

Niskie koszty zakupu i minimalizacja kosztów cyklu życia pojazdu

Istotnymi zadaniami postawionymi przy projektowaniu autobusu szynowego RegioSprinter (RVT – rys. 1) było obniżenie kosztów zakupu i kosztów cyklu życia (Life-cycle-cost). Te ambitne cele mogły zostać osiągnięte tylko przy zmianie założeń projektowania nowych pojazdów przeznaczonych dla komunikacji lokalnej.

Odejście od dotychczasowej filozofii projektowania przy przyjęciu założeń projektowych dla RVT przejawia się w:

- obniżeniu wymagań odnośnie okresu trwałości do 15 lat (do tej pory 25 do 30 lat);
- przyjęciu aktywnej zamiast pasywnej filozofii bezpieczeństwa:
 - odejście od założeń stworzenia pudła pojazdu o maksymalnej wytrzymałości wzdłużnej na zgniecenie w kierunku uniwersalnej „sprężalności”,
 - koncepcji pudła pojazdu z kontrolowaną strefą zgniotu nadwozia (strefą pochłaniania energii zderzenia), bez obniżenia poziomu bezpieczeństwa,
 - znacznym zwiększeniu efektywności hamowania w przypadkach awaryjnych,
 - ciągłej łączności z pociągiem drogą radiową,
 - zastosowaniu systemu zabezpieczeń i sterowania pojazdem;
- zastosowaniu części z produkcji wielkoseryjnej samochodów ciężarowych.

Aby stworzyć innowacyjny pojazd szynowy dla ruchu lokalnego, należało przeprowadzić syntetyczne ujęcie wielu wymogów – również poprzez obniżenie wymagań. Użytkowanie pojazdu w obszarze kolei normalnotorowej wymaga spełnienia przepisów odnośnie budowy i eksploatacji kolei (EBO), jak również wytycznych UIC w odniesieniu do profilu skrajni, wysokości peronów oraz założeń dotyczących bezpieczeństwa. Użytkowanie pojazdu w obszarze miejskim wymaga spełnienia przepisów odnośnie budowy i eksploatacji tramwajów (BOStrab), które zakładają podwyższone, ak-

tywne bezpieczeństwo poprzez określenie wielkości opóźnienia hamowania wartości $2,73 \text{ m/s}^2$.

Również dotychczasowe wymagania odnośnie oczekiwanego okresu użytkowania, wynoszącego 15 lat, zostały zbliżone do oczekiwanych okresów użytkowania pojazdów tramwajowych (autobusów), określanych na 10 lat.

Obowiązująca na kolei normalnotorowej wytrzymałość na zgniecenie wzdłużne, wynosząca 1500 kN, została – dla lekkiego wagonu motorowego RVT, z przeznaczeniem dla ruchu miejskiego – zmniejszona do 600 kN, aby w ten sposób rzeczywiście umożliwić budowę lekkiego wagonu.

Ta „nowa filozofia bezpieczeństwa” czerpie założenia z długoletnich doświadczeń komunikacji miejskiej. Chodzi tutaj między innymi o:

- skrócenie drogi hamowania poprzez osiągnięcie możliwie dużej wartości opóźnienia hamowania,
- zmniejszenie energii kinetycznej pojazdu poprzez obniżenie jego masy,
- zwiększone rozpraszanie energii przy zderzeniu, dzięki zastosowaniu kontrolowanej strefy zgniecenia nadwozia (strefy pochłaniania energii zderzenia) oraz metody budowy pojazdu z aluminium, absorbującej energię uderzenia.

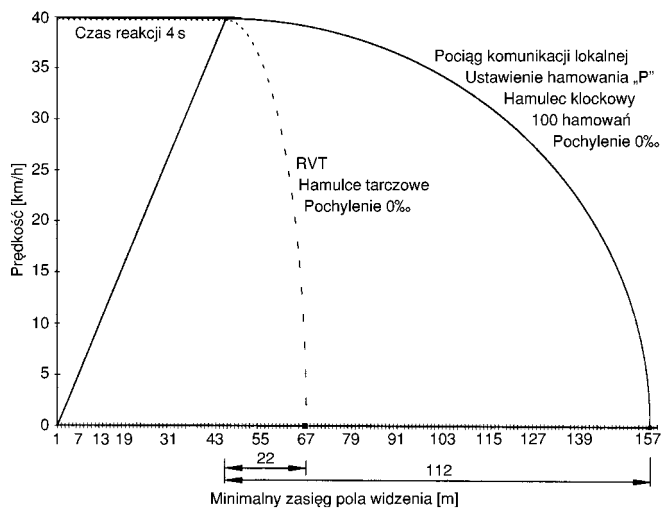
Porównanie ważniejszych danych użytkowych RVT z konwencjonalnym pojazdem komunikacji lokalnej

Przy porównaniu drogi hamowania konwencjonalnego pociągu komunikacji lokalnej (100 prób hamowania, przy ustawieniu „P”) przy prędkości 40 km/h, RVT uzyskał całkowitą drogę zatrzymania (takie same czasy reakcji hamowania) równą 67 m, przy rzeczywistej drodze hamowania równej 22 m, podczas gdy całkowita droga zatrzymania pojazdu komunikacji lokalnej wynosiła 157 m, przy drodze hamowania 112 m (rys. 2).

Koszty cyklu życia pojazdów są uwzględniane w kosztach inwestycyjnych oraz w stałych i zmiennych kosztach eksploatacji i obliczane są dla całego okresu użytkowania. Spośród składników zmiennych kosztów eksploatacji na szczególną uwagę zasługują koszty energii oraz koszty utrzymania pojazdu w dobrym stanie technicznym. Dla zminimalizowania kosztów energii należy dążyć do osiągnięcia małej wartości stosunku masa użyteczna/masa własna pojazdu, chociaż, ze względów wynikających z zasadniczych różnic systemu budowy pojazdów, nie może być osiągnięty współ-



Rys. 1. RegioSprinter z Dürener Kreisbahn



Rys. 2. Proces hamowania pojazdu RegioSprinter

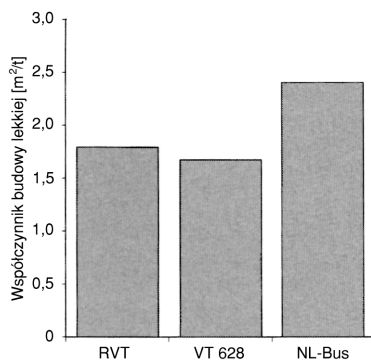
czynnik masy użytecznej dla autobusu liniowego komunikacji lokalnej NL-Bus równy 1,8.

W obszarze kolei normalnotorowej pojawiły się całkiem nowe możliwości konstruowania samego pudła pojazdu wraz z możliwością wykorzystywania nowych komponentów:

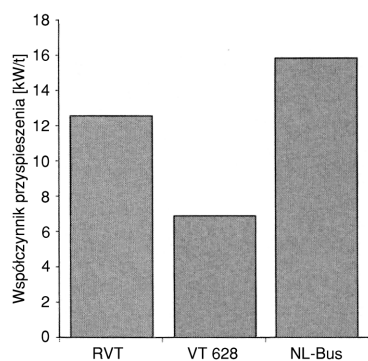
- profili aluminiowych,
- aluminiowych elementów warstwowych (przekładowych),
- komponentów z TWS (tworzywa sztuczne, zbrojone włóknem szklanym).

Zgodnie z nową technologią podwozie spawane jest z profili aluminiowych, ściany boczne skręcane są z kształtowników Alu-Suisse-Lonza Railtec, podczas gdy dach i głowica klejone są ze zbrojonego włóknem szklanym tworzywa sztuczne. Ten mieszany sposób budowy, w połączeniu z obniżoną do 600 kN wzdłużną siłą ściskającą, umożliwia znaczną redukcję masy pudła pojazdu. Bilans masy poprawia jeszcze wprowadzenie podwozia z napędzanymi pojedynczymi napędowymi zestawami kołowymi (w części końcowej podwozia) i podwójnymi zestawami kołowymi (w części środkowej podwozia).

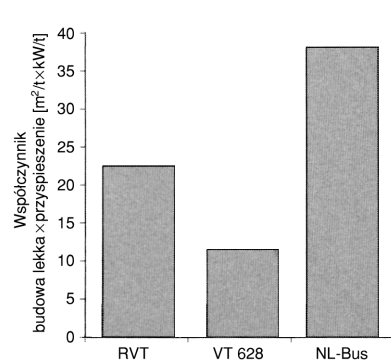
Aby móc ocenić pozytywne efekty tych zabiegów konstrukcyjnych, porównane zostaną parametry pojazdu RVT, lekkiej jednostki napędowej z silnikiem wysokoprężnym VT 628.4 oraz autobusu liniowego NL-Bus. Na rysunku 3 porównane są metody lekkiej konstrukcji pojazdów poprzez



Rys. 3. Porównanie współczynnika budowy lekkiej



Rys. 4. Porównanie współczynnika przyspieszenia



Rys. 5. Porównanie współczynnika budowa lekka/przyspieszenie

zastosowanie wskaźnika lekkości budowy (powierzchnia użytkowa/masa pojazdu). Jako kryterium, zamiast liczby miejsc siedzących i stojących, ze względu na zróżnicowane wyposażenie w pomieszczenia o wielofunkcyjnym zastosowaniu, toalety itp., przyjęto powierzchnię użytkową netto. Pojazd RVT odznacza się większymi zaletami w porównaniu z pojazdami drogowymi, chociaż wskaźnik budowy lekkiej dla NL-Bus, jako pojazdu drogowego, przedstawia wartość graniczną, nieosiągalną dla pojazdów szynowych.

Oprócz spełnienia wymogów zachowania konstrukcji lekkiej, pojazd RVT powinien odznaczać się atrakcyjnymi walorami użytkowymi i być rentowny w eksploatacji. Powinien cechować się dużymi możliwościami, jeżeli chodzi o przyspieszenie, gdyż ruch lokalny charakteryzuje się krótkimi odległościami między przystankami.

Na rysunku 4 przedstawiono wartości wskaźnika przyspieszenia (moc napędu/masa pojazdu), obrazujący możliwości przyspieszeń porównywanych pojazdów. Przy krótkich odległościach między przystankami możliwość uzyskiwania przez pojazd dużych przyspieszeń ma znaczący wpływ na liczbę pojazdów koniecznych do obsługi określonej trasy. W porównaniu z VT 628, pojazd RVT ma lepszą zdolność przyspieszania o wartość wskaźnika równą 1,8. Wskaźnik przyspieszenia nie może być jednakże rozpatrywany niezależnie od wskaźnika budowy lekkiej. Z tego też powodu obydwie wskaźniki zostaną sprowadzone do jednego wskaźnika charakteryzującego pojazd: lekka budowa – wskaźnik przyspieszenia (rys. 5). Z rysunku tego widać, że RVT „prowadzi” w swojej grupie pojazdów.

Interesująca koncepcja budowy samego pudła, wraz z użyciem produkowanych w dużych seriach elementów, obniża cenę zakupu pojazdu (obejmującą dodatkowe koszty związane ze sprowadzeniem towaru, np. transportu, opakowania, ubezpieczenia) oraz ułatwia uruchomienie. Wykorzystanie podzespołów konstrukcyjnych autobusów miejskich umożliwia redukcję kosztów poprzez zastosowanie elementów produkowanych w wielkich seriach, jak np.:

- 5-cylindrowy silnik wysokoprężny z doładowaniem turbosprężarką, zasilaną gazami spalinowymi oraz chłodzeniem powietrzem doładującym,
- 5-biegowa automatyczna skrzynia biegów z opóźniaczem,
- części do układu grzewczego i wentylacyjnego,
- foteli.

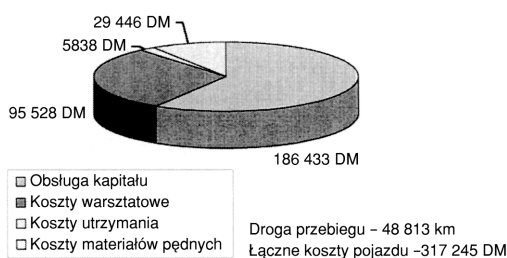
Porównanie kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych

Koszty pojazdów dla komunikacji lokalnej, zwłaszcza pojazdu RVT i NL-Bus, można porównywać, gdyż oba te pojazdy, pod względem prędkości jazdy ($V = 100/120$ km/h) oraz odległości między przystankami (dla RVT odległości te wynoszą od 980 m do 4,8 km) zaprojektowano z myślą o ofercie na podobny obszar rynku. Koszty infrastruktury w każdym z tych przypadków nie zostały uwzględnione. Wynik intensywnych starań o obniżenie kosztów inwestycyjnych dla RVT pokazano na rysunku 6 (koszty z 1997 r.). Porównanie wybranych kosztów inwestycyjnych przedstawiono, w odniesieniu do powierzchni użytkowej – na rysunku 7, a w odniesieniu do liczby miejsc dla podróżnych – na rysunku 8.

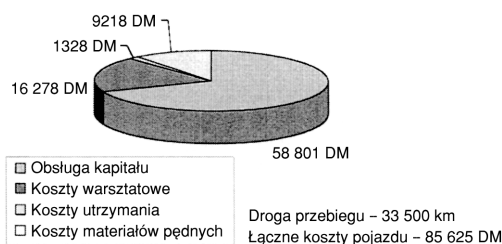
Pojazd RVT również w tym przypadku, w porównaniach z VT 628 zajmuje czołowe miejsce. Koszty eksploatacji, dla przyjętego dla każdego z pojazdów komunikacji lokalnej równego przebiegu, wynoszącego 90 tys. km rocznie, zestawiono na rysunku 9. Istotnym udziałem w olbrzymich kosztach eksploatacji odznaczają się koszty utrzymania i koszty kontroli działania. Do określenia terminów przeprowadzania przeglądów i kontroli pojazdu RVT przyjęto na podstawie dokładnych badań kombinację okresów uzależnioną od czasu użytkowania i kilometrowego przebiegu pojazdu. Prognoza kosztów utrzymania pojazdu w dobrym stanie technicznym dla całego okresu życia, przyjmowanego na 15 lat, przy rocznym przebiegu równym 90 tys. km, zbadana za pomocą metod statystycznych, została w tym przypadku na razie ograniczona do końca 1997 r. Specyficzne koszty eksploatacji – wskaźniki odniesione do liczby miejsc będących do dyspozycji pasażerów – przedstawiono dodatkowo na rysunku 10.

Po upływie okresu gwarancji policzone zostały na nowo koszty warsztatowe od 1998 r. Ponieważ w ramach gwarancji wykonane zostały częściowo prace okresowe bez dodatkowych nakładów, dokładne wyliczenie kosztów warsztatowych było trudne. Poza tym nie były znane czasy użytkowania poszczególnych części i podzespołów.

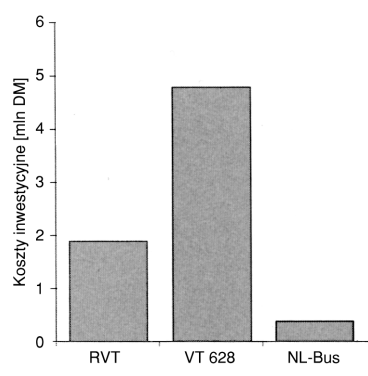
W efekcie, obecnie doszło do tego, że koszty warsztatowe wzrosły znacznie powyżej początkowo szacowanych. Na wykresie (rys. 11) przedstawiono ogólny wynik dla pojazdu RVT.



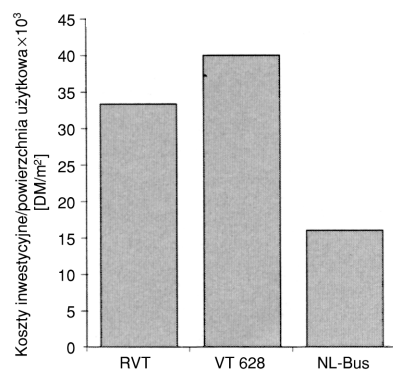
Rys. 11. Koszty pojazdu RVT (DM /rok)



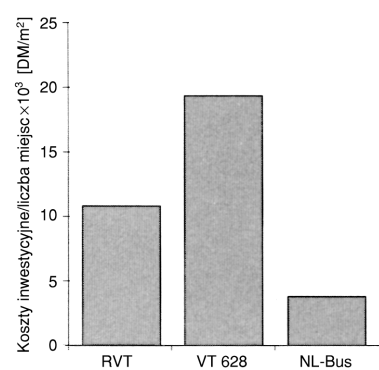
Rys. 12. Rodzaje kosztów pojazdu NL (DM/rok)



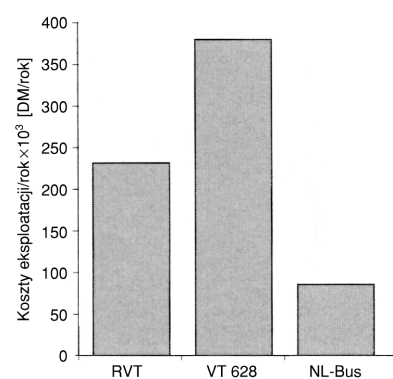
Rys. 6. Porównanie kosztów inwestycyjnych



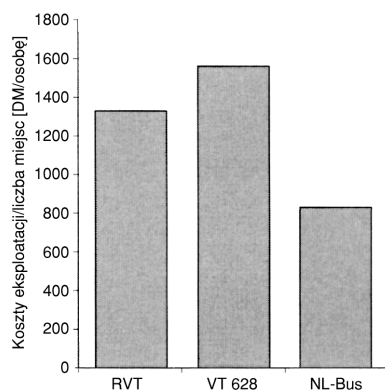
Rys. 7. Porównanie kosztów inwestycyjnych w stosunku do powierzchni użytkowej



Rys. 8. Porównanie kosztów inwestycyjnych w stosunku do liczby miejsc



Rys. 9. Porównanie rocznych kosztów eksploatacji



Rys. 10. Porównanie rocznych kosztów eksploatacji przy przebiegu 90 tys. km w stosunku do liczby miejsc

Koszty ogólne rozkładają się na:

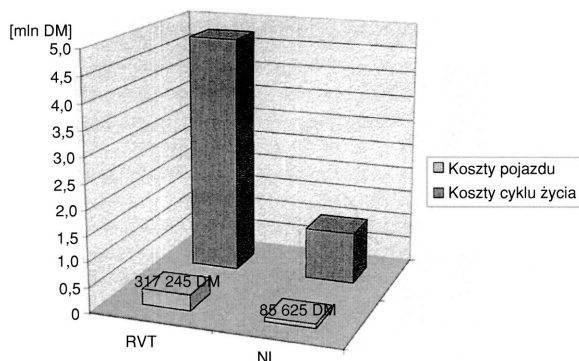
- koszty utrzymania,
- oleje i smary,
- utrzymanie w czystości.

W porównaniu do NL-Bus (rys. 12) wynik ten jest bardzo niedobry i nie ma to w żadnego gospodarczego uzasadnienia, aby nakłady kosztów na pojazd w ciągu roku, przy średnim przebiegu 50 tys. km w przypadku pojazdu RVT, wynosiły 317 245 DM, podczas gdy dla pojazdu NL-Bus koszty te wynoszą 86 624 DM.

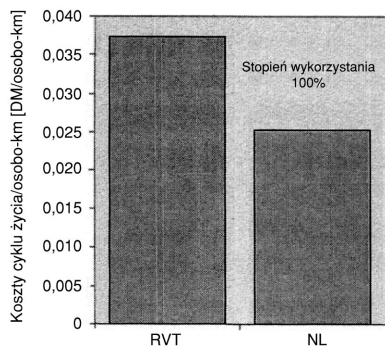
Na rysunku 13 pokazano również koszty cyklu życia poszczególnych typów pojazdów, które w przypadku pojazdu RVT obliczone są na okres użytkowania 15 lat, a dla pojazdu NL-Bus na 8 lat. Na rysunkach 14 i 15 przedstawiono porównawczo dotychczas obowiązujące koszty.

Istotne zalety pojazdów o niskiej cenie w porównaniu z konwencjonalnymi pojazdami komunikacji lokalnej

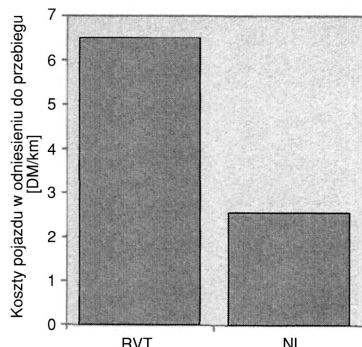
Ekonomiczne zalety pojazdu RVT, to niższe koszty zakupu oraz niższe koszty eksploatacji, w porównaniu z konwencjonalnymi pojazdami szynowymi. Na rysunku 15 przedstawiono porównanie różnych pojazdów pod względem wskaźników ekonomicznych. Wielkością odniesienia jest będąca do dyspozycji liczba miejsc dla pasażerów, przy uwzględnieniu rocznego przebiegu wynoszącego 90 tys. km. Koszty infrastruktury nie zostały uwzględnione. Pojazd RVT wypada bardzo dobrze w porównaniu z konwencjonalnym pojazdem ko-



Rys. 13. Porównanie kosztów cyklu życia i kosztów pojazdu dla RVT i NL



Rys. 14. Koszty cyklu życia RVT i NL odniesione do osobokilometra



Rys. 15. Koszty cyklu życia RVT i NL przypadający na pojazdokilometr

munikacji lokalnej; chodzi w tym przypadku o porównania następujących rodzajów kosztów: koszty inwestycyjne, koszty eksploatacji oraz koszty utrzymania pojazdu.

Ewentualna wada – mniejsza sztywność wzdłużna konstrukcji pojazdu RVT została wyrównana poprzez zastosowanie nowego rozwiązania, tzw. „aktywnego zabezpieczenia”. Jeżeli w wyniku wypadku dochodzi do zderzenia konwencjonalnego pojazdu, to wysoka sztywność konstrukcji, bez strefy kontrolowanego zgniecia nadwozia, prowadzi bezpośrednio do przeniesienia się dużego przyspieszenia na ciało pasażera. Natomiast pojazd RVT odznacza się łatwo odkształcającym się, rozpraszającym energię zderzenia pudłem oraz dużą sprawnością hamowania wynoszącą 2,37 m/s².

Dobra ocena parametrów autobusu liniowego NL-Bus została uzyskana również poprzez podział powierzchni użytkowej na miejsca do siedzenia i miejsca stojące; w pojeździe NL-Bus nie ma pomieszczeń ogólnego przeznaczenia oraz toalet.

Zalecenia dla przemysłu

Przy rozwoju przyszłych lekkich konstrukcji pojazdów z przeznaczeniem dla komunikacji lokalnej powinna być konsekwentnie kontynuowana, zaproponowana droga, ze szczególnym położeniem nacisku na:

- przeanalizowanie wymagań EBO, UIC i BoStrab (bez zmniejszenia bezpieczeństwa pasażerów), gdyż wymagania te stanowią czynnik wzrostu ceny pojazdu,
- wzrost parametrów pojazdu (współczynnik lekkiej budowy × współczynnik przyspieszenia),
- większe zastosowanie części z produkcji wielkoseryjnej.

Do tej pory, przy projektowaniu i konstruowaniu pojazdów najczęściej stawiano warunek spełnienia określonych zadań funkcjonalnych, z uwzględnieniem na pierwszym miejscu całkowitych kosztów zakupu. W ujęciu kosztów okresu eksploatacji pojazdu, a w związku z tym i koszty utrzymania pojazdu w dobrym stanie technicznym. Decydujący udział kosztów utrzymania, około 70–80%, uzależniony jest od rodzaju konstrukcji. Przy projektowaniu nowej generacji pojazdów, uwzględniającym koszty utrzymania pojazdu, w zeszycie obciążeń powinny być dokładnie wyszczególnione zadane wielkości odnośnie zakładanych kosztów związanych z poszczególnymi częściami składowymi konstrukcji, zwłaszcza w odniesieniu do:

- możliwości uszkodzenia się elementu (wartości MTBF – średni czas między uszkodzeniami),
- dopuszczalnych nakładów na konserwację i kontrole,
- dopuszczalnych nakładów na demontaż /montaż,
- funkcji diagnostycznych i systemów diagnostycznych.

Możliwość wystąpienia uszkodzenia urządzeń elektronicznych powinna być, podobnie, jak to jest zwykle robione w innych dziedzinach przemysłu, opisana poprzez podanie zadanych wartości

MTBF. Trudnym, ale opłacającym się przedsięwzięciem jest określenie możliwości uszkodzenia się komponentów mechanicznych. Jedną z możliwości uzyskania tych wartości jest przejście empirycznych wartości z poprzednich konstrukcji, przy wykorzystaniu modeli podobieństwa i systemów ekspertów.

Nakłady na prace konserwacyjne i kontrolne możliwe są do zredukowania, jak wykazały badania nad pojazdem RVT w Dürener Kreisbahn, poprzez zastosowanie środków doposażeniowych, takich jak np.:

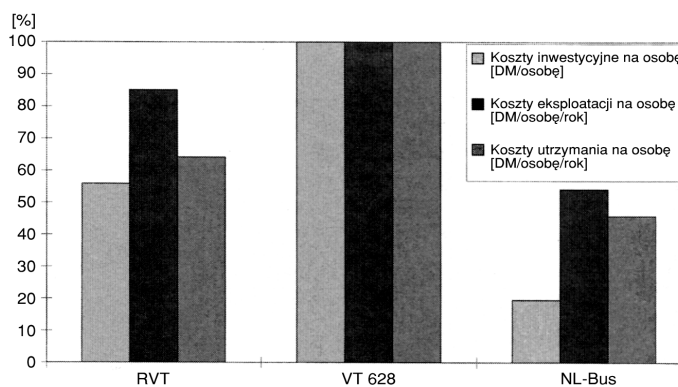
- powiększenie wszystkich zapasów (materiały pędne, woda, piasek), przy czym zalecane są równe odstępy uzupełniania,
- wbudowanie czujników do kontroli poziomu oleju w silniku i przekładni oraz czujników kontroli zużycia okładzin ciernych hamulca.

Przy powstawaniu nowych rozwiązań przedstawiony punkt widzenia powinien zostać uwzględniony już w początkowej fazie projektowania. W funkcje diagnostyczne lub systemy diagnostyczne powinny być wyposażone wszystkie urządzenia elektroniczne, z możliwością przesyłania danych do warsztatu, poprzez przewidziane do tego celu interfejsy, kodów błędów, przy wykorzystaniu systemu RBL (skomputeryzowanego systemu sterowania ruchem).

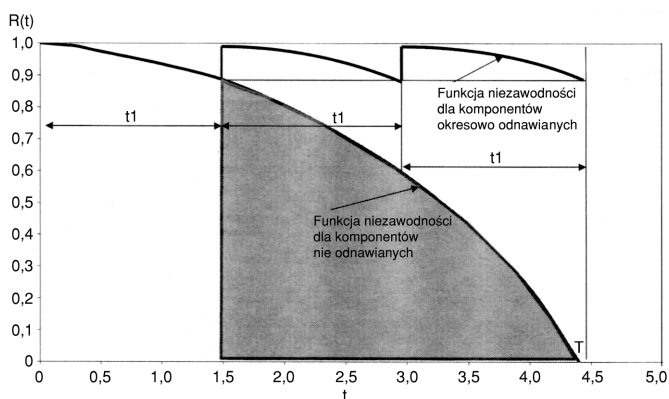
Zalecenia dla użytkownika

Nieodzownym do zmniejszenia kosztów utrzymania pojazdu w dobrym stanie technicznym jest wprowadzenie komputero wspomaganych systemów utrzymania i planowania. Zwiększenie dyspozycyjności pojazdu w okresie dochodzenia części składowych do końca czasu użytkowania, osiągnięte zostaje poprzez wprowadzenie systemu utrzymania zorientowanego na ocenę aktualnego stanu technicznego pojazdu. Niezawodność działania części składowych może być ujęta jako prawdopodobieństwo, za pomocą którego określone są kompleksowo wszystkie własności użytkowe pojazdu w okresie pewnego, zdefiniowanego przedziału czasu eksploatacji. Przy rozpatrywaniu procesów niezawodnościowych należy rozróżniać niezawodność elementów bez uwzględnienia ich odnawiania (prawdopodobieństwo utrzymania własności użytkowych do wystąpienia pierwszego uszkodzenia), od niezawodności elementów przy uwzględnieniu odnawiania (prawdopodobieństwo utrzymania własności użytkowych) – rysunek 17. Przy rozpatrywaniu problemu niezawodności bez odnawiania elementów przyjęto, że dla $t = 0$ wszystkie części składowe są w tym samym stopniu sprawne, a dla $t = T$ wszystkie części składowe uległy awarii. Jeżeli wybrana zostanie metoda utrzymania pojazdu – naprawa po wystąpieniu awarii, to całkowita trwałość życia wszystkich części składowych może zostać wyczerpana, jednakże ze zmieniającą się, przeciętnie małą dyspozycyjnością pojazdu. Aby zagwarantować dużą dyspozycyjność pojazdu, części składowe podlegają normalnie okresowemu odnawianiu. Tym sposobem rezerwa długości życia dla większości komponentów zostaje na nowo przedłużona (współczynnik zużycia odpowiada zacięniowanej powierzchni).

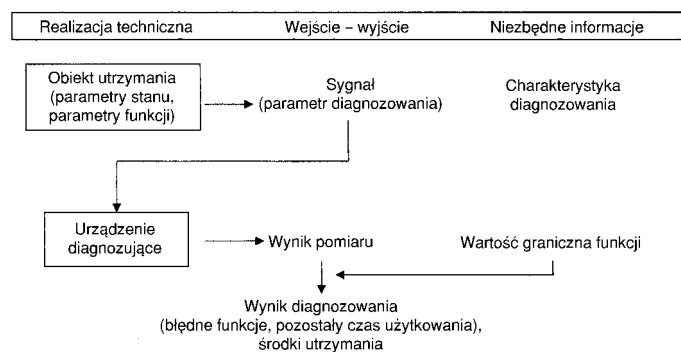
Przy wprowadzeniu metody utrzymania pojazdu bazującej na rozpoznawaniu aktualnego stanu technicznego pojazdu, rezerwa zużycia może zostać skuteczniej wykorzystana, dając w wyniku znaczną oszczędność kosztów. Określenie każdorazowo aktualnego stanu technicznego części składowych można przeprowadzić za pomocą systemu diagnostycznego (rys. 18), który umożliwia również prognozowanie pozostałego okresu trwałości elementu, jednakże w przybliżony tylko sposób.



Rys. 16. Porównanie ekonomiczne



Rys. 17. Funkcje okresu życia komponentów bez i z okresowym odnawianiem



Rys. 18. Diagnostyka techniczna i technika utrzymania

Dokończenie na s. 55 □