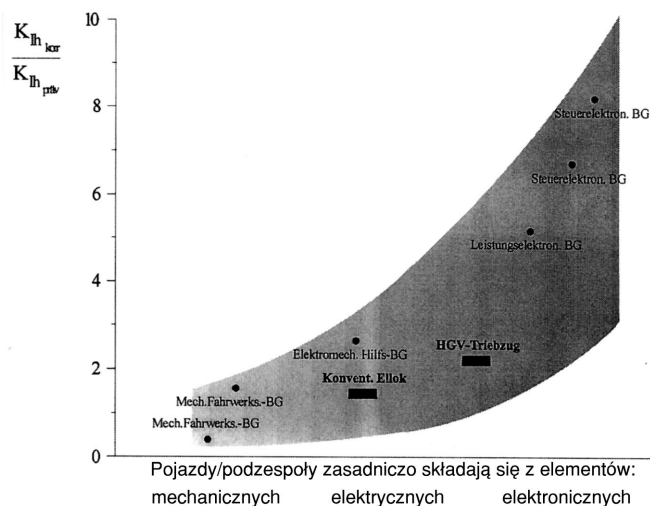


# Zapobiegawcze i bieżące utrzymanie pojazdów szynowych i ich podzespołów – trendy, ocena, optymalizacja

**W ostatnich 20–30 latach stosunek nakładów na prace naprawcze w stosunku do działań zapobiegawczych, dla utrzymania pojazdów szynowych i ich podzespołów w dobrym stanie technicznym, wzrósł średnio z 0,5 do ponad 3. W skali przedstawionej na rysunku 1 odpowiada to zwiększeniu parametru wzrostu z 6 do 8 w czasie, w którym jednocześnie ceny pojazdów wzrosły o około 5.**

Jako przyczyny tego wzrostu można wymienić następujące uwarunkowania:

- konstrukcyjne: wzrastającą złożoność budowy pojazdu szynowego, przy wzrastającym udziale urządzeń elektrycznych i elektronicznych;
- fizyczne: wzrastająca niezawodność podzespołów, włączając w to dużą liczbę rozwiązań redundancyjnych, jak również pogorszenie się, w warunkach zastosowania na kolei, możliwości przewidywania zdarzenia awaryjnego, szczególnie w podzespołach elektronicznych;



Rys. 1. Wpływ rodzaju podzespołu na metodę utrzymania pojazdów szynowych

□ eksploatacyjne: wymagania dotyczące wzrostu dyspozycyjności, również w następstwie wzrostu cen, poprzez zmniejszenie uwarunkowanych pracami konserwacyjnymi czasów przestojów.

Wraz z przeniesieniem wzrastającego udziału środków na utrzymanie pojazdu w dobrym stanie technicznym w obszar produkcyjnego odnawiania części, wzrasta prawdopodobieństwo, że ilość oraz moment czasowy przypadkowych awarii znów prowadzi do obniżenia dyspozycyjności i podniesienia całkowitych kosztów prac utrzymaniowych i kosztów następstw wypadków.

Z tak sformułowanego stanu rzeczy, przyjętego jako założenia, pojawiają się pytania:

- czy istnieje optymalny stosunek między kosztami na działania zapobiegawcze a kosztami na bieżące prace naprawcze, podobnie jak w [1]?
- jakie wielkości mają wpływ na utrzymanie optymalnej wartości tego stosunku?
- czy istnieje technicznie, logistycznie i ekonomicznie akceptowalny przedział swobody działania w podejmowaniu przedsięwzięć?

Udzielenie odpowiedzi na postawione pytania będzie przedmiotem i celem poniższych rozważań.

## Możliwości rozwiązania i założenia

Matematyczne sformułowanie problemu i znalezienie metod optymalizacji wymaga dokonania następujących założeń:

- znana jest awaryjność pojazdu szynowego i jego podzespołów, przynajmniej takich, które mają zasadnicze znaczenie do spełnienia wymagań klientów [2];
- zmienny wskaźnik awaryjności, zależny od długości czasu użytkowania lub przebiegu pojazdu w kilometrach, którego rosnąca wartość jest adekwatna również dla podzespołów elektronicznych, podlegającym zmiennym obciążeniom termicznym i dynamicznym;
- możliwość określania ważnych części składowych kosztów, jak koszty prac zapobiegawczych i koszty bieżących prac naprawczych oraz koszty powstałe w następstwie wystąpienia awarii; do ostatniej grupy kosztów zaliczane są, częściowo trudne do określenia, koszty awarii pojazdu lub pociągu, koszty opóźnień i koszty logistyczne.

Koszty całkowite, na utrzymanie i przywrócenie zdolności funkcjonalnej, jak również koszty usunięcia następstw awarii, można wyliczyć z równania (1):

$$K_{lhges} = K_{lhpav} \left( 1 + \frac{K_{lhkorr}}{K_{lhpav}} \right) + K_{AF} K_{lhpav} > 0 \quad (1)$$

$$lh = \frac{K_{lhkorr}}{K_{lhpav}}$$

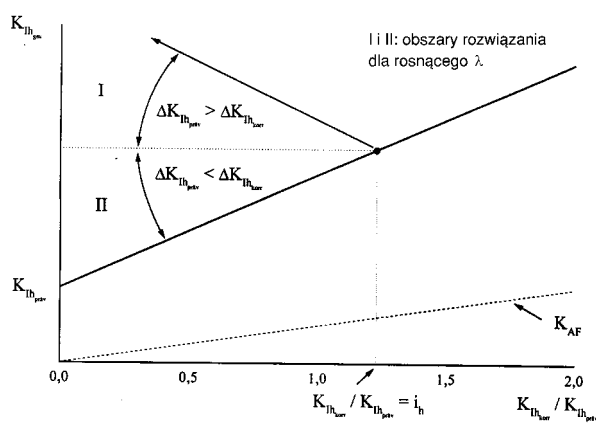
- $K_{lhges}$  – koszty całkowite,
- $K_{lhpav}$  – koszty działań zapobiegawczych,
- $K_{lhkorr}$  – koszty bieżących prac naprawczych,
- $K_{AF}$  – koszty spowodowane przez awarie.

Otrzymane na tej podstawie zależności funkcjonalne (rys. 2), można skomentować w następujący sposób:

□ wraz ze wzrostem kosztów na działania zapobiegawcze, co daje możliwość obniżenia kosztów czynnych prac naprawczych i kosztów spowodowanych następstwami wypadków, można wyprowadzić zależność ujmującą obniżenie kosztów całkowitych, za pomocą której można określić sensowne pola rozwiązań w kierunku mniejszych wartości stosunku  $i_h$ , a więc na lewo od każdorazowo rozważanego punktu;

□ koszty działań zapobiegawczych i bieżących prac naprawczych zmieniają się każdorazowo w takim samym stopniu, lecz przeciwnie, to znaczy  $\Delta K_{lhpr\grave{a}v} = -\Delta K_{lhkorr}$  a przez to koszty całkowite przedstawiają się jako równoległe do osi  $i_h$ ; ta pozioma linia oddziela pola rozwiązań I i II;

□ pole rozwiązania I odpowiada spełnieniu postawionego celu, to jest podniesieniu niezawodności ( $\Delta K_{lhpr\grave{a}v} \sim f(R)$ ); pole rozwiązania II odpowiada również spełnieniu postawionego celu podwyższenia niezawodności z interesującą możliwością wielokrotnej optymalizacji oraz obniżeniu kosztów całkowitych ( $\Delta K_{lhkorr, K_{AF}} \sim f(\lambda)$ ), jeśli poprzez  $R$  oznaczmy niezawodność w ściślejszym znaczeniu, a poprzez  $\lambda$  oznaczmy wskaźnik awaryjności.

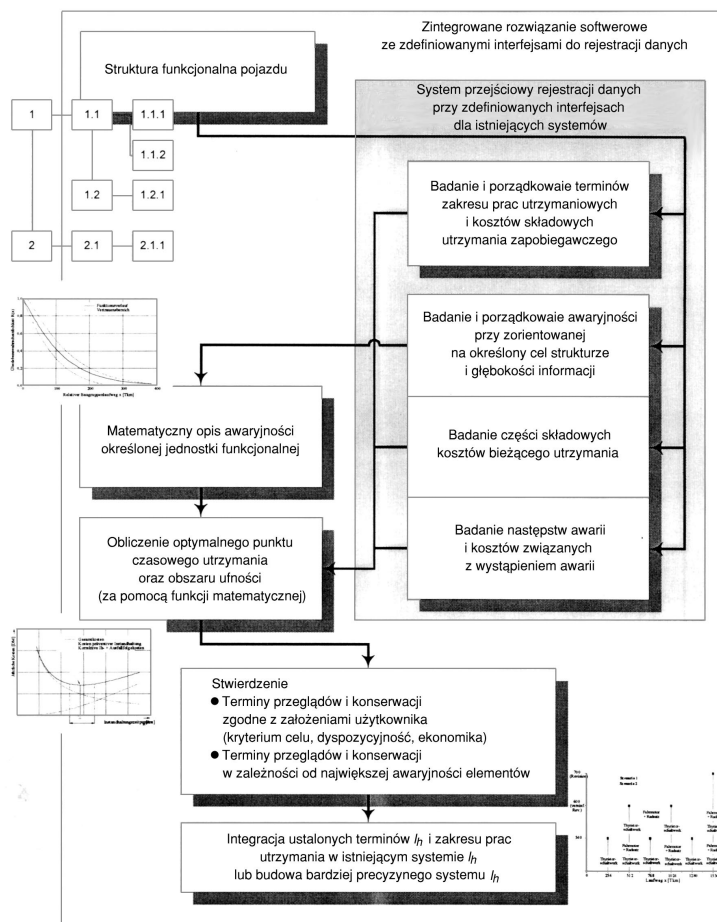


Rys. 2. Teoretyczny związek między kosztami całkowitymi  $K_{lhges}$  a indeksem utrzymania  $i_h$ ; I i II: obszary rozwiązania dla zmieniającego (wzrastającego)  $\lambda$ .

Ograniczając się do możliwej optymalizacji w polu rozwiązania II, musi zostać jednak obowiązywać zastrzeżenie, że ważne dla bezpieczeństwa podzespoły należy rozpatrywać wyłącznie pod kątem wymaganej niezawodności, w następstwie czego przyporządkowanie ich musi następować w kierunku pola rozwiązania I.

### Metoda rozwiązania

Sposób postępowania w celu znalezienia odpowiedzi na sformułowane na początku pytania należy podzielić, stosownie do rysunku 3, na osiem kroków. Punktem wyjścia jest podzielony, ze względu na aspekty funkcjonalne, opis produktu (funkcjonalna struktura produktu). Służy on do tego, aby zrobić wyraźne funkcjonalne powiązania mechanicznych i elektrycznych jednostek funkcjonalnych w obszarze części składowych produktu oraz między nimi, aby wzmocnić strukturę niezawodności [3] oraz aby określić, ze względu na po-



Rys. 3. Sposób postępowania w ocenie awaryjności i metod utrzymania pojazdów szynowych

tencjalne i rzeczywiste aspekty, podzespoły o kluczowym znaczeniu. Propozycja odpowiedniej struktury znajduje się obecnie na etapie uzgadniania pomiędzy niemieckim przemysłem pojazdów szynowych a kolejami niemieckimi.

Drugim krokiem postępowania jest określenie podzespołów o zasadniczym znaczeniu. Zakłada się, że na tym etapie zostaną postawione i zdefiniowane cele, których spełnienie stanowić będzie kryterium wyboru podzespołów o zasadniczym znaczeniu. Należy tutaj wymienić między innymi: zapewnienie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa i określonego stopnia dyspozycyjności, jak również utrzymanie się w określonych kosztach ramowych. Wykorzystując, lub ograniczając się do rezultatów poprzednich kroków, przechodzimy do następnego kroku, którego celem jest badanie i komputerowe opracowanie awaryjności oraz stopnia występowania uszkodzeń wszystkich, albo tylko wybranych podzespołów o zasadniczym znaczeniu, zgodnie z wymaganą głębokością strukturyzacji. Wynikiem przeprowadzonego postępowania jest powstanie odpowiedniej struktury banku uszkodzeń, który w zależności od postawionego kryterium oceny może być różnie wykorzystywany.

Następnie, za pomocą istniejących programów przetwarzania danych, można rozdzielić koszty na środki utrzymania zapobiegawczego i naprawczego, zgodnie z podziałem na nakłady montażowe i materiałowe, jak również można określić

koszty całkowite. Uzupełnieniem będzie określenie kosztów spowodowanych następstwem awarii. W dalszych rozważaniach, ze względów na uproszczenie, te ostatnie powinny być doliczone do kosztów utrzymania naprawczego.

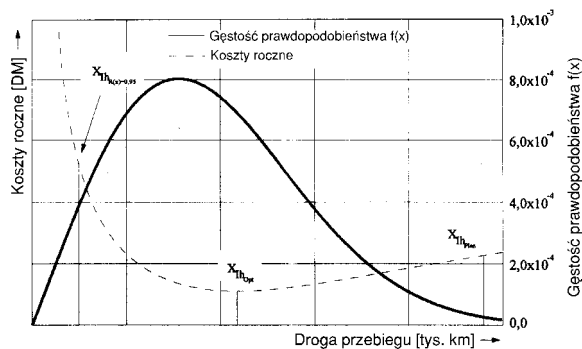
Na podstawie tego, w następnym kroku, możliwe jest przedstawienie związku między prawdopodobieństwem awarii (w znaczeniu badania niezawodności urządzeń) a kosztami utrzymania urządzeń, w ciągu jednego roku, w zależności od przyjętego parametru, np. przebiegu pojazdów, w których zamontowany został podzespół. Umożliwia to wyznaczenie punktu czasowego, dla którego koszty utrzymania są najmniejsze, przy uwzględnieniu przyjętych granic przedziału ufności.

Szczególną formą przedstawienia jest związek rocznych kosztów utrzymania (łącznie z kosztami następstw awarii) i prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy, przy uwzględnieniu przedziału ufności. Jest to krok, który wskazuje obszar prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy, przy minimum kosztów, jako podstawę do podjęcia odpowiednich decyzji na szczeblu przedsiębiorstwa. Ostatecznie, w następnym kroku, możliwe jest praktyczne przeprowadzenie, porównawczego zestawienia „czasowych” punktów utrzymania i dotychczas wyznaczanych planowo (w systemie utrzymania). W ostatnim, zamykającym kroku powstaje możliwość wariantowania podanych systemów utrzymania pojazdów w dobrym stanie technicznym, względem czasookresów przeprowadzania i zakresu wykonywanych prac utrzymaniowych, poprzez syntezę od awaryjności głównych podzespołów pojazdu, do awaryjności całego pojazdu.

### Przykłady rozwiązań

Weryfikacja przedstawionej metody rozwiązania powinna być przeprowadzona następnie na bazie statystycznie udokumentowanych wyników badań doświadczalnych, które już od dłuższego czasu są sukcesywnie pozyskiwane poprzez przeprowadzanie takich badań dla pojazdów trakcyjnych i zespołów trakcyjnych, starszych oraz nowocześniejszych typów, jak również dla pojazdów dużych prędkości.

Tak więc, po przetransponowaniu trzeciego i czwartego kroku metody rozwiązania, na rysunku 4 przedstawiona jest funkcja rozkładu awarii oraz wykres kosztów całkowitych w funkcji drogi przebiegu, w odniesieniu do jednego roku.

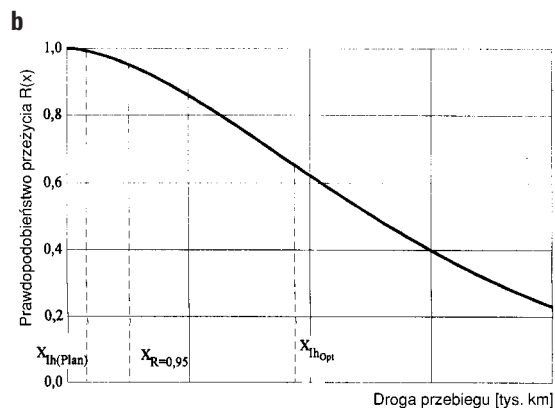
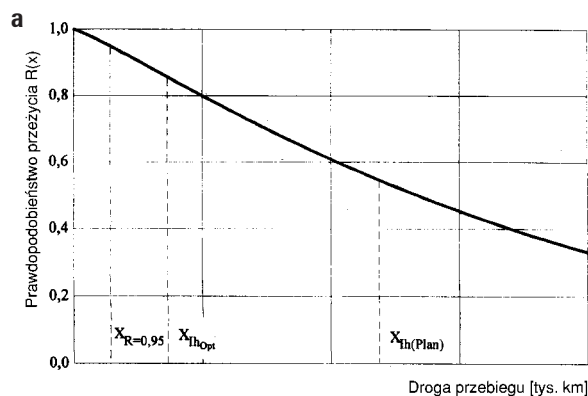


Rys. 4. Gęstość prawdopodobieństwa i przebieg kosztów całkowitych w zależności od przebiegu drogi dla podzespołów pojazdów szynowych

Droga przebiegu, oznaczona  $x_{Ih_{opt}}$ , przyporządkowana jest minimum kosztów, które wynika z przeciwbieżności zapobiegawczych i naprawczych kosztów utrzymania, porównywalnymi w pewnym sensie z przebiegami na rysunku 6.

Do celów porównawczych, i odpowiednio do kroku siódmego metody rozwiązania, wrysowane są drogi przebiegu, które odpowiadają dotychczasowemu planowaniu środków na utrzymanie pojazdów ( $x_{Ih_{plan}}$ ), jak również zachowaniu pewnego, określonego prawdopodobieństwa przeżycia ( $x_{Ih_{R(x)=0,95}}$ ), tutaj równemu 95%. Zestawienie z minimum kosztów lub np. wartością modalną (dominantą) gęstości prawdopodobieństwa stanowi podstawę do możliwych rozstrzygnięć.

Z analogicznymi sytuacjami mamy do czynienia na rysunku 5, gdzie przedstawiono, jako przykład funkcji prawdopodobieństwa przeżycia  $R(x)$ , odnośnie kroku piątego metody rozwiązania zarówno dla urządzeń mechanicznych, jak i elektronicznych. W odniesieniu do kroku drugiego metody rozwiązania, przedstawiono postawione cele: minimalne prawdopodobieństwo, prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy, minimum kosztów i realizacja prac związanych z utrzymaniem urządzeń w dobrym stanie technicznym w wyznaczonych terminach, do tej pory po części ujętych w obowiązujących przepisach. Ustosunkowanie się do określonego, wzajemnego przyporządkowania tych wielkości docelowych względem siebie jest niemożliwe, można je określić jedynie osobno dla każdego badanego przypadku (krok drugi metody rozwiązania).



Rys. 5. Przebieg krzywej prawdopodobieństwa przeżycia w funkcji drogi przebiegu  
a - zespół przetwornicy pokładowej, b - zespół wózka

Na rysunku 6 przedstawiono rozszerzony sposób postępowania w odniesieniu do przeprowadzenia kroku szóstego metody rozwiązania, jak również w odniesieniu do numerycznego przyporządkowania stosunków kosztów utrzymania  $i_h$  oraz ponownie zostaje potwierdzone zróżnicowanie przebiegów, w zależności od rozpatrywanego podzespołu. Z rozważań tych wynika jednoznacznie:

- wyraźnie zaznaczający się wzrost kosztów utrzymania zapobiegawczego, przy wysokich wymaganiach odnośnie prawdopodobieństwa bezawaryjnej pracy, lub przyrost kosztów utrzymania bieżącego wraz ze zwiększeniem przebiegu pojazdu;
- rozpatrywania dotyczące kosztów i niezawodności są do powiązania na poziomie struktury produktu (podzespołu), a więc przy dokładnej znanej awaryjności i sposobie kształtowania się kosztów;
- istnieje możliwość zaplanowanego, „czasowego” punktu utrzymania przyporządkowania konkretnego stosunku między naprawami bieżącymi a zapobiegawczymi kosztami utrzymania; dla określenia tej zależności proponowany jest termin „indeks utrzymania”  $i_h$ ; przy tym staje się bardzo widoczny przyrost tej wartości przy porównywaniu podzespołów elektromechanicznych z podzespołami elektronicznymi.

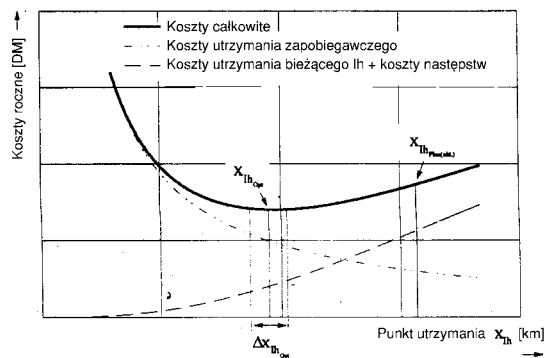
Aby móc sprawdzić, że ostatnia wypowiedź jest słuszna, proponowane jest przedstawienie związku indeksu utrzymania  $i_h$  z optymalnym pod względem kosztów punktem

„czasowym” utrzymania, dla różnych pod względem rodzaju podzespołów, zgodnie z rysunkiem 7. Takie przedstawienie podanej zależności pozwala na następujące stwierdzenia:

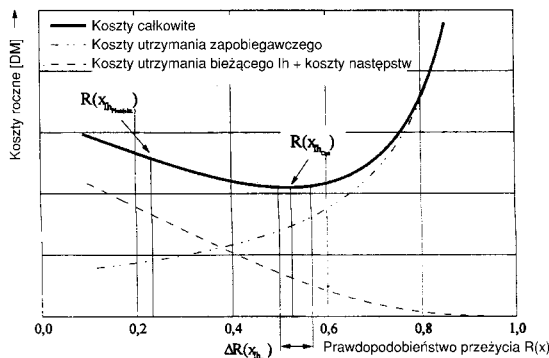
- przebieg krzywych awaryjności zależy jest od rodzaju podzespołów;
- wraz ze wzrastającym indeksem utrzymania, kosztowo optymalne punkty czasowe utrzymania przesuwają się w kierunku mniejszych dróg przebiegów, co świadczy o wyraźnym wpływie przyrostu naprawczych kosztów utrzymania;
- tendencja ta narasta w następującym porządku: podzespoły mechaniczne → elektryczne → elektroniczne, co oznacza dla podzespołów elektronicznych mniejszy indeks utrzymania a więc stosunkowo wyższe zapobiegawcze koszty utrzymania, dla osiągnięcia tego samego, optymalnego, „czasowego” punktu utrzymania, jak dla podzespołów mechanicznych.

Jeżeli przetransponuje się ogólne pierwsze stadium rozwiązania, zgodnie z rysunkiem 2, na sposób przedstawiania dotychczasowych przykładów rozwiązań, to w wyniku otrzymujemy, dla podzespołów o różnej budowie, związki między rocznymi kosztami na utrzymanie i kosztami powstającymi w następstwie awarii, a stosunkiem  $i_h$  kosztów utrzymania, zgodnie z rysunkiem 8.

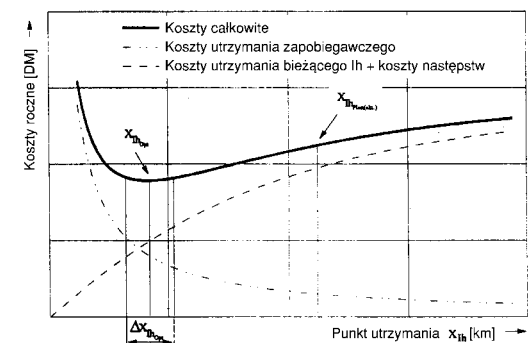
Po pierwsze, uwidacznia się rzeczywiście obszar minimalnych rocznych kosztów całkowitych dla określonych wartości indeksu utrzymania.



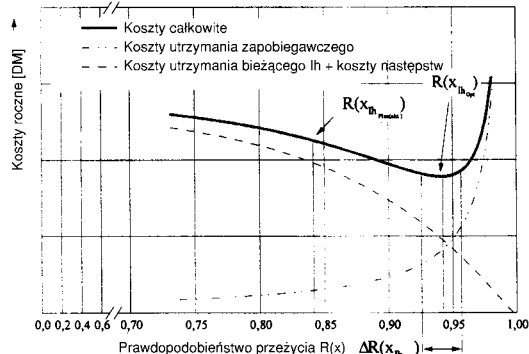
Podzespół elektromechaniczny ze stosunkiem kosztów równym



$$\frac{(K_{i_h \text{ bież}} + K_{AF})}{K_{i_h \text{ prev}}} \approx 2,4 \text{ przy } x_{i_h \text{ plan}}$$



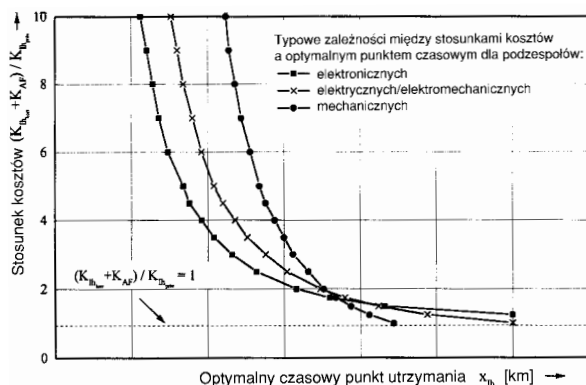
Podzespół elektryczny/elektroniczny ze stosunkiem kosztów równym



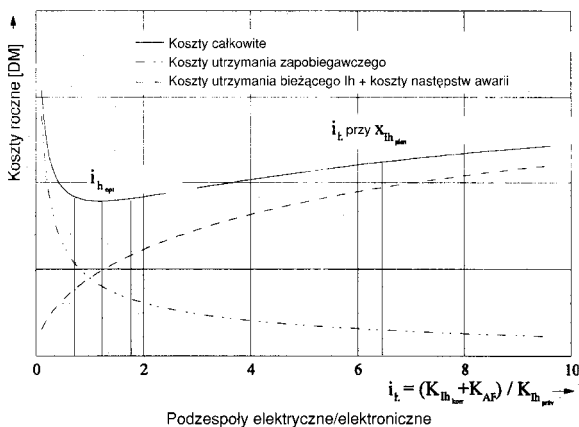
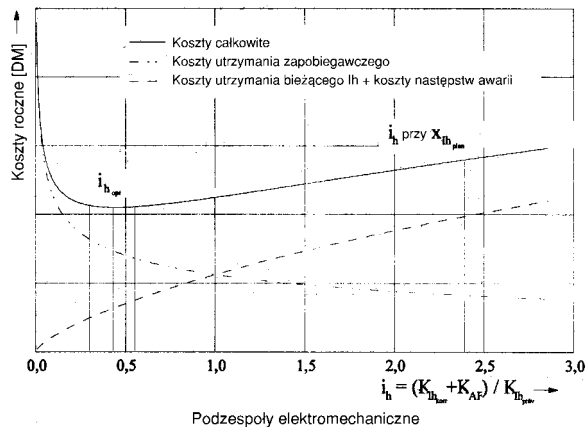
$$\frac{(K_{i_h \text{ bież}} + K_{AF})}{K_{i_h \text{ prev}}} \approx 6,5 \text{ przy } x_{i_h \text{ plan}}$$

Rys. 6. Zależność kosztów utrzymania i kosztów następstw awarii od wymaganej drogi przebiegu i prawdopodobieństwa przeżycia dla różnego typu podzespołów

Po drugie, istnieje „optymalny”, w wyższym znaczeniu, obszar rocznych kosztów całkowitych dla podzespołów elektronicznych, przy wyższych wartościach indeksu utrzymania (na rys. 8 przy 0,8...1,7), niż dla podzespołów mechanicznych (na rys. 8 przy 0,3...0,6), przez co potwierdzona zostaje początkowo obserwowana tendencja dla podzespołów elektronicznych.



Rys. 7. Zależność czasowego punktu utrzymania, przy zachowaniu optimum kosztów, od indeksu utrzymania  $i_h$



Rys. 8. Związek między kosztami całkowitymi na utrzymanie oraz następstwa awarii a indeksem utrzymania

Po trzecie, pominięcie kosztów spowodowanych następstwami awarii prowadziłoby do pewnego przesunięcia minimum kosztów w kierunku większych indeksów utrzymania.

I na koniec, po czwarte, dla dużych stosunków między kosztami zapobiegawczymi a kosztami napraw bieżących, wyraźnie uwidaczniają się wzrosty kosztów w porównaniu z obszarem optymalnym, przy czym na wzrost tych kosztów w dużej mierze wpływ mają koszty związane z następstwami awarii. Wynika z tego wyraźnie, że nie można dopuścić do dowolnego wzrostu wymienionego stosunku.

Do takiego rezultatu prowadzi względne podniesienie zapobiegawczych kosztów utrzymania, przy czym rzeczą rozstrzygającą dla czasowego punktu utrzymania i zakresu prac utrzymaniowych jest rodzaj podzespołu.

## Podsumowanie

W odniesieniu do odpowiedzi na sformułowane początkowo pytania, jak również w odniesieniu do rozwiązań prowadzących do odpowiedzi na postawione pytania, w podsumowaniu należy stwierdzić, że:

□ w badanych podzespołach pojazdów stwierdzono częściowo znaczne odchylenia między aktualnie planowanym, jak również uwarunkowanym wymaganiem stopniem niezawodności, terminem wykonania prac dla utrzymania pojazdów w dobrym stanie technicznym a punktem czasowym wynikającym z optymalnych kosztów, bez wyraźnej tendencji w odniesieniu do negatywnych czy pozytywnych odchyliń; dlatego też przedstawiony sposób rozwiązania umożliwia pewną swobodę działania przy określaniu optymalnego czasowego punktu utrzymania, tak że użytkownik może dobrać w zależności od pierwotnie postawionych przez niego celów termin utrzymania;

□ w zależności od fizyczno-technicznego rodzaju rozważanych jednostek (podzespołów) istnieją widoczne optymalne wartości dla wielkości stosunku napraw bieżących, liczone łącznie z kosztami spowodowanymi awariami, do zapobiegawczych kosztów utrzymania, przy których suma kosztów utrzymania i kosztów powodowanych następstwami awarii przyjmuje wartości minimalne; dlatego niepoohamowana tendencja do stosowania utrzymania naprawczego prowadzi do podniesienia kosztów całkowitych, w odniesieniu do rozpatrywanego obszaru czasowego;

□ uwzględniając stan techniczny urządzenia, system utrzymania powinien w następstwie zawsze zawierać wystarczający udział utrzymania zapobiegawczego, przy czym udział ten, uwarunkowany poprzez koszty następstw awarii i związane z tym zakłócenia w ruchu, musiałyby się zwiększać wraz ze wzrostem wartości i złożoności budowy pojazdów;

□ przez badania kontynuujące rozpoczęte prace należałoby zbadać, jaki wpływ wywierają stwierdzone tutaj zależności na koszty cyklu życia w odniesieniu do pojazdu.

## Literatura

- [1] E DIN IEC 56/560/CDV: Zuverlässigkeitsmanagement – Auf die Funktionalität bezogene Instandhaltung, 2/1898.
- [2] Müller R., Nickel H.-P., Trebst W.: *Minimierung des technischen Risikos bei der Auftragsabwicklung für Schienenfahrzeuge – das Modell KOLUMBUS der DWA ZEV + DET Glas. Ann. 122 (1998) 12.*
- [3] DIN IEC 1025: Störungsbaumanalyse, 12/1993.

Na podstawie:  
Präventive und korrektive Instandhaltung  
Der Eisenbahn Ingenieur 10/1999