

# Ocena trwałości pojazdów metra w procesie przedłużania ich żywotności

Andrzej Chudzikiewicz, Jerzy Lejk

Zakopane, 26 – 28.10.2022

# Geneza problemu

Pojazdy będące w eksploatacji przez Metro Warszawskie



## Pojazd serii 81

Pierwsza dostawa **1990 r.**  
Ostania **2006 r.** (pojazdy  
modernizowane)



## Pojazd Metropolis

Pierwsza dostawa **2000 r.**



## Pojazd Inspiro

Pierwsza dostawa **2013 r.**

Okresy międzynaprawcze: **16 lat** (naprawa P5 – główna) lub przebiegi w km

Przeciętny roczny przebieg  
pojazdu metra:

**80 000 ÷ 100 000 km**

Maksymalne okresy  
międzynaprawcze:

**16 lat** (naprawa P5 – główna)

lub przebiegi w km (**ok. 3 600 000 km**)

Pytanie:

I co dalej z eksploatacją  
pojazdów ?

trwałość

niezawodność

żywołność

**Żywotność**, określana często jako **trwałość**, to zdolność do zachowania określonych właściwości użytkowych w czasie eksploatacji.

Miarą żywotności pojazdu może być przedział czasu, ilość wykonanej pracy przewozowej, długość przebytej drogi – odniesione do warunków i środowiska eksploatacji.

**Niezawodność** eksploatacyjna (obiektu) – właściwość obiektu charakteryzująca jego zdolność do użytkowania i obsługi w określonych warunkach i w określonym przedziale czasu.

Niezawodność jest charakteryzowana funkcjami niezawodności, przyjmowanymi z definicji, nazywanymi też funkcjami charakterystycznymi oraz wskaźnikami (parametrami).

# Metody oceny żywotności / trwałości

**Trwałość obiektu technicznego** – środka transportu (ŚT) wyznacza okres eksploatacji, w którym uzyskuje się możliwość realizacji zadań transportowych; wpływa na zakres prac utrzymywania zdatności, w tym w szczególności przeglądów i napraw głównych, określając ekonomiczną opłacalność eksploatacji pojazdu.

Wśród zjawisk wpływających na trwałość ŚT najważniejsza okazuje się wytrzymałość zmęczeniowa konstrukcji układów jezdnych oraz elementów zespołu napędowego.

Inne zjawiska mające wpływ na trwałość to: zużywanie elementów węzłów tribologicznych, korozja metali, destrukcja materiałów niemetalicznych (np. gumy). Wilgoć i zasolenie atmosfery sprzyjają korozji.

Trwałość jest zmienną losową, której wartości graniczne zostały wyznaczone i narzucone przez producenta pojazdu.

Okazuje się, że zbliżając się do wyznaczonej granicy okresu eksploatacji, eksploatowany pojazd zachowuje swoje właściwości fizyczne i parametry techniczne na poziomie umożliwiającym dalszą jego eksploatację. Można wtedy wykorzystać różnicę pomiędzy przyjętą wartością trwałości określonej przez producenta a rzeczywistą jego trwałością wynikającą z aktualnego stanu technicznego.

***Ten fakt umożliwia rozważania nad przedłużeniem żywotności i wydłużeniem okresu eksploatacji.***

## Wskaźniki oceny trwałości

□ oczekiwany (średni) czas eksploatacji

□ prawdopodobieństwa wystąpienia stanu granicznego

□ funkcja gęstości rozkładu trwałości

□ średni resurs

□ granica zmęczenia (graniczna liczba cykli)

dopuszczalne naprężenia



# Metody oceny niezawodności

Pojęcie niezawodności może obejmować różne wymagania opisane charakterystykami **technicznymi**, **ekonomicznymi** i **socjologicznymi** obiektów.

- ☐ **Niezawodność** - bez dodatkowych określeń - jest rozumiana jako niezawodność techniczna.
- ☐ **Niezawodność obiektu** jest to jego zdolność do spełnienia stawianych mu wymagań.
- ☐ Wielkością charakteryzującą zdolność do spełnienia wymagań może być **prawdopodobieństwo spełniania wymagań**.

Stąd definicja – jedna z wielu:

„**niezawodność obiektu** jest to prawdopodobieństwo spełnienia przez obiekt stawianych mu wymagań” (Macha).



W sensie probabilistycznym niezawodność obiektu  $R(t)$  w danej chwili  $t$  jest prawdopodobieństwem tego, że jego trwałość  $T$  jest większa od  $t$ , tj.  $R(t) = P(T \geq t)$ .

Trwałość  $T$  może być wyrażona np. czasem eksploatacji w [s] czy przebytej drogi (resursem) w [km], itp.

Z tego wynika, że  $R(t)$  może przyjmować różne wartości - być inną wielkością, w zależności od analizowanego przypadku.

Wniosek:

**Trwałość / żywotność i niezawodność** to pojęcia związane ze sobą i niekiedy uznawane za tożsame.

# Wskaźniki oceny niezawodności

## Wskaźniki nieuszkodzalności

□ dystrybuanta czasu pracy do pierwszego uszkodzenia

□ funkcja niezawodności do pierwszego uszkodzenia

□ funkcja intensywności uszkodzeń

□ oczekiwany czas pracy między uszkodzeniami

## Wskaźniki obsługiwalności

☐ dystrybuanta czasu odnowy

☐ oczekiwany czas usuwania  
uszkodzenia

## Wskaźniki związane z gotowością techniczną

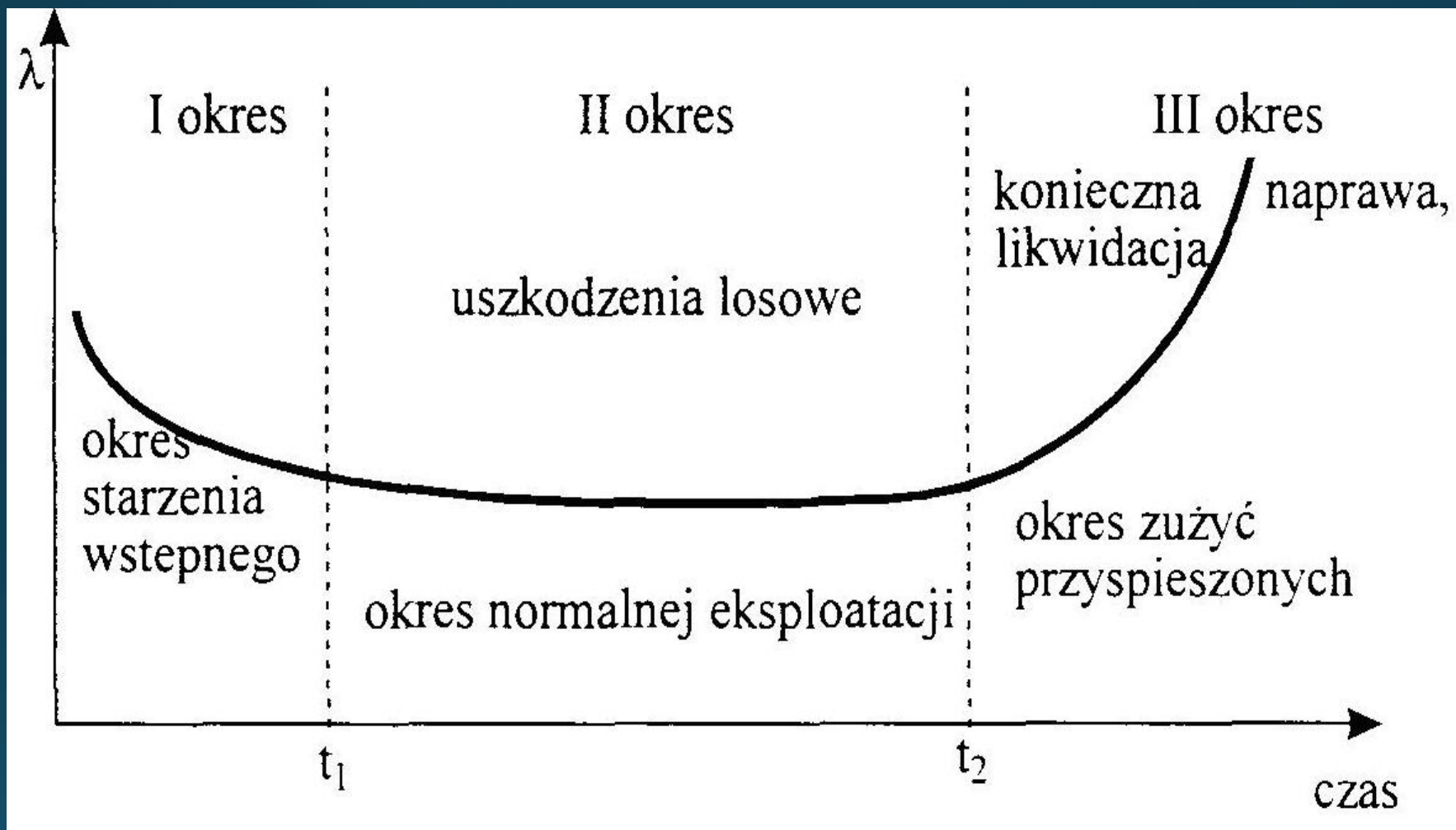
☐ wskaźnik gotowości technicznej

# Podstawowa cecha procesu eksploatacji:

## ZUŻYCIE

### Efekty:

- pogorszenie niezawodności,
- zmniejszenie trwałości,
- zwiększone koszty eksploatacji,
- zmniejszenie komfortu jazdy,
- pogorszenie poziomu bezpieczeństwa.



Przebieg w czasie zmian intensywności uszkodzeń obiektu  
w czasie eksploatacji

## Tryb postępowania:

☐ wycofanie z eksploatacji

☐ ocena trwałości i niezawodności

☐ doprowadzenie do stanu ponownej  
używalności

☐ DECYZJA

W przypadku pojazdów szynowych:

przedłużenie żywotności musi uwzględniać

cel nadrzędny

BEZPIECZEŃSTWO PRZEWÓZÓW



## Praktyka działania

- analiza dostępnej dokumentacji: konstrukcyjnej, systemu utrzymania, wybranych kart prób, pomiarów oraz protokołów z wykonanych naprawach na poziomach P<sub>1</sub>-P<sub>5</sub>,
- badania organoleptyczne, wytypowanych egzemplarzy pojazdów,
- analiza zarejestrowanych awarii w okresie eksploatacji pojazdu,
- wyznaczenie i analiza parametrów wytrzymałościowych i trwałościowo - niezawodnościowych podstawowych zespołów i podzespołów pojazdu,
- opracowanie prognozy trwałości mając na uwadze przedłużenie żywotności pojazdów danego typu.

# Przykład działań z pojazdami metra serii 81 i Metropolis

Wagony serii 81, dostawy z Rosji:

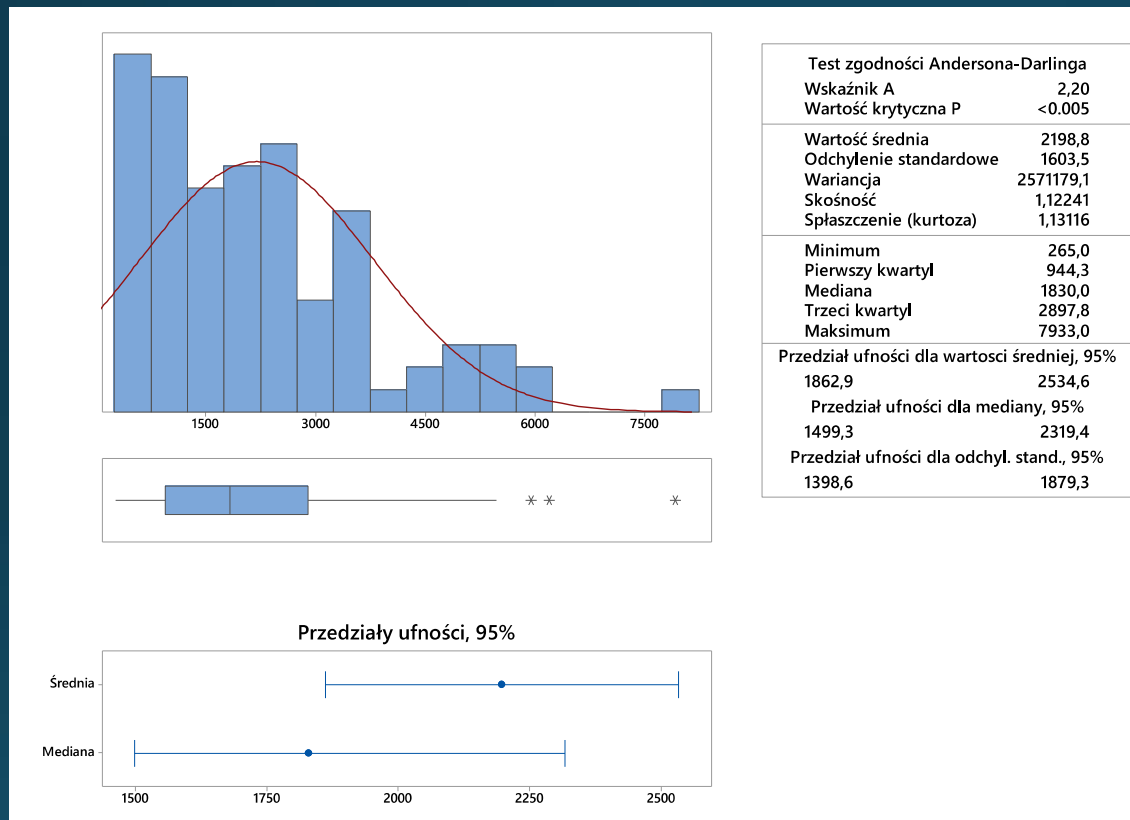
Typ 81-572P i 81-573P – liczba wagonów **90** (dostawa od 1990 r.),

Typ 81 jw. – liczba wagonów **42** (dostawa od 2008 r.)

Przewidywany okres eksploatacji określony w dokumentacji – **25 lat**



# Wybrane wskaźniki niezawodności istotne dla bezpieczeństwa ruchu zespołów, podzespołów i elementów wagonów serii 81 \*)



\*) Na podstawie Raportu PK,  
Instytut Pojazdów Szynowych  
Nr raportu: M-o8/152/2019/P

Histogram częstości uszkodzeń wagonów serii 81 z podstawowymi parametrami statystycznymi i przedziałami ufności 95% - wg normy PN-EN 50126-1:2018-02 (program Statistica oraz Weibull ++)

Interpretacja: uszkodzenia wagonów serii 81 występują średnio co:

- 89 dni eksploatacji dla średniego dobowego czasu pracy 8 godz.
- 67 dni eksploatacji dla maksymalnego dobowego czasu pracy 20 godz.

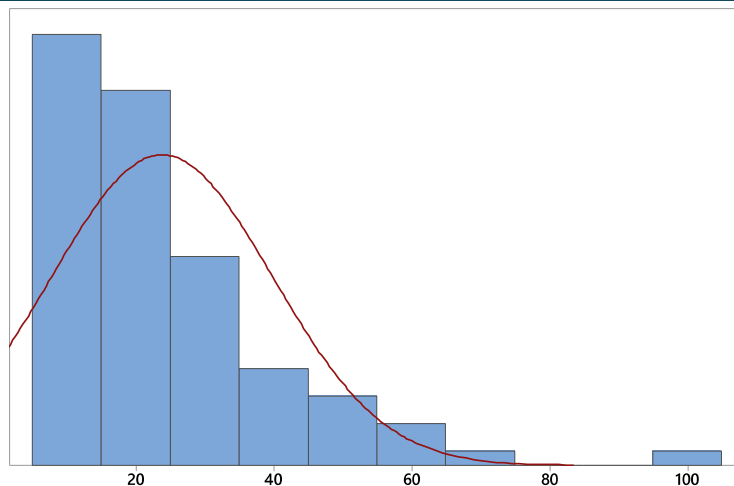
Oszacowanie statystyczne *oczekiwanego czasu poprawnej pracy wagonów* serii 81 między uszkodzeniami MTBF. Obliczone na podstawie danych eksploatacyjnych dla zjazdów awaryjnych:

- ❑ dla średniego dobowego czasu pracy **8 godz.:**

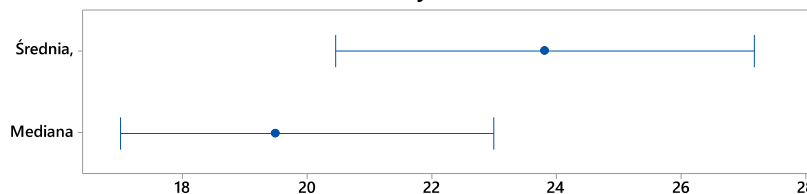
$$MTBF = 2142,3 \text{ [godz. ]}$$

- ❑ dla maksymalnego dobowego czasu pracy **20 godz.:**

$$MTBF = 1606,7 \text{ [godz. ]}$$



Przedziały ufności, 95%



Test zgodności Andersona-Darlinga

Wskaźnik A 3,79

Wartość krytyczna P <0.005

Wartość średnia 23,822

Odchylenie standardowe 16,075

Wariancja 258,417

Skośność 1,80994

Splaszczanie (kurtoza) 4,42246

Minimum 7,000

Pierwszy kwartył 12,750

Mediana 19,500

Trzeci kwartył 28,250

Maksimum 97,000

Przedział ufności dla wartości średniej, 95%

20,455 27,189

Przedział ufności dla mediany, 95%

17,000 23,000

Przedział ufności dla odchyl. stand., 95%

14,021 18,840

Histogram licznosci odnow z podstawowymi parametrami statystycznymi i przedziałami ufności 95%

# Oczekiwany czas usuwania uszkodzenia: *MTTR*

Oczekiwany czas odnowy obliczony na podstawie funkcji rozkładu czasu odnowy:

$$MTTR = exp(a + \delta^2/2) = 23,82 [godz.]$$

Oszacowanie statystyczne średniego czasu odnowy:

$$MTTR = 25,41 [godz.]$$

Wniosek:

czas trwania naprawy bieżącej dla badanych wagonów serii 81 wynosi:  **$23,8 \div 25,4 [godz.]$** .

Wskaźnik gotowości technicznej wagonów serii 81, obliczone na podstawie danych eksploatacyjnych (zjazdy awaryjne):

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

gdzie:

**MTBF** – oczekiwany czas między uszkodzeniami (w godz.),

**MTTR** – oczekiwany czas do odnowy (w godz.).

- dla średniego dobowego czasu pracy 8 godz.:

$$A = 0,988$$

- dla średniego dobowego czasu pracy 20 godz.:

$$A = 0,984$$



# Badania trwałości w aspekcie wydłużenia okresu eksploatacji

Pudło (ugięcia i naprężenia wyznaczone metodą numeryczną).

Wyniki:

➤ Maksymalna strzałka ugięcia ramy pudła: **< 2 mm**

(w DTR wartość graniczna: 7,2 mm)

➤ Maksymalna wartość naprężeń gnących: **16 MPa**

( $\sigma_{\max} = \sigma_m \cdot 1,15 = 18,4 MPa$ , wartości podane w raporcie ERRI)

## Rama wózków (badania naprężeń w punktach krytycznych ramy wózka, EN 13749:2011)

- Ocena wytrzymałości zmęczeniowej ramy wózka bez obciążeń wiatrem w najbardziej wyężonych miejscach
- Wyznaczenie punktów krytycznych – dolny pas ostojnicy
- Otrzymane wartości nie przekraczały krytycznych

## Konkluzja:

Uwzględniając powyższe opinie i uwagi dotyczące wybranych elementów układu mechanicznego i elektrycznego wagonów metra oraz zakładając rzetelność wykonania przeglądów i napraw okresowych, zgodnie z DSU i WTNiO, nie ma przeciwwskazań do wydłużenia czasu eksploatacji poza okres 25 lat wskazany przez producenta, czyli do czasu wykonania kolejnej naprawy P5 (trzeciej) ww. wagonów, czyli osiągnięcia maksymalnego przebiegu między naprawami poziomów utrzymania P5 wynoszącego 1 120 000 km lub maksymalnego okresu 16 lat w zależności, która z tych wartości zostanie osiągnięta wcześniej, zgodnie z DSU

## Wagony z koncernu Alstom:

Typ Metropolis 98B

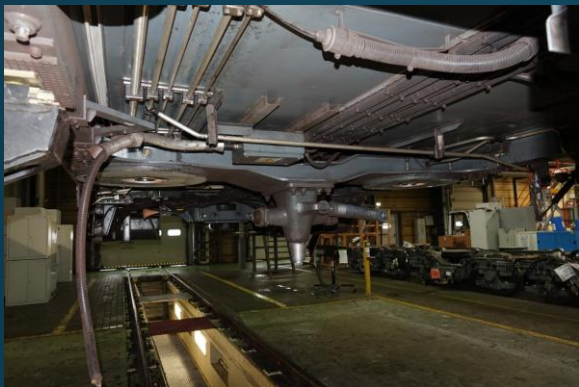
- **108** szt. wagonów  
(**18** pociągów 6-cio wagonowych),  
dostawy od 2000 do 2006 roku.

*Producent w dokumentacji nie  
zakreślił przewidywanego okresu  
eksploatacji wagonów.*

*Pojazd po przeglądzie P5 powinien uzyskać pierwotne parametry  
techniczno-eksploatacyjne i użytkowe*



# Badania organoleptyczne



Pudło: widok czopa skrzętu



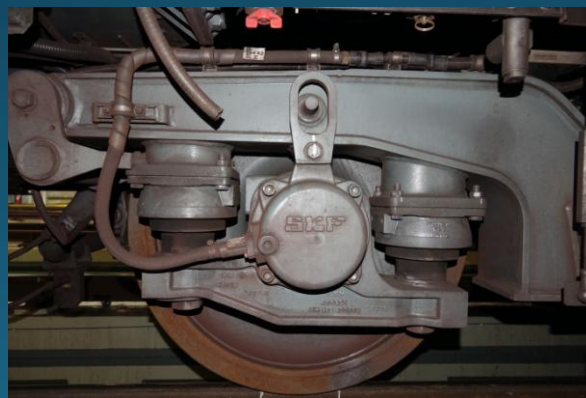
Pudło: fragment sprzęgu międzywagonowego



Wózek: połączenie ramy wózka z kolumną zawieszenia I st



Rama wózka – spawy od strony wew.



Układ prowadzenia zestawu kołowego



Wózek – pudło; sprężyna pneumatyczna w II st. uspr.

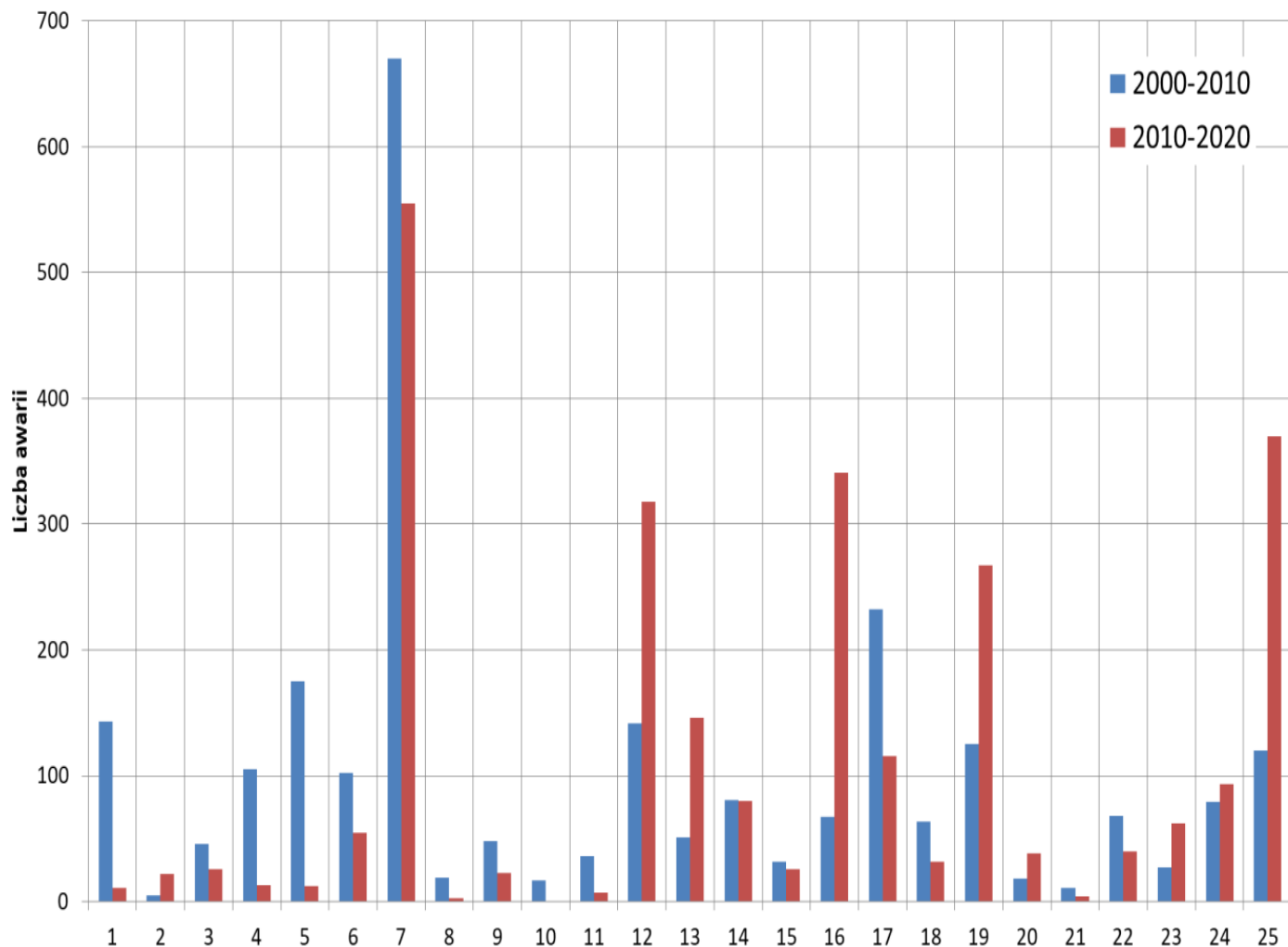


# Wniosek:

- Realizacja zadań utrzymaniowych zgodnie z system utrzymania zawartym w DSU, opracowanym zgodnie z wymaganiami zawartymi w ustawie z dnia 28 marca 2003 r. o transporcie kolejowym, zapewnia wymagany poziom bezpieczeństwa ruchu kolejowego.
- Stan techniczny układów, zespołów, podzespołów oraz elementów wpływających na bezpieczeństwo prowadzenia ruchu kolejowego w kontekście przedłużenia czasu eksploatacji wagonów Metropolis 98B należy ocenić jako stan zdatności technicznej pozwalający na dalszą ciągłą eksploatację z zachowaniem stosowania aktualnych zapisów zawartych w DTR, DSU i WTNiO.
- Możliwe jest przedłużenie żywotności (okresu eksploatacji) ocenianego typu pojazdów Metropolis 98B

# Analiza zarejestrowanych awarii w okresie od 2010 do 2020

Udział awarii ogółem w latach 2000-2020



Porównanie  
awarii ogółem

Okresy:

2000 – 2010

2011 - 2020

12 – inne mechaniczne

13 – zasilanie

16 – sterowanie

19 - SOP

25 – inne elektryczne



## Konkluzja:

Z analizy statystycznej i oceny liczby awarii, które miały miejsce w latach 2000 – 2020 wynika, że stan techniczny wagonów Metropolis, należy ocenić jako stan zdatności technicznej pozwalający na dalszą ciągłą eksploatację z zachowaniem zapisów zawartych w DTR, DSU i WTNiO.

# Prognoza trwałości podstawowych elementów konstrukcyjnych pojazdów Metropolis 98B (pudło, wózek)

## Wyniki analiz:

*Pudło – konstrukcja aluminiowa  
stop aluminium o granicy plastyczności 240 MPa*

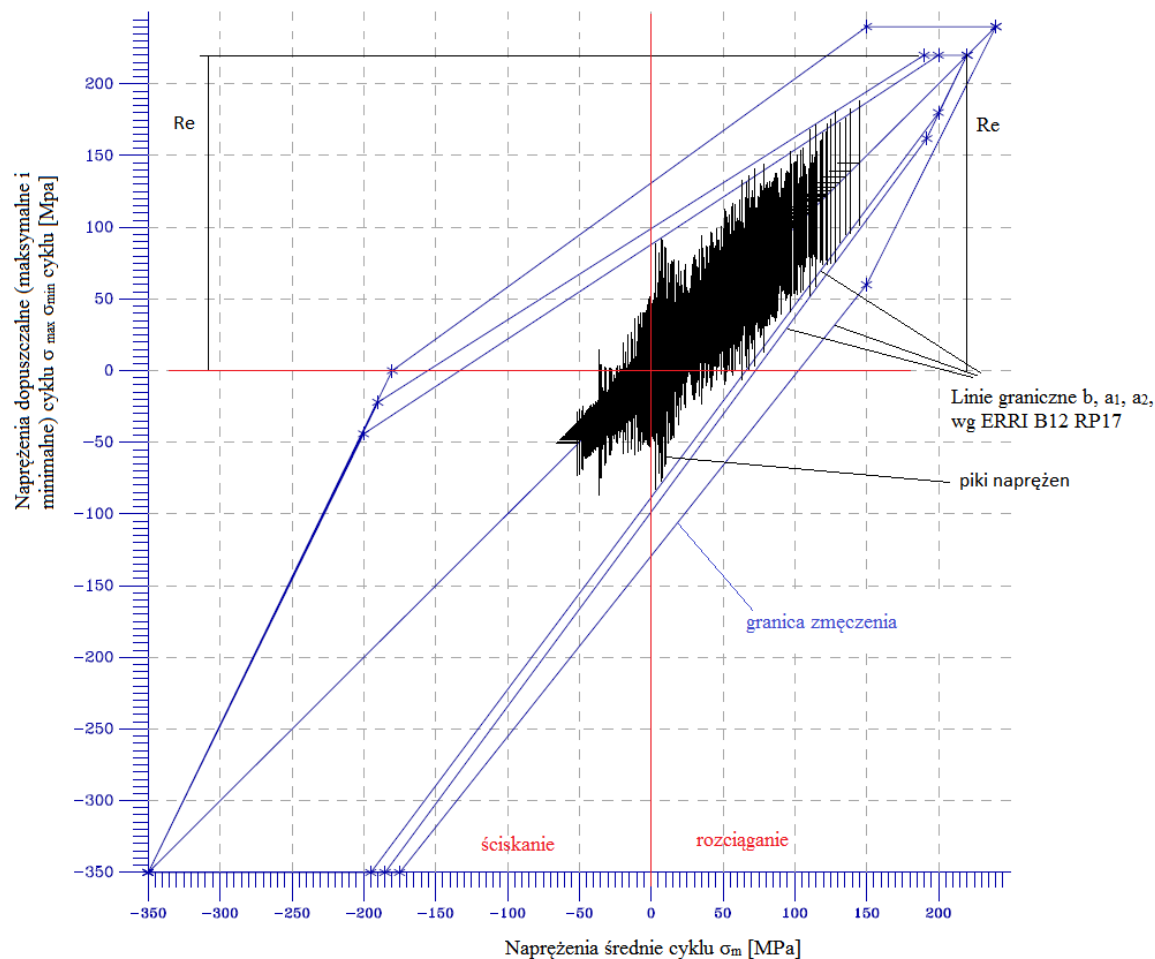
Ugięcie płyty	$w_a$ [mm]	1,81
Naprężenia	$\sigma$ [MPa]	173

## Konkluzja:

Otrzymane wyniki analiz odnośnie prognoz wytrzymałościowych pozwalają na sformułowanie oceny:

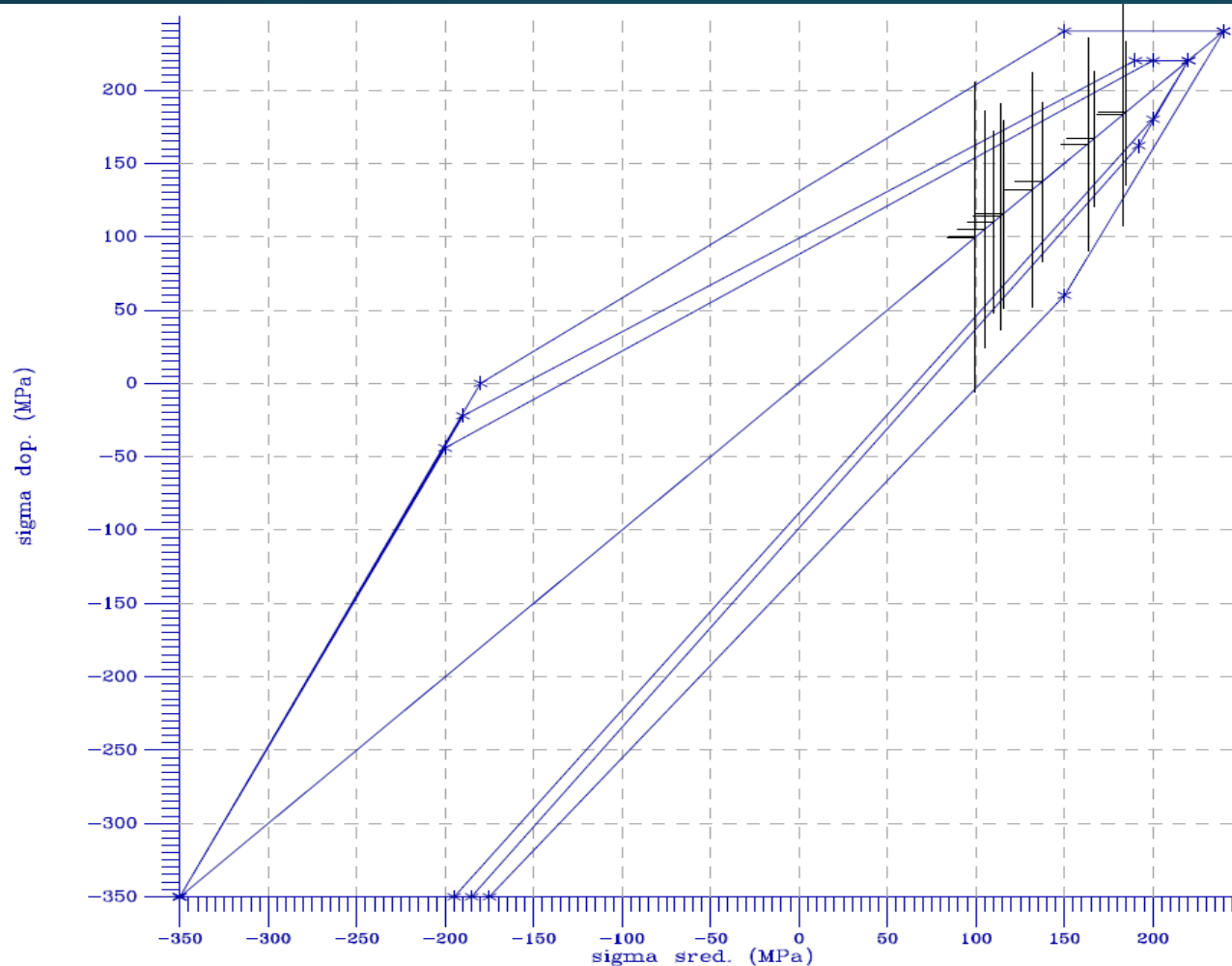
**stan techniczny pudła należy ocenić jako bardzo dobry.**

# Wózek – ramowa konstrukcja stalowa stal S355, $R_e = 355 \text{ MPa}$ , $R_m = 520 \text{ MPa}$



Przebiegi naprężeń w elementach ramy wózka pojazdu Metropolis 98B uzyskane dla uproszczonego modelu ramy

Wykres Goodmana - Smitha



Przekroczenia wartości granicznych mają charakter incydentalny i nie mają wpływu na wytrzymałość zmęczeniową badanych elementów ramy wózka.

Wykresy naprężeń w elementach, dla których nie jest spełniony warunek wytrzymałościowy

Odnosząc się do uzyskanych wyników należy stwierdzić, iż na podstawie dotychczasowej eksploatacji, stanu utrzymania toru oraz

stanu utrzymania wózka, w punktach krytycznych ramy wózka wartości naprężeń nie przekraczają wartości

$$\sigma_{dop} = 355 \text{ MPa} = Re$$

Nie ma więc warunków umożliwiających powstanie odkształceń trwałych.

Można przyjąć, iż rama wózka **spełnia** zatem **wymagania** określone w Karcie UIC 615-4 p.3.2.

## KONKLUZJA KOŃCOWA (pojazd Metropolis 98B)

- ☐ Stan techniczny układów, zespołów, podzespołów oraz elementów wpływających na bezpieczeństwo prowadzenia ruchu kolejowego w kontekście przedłużenia czasu eksploatacji wagonów Metropolis 98B należy ocenić jako stan zdolności technicznej pozwalający na dalszą ciągłą eksploatację z zachowaniem stosowania aktualnych zapisów zawartych w DTR, DSU i WTNiO.
- ☐ Wykonana prognoza przedłużenia żywotności pojazdów Metropolis 98B, z użyciem metod oceniających zmęczenie materiału oraz metod statystycznej oceny występujących w okresie 2010 – 2020 awarii pokazała, że możliwa jest dalsza eksploatacja tych pojazdów po wykonaniu przeglądu na poziomie P<sub>5</sub>, zgodnie z wymogami wskazanymi przez producenta.

## WNIOSKI

Przeprowadzone badania w zakresie:

- I. Analizy charakterystyk techniczno – eksploatacyjnych oraz konstrukcyjnych analizowanego taboru.
- II. Oceny systemu utrzymania eksploatowanego taboru typu 81 i Metropolis
- III. Oceny zużycia eksploatacyjnego elementów i podzespołów pojazdów serii 81 i Metropolis 98B
- IV. Prognozy trwałości elementów konstrukcyjnych pojazdów serii 81 i Metropolis w oparciu o analizę zjazdów awaryjnych badanego taboru.

oraz

**UZYSKANE WYNIKI POZWOLIŁY NA SFORMUŁOWANIE  
REKOMENDACJI DOTYCZĄCEJ PRZEDŁUŻENIA OKRESU  
EKSPLOATACJI WAGONÓW SERII 81 i METROPOLIS**



**DZIĘKUJEMY  
ZA  
UWAGĘ**



Pojazd Varsovia (Skoda)

## *XVI Konferencja Naukowo-Techniczna Public Trans 2022*