksploatacyjne

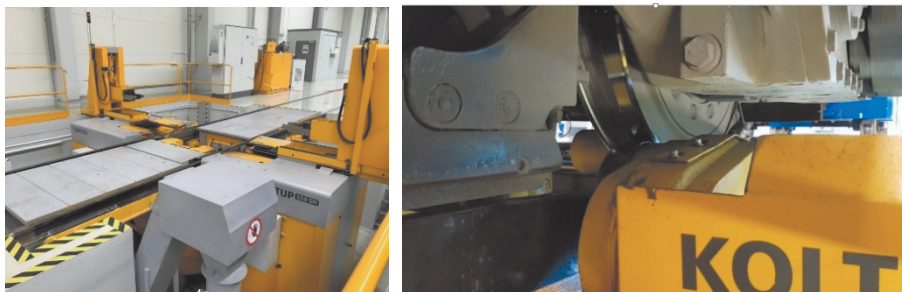
Pojazdy szynowe mają znacznie gorszą przyczepność w stosunku do pojazdów na kołach ogumionych. Wynika to z małej powierzchni styku pomiędzy kołem, a szyną oraz tego, że twarde stalowe koło toczy się po twardej stalowej szynie. Powyższa wada ma jednak z drugiej strony zaletę w postaci zdecydowanie mniejszych oporów ruchu pojazdów szynowych, co czyni je bardziej ekonomicznymi. Na przykładzie tramwajów przyjmuje się, że około 60% jazdy pomiędzy przystankami to jazda z rozpędu (z wybiegu) lub hamowanie. Pojazd szynowy rozpędza się

do żądanej prędkości, a następnie toczy się (bez napędzania) z małymi oporami ruchu, przez co nie jest potrzebne „ciągłe dodawanie gazu”. Natomiast przy hamowaniu, hamuje elektrodynamicznie, często rekuperując energię. Kilka lat temu przeprowadziłem praktyczny eksperyment dotyczący oporów toczenia. Po rozpedzeniu tramwaju do 50 km/h i przejechaniu na wybiegu ok. 1000 m po płaskim, prostym torze, pojazd zmniejszył prędkość jedynie do 30 km/h.

Mniejsza przyczepność kół pojazdu szynowego w porównaniu do pojazdów samochodowych powoduje, że pojazdy szynowe wyposaża się w zaawansowane układy wykrywania i likwidacji poślizgu. W nowoczesnych konstrukcjach, wykrywanie poślizgu odbywa się na podstawie pomiarów i porównania prędkości obrotowych poszczególnych zestawów kołowych. W starszych rozwiązaniach stosowany był np. pomiar różnicy wartości prądów na poszczególnych silnikach trakcyjnych (pozwala na to powszechnie stosowany indywidualny napęd osi przez niezależny silnik). Przy śliskiej szynie mogą występować problemy z ruszeniem. Dotyczy to szczególnie ciężkich składów kolejowych. Gdy współczynnik tarcia jest zbyt mały, to koła zaczynają obracać się z większą prędkością niż wynikająca z prędkości liniowej pojazdu. Zadaniem systemu przeciwoślizgowego jest zmniejszenie siły pociągowej w celu przywrócenia przyczepności. Jest to rozwiązanie analogiczne do stosowanego w branży motoryzacyjnej (ASR). W pojazdach szynowych może wystąpić bardzo niekorzystne zjawisko, gdy poślizg nastąpi podczas hamowania, czyli koła przestaną się obracać, a pojazd dalej będzie w ruchu przesuając się zablokowanymi kołami po szynach. W takiej sytuacji, poza aspektami związanymi z gorszą skutecznością hamowania, dochodzi bardzo często do powstania tzw. płaskich miejsc na powierzchniach toczych kół (ryc. 26). Zjawiska takiego, zwanego potocznie podkuciem, nie spotkamy w pojazdach samochodowych. W samochodach, efektem technicznym wystąpienia poślizgu przy braku systemu ABS, może być czarny ślad na jezdni od trącej opony zablokowanego koła. Sama opona może nie stracić jednak swoich własności jezdnych, natomiast w pojazdach szynowych taka sytuacja może wpłynąć na konieczność wyłączenia pojazdu z eksploatacji. Powstałe wypłaszczenie na profilu tocznym koła, podczas dalszej jazdy, powoduje drgania, wywołane jego uderzaniem o główkę szyny podczas toczenia się koła. Drgania takie, poza niekorzystnym oddziaływaniem na pojazd i komfort podróży są też źródłem dużego hałasu w postaci stukotu proporcjonalnego do prędkości obracającego się uszkodzonego koła. W celu wyeliminowania uszkodzenia, pojazd wyłącza się z ruchu i kieruje na tak zwaną reprofilację zestawów kołowych (ryc. 27).



Ryc. 26. Wyplaszczenie na profilu koła i schemat jego powstawania.



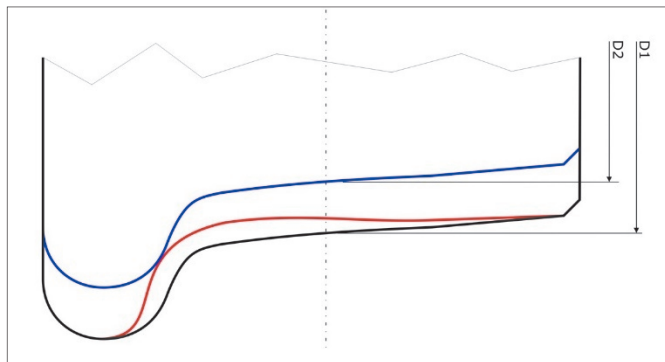
Ryc. 27. Tokarka podtorowa (po lewej) i koło w trakcie reprofilacji (po prawej).

Na specjalnych tokarkach obrabia się poprzez obróbkę skrawaniem profil koła, tak aby zniwelować wyplaszczenie. Każda taka reprofilacja ze względu na zebranie materiału z obwodu koła, powoduje jednak zmniejszenie jego średnicy. Im więcej reprofilacji tym szybsza konieczność wymiany kół na nowe, ze względu na osiągnięcie granicznej średnicy, pozwalającej na eksploatację.

W obecnie produkowanych tramwajach koło nowe ma najczęściej średnicę 600 mm, a maksymalnie zużyte nie może mieć mniejszej średnicy niż 520 mm. W pojazdach kolejowych przykładowe koło zespołu trakcyjnego o średnicy 840 mm może uzyskać graniczny wymiar 790 mm, a nowoczesnej lokomotywy odpowiednio 1250 i 1170 mm.

Reprofilacja kół jest normalnym zabiegiem wynikającym z eksploatacji. Koła podczas jazdy zużywają się na skutek współpracy z szynami toru i konieczna jest regeneracja ich profilu, gdy ten nie jest zgodny z wymaganiami bezpieczeństwa. Jednak im mniej takich zabiegów, tym dłuższa trwałość kół i wynikające z tego

oszczędności. Dlatego tak ważne jest zastosowanie skutecznych systemów przeciwpoślizgowych, aby wykonywać reprofilacje (ryc. 28) tylko wynikające z normalnego zużycia eksploatacyjnego, a nie błędnie działającego systemu przeciwpoślizgowego.



Ryc. 28. Przykładowe zużycie profilu koła kolejowego i reprofilacja: linia czarna – zarys profilu koła nowego, linia czerwona – zarys profilu zużytego, wymagający reprofilacji, linia niebieska – odnowiony zarys profilu koła po reprofilacji.

W zakresie systemów likwidacji poślizgu pojazdy szynowe wyposaża się w jeszcze jeden układ, bezpośrednio wpływający na zwiększenie współczynnika tarcia między kołem a szyną. Jest nim układ piasecznic, czyli rozwiązanie polegające na wysypywaniu piasku na szynę bezpośrednio pod koła jezdne. Piasek magazynowany jest w zbiornikach (ryc. 29) i w razie potrzeby wysypywany z odpowiednią prędkością, dzięki sprężonemu powietrzu, poprzez dysze zamontowane przed kołami (ryc. 30).



Ryc. 29. Zbiornik piasku w podwoziu pojazdu – po lewej na wózku jezdnym, po prawej pod siedzeniem pasażerskim.

Piasek wykorzystywany w piasecznicach musi mieć odpowiednie, opisane w przepisach, parametry związane z gramaturą i składem. Musi być również suchy,

aby jego skuteczność była właściwa. Dlatego zbiorniki piasku często mają zabudowane układy osuszające w postaci grzałek elektrycznych lub wentylowania sprężonym powietrzem. Stosuje się również ogrzewane dysze wysypowe przy kołach.



Ryc. 30. Układ piasecznicy – widoczny fragment zbiornika, przyłącze pneumatyczne dozownika piasku, wąż zsypowy i podgrzewana dysza przy kole.



Ryc. 31. Tramwaj podczas napełniania zbiorników („napiaszczania”) i silos do magazynowania piasku w odpowiednich warunkach.

W pojazdach kolejowych sprężone powietrze do zasilania piasecznic pochodzi z układu pneumatycznego pojazdu. W tramwajach stosuje się kompresory dedykowane dla tego układu.

5. Konkluzje

Artykuł w sposób ogólny przedstawia rozwiązania stosowane w konwencjonalnych pojazdach szynowych w zakresie układów hamulcowych oraz układów wspomagających. Wskazane zostały aspekty bezpieczeństwa wynikające ze stosowanych rozwiązań technicznych oraz omówiono kwestie eksploatacyjne dla tych zakresów. Pojazdy szynowe potrzebują znacznie dłuższych dróg hamowania niż samochody. Należy też pamiętać, że pojazdy szynowe przewożą na pokładzie nie tylko pasażerów siedzących, ale także stojących. Ci drudzy są najbardziej narażeni na skutki gwałtownego hamowania. Prowadzący musi zawsze brać pod uwagę nie tylko bezpieczeństwo innych użytkowników ruchu, ale również przewożonych pasażerów. Niestety, jak wynika z doświadczeń, zdarzenia drogowe z udziałem pojazdów szynowych bardzo często są efektem brawury kierowców i pieszych oraz niezajomości przez nich przepisów ruchu drogowego [5].

Bibliografia

1. Rozporządzenie Komisji Unii Europejskiej nr 1302/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu „Tabor – lokomotywy i tabor pasażerski” systemu kolei w Unii Europejskiej (z późn. zm.).
2. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. (2022). *Instrukcja Ir-1 (R1) o prowadzeniu ruchu pociągów* <https://www.plk-sa.pl/klienci-i-kontrahenci/akty-prawne-i-przepisy/instrukcje-pkp-polskich-linii-kolejowych-sa/ruch-i-przewozy-kolejowe>
3. Polski Komitet Normalizacyjny. (2020). *Kolejnictwo – Systemy hamulcowe wieloczołowych zespołów trakcyjnych* (PN-EN 16185).
4. Polski Komitet Normalizacyjny. (2021). *Kolejnictwo – Hamowanie – Wymagania dla układu hamulcowego pociągów prowadzonych przez lokomotywy* (PN-EN 14198).
5. Ustawa z dnia 20 czerwca 1997 r. *Prawo o ruchu drogowym*, Dz. U. 1997 Nr 98 poz. 602 z późn. zm.
6. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 2 marca 2011 r. w sprawie warunków technicznych tramwajów i trolejbusów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia.
7. Instytut Gospodarki Przestrzennej i Mieszkalnictwa. (2012). *Badanie homologacyjne tramwaju marki NEWAG typu 126N – załącznik nr 11*.
8. Górowski, M. (2023). *Transportszynowy.pl. Najobszerniejsze centrum wiedzy o transporcie szynowym po polsku*. <https://transportszynowy.pl/>
9. Piechowiak, T. (2012). *Hamulce pojazdów szynowych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
10. Zalewski, P., Siedlecki, P., Drewnowski, P. (2004). *Technologia transportu kolejowego*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności.

* * *

Rail vehicle brakes. Basic characteristics, construction and operation

Abstract

The aim of the article is to present the issues related to the construction and principles of operation of braking systems used in railroad and tramway vehicles, paying attention to aspects of safety, achieving appropriate braking performance and wheel to rail adhesion. The article is a theoretical introduction to the applied solutions and requirements for braking systems in rail vehicles together with systems supporting the operation of brakes.

Key words

Railway, trams, brakes, traction, braking distances, skidding.