



**Wytrzymałość zmęczeniowa
lotniczych zespołów napędowych**



DEFINICJA WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ;
POJĘCIE GRANICY ZMĘCZENIA,

HIPOTEZY KUMULACJI USZKODZEŃ
ZMĘCZENIOWYCH I KRYTERIA ZMĘCZENIA,

TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA
W ZŁOŻONYM STANIE NAPRĘŻENIA,

KLASYFIKACJA SYGNAŁÓW:
SYGNAŁY ZDETERMINOWANE I LOSOWE
WYBRANE CHARAKTERYSTYKI SYGNAŁÓW,

ANALIZA CZĘSTOTLIWOŚCIOWA ZAPISÓW
SKŁADANIE SYGNAŁÓW HARMONICZNYCH,



**RODZAJE NAPĘDÓW STATKÓW POWIETRZNYCH
ZASADY PRACY I CHARAKTERYSTYKI LOTNICZYCH
ZESPOŁÓW NAPĘDOWYCH;
OBLICZENIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE,
DRGANIA I PRĘDKOŚCI KRYTYCZNE,**

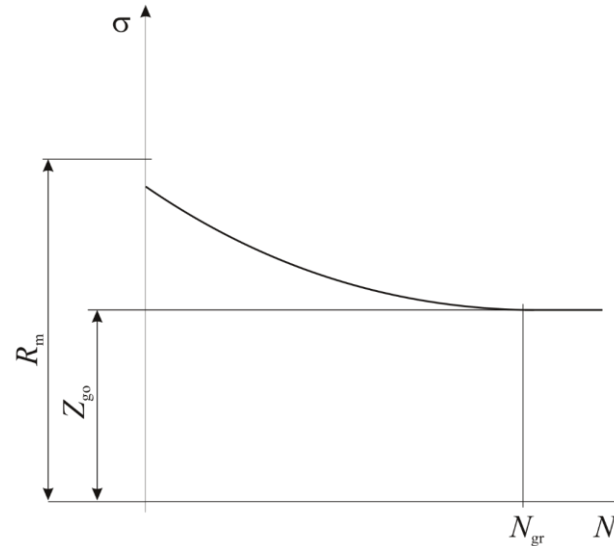
**CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE
NA TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ
LOTNICZYCH ZESPOŁÓW NAPĘDOWYCH;
METODY BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH,**

**WYZNACZANIE I KLASYFIKACJA
CYKLI ZASTĘPCZYCH
Z ZAPISÓW OBCIĄŻEŃ,
METODY ZLICZANIA CYKLI UMOWNYCH,**

EKSPLOATACYJNE WIDMO LOTÓW.



WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA GRANICA ZMĘCZENIA



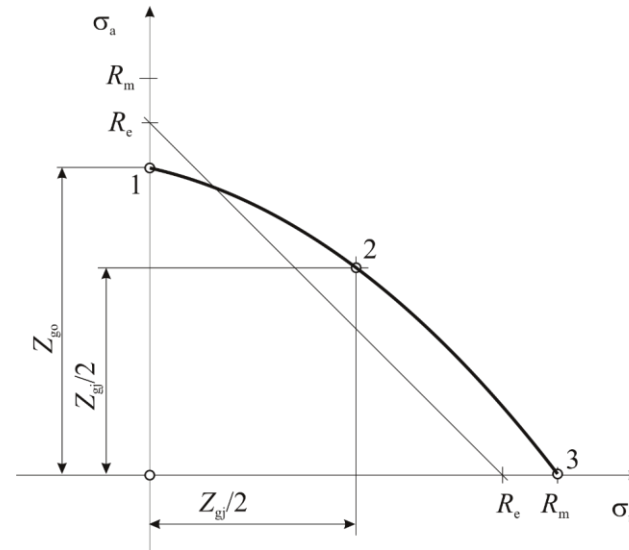
Pod pojęciem **wytrzymałości zmęczeniowej** rozumie się odporność materiału na działanie cyklicznych obciążeń.

Granica zmęczenia to wartość cyklicznie zmieniającego się naprężenia, które materiał jest w stanie wytrzymać przy umownej liczbie cykli (N_{gr}).

Wytrzymałość zmęczeniową opisuje się za pomocą wykresów **Woehlera**, **Smitha** i **Haigha**.



WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA GRANICA ZMĘCZENIA



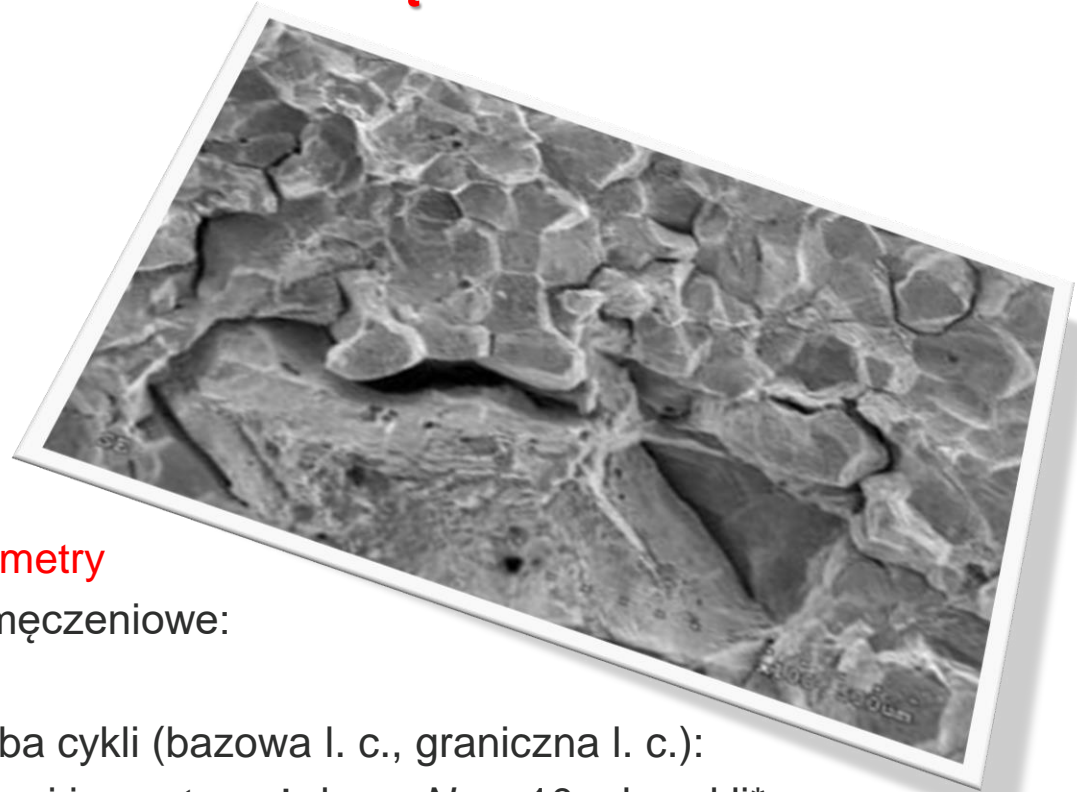
Pod pojęciem **wytrzymałości zmęczeniowej** rozumie się odporność materiału na działanie cyklicznych obciążeń.

Granica zmęczenia to wartość cyklicznie zmieniającego się naprężenia, które materiał jest w stanie wytrzymać przy umownej liczbie cykli (N_{gr}).

Wytrzymałość zmęczeniową opisuje się za pomocą wykresów Woehlera, Smitha i **Haigha**.



WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA GRANICA ZMĘCZENIA



Podstawowe parametry
opisujące cykle zmęczeniowe:

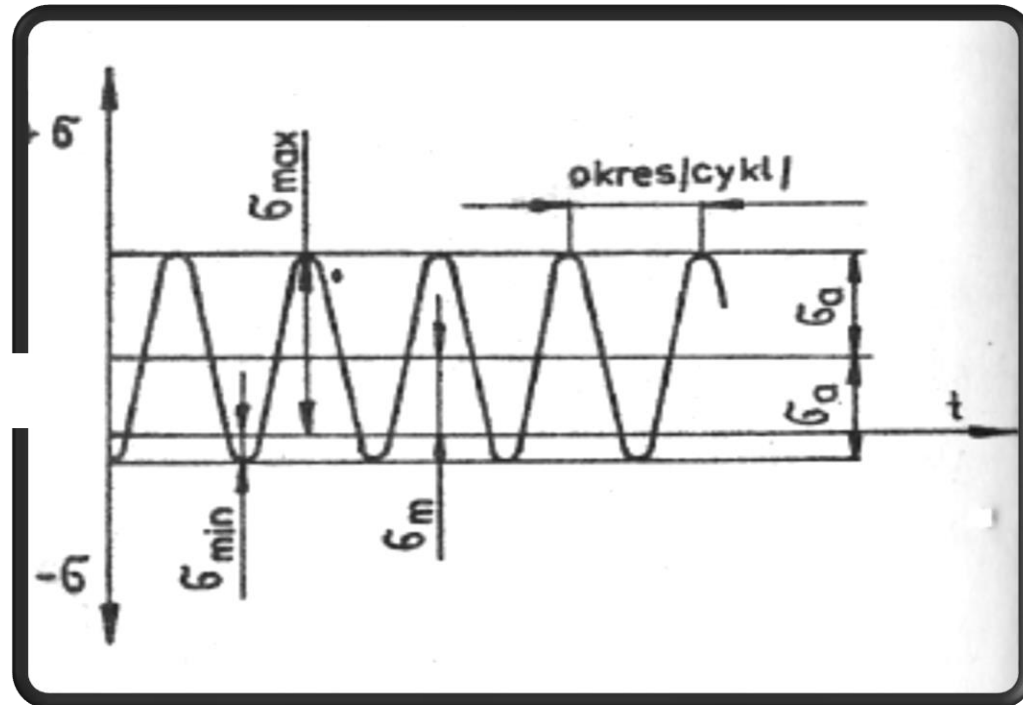
Umowna liczba cykli (bazowa l. c., graniczna l. c.):

- stale węglowe i inne stopy żelaza: $N_{gr} = 10$ mln cykli*
- – stopy metali nieżelaznych: $N_{gr} = 100$ mln cykli

* Niektóre źródła podają też wartości 5÷50 mln cykli i 20÷200 mln cykli, odpowiednio dla stali i stopów nieżelaznych (por. mat. pomocnicze dla studentów *Lab. wytr. mat.*, Politechnika Wroclawska)



WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA GRANICA ZMĘCZENIA



Podstawowe parametry opisujące cykle zmęczeniowe:

- naprężenie maksymalne, σ_{maks}
- naprężenie minimalne, σ_{min}
- naprężenie amplitudowe, σ_a
- naprężenie średnie, σ_m



WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA GRANICA ZMĘCZENIA

Rodzaj cyklu	Nazwa naprężeń zmiennych	WARTOŚĆ WSPÓCZYNNIKA	
		R	λ
	Stałe	$R = +1$	$\lambda = \pm\infty$
	Jednostronne	$0 < R < +1$	$1 < \lambda < \infty$
	Tętniace pulsujące	$R = 0$	$\lambda = 1$
	Wahadłowe symetryczne	$R = -1$	$\lambda = 0$
	Dwustronne	$-1 < R < 0$	$0 < \lambda < 1$



HIPOTEZA KUMULACJI USZKODZEŃ ZMĘCZENIOWYCH. KRYTERIA ZMĘCZENIA



Hipoteza liniowej kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych – Palmgren-Minera:

uszkodzenie powstające w materiale wskutek k następujących po sobie ustalonych przebiegów obciążeń zmęczeniowych, o danych parametrach, jest wprost proporcjonalne do sumy ułamków liczb cykli (n_i) odniesionych do bazowych liczb cykli (N_i) odpowiadających i-tym przebiegom.

Z natury rzeczy wartość maksymalna tej sumy nie może przekroczyć 100%, czyli 1, bez wystąpienia zniszczenia. Hipoteza P.-M. nie uwzględnia też „historii uszkodzenia” materiału.

Liniowe kryterium zmęczenia można zapisać jako →

$$\sum_{1}^{k} \frac{n_i}{N_i} = 1$$



HIPOTEZA KUMULACJI USZKODZEŃ ZMĘCZENIOWYCH. KRYTERIA ZMĘCZENIA



W praktyce wiele elementów maszyn znajduje się w złożonym stanie naprężenia, np. wały – wskutek jednoczesnego skręcania i zginania.

W takich przypadkach, w analizie zmęczenia materiału, stosuje się odpowiednie **kryteria wieloosiowe** (zob. Wang & Yao (2004)):

- naprężeniowe (Gough-Pollard, Lee, Carpinteri-Spagnoli, Sines, Kakuno-Kawada, Crossland, Findley-Matake-McDiarmid, Papadopoulos),
- odkształceniowe (Kandil-Brown-Miller, Lohr-Ellison, Fatemi-Socie, Shang-Wang, Borodii-Strizhalo),
- energetyczne (SWT, Socie, Chen, Chu, Liu, GWP, F, PHC).





KLASYFIKACJA SYGNAŁÓW

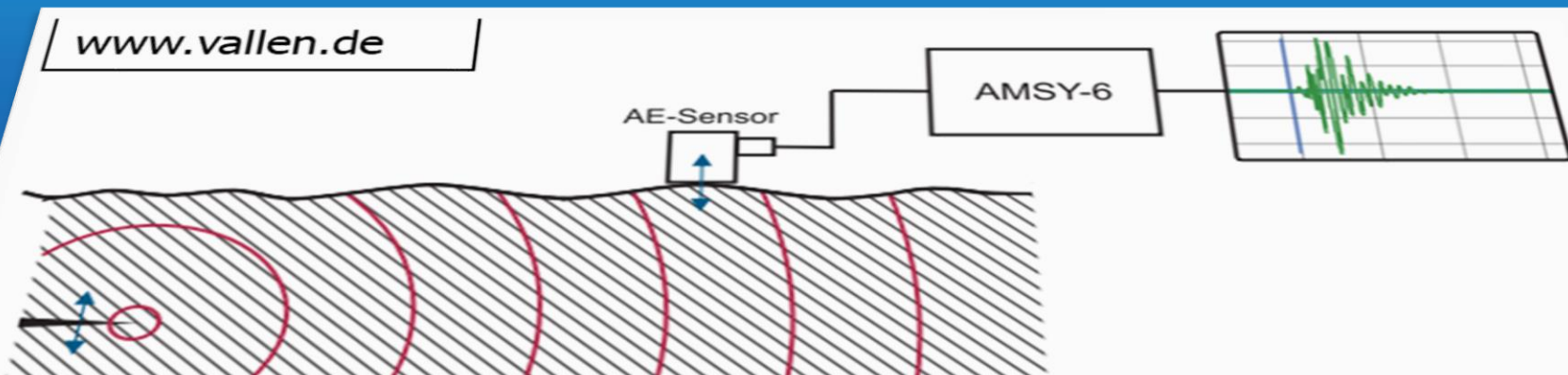


Sygnałem nazywa się zapis wartości wielkości fizycznej zmieniającej się w czasie.

Do badania i przetwarzania sygnałów wykorzystuje się narzędzia analizy matematycznej.

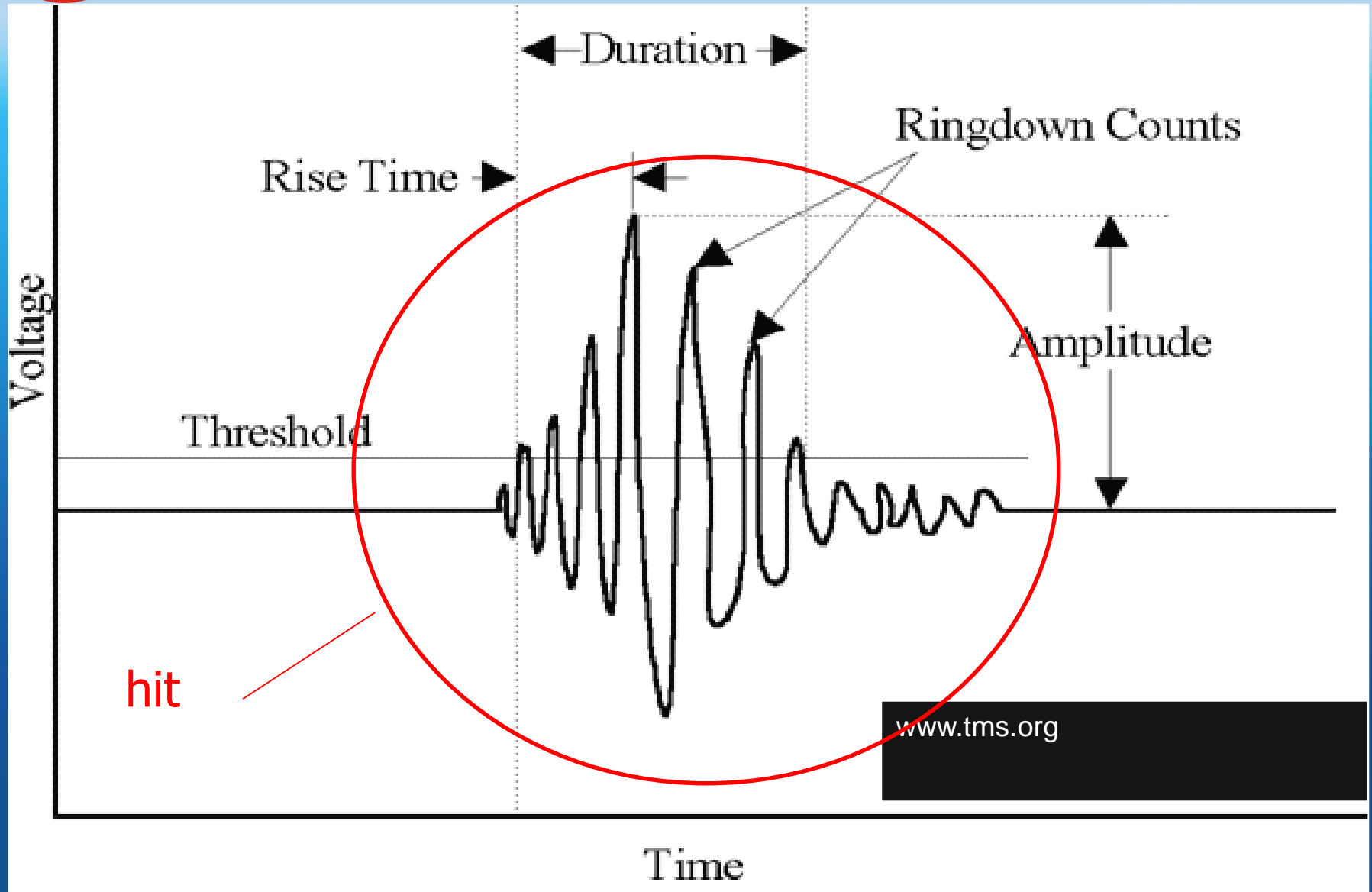
Klasyfikacja sygnałów ze względu na powtarzalność przebiegu czasowego:

- zdeterminowane (okresowe),
- losowe.





KLASYFIKACJA SYGNAŁÓW



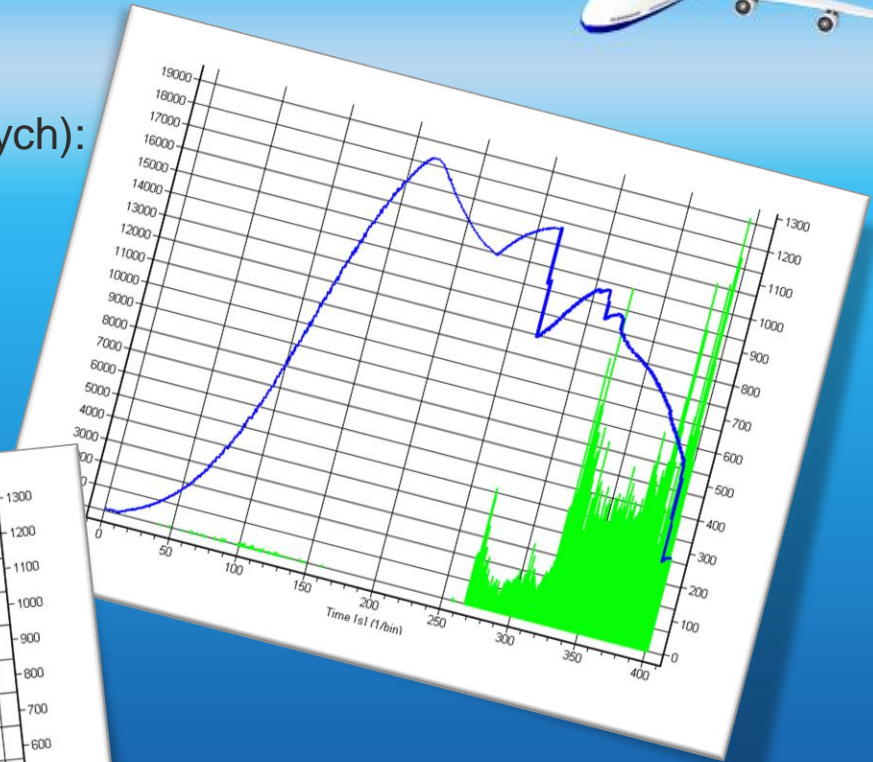
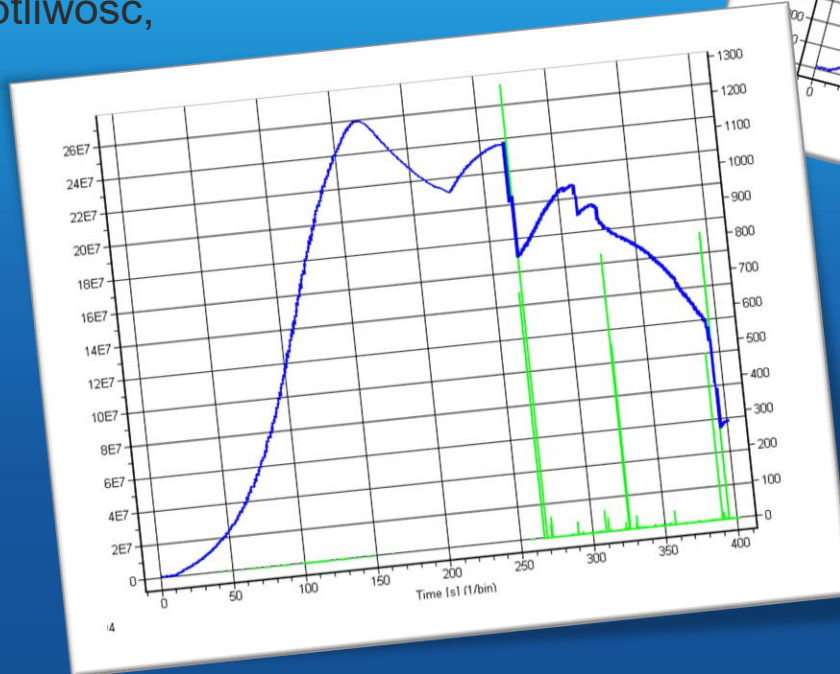


KLASYFIKACJA SYGNAŁÓW



Wybrane charakterystyki sygnałów (analogowych):

- wartość średnia w przedziale czasu
- energia,
- moc średnia,
- amplituda,
- częstotliwość,
- faza,
- RMS.

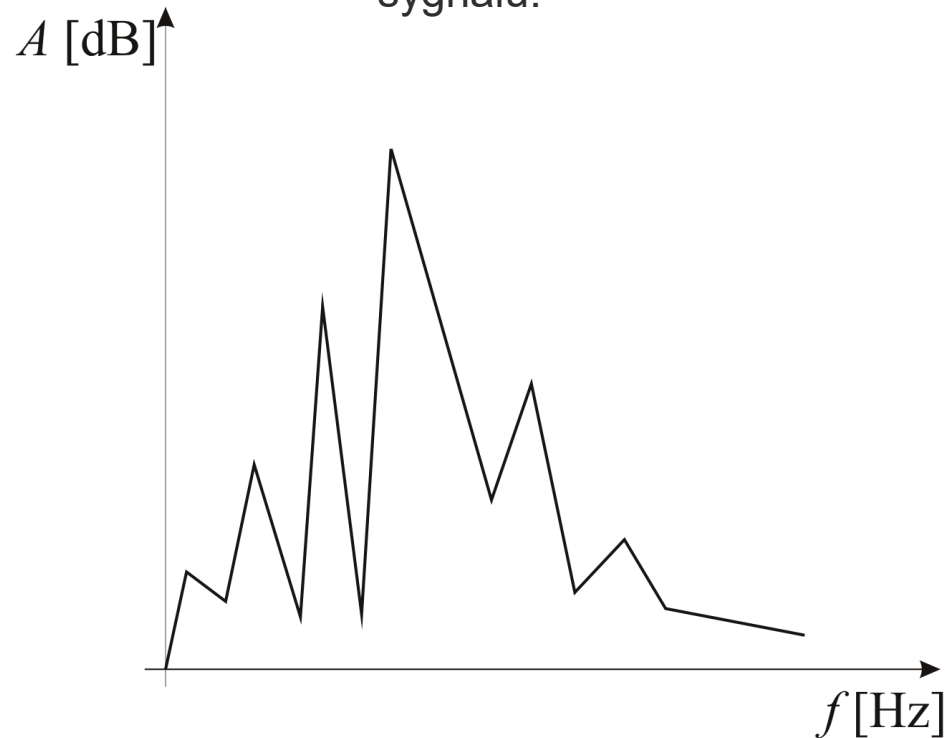




ANALIZA CZĘSTOTLIWOŚCIOWA SYGNAŁÓW

Analiza częstotliwościowa ma zastosowanie do sygnałów analogowych, jak i dyskretnych; polega ona na wyznaczeniu częstotliwości, występujących w przebiegu czasowym sygnału.

Wskutek analizy uzyskuje się tzw. **widmo częstotliwościowe** sygnału.

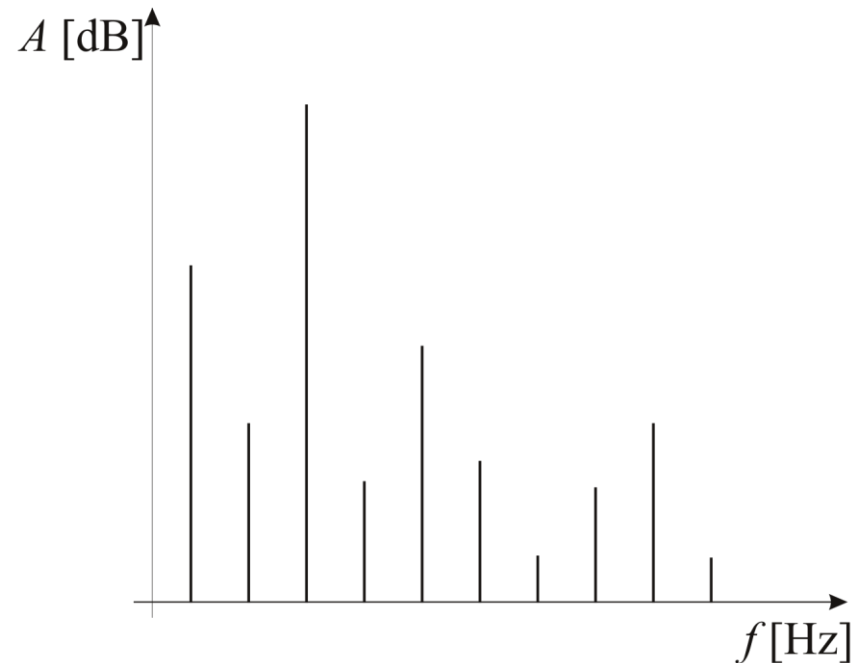




ANALIZA CZĘSTOTLIWOŚCIOWA SYGNAŁÓW

Podstawowym narzędziem analizy sygnału jest **przekształcenie Fouriera**.

$$F(s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot e^{-2\pi ixs} dx$$



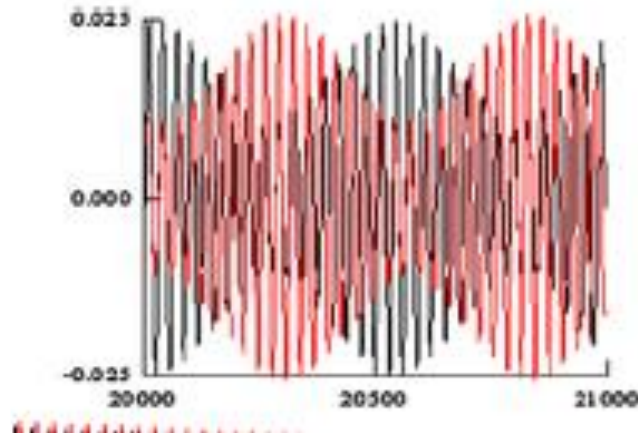


SKŁADANIE SYGNAŁÓW HARMONICZNYCH

Dzięki addytywności przekształceń Fouriera (*transformata sumy sygnałów równa się sumie ich transformat*):

$$F(s_1 + s_2 + \dots) = F(s_1) + F(s_2) + \dots$$

W przypadku drgań harmonicznycch złożenie sygnałów „prostopadłych” daje tzw. krzywe Lissajous





RODZAJE NAPĘDÓW STATKÓW POWIETRZNYCH



Silniki lotnicze

tłokowe

turbośmigłowe

turbinowe



RODZAJE NAPĘDÓW STATKÓW POWIETRZNYCH



Układ wirników śmigłowca

pojedynczy

podwójny

współosiowy

skośny



RODZAJE NAPĘDÓW STATKÓW POWIĘTRZNYCH



*single main rotor
with tail rotor*



coaxial rotors



tandem rotors



*NOTAR
(no tail rotor)*



intermeshing rotors



transverse rotors



autogiro

**rotor configurations
(helicopter)**

www.inchbyinch.de





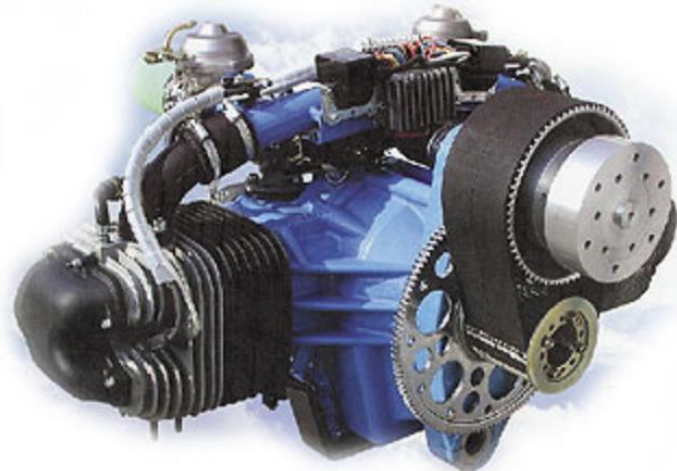
CHARAKTERYSTYKI LOTNICZYCH ZESPOŁÓW NAPEŁDOWYCH

Do podstawowych parametrów charakteryzujących silniki lotnicze należą:

- masa,
- moc,
- moment obrotowy,
- prędkość obrotowa,
- sprawność,
- stopień sprężania,
- ciśnienie w cylindrze,
- cena.

Silnik lotniczy Verner VM 125T

Silnik lotniczy o mocy 78 KM dla samolotów ultralekkich





CHARAKTERYSTYKI LOTNICZYCH ZESPOŁÓW NAPĘDOWYCH

Dane techniczne silnika lotniczego VM 125MT dla samolotów ultralekkich

pojemność	1248 cm ³
średnica tłoku	94 mm
skok tłoku	90 mm
stopień sprężania	9.3 : 1
moc maksymalna	78 HP (63 kW) @ 5200 RPM
moc ciągła	58 HP (51 kW) @ 3800 RPM
moment obrotowy	124 Nm @ 4500 RPM
obroty silnika max.	5400/s
waga	69 kg
reduktor	1 : 2 albo 1 : 2,6
TBO	1000 h



CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ LOTNICZYCH ZESPOŁÓW NAPĘDOWYCH



Rzeczywista wytrzymałość zmęczeniowa elementu maszyny może różnić się od wytrzymałości próbek materiału. Zależy to od następujących czynników:

- kształt elementu
- występowanie tzw. Karbu
- stan powierzchni
- wielkość elementu
- sposób obciążenia
- aktywność chemiczna ośrodka

Każdy z wyżej wymienionych czynników opisany jest stosownymi współczynnikami korekcyjnymi.



METODY BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH



Metody badań zmęczeniowych można podzielić - ze względu na warunki próby:

- badania całych konstrukcji:
 - w warunkach laboratoryjnych,
 - w warunkach eksploatacyjnych (w terenie),
- badania laboratoryjne próbek materiału.

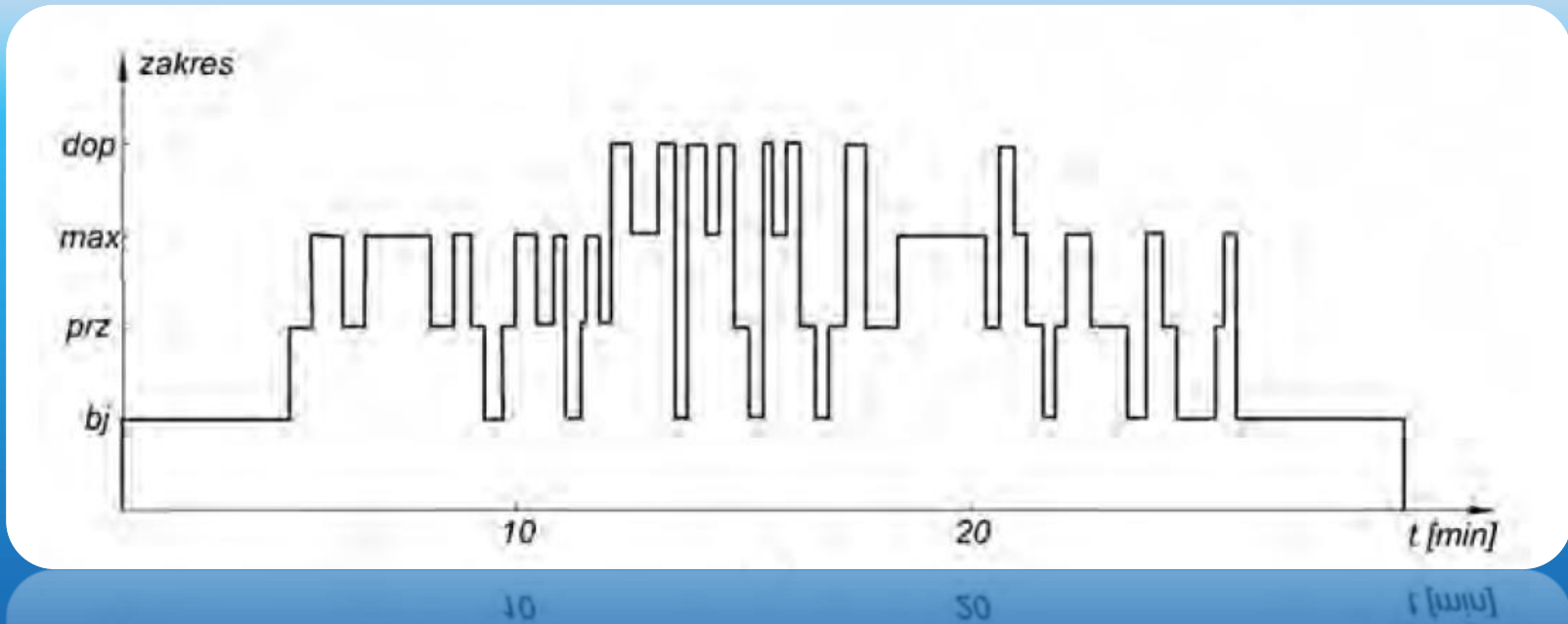
Pod względem rodzaju obciążeń cyklicznych wyróżnia się:

- próby jednoosiowe (rozciąganie ściskanie),
- próby zginania,
- próby skręcania.





WYZNACZANIE I KLASYFIKACJA CYKLI ZASTĘPCZYCH



W przypadku samolotów bojowych stosowane są następujące **cykle zastępcze**:

- typowa misja,
- skrócona próba silnika,
- walka powietrzna,
- wsparcie pola walki.

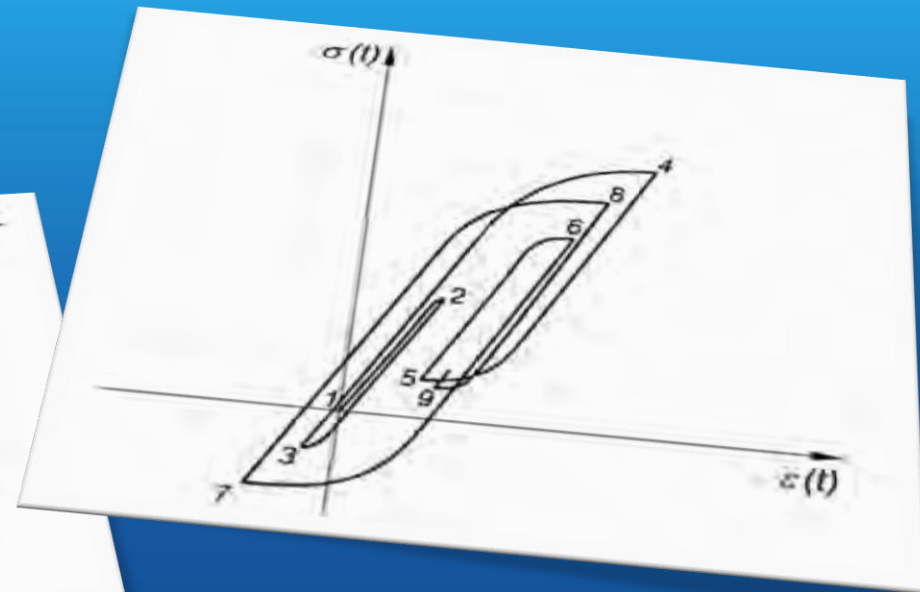
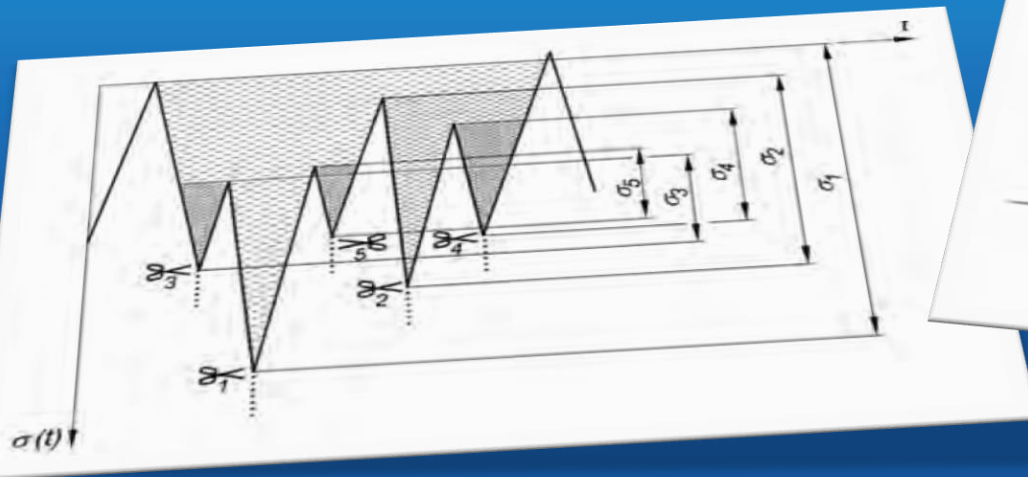


METODY ZLICZANIA CYKLI UMOWNYCH



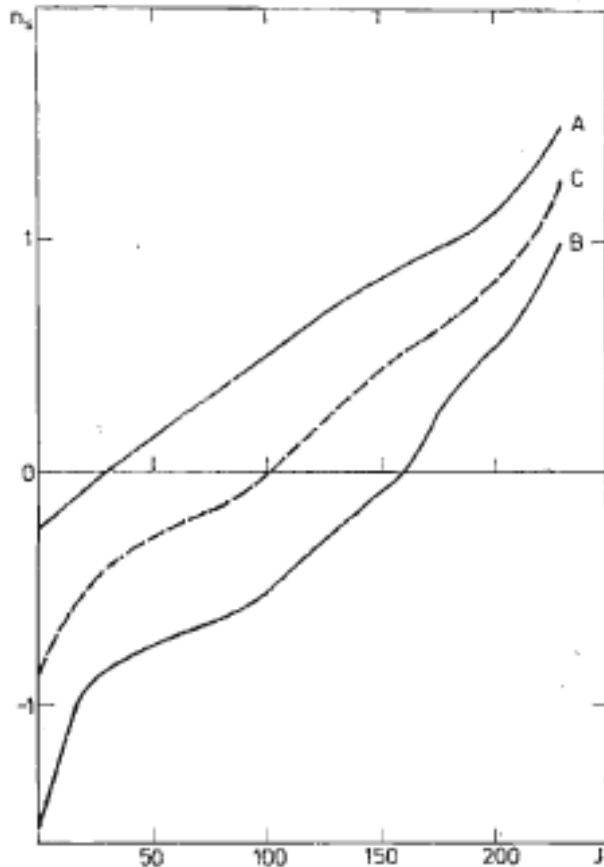
Znane są następujące metody opracowania eksploatacyjnego widma lotów:

- Metoda pełnych cykli (ang. *full cycles count method*)
- Metoda par rozpiętości (ang. *range pair count method*)
- Metoda obwiedni (ang. *rain flow count method*)
- Metoda pętli histerezy
- Metoda zbiornika





EKSPLOATACYJNE WIDMO LOTÓW



Rys. 4. Widmo obciążeń skrzydła (obwiednia) dla jednego startu.

Eksploatacyjne widmo lotów zawiera informacje o przebiegu obciążeń poszczególnych części statku powietrznego. Widmo eksploatacyjne można odtworzyć na potrzeby prób zmęczeniowych symulując obciążenia „lot po locie” lub obciążenia ze wszystkich lotów zgrupowane w bloki (por. Stapiej, 1987).



LITERATURA



ŹRÓDŁA KSIĄŻKOWE / INTERNETOWE:

Slajd 2 – <https://www.elektroda.pl/rtvforum/topic3330368.html>

Slajd 3 – <https://www.gov.pl/documents/905843/1047987/20152140A.pdf>

Slajd 7 – <http://tesolutions.pl/nauka/fraktografia-badania-powierzchni-pekniec/>

Slajd 8 – Sobiesiak, K., Szabelski, K.: Laboratorium wytrzymałości materiałów

Slajd 9 – Sobiesiak, K., Szabelski, K.: Laboratorium wytrzymałości materiałów

Slajd 21 – http://www.lz.pl/sam_silnik_verner125.htm

Slajd 22 – http://www.lz.pl/sam_silnik_verner125.htm

Slajd 24 – <http://aviation.stackexchange.com>

Slajd 25 – Chachurski et al., 2011

Slajd 26 – Chachurski et al., 2011

Slajd 27 – Chachurski et al., 2011

Slajd 28 – Stapiej, 1987



DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ !!!

WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA LOTNICZYCH ZESPOŁÓW NAPĘDOWYCH

POLITECHNIKA LUBELSKA
Katedra Mechaniki Stosowanej
Dr hab. inż. Sylwester Samborski, prof. nadzw.

Projekt „Politechnika Lubelska - Regionalna Inicjatywa Doskonałości”
- finansowany ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego



Ministerstwo
Nauki
i Szkolnictwa
Wyższego

