

**Marek MŁYŃCZAK\***

## **ANALIZA DANYCH EKSPLOATACYJNYCH W BADANIACH NIEZAWODNOŚCI OBIEKTÓW TECHNICZNYCH**

*W analizie niezawodności obiektów technicznych eksploatowanych w warunkach rzeczywistych kluczowym elementem są dane uzyskane z obserwacji wybranych zmiennych losowych. Natura badań eksploatacyjnych powoduje zakłócenia w gromadzeniu, archiwizacji danych, obniżając tym samym ich wiarygodność. Ma to swoje dalsze konsekwencje w przetwarzaniu danych i niepewności w odniesieniu do wyników. Celem pracy jest przedstawienie modeli niepewnych danych i dalszego postępowania w zakresie ich przetwarzania.*

**Słowa kluczowe:** badania eksploatacyjne, niezawodność, dane cenzurowane

### **WSTĘP**

Zarządzanie eksploatacją systemów technicznych wymaga ciągłego lub okresowego pozyskiwania informacji, które można określić jako: informacje operacyjne stanowiące podstawę do sterowania procesami lub informacje alarmowe (awaryjne) powiadamiające o nieprawidłowym działaniu systemu. Informacje awaryjne stanowią podstawę do statystycznej oceny pojawiających się zdarzeń niepożądanych i mogą budować bazę danych o zmiennych dyskretnych (zdarzeniach) lub zmiennych ciągłych opisujących czas, wydajność, przebieg itp.

Ocena niezawodności i bezpieczeństwa systemów technicznych wymaga zgromadzenia i przetworzenia wiarygodnych danych charakteryzujących zachodzące procesy. Takie dane gromadzi się w wyniku obserwacji procesu eksploatacji prowadzonych w sposób bierny lub czynny. Bierna obserwacja eksploatacji polega na gromadzeniu danych istniejących i zapisywanych w rutynowej dokumentacji. W czynnym eksperymencie obserwacyjnym gromadzi się określone, wybrane pod kątem spełnienia celu badań dane, co wymaga zastosowania specjalnych procedur i nośników danych. Niemniej przy użyciu każdej z tych metod istnieje możliwość uzyskania niepoprawnego lub

---

\* dr inż. Marek MŁYŃCZAK - Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej

niepełnego zbioru informacji, wynikająca z nierozpoznania systemu eksploatacji, nie dostosowania dokumentacji do celu badań, błędu człowieka lub systemu rejestrującego [2].

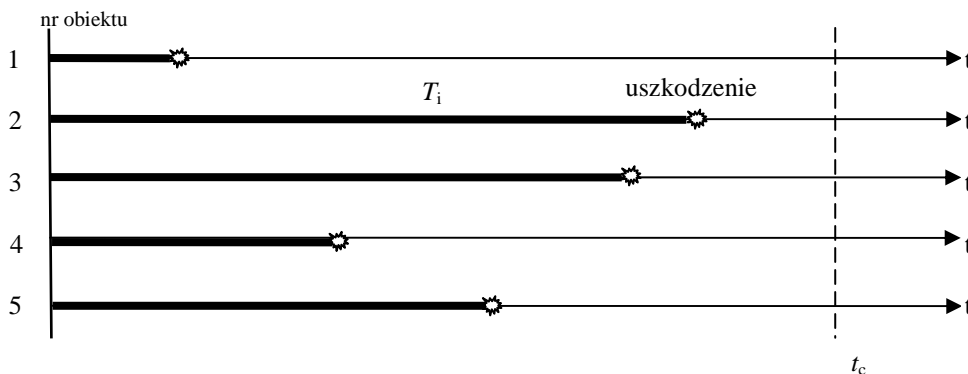
Obserwacje rzeczywistych zjawisk zachodzą zwykle w pewnym ograniczonym przedziale czasu i nie zawsze oczekiwane zdarzenie (zjawisko) pojawia się w tym okresie. Mówi się wówczas o ucinaniu obserwacji. Ucięcie obserwacji zachodzi wówczas, gdy w okresie obserwacji nie zaobserwuje się oczekiwanego zdarzenia, np. w obserwowanym przedziale przebiegu 0-100 000 km sprzęgło pojazdu nie uszkodziło się lub w próbie 10 maszyn nie wszystkie obiekty uszkodziły się w okresie obserwacji wynoszącym jeden rok. Obiekty te nie dostarczają precyzyjnej informacji o wartości obserwowanej zmiennej i w tym przypadku np. czas do uszkodzenia przyjmowany jest jako nie krótszy niż okres obserwacji. Dane uzyskane z obserwacji takich obiektów nazywa się uciętymi lub cenzurowanymi [3].

## 1. KLASYFIKACJA DANYCH W STATYSTYCZNEJ ANALIZIE I OCENIE NIEZAWODNOŚCI

### 1.1. Dane pełne

Realizując badania niezawodności, oczekuje się, że większość danych dotyczących obserwowanych zmiennych losowych są danymi **pełnymi** (kompletnymi). Oznacza to znajomość dokładnych wartości realizacji zmiennych losowych np. przebieg do uszkodzenia jest konkretną liczbą kilometrów przebiegu pojazdu do chwili zaobserwowania uszkodzenia (rys. 1).

Zwykle rozpoczyna się badania w określonej chwili, z określoną liczbą obiektów. Zakończenie obserwacji może nastąpić, jeśli wszystkie obiekty dostarczą oczekiwanej zmiennej losowej, lub upłynie założony czas badań niezależnie od liczby uzyskanych realizacji zmiennej losowej, lub uszkodzi się pewna, określona część (frakcja) obiektów.



Rys. 1. Dane pełne, wszystkie obiekty uszkodziły się w okresie badań  $t_c$

*Źródło: Opracowanie własne*

Jeśli w założonym przedziale czasu badań nie wszystkie obiekty dostarczą oczekiwanych informacji (np. nie uszkodzą się), wówczas wiadomo tylko, że czas do uszkodzenia dla tych obiektów jest nie krótszy niż czas obserwacji. Liczba takich obiektów jest zmienną losową. Ucięcie tego rodzaju nazywa się ucięciem prawostronnym. Możliwe są dwa rodzaje ucięcia, określane jako I lub II typu. Typ ucięcia uzależniony jest od sposobu prowadzenia badań i kryterium ich zakończenia. Badania mogą być prowa-

dzione w określonym przedziale czasu niezależnie od stanu obiektów lub też do uzyskania określonej liczby realizacji zmiennej losowej, lub określonej frakcji uszkodzonych obiektów.

## 1.2. Dane ucięte prawostronne

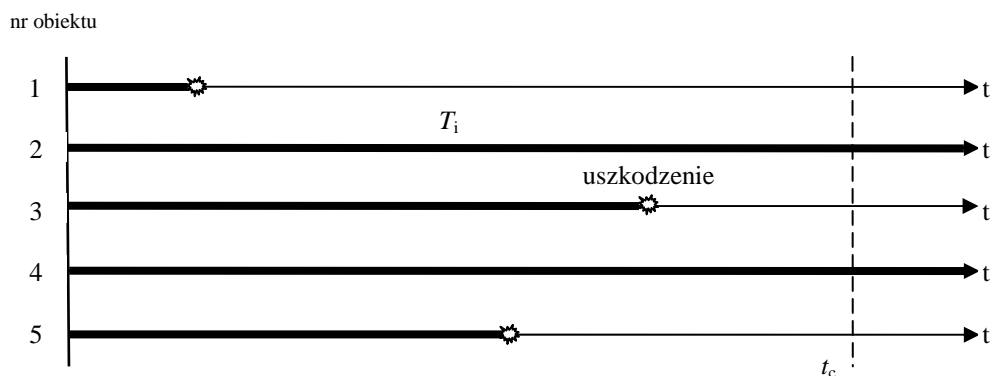
### Ucięcie I typu

Ucinanie typu I ma miejsce wówczas, gdy w określonym przedziale obserwacji tylko część obiektów uległa uszkodzeniu. Czas obserwacji jest ściśle określony, a liczba uszkodzonych obiektów jest zmienną losową (rys. 2). W tym przypadku badanie jest zakończone o wcześniej ustalonej chwili niezależnie od pojawienia się badanej cechy, a wartość obserwowanej zmiennej przyjmuje wartość:

$$X_i = \begin{cases} T_i; & T_i \leq t_c \\ t_{ci}; & t_{ci} > t_c \end{cases} \quad (1)$$

gdzie:

$T_i$  jest zaobserwowanym czasem do uszkodzenia  $i$ -tego obiektu, a  $t_c$  jest czasem badań.



Rys. 2. Dane prawostronnie ucięte (cenzurowane) I typu, obiekty 2 i 4 nie uszkodziły się w okresie badań  $t_c$

Źródło: Opracowanie własne

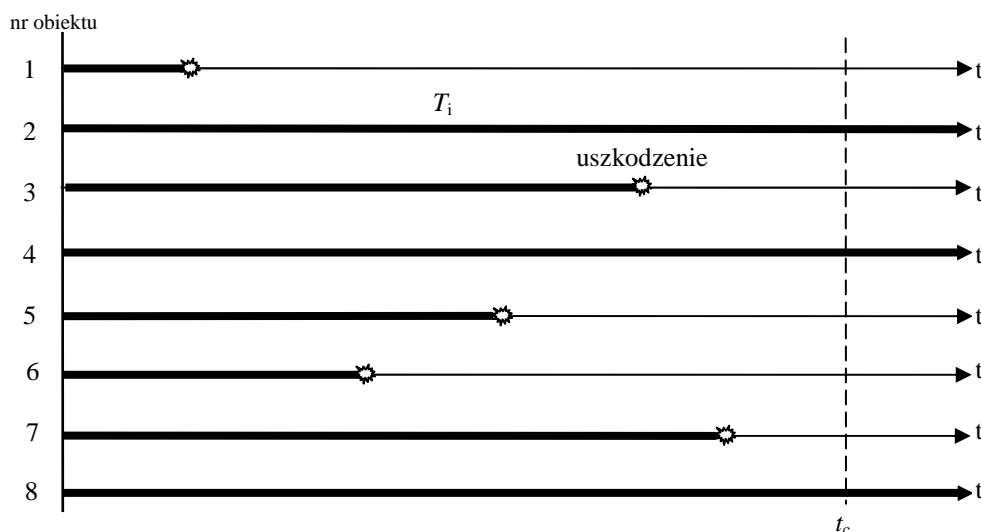
### Ucięcie II typu

W eksperymencie z ucinaniem II typu obserwacje prowadzi się do chwili, kiedy określona liczba obiektów  $r$  (frakcja) ulegnie uszkodzeniu (rys. 3). W tym przypadku liczba uszkodzonych obiektów (frakcja) jest określona, a czas do uszkodzenia jest zmienną losową. Badanie jest prowadzone do uzyskania pełnych danych dla wszystkich bądź dla ustalonej z góry liczby zdarzeń. Obserwowana zmienna przyjmuje wartość

$$X_i = \begin{cases} T_i; & i \leq r \\ t_{ci}; & i > r \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:

$r$ - numer zdarzenia, po którym następuje cenzurowanie.

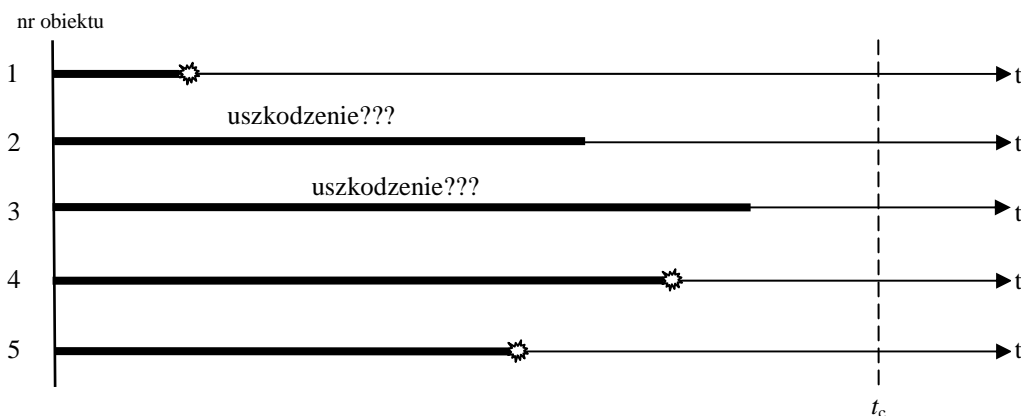


Rys. 3. Dane prawostronnie ucięte (cenzurowane) II typu, 5 z 8 obiektów uszkodziło się w okresie badań

Źródło: Opracowanie własne

### 1.3. Ucięcie lewostronne

Ucinanie lewostronne dotyczy zmiennych, o których nie wiadomo, kiedy w przeszłości pojawiły się (kiedy obiekty uległy uszkodzeniu) (rys. 4).



Rys. 4. Dane lewostronnie ucięte (cenzurowane)

Źródło: Opracowanie własne

Obiekty 2 i 3 rozpoczęły eksploatację jako zdadne i uszkodziły się w przedziale  $(0, T_{ic})$ ;  $i=1,2$ .

Obserwuje się też dane przedziałowo ucięte, gdy nie wiadomo, kiedy dokładnie nastąpiło badane zdarzenie, ale wiadomo, że nastąpiło to nie wcześniej niż ... i nie później niż ... Wnioskuje się, że uszkodzenie zaistniało w przedziale czasu (przebiegu) o znanym początku i końcu. Ucięcie lewostronne jest w zasadzie szczególnym przypadkiem ucięcia przedziałowego, kiedy początkiem tego przedziału jest początek badań. Uszkodzenie pojawiło się przed chwilą jego zarejestrowania. Okresowe monitorowanie zjawisk może przynieść takie dane, kiedy uszkodzenie wystąpi między chwilami monitorowania (diagnostyki), jednak dokładna chwila nie jest znana.

## 2. METODY PRZETWARZANIA DANYCH CENZUROWANYCH

Opracowanie statystyczne danych eksploatacyjnych polega najczęściej na wyznaczeniu modelu probabilistycznego obserwowanej zmiennej losowej. Wykorzystuje się w tym celu modele ciągłych zmiennych losowych bazujące na takich rozkładach prawdopodobieństwa, jak: rozkład wykładniczy, normalny, logarytmiczno-normalny, Weibulla, a także gamma, beta. Estymację parametrów tych rozkładów można przeprowadzić metodami analitycznymi, a coraz częściej numerycznie przy użyciu specjalistycznych pakietów komputerowych [4].

Szacowanie parametrów rozkładu jest modelowaniem danych wymagającym określenia najlepiej dopasowanego rozkładu i oszacowania parametrów tego rozkładu (kształt, skala, położenie).

Stosuje się różne metody estymacji parametrów, do których zalicza się zarówno metody numeryczne, jak i graficzne (metoda momentów, największej wiarygodności, najmniejszych kwadratów, dopasowanie w siatkach rozkładów, probability plot correlation coefficient (PPCC) [4].

**Metoda momentów** zakłada równość parametrów rozkładu z momentami obliczonymi z próbki. Zaletą metody jest jej prostota, jednak brak wymaganej wiarygodności powoduje, że jest ona zwykle wstępną fazą estymacji przed metodą największej wiarygodności czy najmniejszych kwadratów.

**Metoda największej wiarygodności (Maximum Likelihood Estimation MLE)** oparta jest na funkcji największej wiarygodności próbki danych. Wiarygodność danych jest prawdopodobieństwem zgodności próbki danych z wybranym rozkładem prawdopodobieństwa. Funkcja  $L$  zależy od realizacji zmiennej losowej  $T_1$  oraz od zmiennych  $\Theta_j$ , których wartości maksymalizujące funkcję wiarygodności  $L$  są szukanymi estymatami parametrów rozkładu.

$$L(\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_k / T_1, T_2, \dots, T_N) = \prod_{i=1}^N f(T_i, \Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_k) \quad (3)$$

Metoda pozwala na określanie parametrów rozkładów także dla danych ucinanych. Wówczas funkcja rozszerzona jest o czynniki uwzględniające dane ucięte i wówczas, w najszerszym przypadku danych o różnym typie ucięcia (prawo-, lewostronnie ucięte oraz przedziałowe) funkcja wiarygodności przyjmuje postać:

$$L = \prod_{i=1}^N f(T_i, \Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_k) \cdot \prod_{j=1}^M [1 - F(S_j, \Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_k)] \cdot \prod_{l=1}^P \{F(I_{lk}, \Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_k) - F(I_{lp}, \Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_k)\} \quad (4)$$

gdzie:

$L = L(\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_k / T_1, T_2, \dots, T_N, S_1, S_2, \dots, S_M, I_1, I_2, \dots, I_P)$ , funkcja wiarygodności,  
 $N$ - liczba obiektów uszkodzonych,  
 $M$ - liczba obiektów nieuszkodzonych (dane ucięte prawostronnie),  
 $P$ - liczba obiektów uszkodzonych z danymi uciętymi lewostronnie lub przedziałowo,

$\Theta_j$  – parametry rozkładu,  
 $T_i$  – czas do uszkodzenia  $i$ -tego obiektu,  
 $S_j$  – czas do prawostronnego ucięcia,  
 $I_{lk}$  – koniec przedziału ucięcia  $l$ -tej grupy danych uciętych lewostronnie lub przedziałowo,  
 $I_{lp}$  – początek przedziału ucięcia  $l$ -tej grupy danych uciętych lewostronnie lub przedziałowo.

Komputerowe aplikacje MLE dotyczą najczęściej określonych rozkładów, ponieważ obliczenia są zbyt złożone, aby oferować uniwersalne narzędzia. Wadą metody jest konieczność znajomości złożonej funkcji wiarygodności, zaś zaletą jest jej stabilność i efektywność.

**Metoda najmniejszych kwadratów (metoda regresji liniowej i nieliniowej, metoda regresji rangowanej)** jest alternatywą dla MLE. Pozwala na stosunkowo łatwe wyznaczanie parametrów rozkładów. W szczególności, metoda regresji liniowej w skojarzeniu z linearyzacją dystrybuanty rozkładów prawdopodobieństwa stosowana jest w postaci graficznej (**Probability Plot**), a w wersji analitycznej wykorzystywana jest w pakietach komputerowych dla danych nieuciętych.

**Siatka rozkładu prawdopodobieństwa (Probability Plot, Weibull Plot)** jest techniką graficzną wyznaczania parametrów rozkładu prawdopodobieństwa opartą na przekształceniu funkcji dystrybuanty do postaci liniowej.

### 3. GRAFICZNA ESTYMACJA PARAMETRÓW DANYCH EKSPLOATACYJNYCH

Graficzna metoda szacowania parametrów rozkładów wykorzystuje siatkę rozkładu przekształcającą krzywoliniowy wykres funkcji dystrybuanty w linię prostą. Wówczas naniesienie wartości dystrybuanty empirycznej w ten układ współrzędnych pozwala na aproksymację przebiegu wykresu dystrybuanty jako linii prostej. Parametry rozkładu odczytać można z charakterystycznych punktów wykresu.

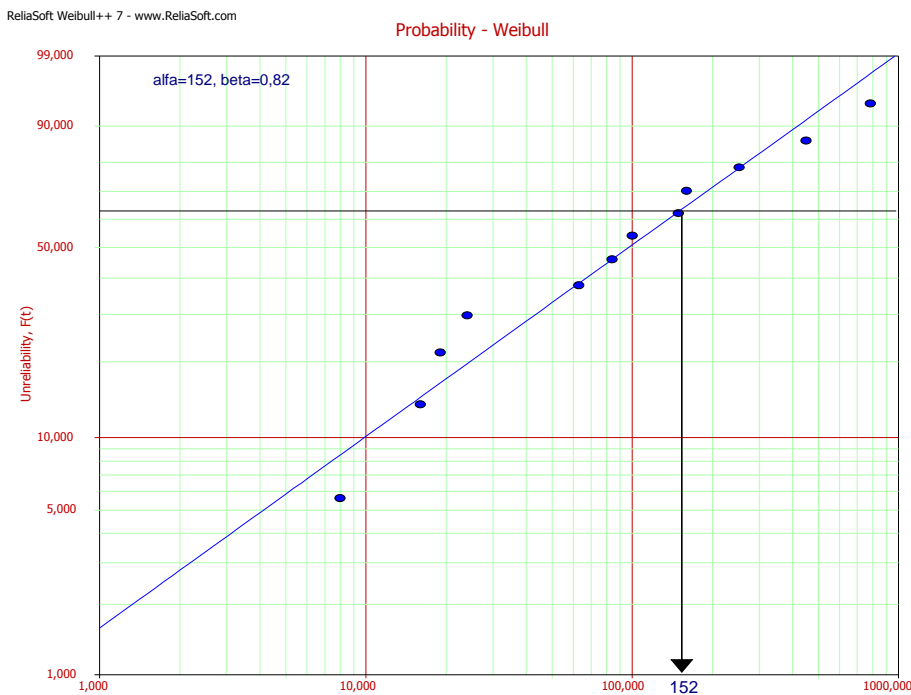
Najprościej można prześledzić tę procedurę na przykładzie jednoparametrowego rozkładu wykładniczego. Dystrybuanta rozkładu wykładniczego ma postać  $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ , gdzie  $\lambda$  jest intensywnością uszkodzeń. Kolejne przekształcenia doprowadzają do postaci:  $\ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right) = \lambda t$ , co odpowiada równaniu prostej  $y = ax$ , gdzie

$y = \ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right)$ , a  $a = \lambda$ . Parametr  $\lambda$  rozkładu odczytuje się z punktu odpowiadającego

rozwiązaniu równania  $F(t) = e^{-\lambda t}$  dla  $t = \bar{T} = \frac{1}{\lambda}$ ;  $F(t) = e^{-\lambda \frac{1}{\lambda}}$ ,  $F(t) = e^{-1} = 0,632$  [3,4].

Na rysunku 5 przedstawiono przykład graficznej estymacji parametrów rozkładu Weibulla dla rzeczywistych danych dotyczących czasów uszkodzeń elementów uzbrojenia [1]. Dane eksploatacyjne (czasy między uszkodzeniami)  $t_i$  są posortowane rosnąco, a każdej z wartości przypisano oszacowanie dystrybuanty empirycznej jako rząd mediany (Median Rank) wyznaczony z zależności Bernarda:  $\hat{F}(t_i) = \frac{i - 0,3}{N + 0,4}$  [3]. Wartość parametru skali  $\beta$  rozkładu Weibulla odczytano z przecięcia linii interpolacji da-

nych z linią wartości  $\hat{F}(t) = 0,632$ , a wartość parametru kształtu  $\alpha$  z kąta nachylenia dystrybuanty empirycznej.



Rys. 5. Graficzna estymacja parametrów rozkładu Weibulla

Źródło: Opracowanie własne

## PODSUMOWANIE

Dane uzyskiwane z obserwacji eksploatacyjnych obarczone są często znaczną niepewnością wynikającą z ich niepełności, ograniczeń i niespełnienia warunków badań oraz celowych zafałszowań. Dane uzyskane dla obiektów, które nie uszkodziły się w okresie obserwacji lub chwila ich uszkodzenia nie jest ściśle określona, analizuje się przy wykorzystaniu metody największej wiarygodności lub najmniejszych kwadratów.

## LITERATURA

- [1] Kowalski K., Młyńczak M., *Problematyka gotowości systemów uzbrojenia we wczesnej fazie eksploatacji*, [w:] „Motorol”, 2009.
- [2] Młyńczak M., *Badania i ocena niezawodności pojazdów w eksploatacji*, [w:] „Zeszyty Naukowe WSOWL”, Wrocław, 2004.
- [3] Smith D.J., *Reliability Maintainability and Risk*. Butterworth-Heinemann, 2007.
- [4] Weibull 7+. *Reliasoft podręcznik użytkownika i Life Data Web*. [online]. [dostęp: 2010]. Dostępny w Internecie: [www.weibull.com](http://www.weibull.com).

**FIELD DATA ANALYSIS  
IN RELIABILITY TESTING OF TECHNICAL OBJECTS**

**Summary**

*In a reliability assessment of technical objects operated in real conditions the key element is data concerning some variables. The nature of a field test introduces disturbances in data collecting, storing and processing while decreasing their credibility. It influences a further data analysis and processing. The paper describes models of censored data and methods of their processing.*

**Key words:** *field test, reliability, censored data*

*Artykuł recenzował: płk dr inż. Kazimierz KOWALSKI*