

# Przetwarzanie sygnałów



Paweł Strumiłło

<http://eletel.p.lodz.pl/pstrumil/>

pokój 322

pawel.strumillo@p.lodz.pl

Anna Borowska-Terka

<http://eletel.p.lodz.pl/>

pokój 309

anna.borowska-terka@p.lodz.pl



Marek Kociński

<http://eletel.p.lodz.pl/>

pokój 218

marek.kocinski@p.lodz.pl



Zakład Elektroniki Medycznej  
Instytut Elektroniki PŁ

# Forma zajęć i zaliczenie

---

- Wykłady i ćwiczenia 30 godz.
- Laboratorium i projekt 30 godz.



- 
- Kolokwium waga: 0.5
  - Projekt i raport waga: 0.5



# Literatura

---

- Notatki wykładowe (\*.pdf):  
<http://www.eletel.p.lodz.pl/pstrumil/>
- R.G. Lyons, „*Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów*”, WKŁ, Warszawa, 1999.
- T. P. Zieliński, „*Od teorii do cyfrowego przetwarzania sygnałów*”, AGH, Kraków, 2002.
- D.C. Reddy, *Biomedical signal processing: principles and techniques*, Tata McGraw Hill education Private Limited, 2005.
- „The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing”, Steven W. Smith: [www.DSPguide.com](http://www.DSPguide.com)

# Zakres tematyczny przedmiotu

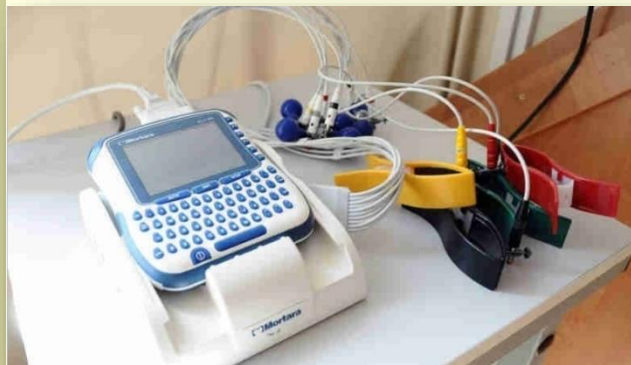
## Podstawy przetwarzania sygnałów:

- Sygnały i ich modele (np. deterministyczne i losowe)
- Reprezentacja widmowa sygnałów
- Próbkowanie oraz przetwarzanie A/C i C/A sygnałów
- Filtracja cyfrowa sygnałów biologicznych
- Metody kompresji sygnałów

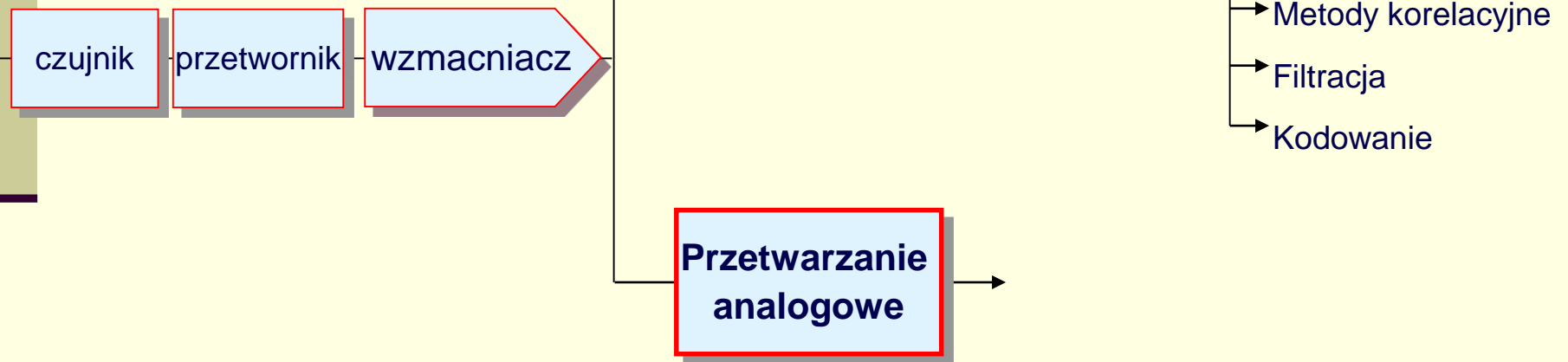
## Elementy analizy sygnałów:

- Sygnały biologiczne – geneza, klasyfikacja i własności
- Pomiary sygnałów biologicznych (wzmacniacze pomiarowe, zakłócenia)
- Analiza sygnałów biologicznych (detekcja, klasyfikacja, ...)
- Przykładowe systemy i programy analizy sygnałów biologicznych

# System przetwarzania sygnału

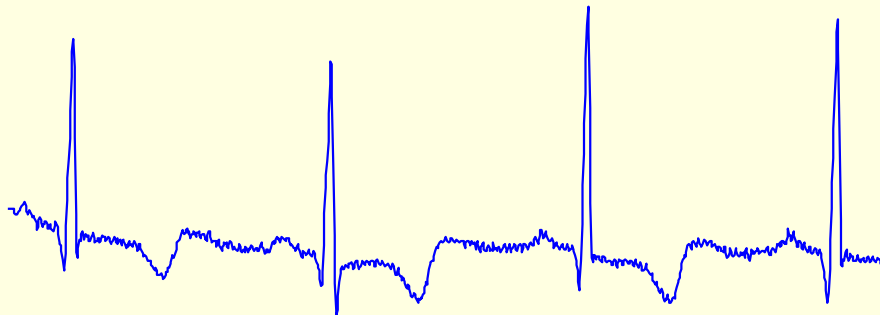


Mortara



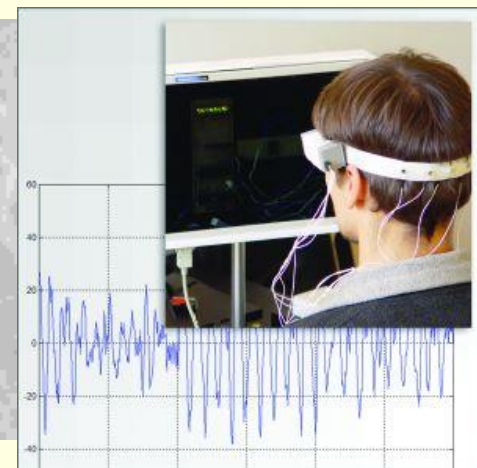
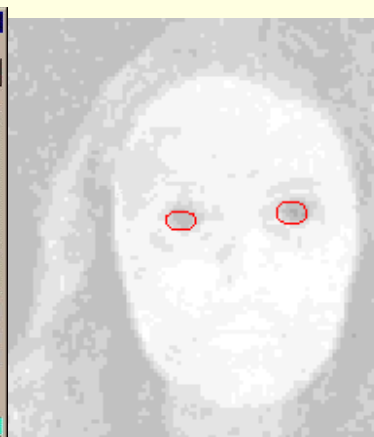
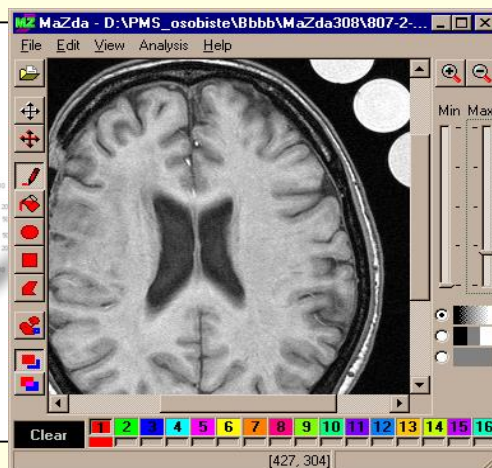
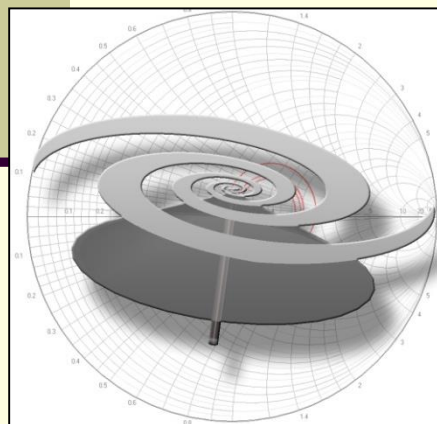
# Ćwiczenia i laboratorium

- Materiał wykładowy ilustrowany przykładowymi ćwiczeniami z przetwarzania i analizy sygnałów biologicznych
- Wykonanie samodzielnego projektu z zakresu przetwarzania/analizy sygnałów biologicznych

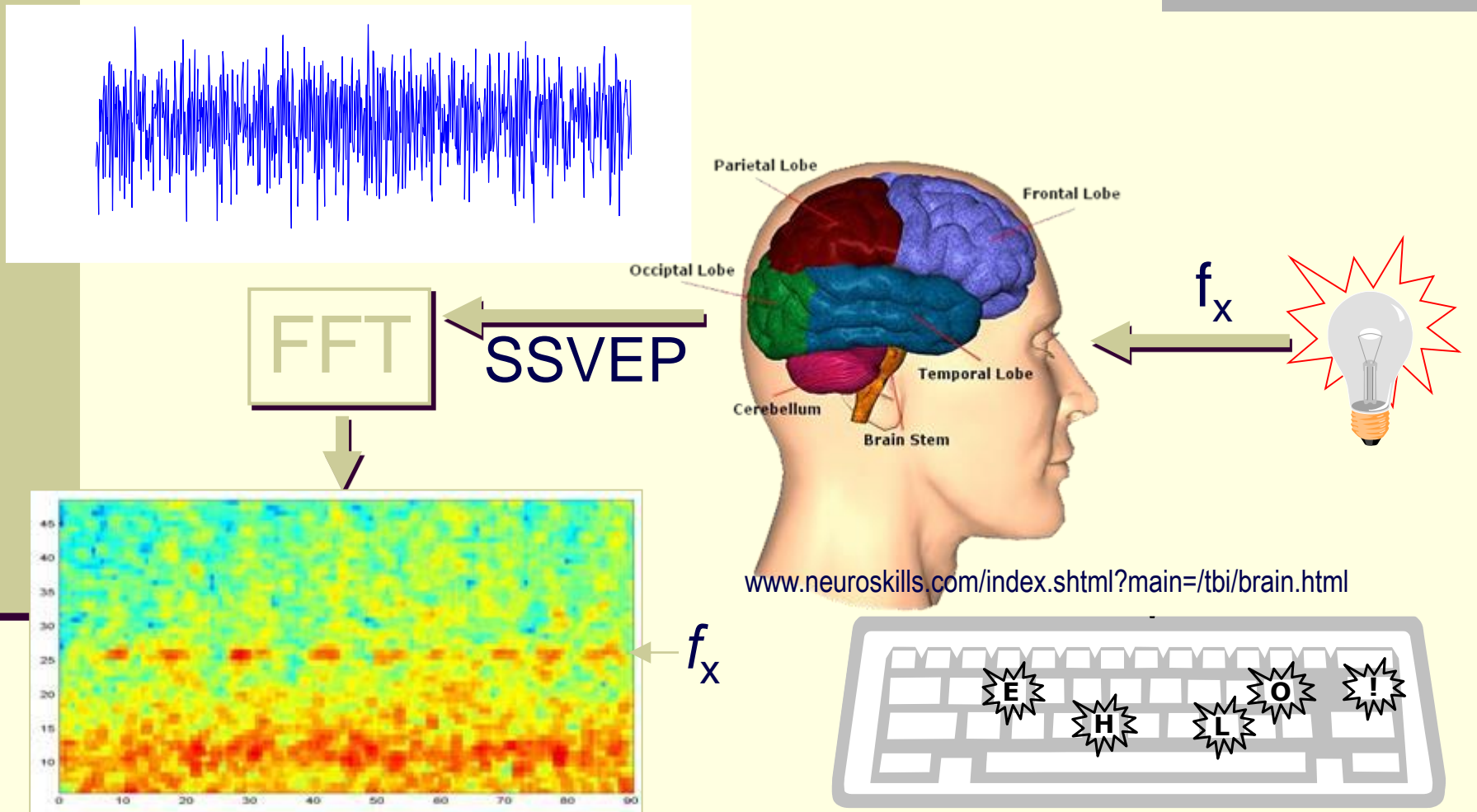


# Instytut Elektroniki

- ❑ Elektronika medyczna (przetwarzanie sygnałów i analiza obrazów), interfejsy człowiek-komputer
- ❑ Układy elektroniczne i termografia komputerowa
- ❑ Telekomunikacja



# Interfejs mózg-komputer





# Interfejs mózg-komputer



Czas rozpoznania:  
3-5 s



*dr Marcin Byczuk*

# Analiza sygnału EKG

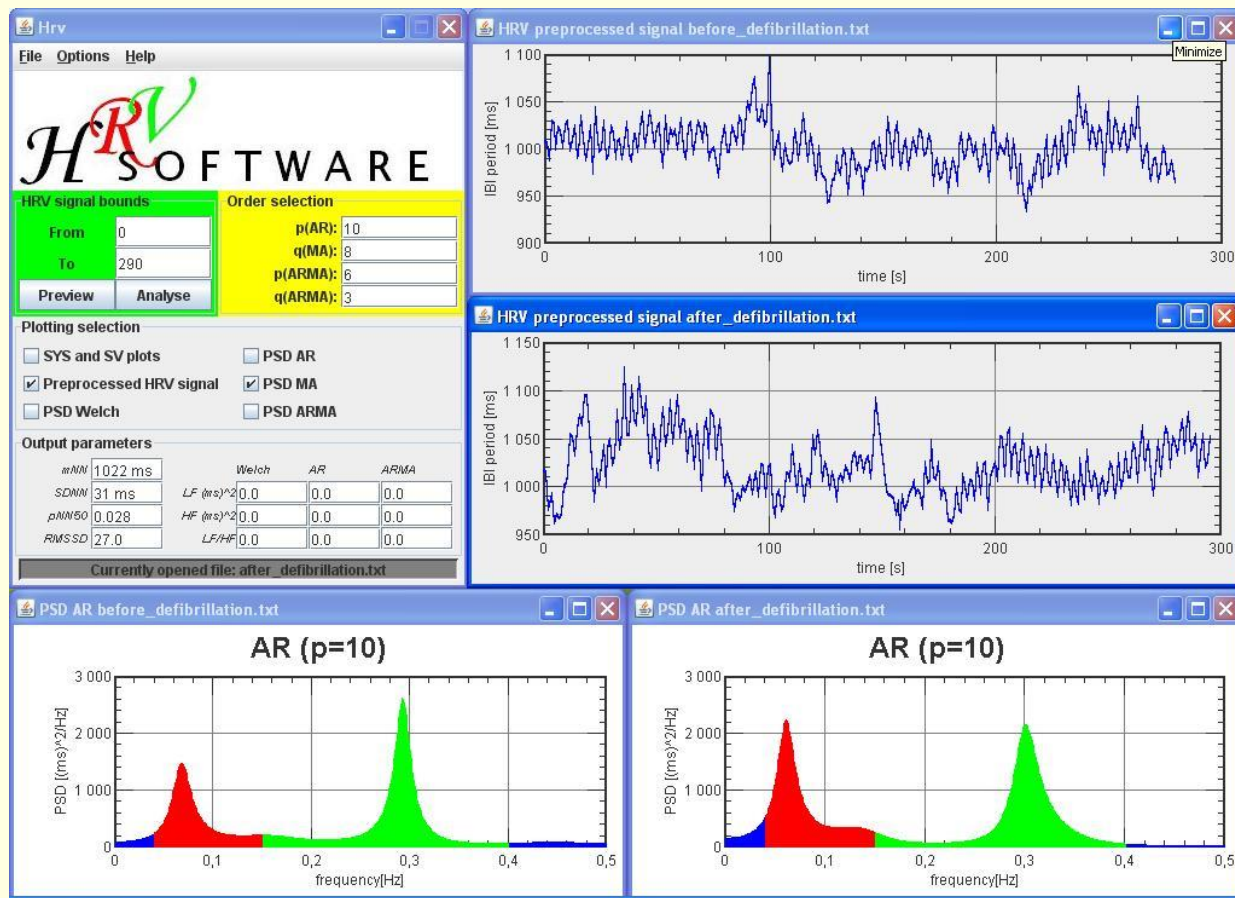
Dr Krzysztof Kudryński –

„HRV analysis”

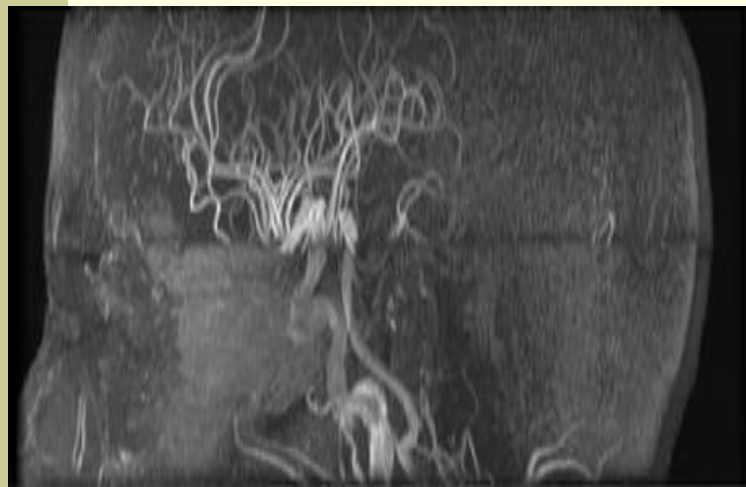
Praca dyplomowa

I miejsce w konkursie

SEP

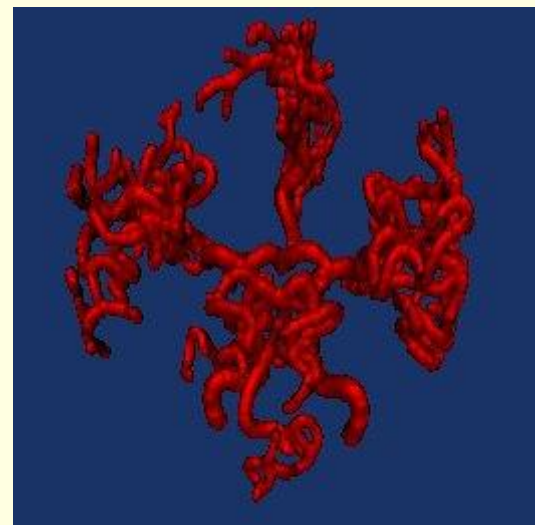
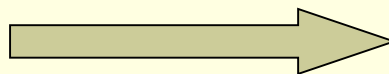


# Modelowanie naczyń krwionośnych



Rekonstrukcja  
trójwymiarowa obrazów  
tomograficznych MRI

Segmentacja  
obrazu

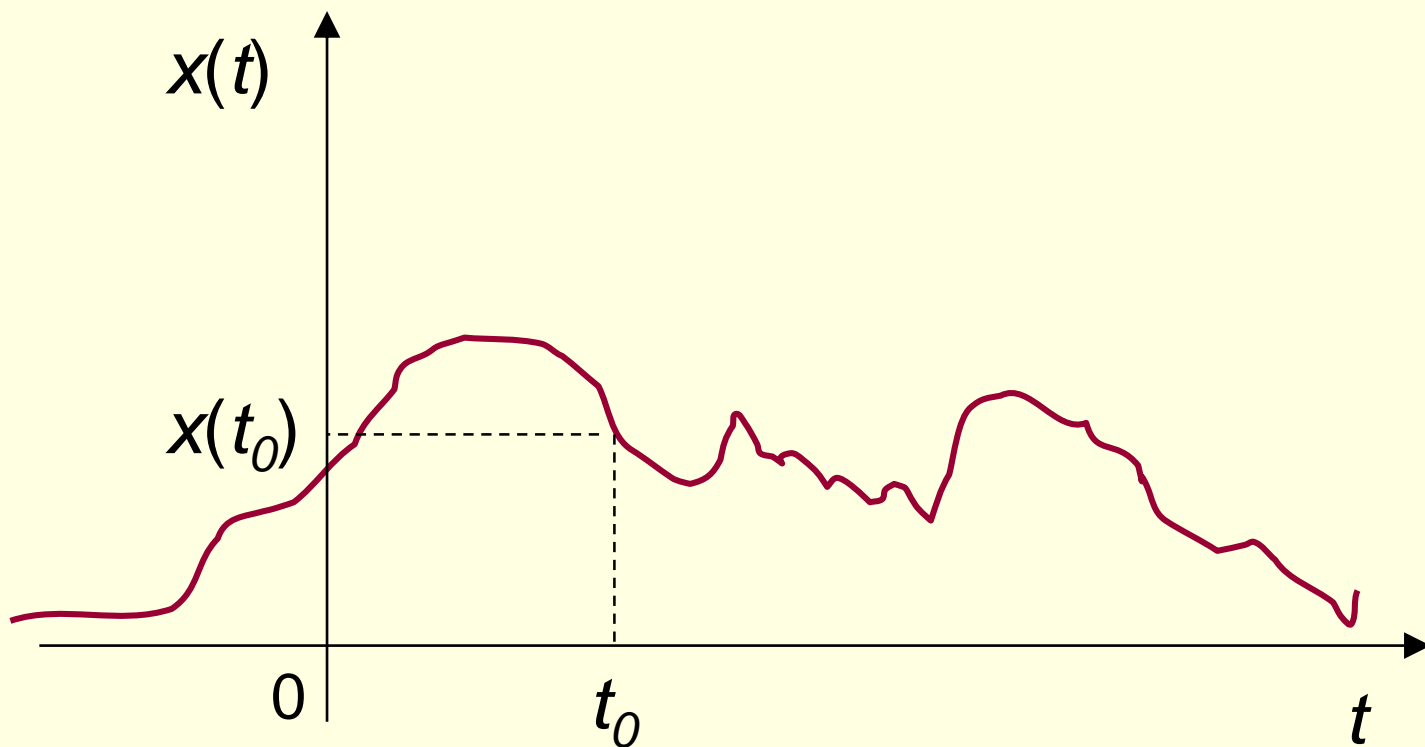


Model geometryczny  
naczyń

*mgr Marek Kociński*

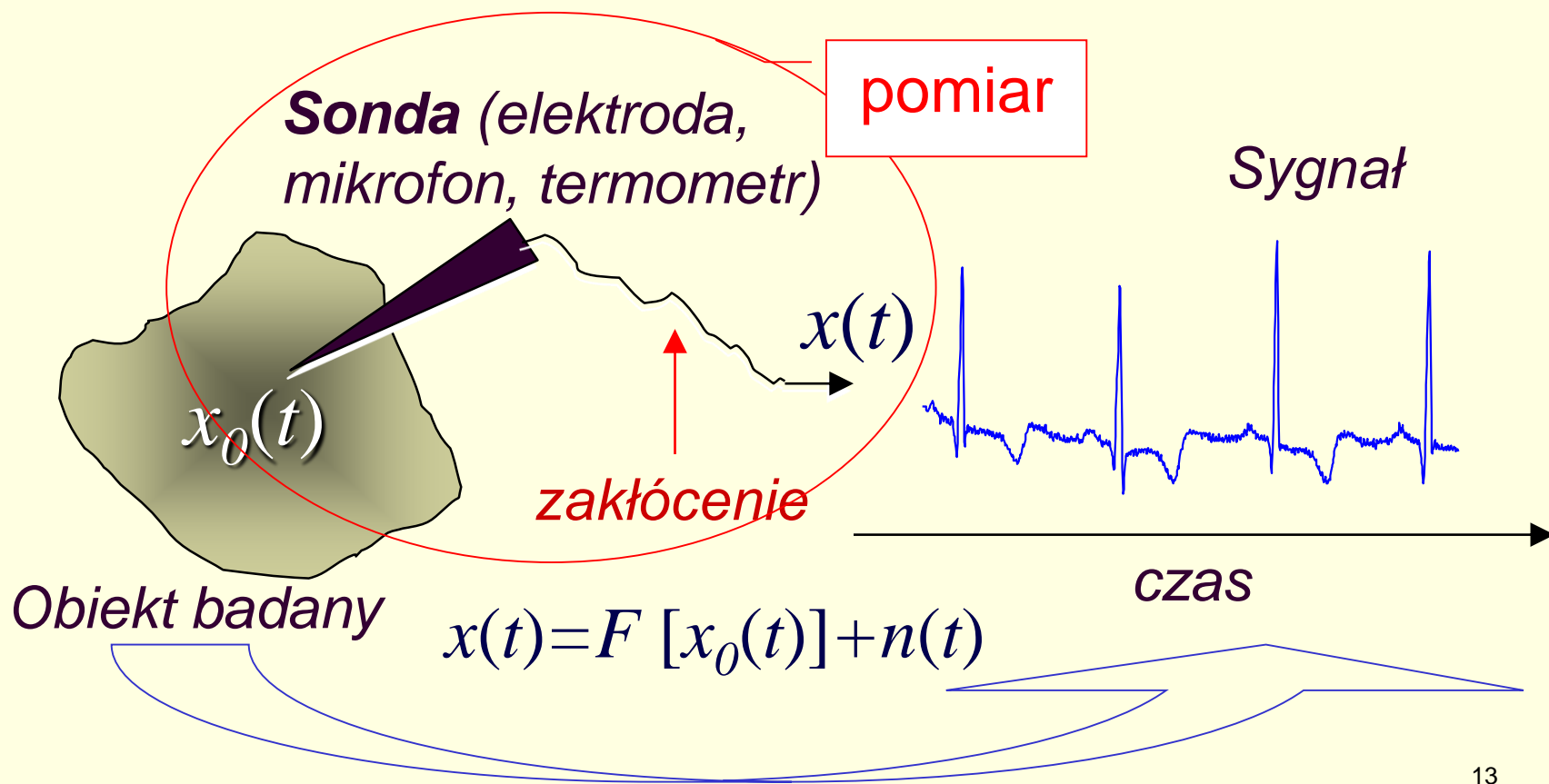
# Co to jest sygnał?

Funkcja czasu  $x(t)$  przenosząca informację o stanie lub działaniu układu (systemu), *która zwykle nie jest dana w postaci jawnej* → *potrzeba budowania modeli sygnałów*



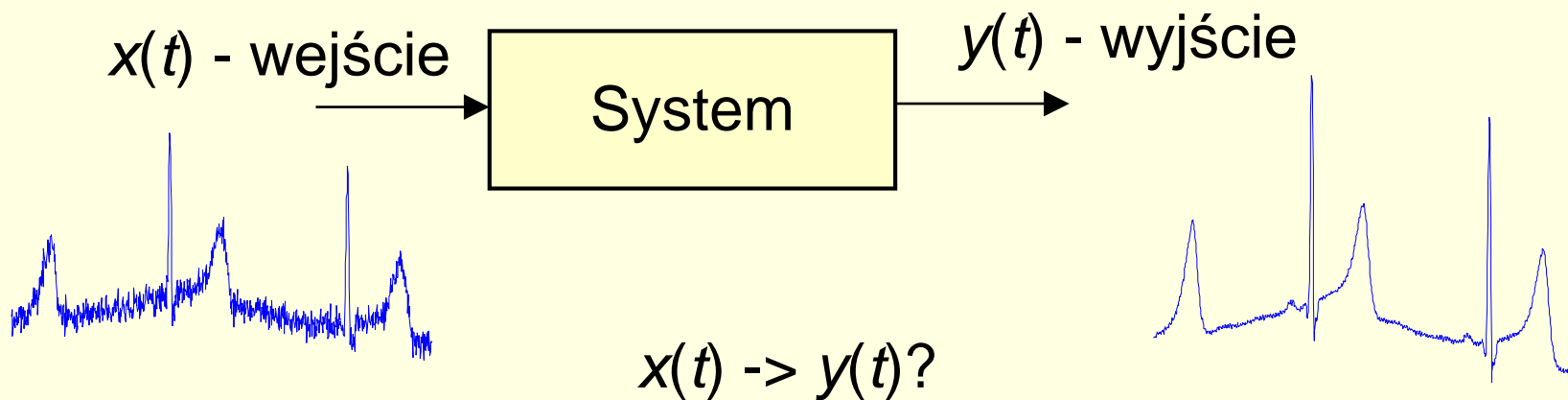
# Dlaczego analizujemy sygnały?

Rejestracja, przetwarzanie i analiza **sygnałów** są sposobami badania otaczającej nas rzeczywistości



# Systemy przetwarzania sygnałów

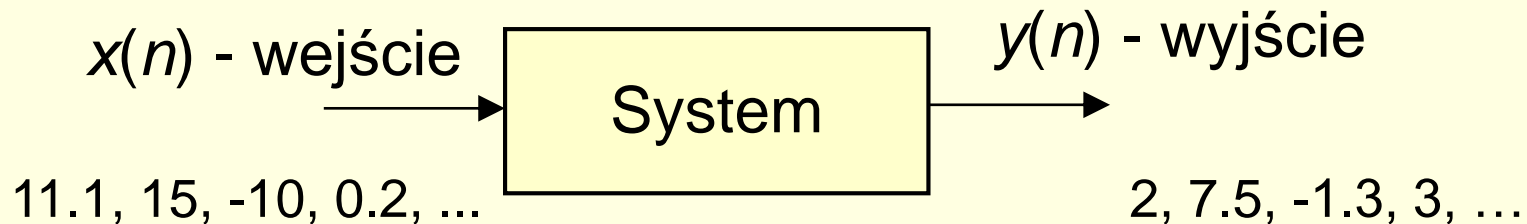
Do rejestracji, przetwarzania i analizy sygnałów potrzebujemy odpowiednich systemów.



Jak projektować systemy?

Mózg człowieka jest bardzo wydajnym systemem przetwarzania i analizy sygnałów oraz obrazów.

# Co to są sygnały dyskretne (czasu dyskretnego)?



## Problemy:

- Jak połączyć „świat analogowy” ze „światem cyfrowym”?
- Częstotliwość próbkowania?

**Uwaga:** Systemy przetwarzania sygnałów można realizować za pomocą programów komputerowych (ang. *software*) lub za pomocą odpowiedniego sprzętu (ang. *hardware*)

# Przykłady systemów i metod analizy sygnałów

## Przykładowe systemy:

- **echosonda, radar** – detekcja sygnałów
- **EKG, EEG, USG** – diagnoza medyczna
- **Interfejs człowiek-komputer** – analiza i kodowanie sygnału mowy, wyrazu twarzy i gestów rąk

## Przykładowe metody analizy i przetwarzania:

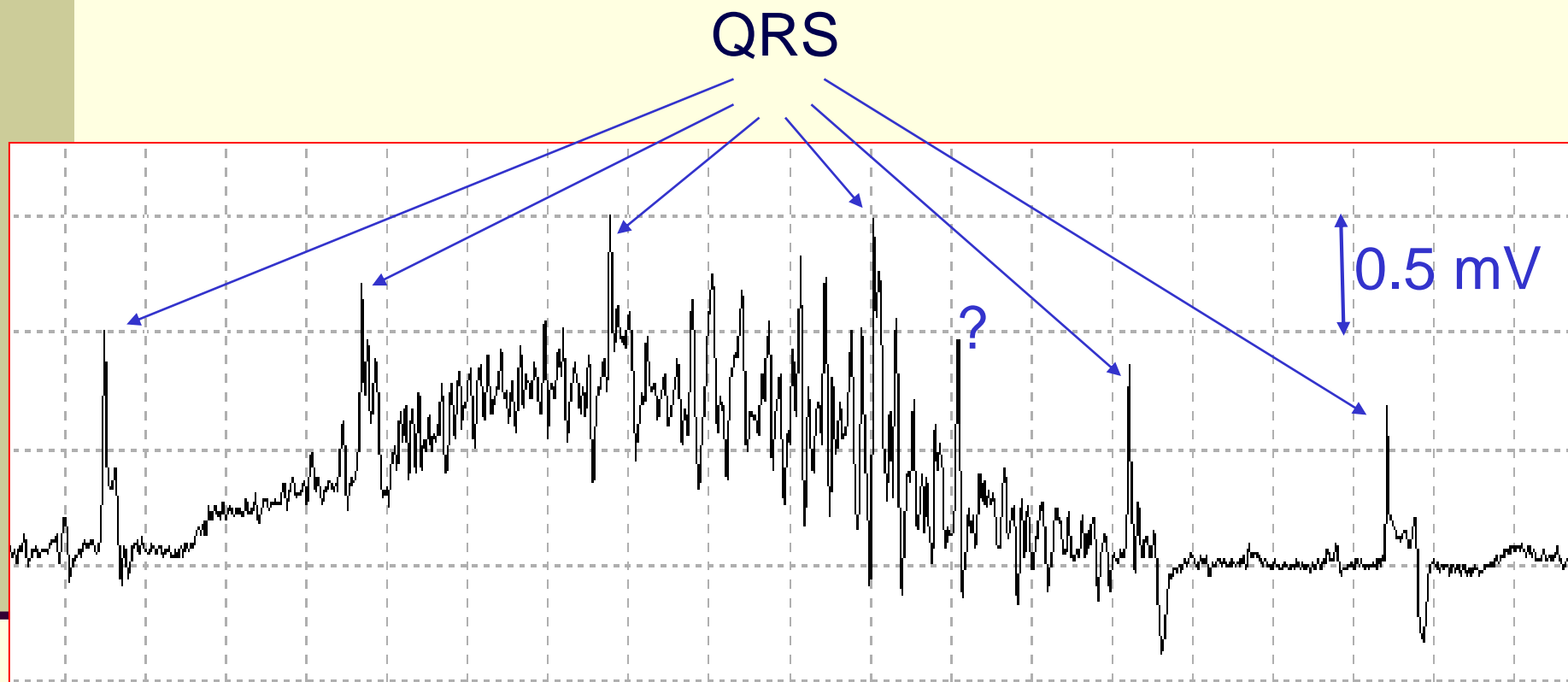
- redukcja zakłóceń (filtracja cyfrowa)
- detekcja i analiza ilościowa sygnałów w dziedzinie czasu
- analiza sygnałów w dziedzinie widma Fouriera (aplikacja *Advanced Spectrum Analyzer for Android*)
- kompresja sygnałów (JPG, MPEG, MP3)



# Problemy rejestracji i analizy sygnałów biologicznych

- **różna postać sygnałów** → konieczne stosowanie różnorodnych czujników
- **mała amplituda (nieinwazyjny pomiar)** → konieczne wzmocnienie (EEG  $\sim \mu\text{V}$ , EKG  $\sim 1 \text{ mV}$ )
- **zakłócenia** → konieczna ich redukcja
- **kosztowna rejestracja** → konieczna wysoka jakość aparatury pomiarowej oraz możliwość zapamiętania sygnałów
- **duża ilość rejestrowanych sygnałów** → konieczne oszczędne sposoby ich przechowywania
- **informacja diagnostyczna „ukryta” w cechach sygnału niewidocznych „gołym okiem”**  
→ konieczne zaawansowane metody analizy

# Problemy rejestracji i analizy sygnałów biologicznych



**Przykład zakłóconego sygnału EKG z bazy MIT/BIH #104**

# Klasyfikacja sygnałów biologicznych wg ich źródła

---

- **bioelektryczne** (EKG, EEG, EMG, ...)
- **bioimpedancyjne** (pomiar impedancji tkanek)
- **bioakustyczne** (głos, tony serca, ...)
- **biomaganetyczne** (pomiar pola magnetycznego wytwarzanego przez narządy wewnętrzne, np. mózg, serce, płuca)
- **biomechaniczne** (diagnoza narządu ruchu, mechaniczna czynność serca, ...)
- **biooptyczne** (np. oksymetria)
- **inne** (np. spirometria, ...)

# Sygnały biomedyczne

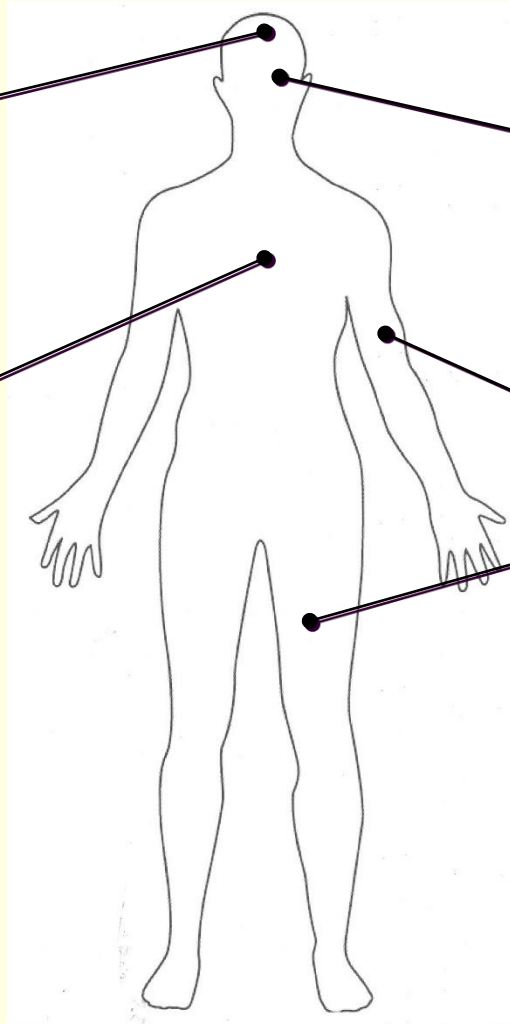
## Bioelektryczne

EEG  
(nervous  
system)

EOG  
(ocular  
system)

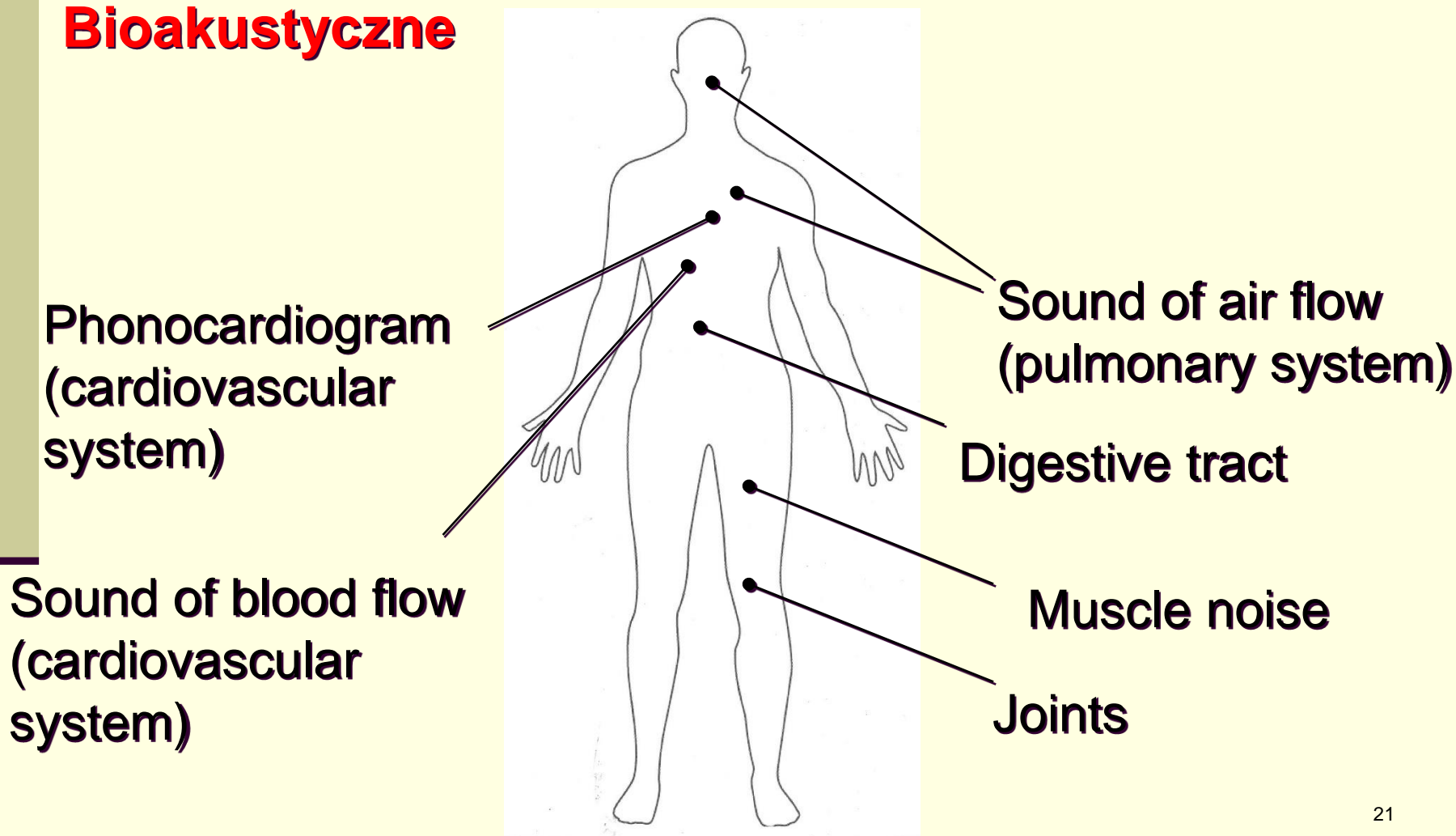
ECG  
(cardiovascular  
system)

EMG  
(muscular  
system)



# Sygnały biomedyczne

## Bioakustyczne

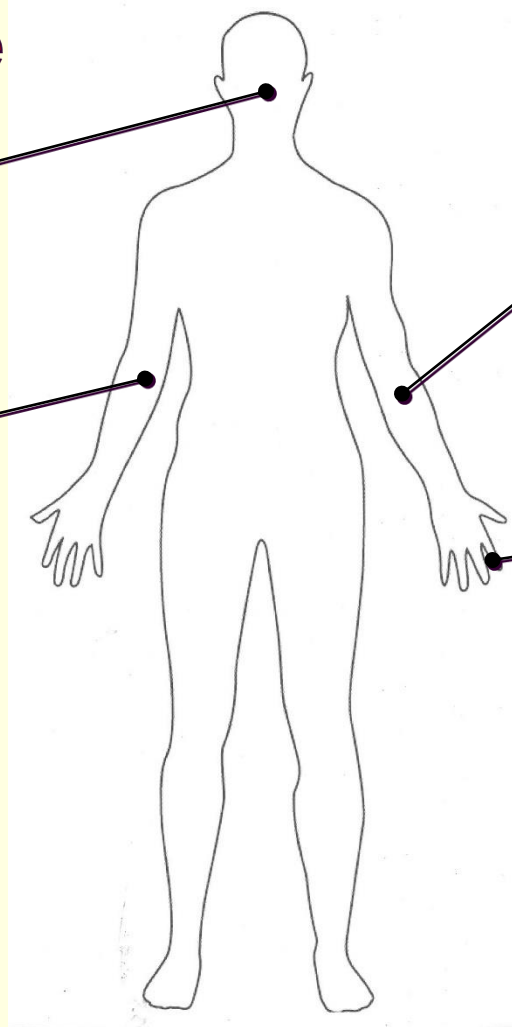


# Sygnały biomedyczne

## Biomechaniczne

Air flow  
(pulmonary  
system)

Blood flow  
(cardiovascular  
system)

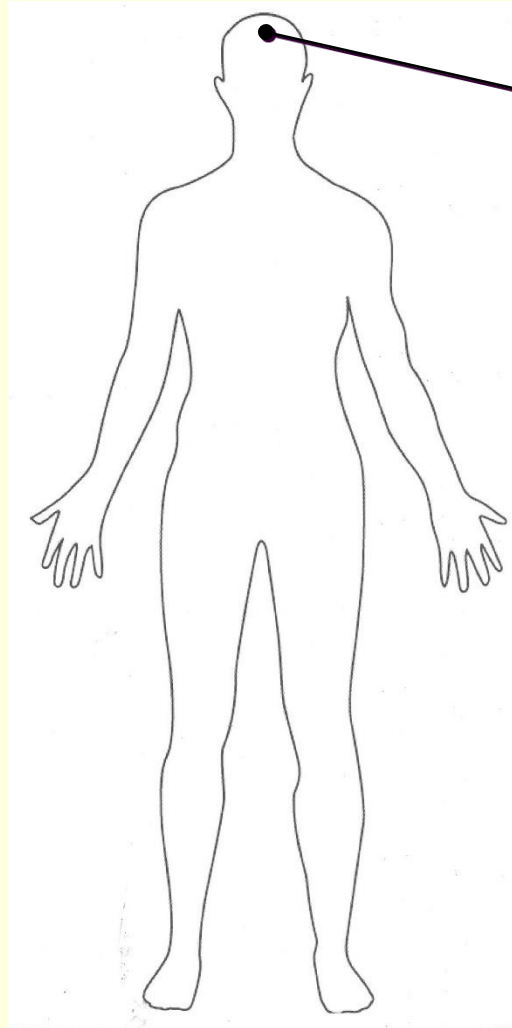


Blood  
pressure  
(cardiovascular  
system)

Pulse rate  
(cardiovascular  
system)

# Sygnały biomedyczne

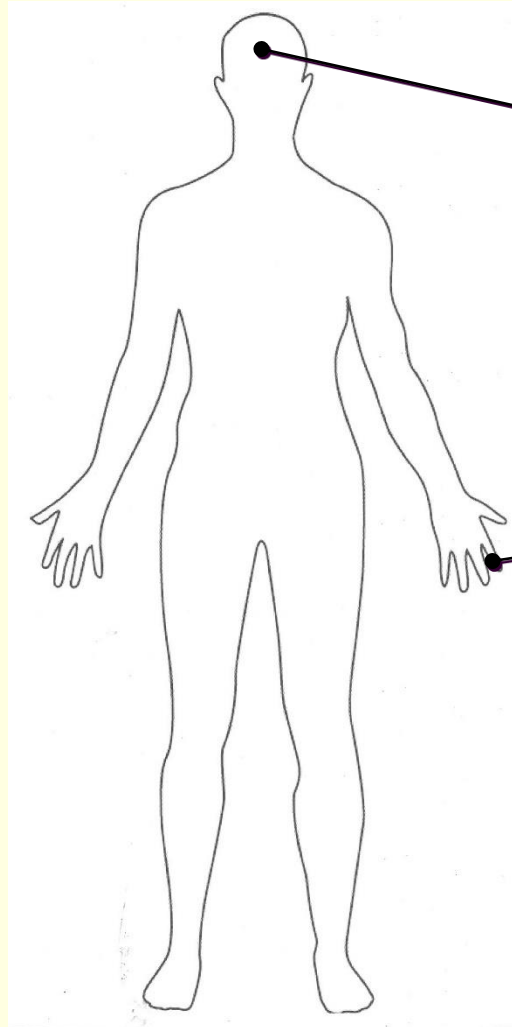
**Biomagnetyczne**



**MEG  
(nervous  
system)**

# Sygnały biomedyczne

## Bioptyczne



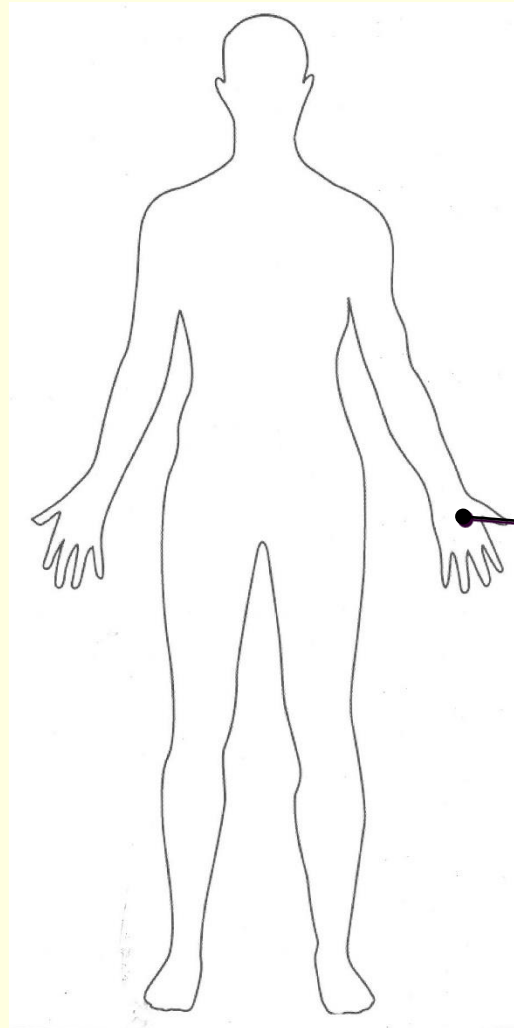
functional-near-infrared spectroscopy (fNIRS)

Pulse oximetry  
(pulmonary system)



# Sygnały biomedyczne

## Bioimpedancyjne

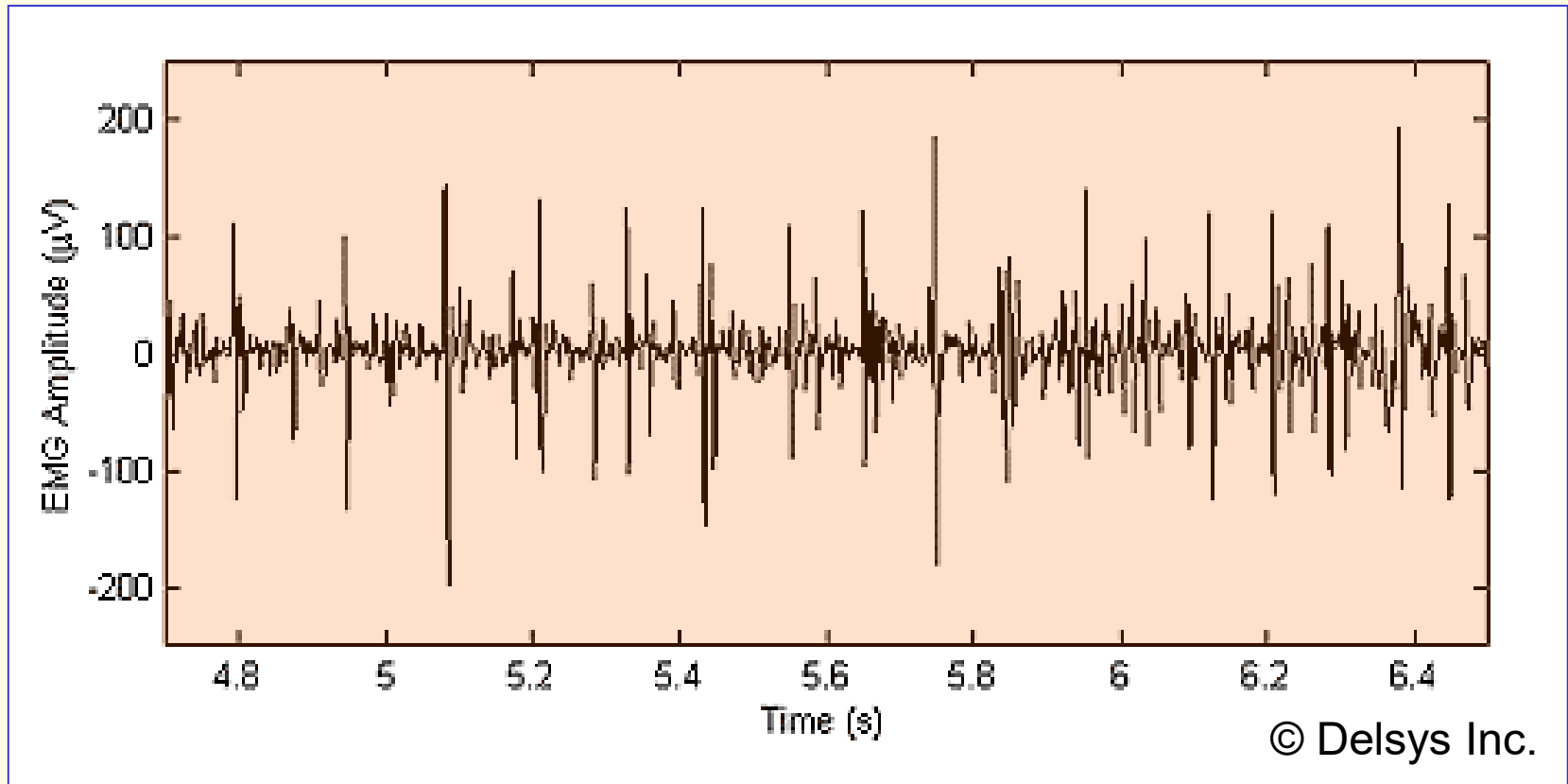


**Galvanic  
skin  
response  
(GSR)**

# Przykłady sygnałów biologicznych

Rodzaj sygnału	Pasmo częstotliwości	Zakres amplitud
EKG	0.05 – 100 Hz	10 $\mu$ mV – 5 mV
EEG	0.5 – 60 Hz	15 - 100 $\mu$ V
EMG	10 – 200 Hz	zależny od elektrod (kilka mV)
Ciśnienie krwi	DC – 60 Hz	40-300 mm Hg (tętnice) 0 - 15 mm Hg (żyły)
Częstość oddechu	14 – 40 cykli na minutę	-

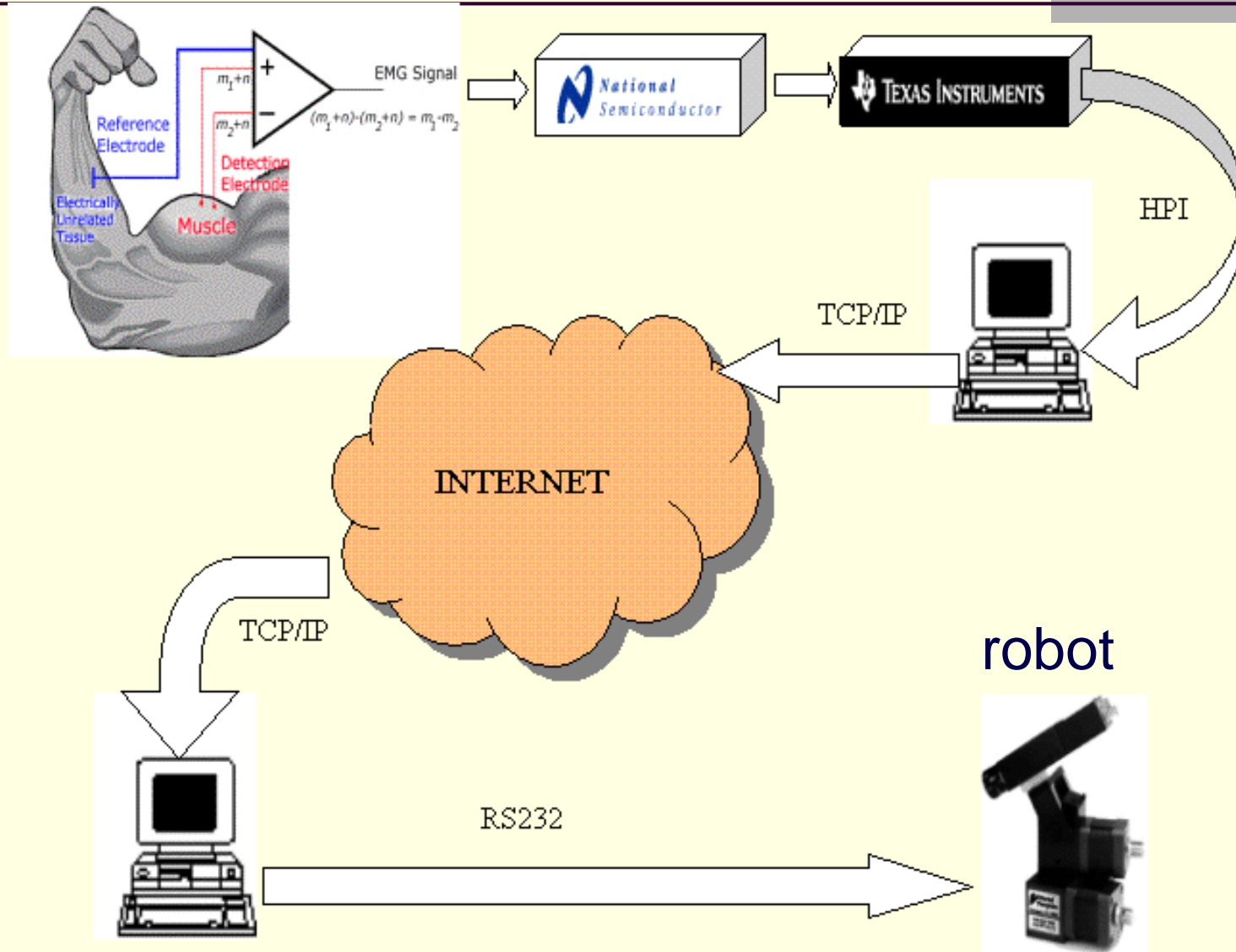
# Przykłady sygnałów biologicznych



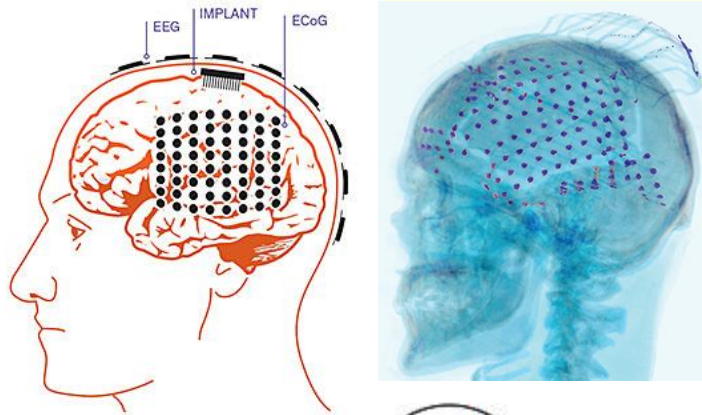
**Przykładowy przebieg EMG w czasie skurczu mięśnia**

# Zastosowanie systemu rejestracji i analizy sygnału EMG

© <http://www.me.berkeley.edu/>



# Interfejs człowiek-robot



„Combining brain commands with information from other sensors may provide more sophisticated control of a robotic limb.”

IEEE Spectrum

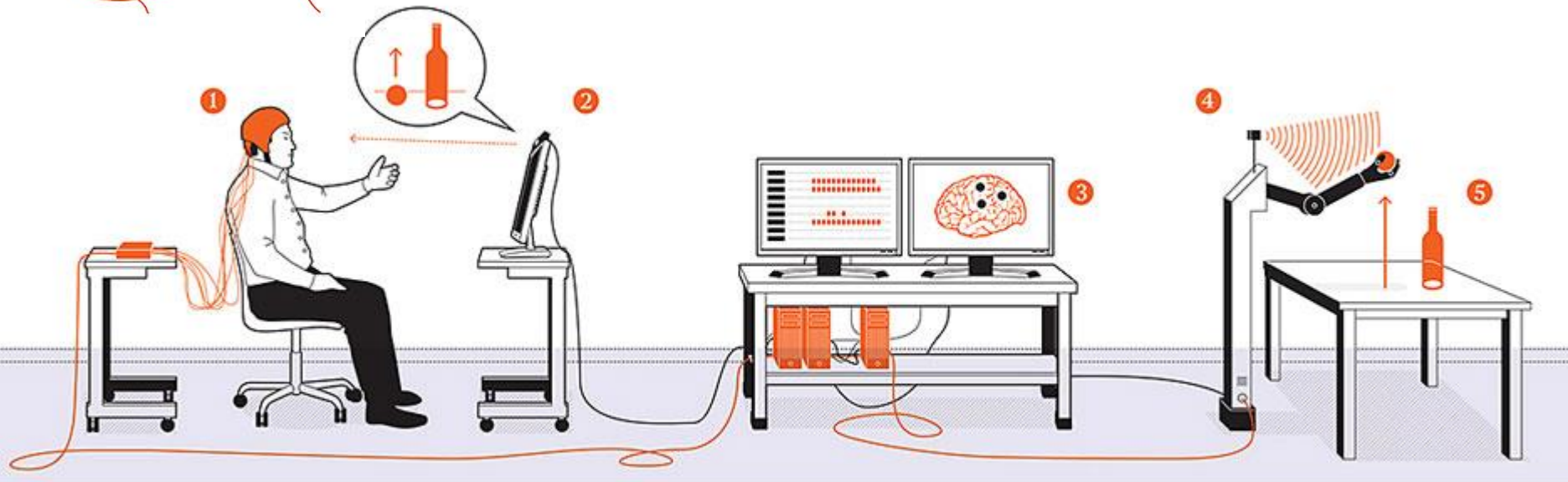
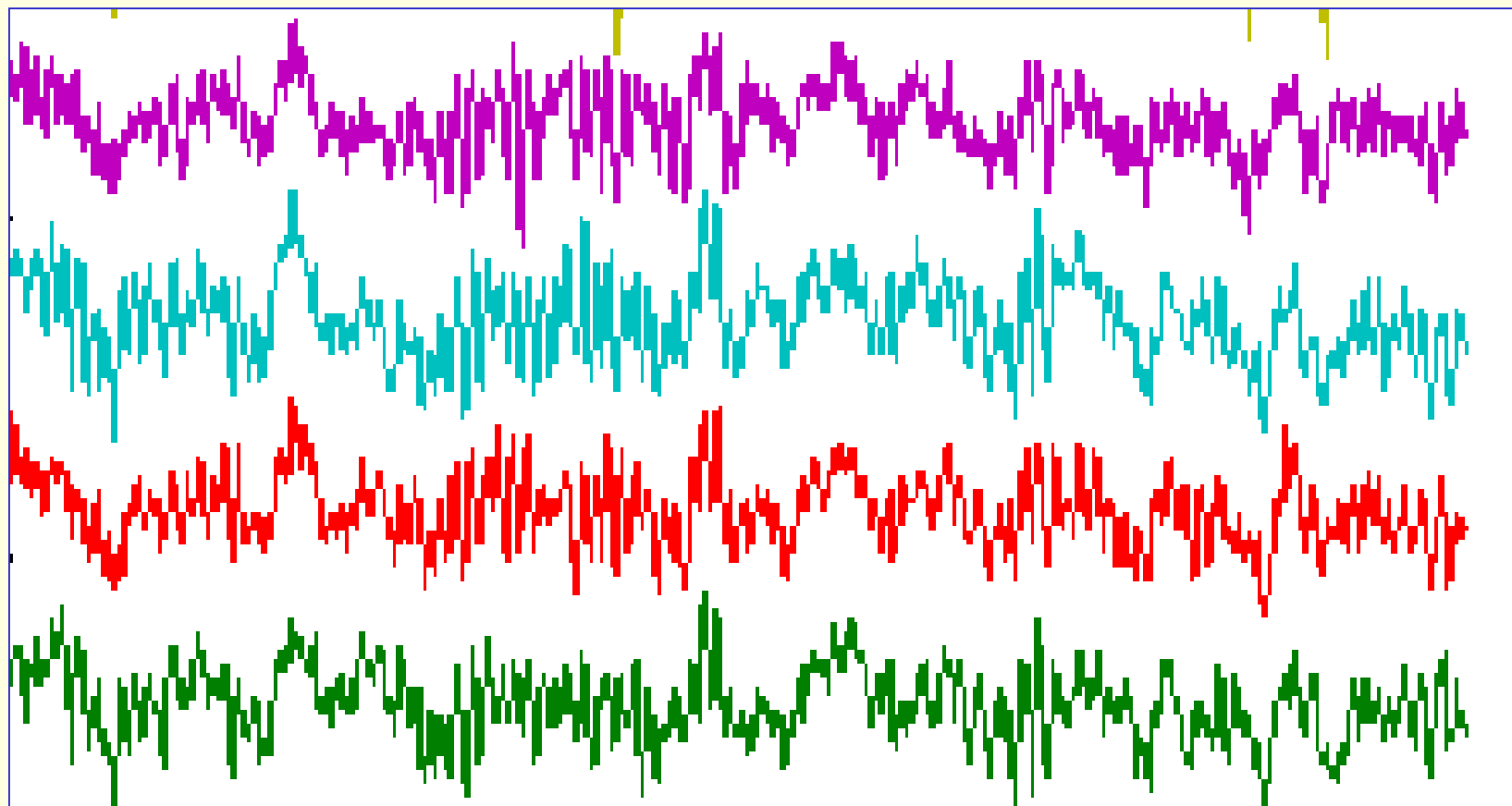


Illustration: Nicolas Rapp

# Przykładowy sygnał EEG

Amplituda: 1-10  $\mu\text{V}$ , Pasmo: 0.15 - 300 Hz



# HealthWatch

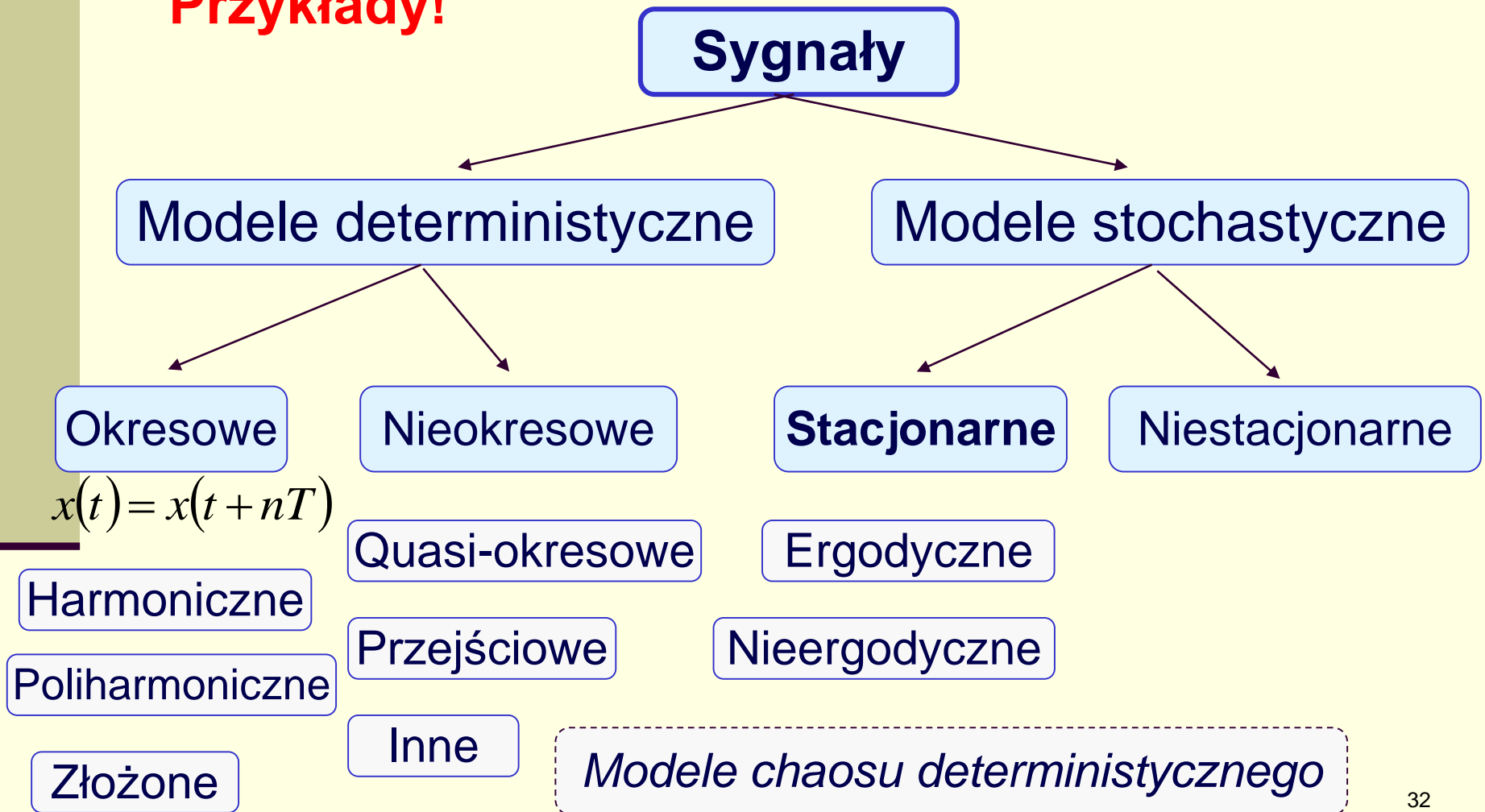
---



<https://www.youtube.com/watch?v=4k4NUsFZWNE>

# Modele sygnałów

**Przykłady!**





# Modele sygnałów

**Przykłady!**

**Sygnały**

O skończonej/nieskończonej energii:

$$E[x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} [x(t)]^2 dt$$

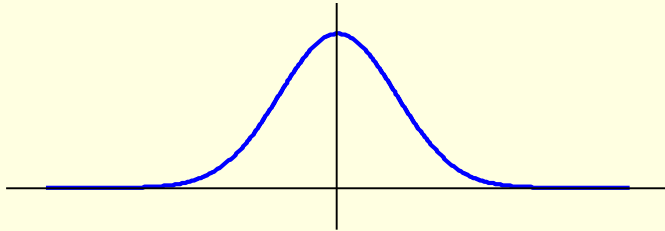
**Moc sygnału?**

**Wartość skuteczna?**

O skończonym/nieskończonym czasie trwania:

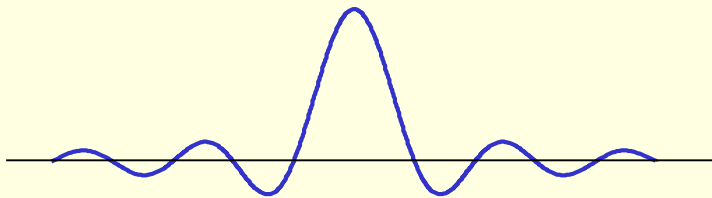
**Przykłady?**

# Modele sygnałów (o nieskończonym czasie trwania i o skończonej energii)



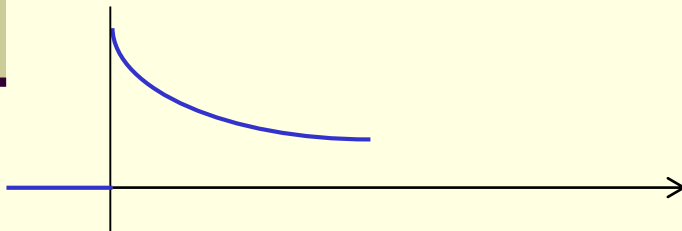
*sygnał Gaussa*

$$x(t) = e^{-t^2}$$



*sygnał sinc*

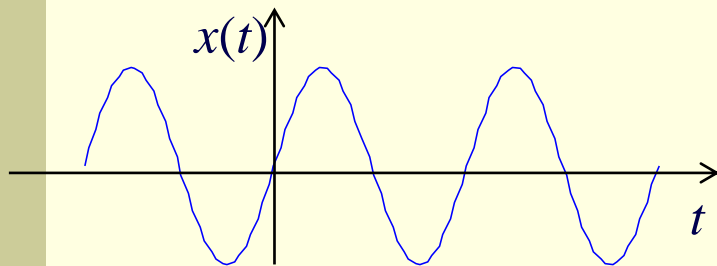
$$x(t) = \begin{cases} \frac{\sin t}{t} & \text{dla } t \neq 0 \\ 1 & \text{dla } t = 0 \end{cases}$$



*sygnał wykładniczy*

$$x(t) = Ae^{-\alpha t}, \quad t \geq 0$$

# Sygnał sinusoidalny

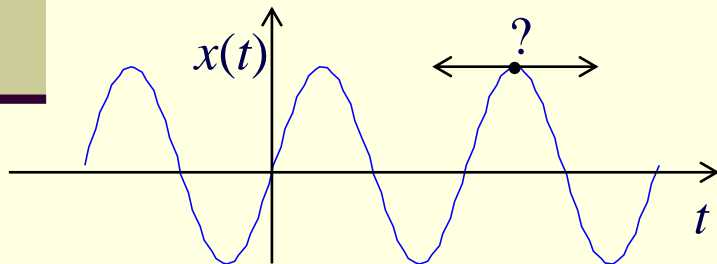


Częstotliwość  
kątowna [rad/s]

$$x(t) = \sin(\omega t) = \sin(2\pi f t) = \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right)$$

Częstotliwość  
fizyczna [Hz]

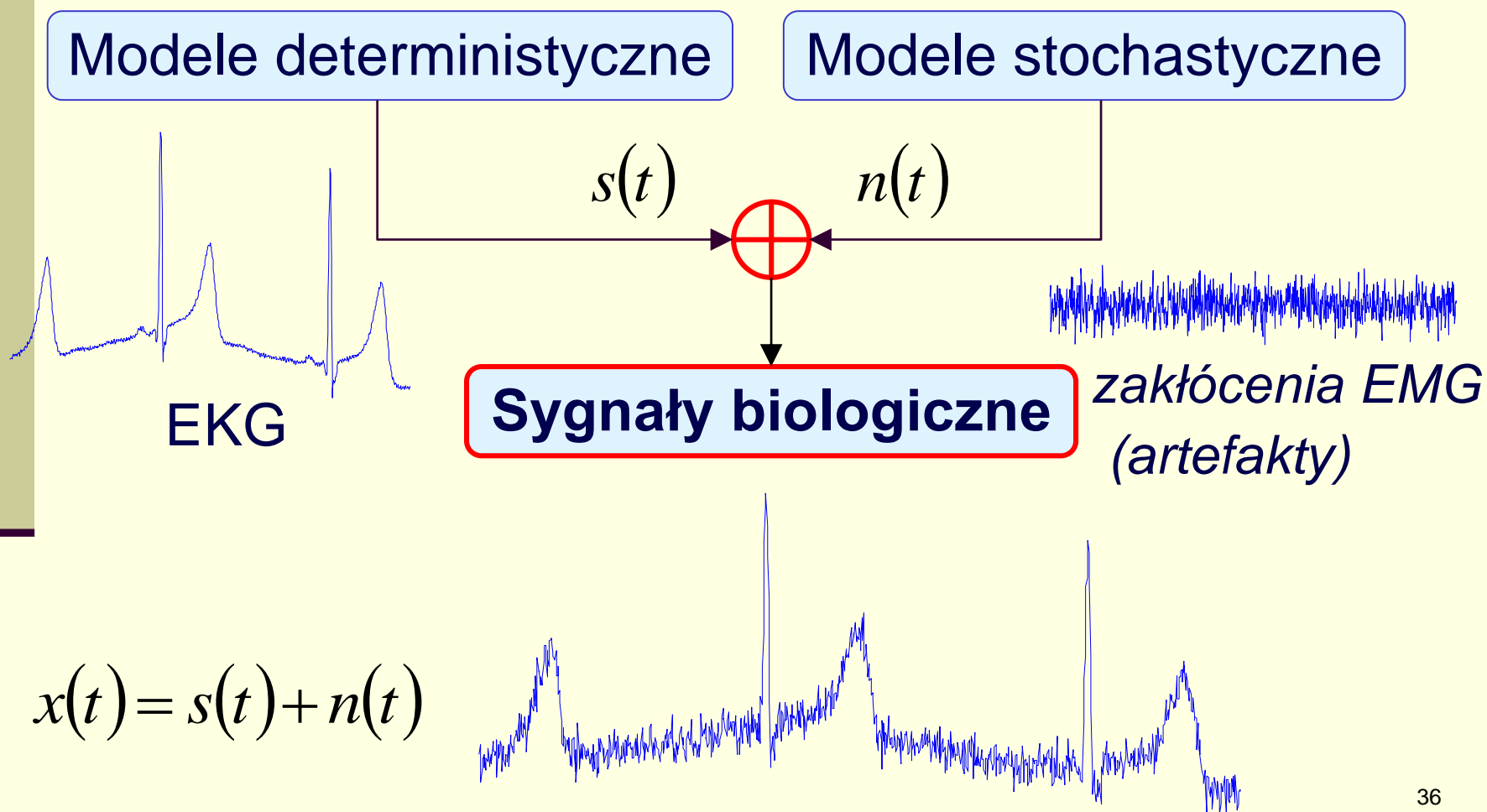
Okres [s]



$$x(t) = \sin(\omega t + \varphi) \Rightarrow x(0) = \sin(\varphi)$$

faza [rad]

# Sygnały biologiczne



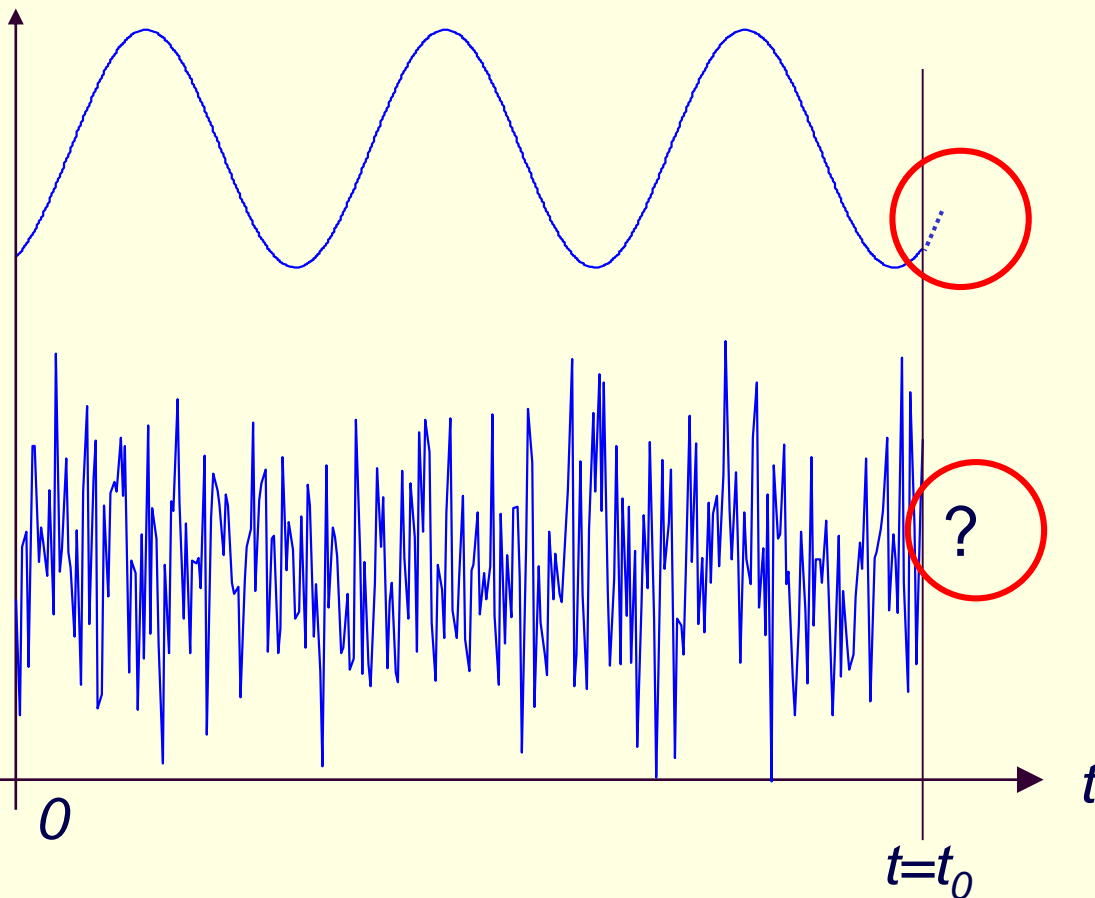
# Sygnał losowy a sygnał stochastyczny

## **sygnał deterministyczny**

(próbki można przewidywać z dużą dokładnością)

## **sygnał losowy**

(niemożliwe przewidywanie wartości próbek sygnału, można tylko określić zadane parametry sygnału)

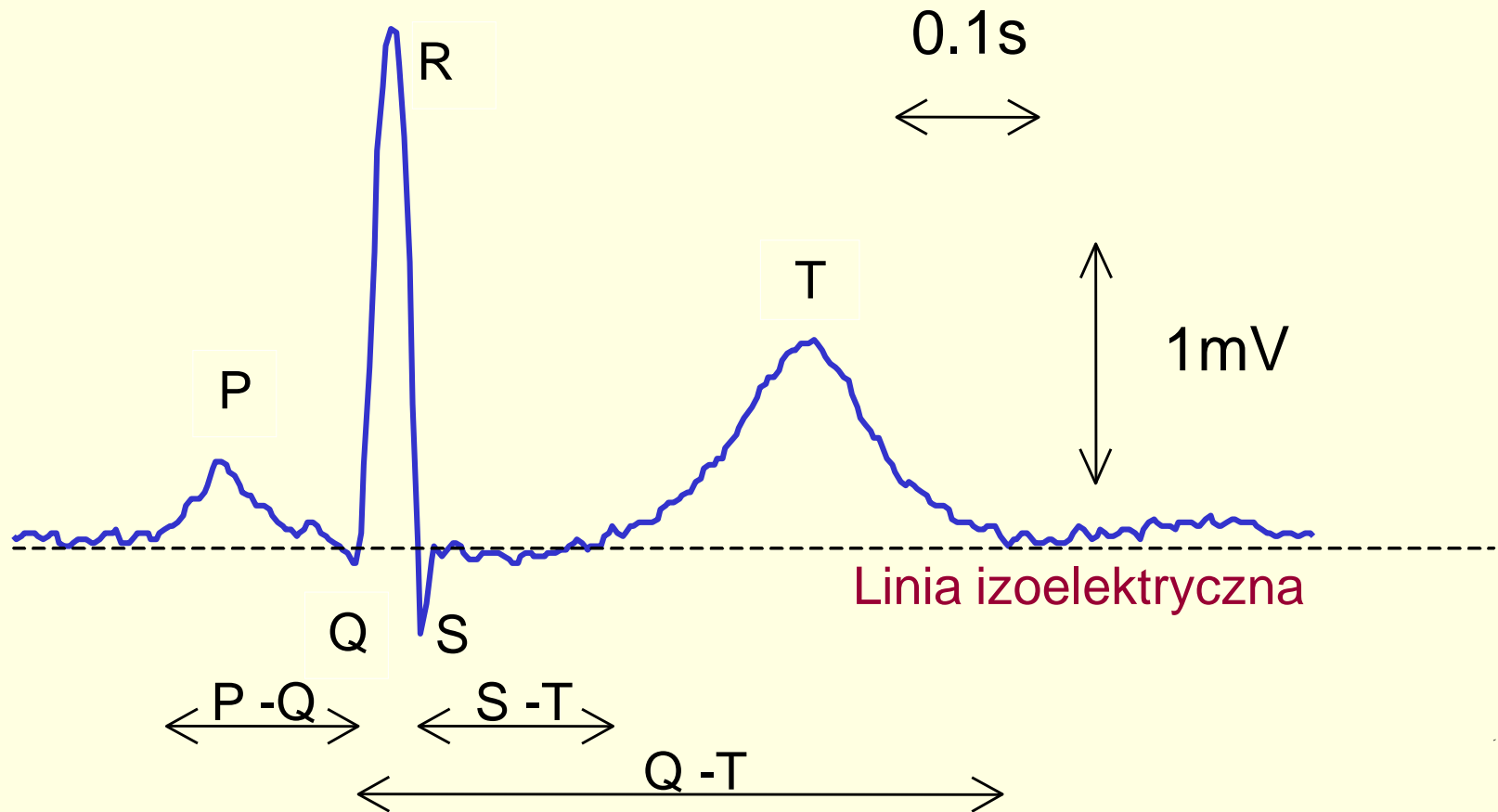


# Metody analizy sygnałów

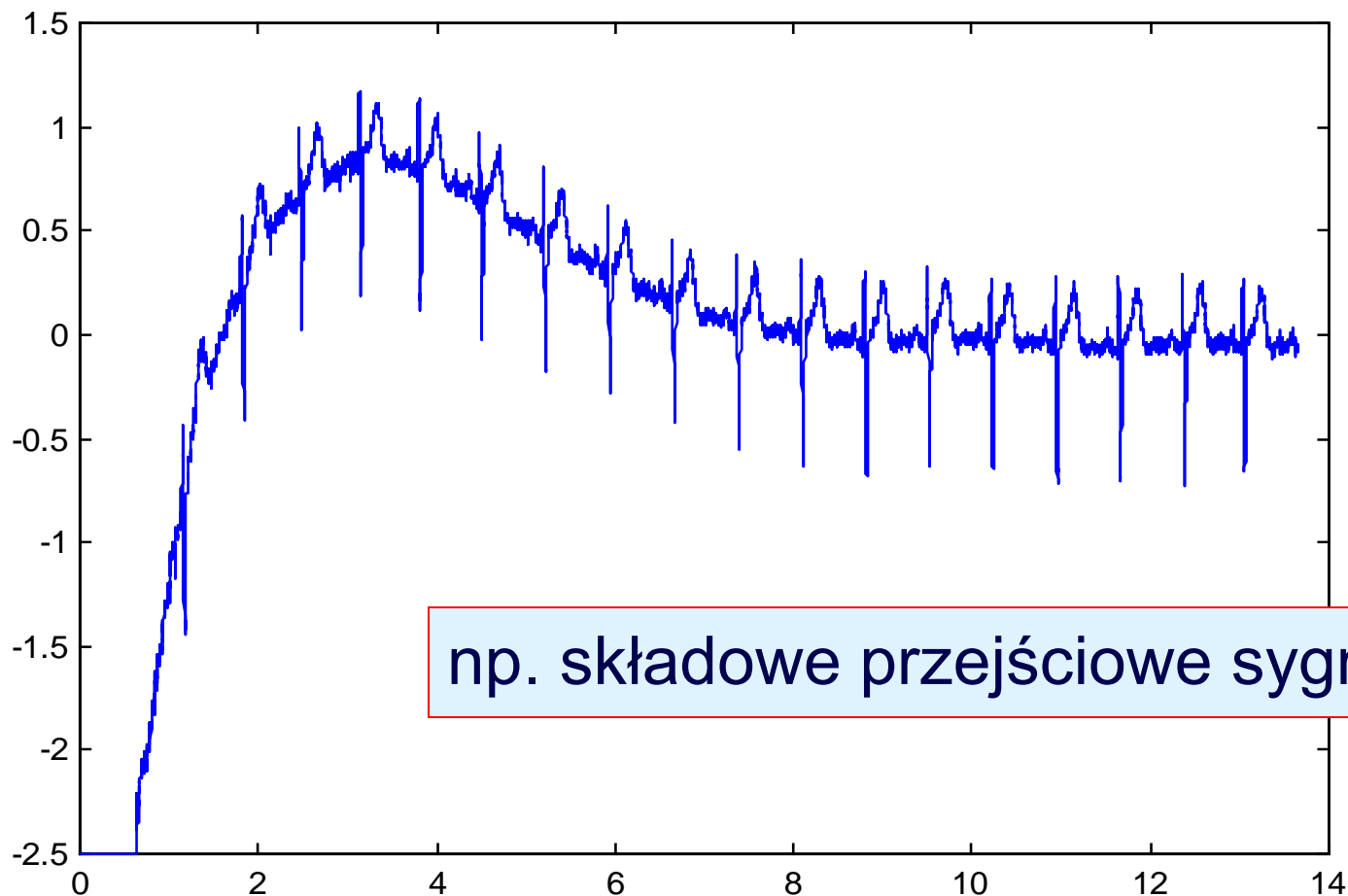
---

- **analiza czasowa** (detekcja i badanie cech sygnału w dziedzinie czasu)
- **analiza statystyczna** (modele losowe, analiza korelacyjna)
- **analiza widmowa** (badanie właściwości sygnału w dziedzinie częstotliwości – przekształcenie Fouriera)

# Analiza czasowa

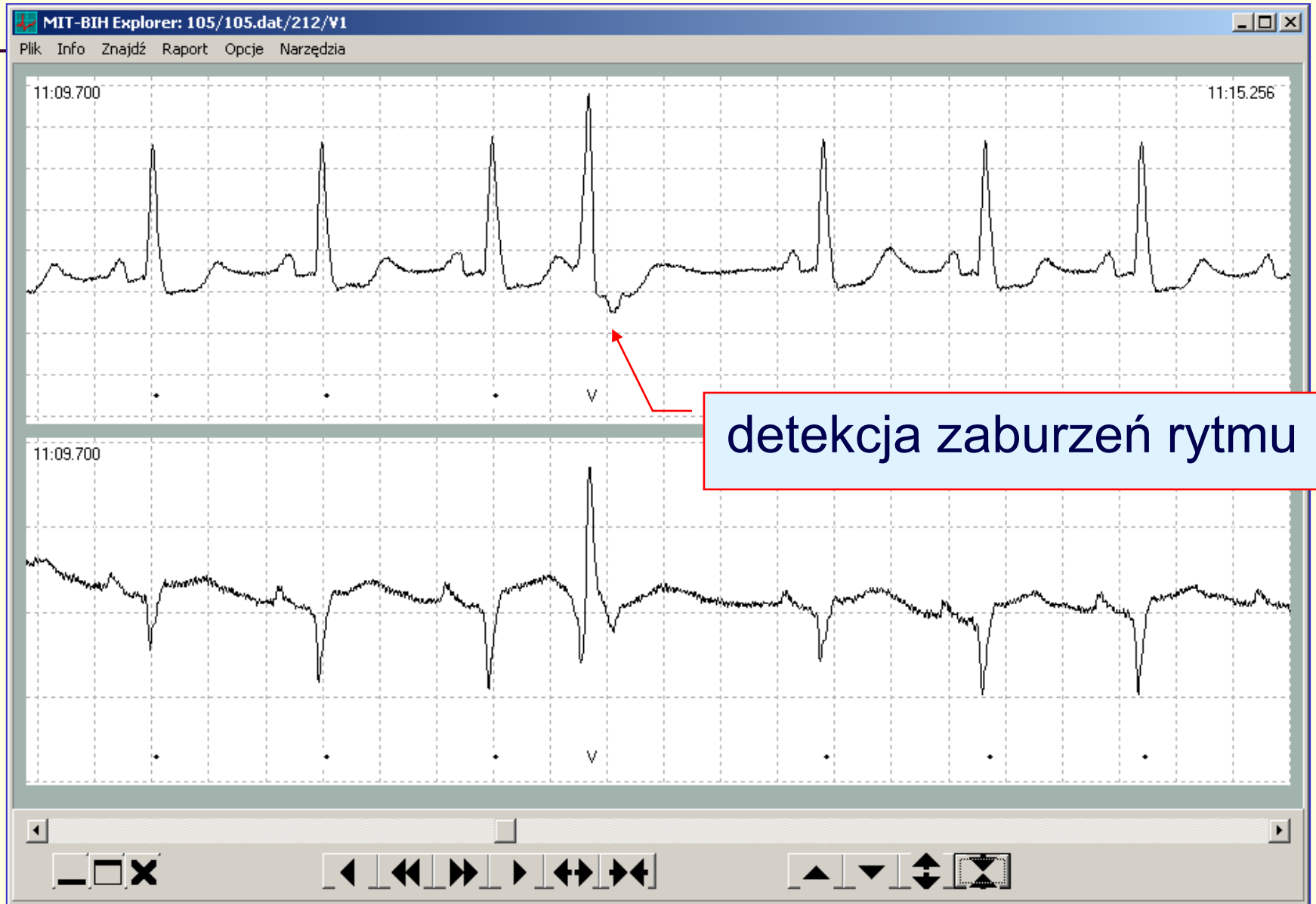


# Analiza czasowa

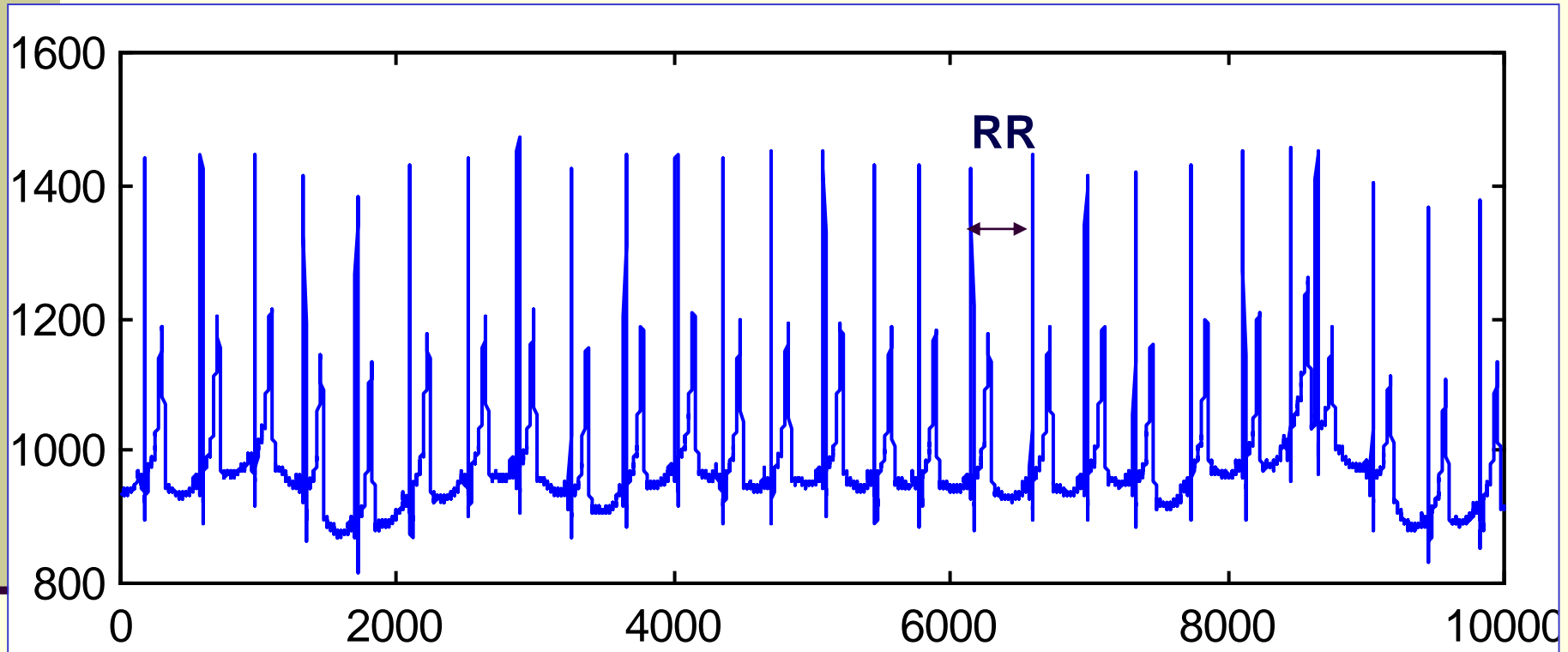




# Analiza czasowa



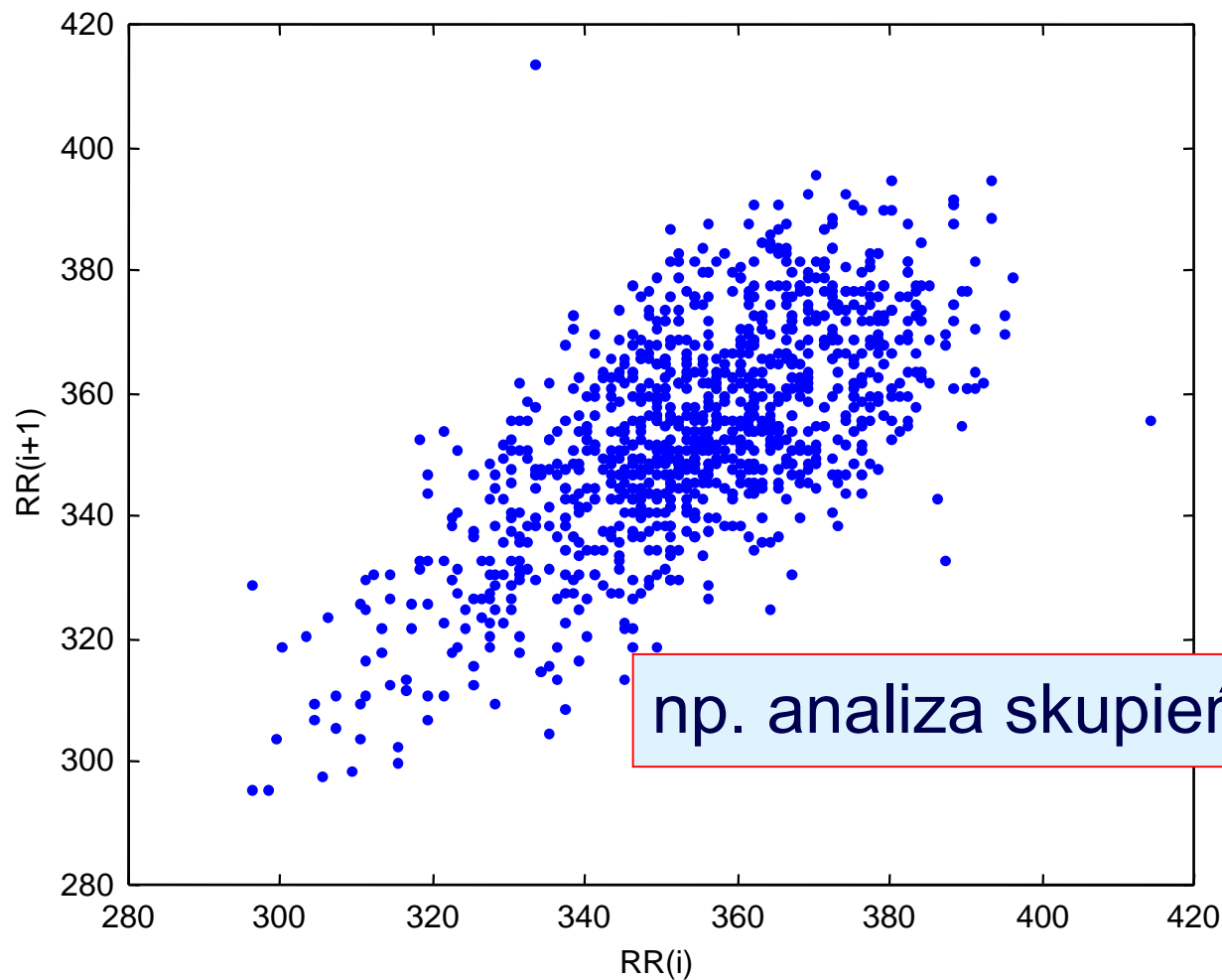
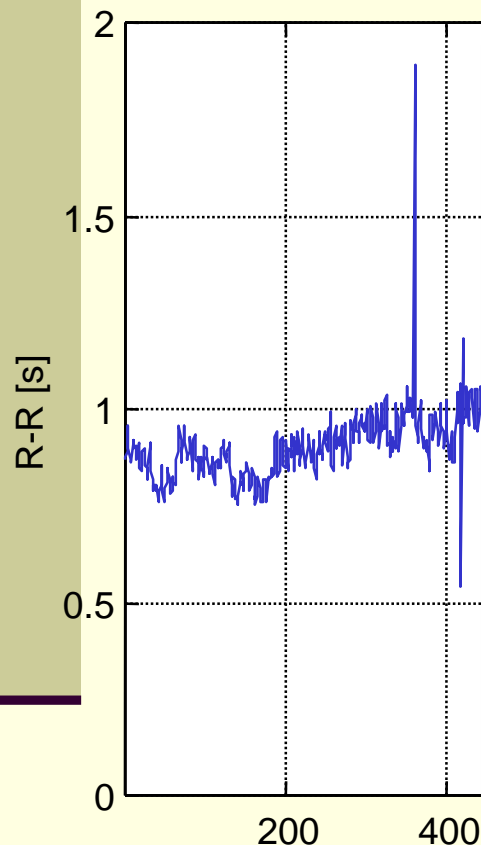
# Analiza statystyczna



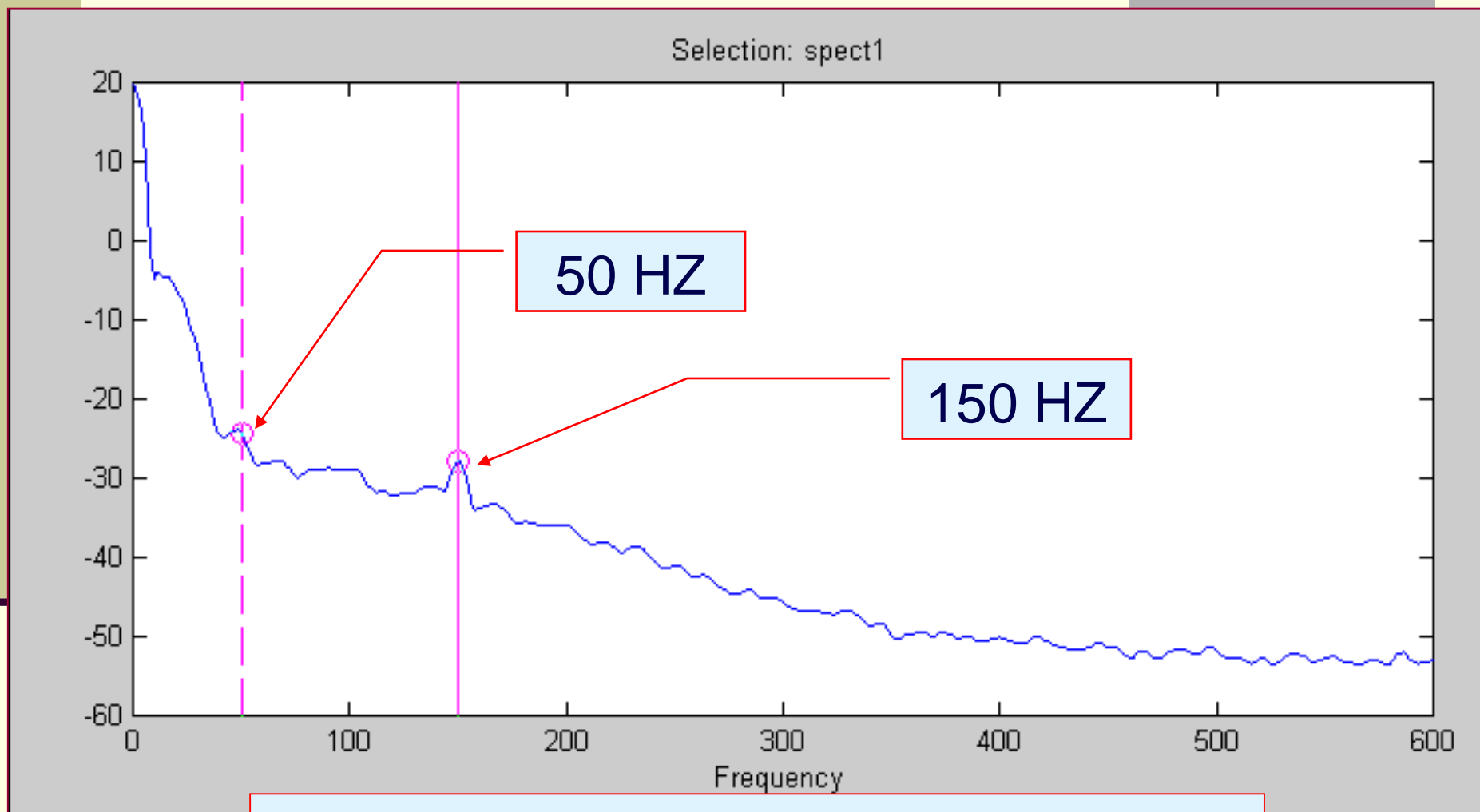
np. analiza szeregu czasowego  $RR_i$

# Analiza statystyczna

Baza danych MIT-BIH zapis nr 101



# Analiza widmowa



Gęstość widmowa mocy sygnału EKG

# Skala logarytmiczna

**Decybel** jest jednostką logarytmiczną definiującą stosunek mocy dwóch sygnałów w tzw. skali decybelowej:

(*Graham **Bell** - wynalazca telefonu w 1876 r).*

$$\left( \frac{P}{P_0} \right) \Big|_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{P}{P_0} \right) [dB]$$

m.in. skala wykorzystywana do określania wzmocnienia wzmacniaczy elektronicznych i do określania poziomu hałasu (moc progu słyszenia  $P_0=10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>)

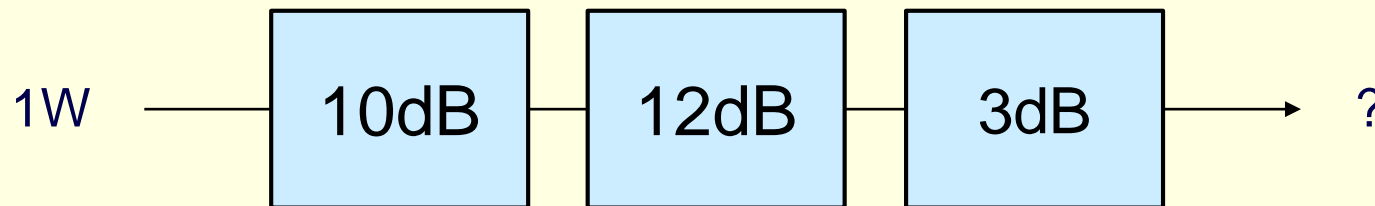
$P_0/P_i$	$P_0/P_i$ [dB]
1	0
1,26	1
2	3
10	10
100	?
$10^6$	?
1/2	?

# Przykład

Pamiętajmy że:

$$\log(x \cdot y \cdot z) = \log(x) + \log(y) + \log(z) \quad \text{and} \quad \log(x/y) = \log(x) - \log(y)$$

Kaskadowe połączenie wzmacniaczy:



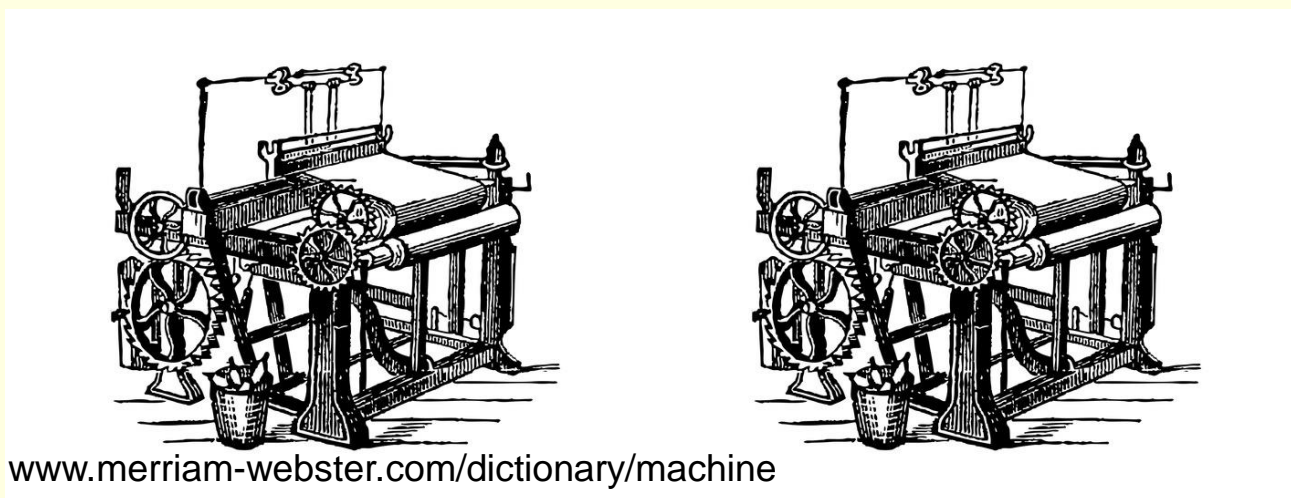
Całkowite wzmocnienie wzmacniaczy:  $G = 10\text{dB} + 12\text{dB} + 3\text{dB} = 25\text{dB}$

Jaka jest moc sygnału na wyjściu wzmacniaczy?

Zauważmy, że:  $25\text{dB} = 10\text{dB} + 10\text{dB} + 3\text{dB} + 1\text{dB} + 1\text{dB}$

# Quiz

Każda z maszyn włókienniczych generuje hałas o mocy 90dB.



Jak jest całkowita moc hałasu (w dB) od dwóch maszyn pracujących jednocześnie?

# The logarithmic scale

Za pomocą skali decybelowej można również porównywać napięcia i prądy:

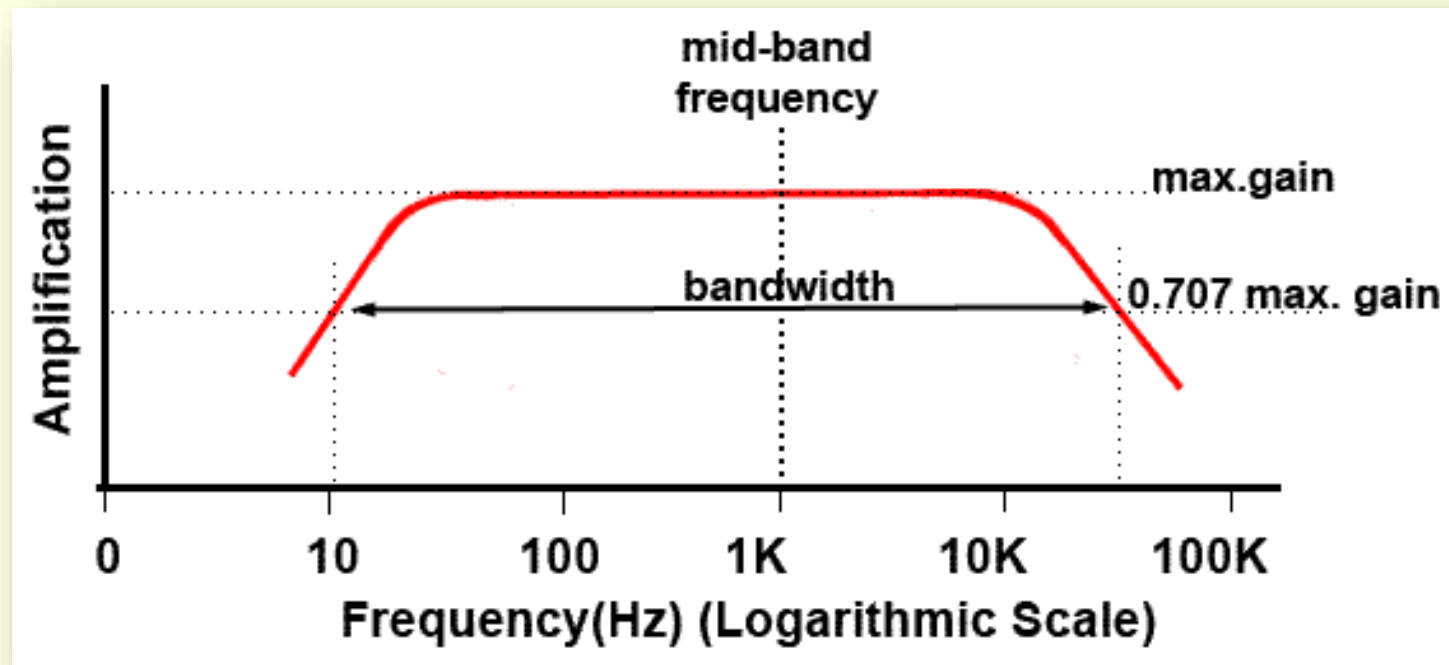
$$10 \log_{10} \left( \frac{P}{P_0} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{V^2 / R}{V_0^2 / R} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{V^2}{V_0^2} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 = 20 \log_{10} \left( \frac{V}{V_0} \right)$$

lub:

$$10 \log_{10} \left( \frac{P}{P_0} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{I^2 R}{I_0^2 R} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{I^2}{I_0^2} \right) = 10 \log_{10} \left( \frac{I}{I_0} \right)^2 = 20 \log_{10} \left( \frac{I}{I_0} \right)$$



# Szerokość pasma wzmacniacza

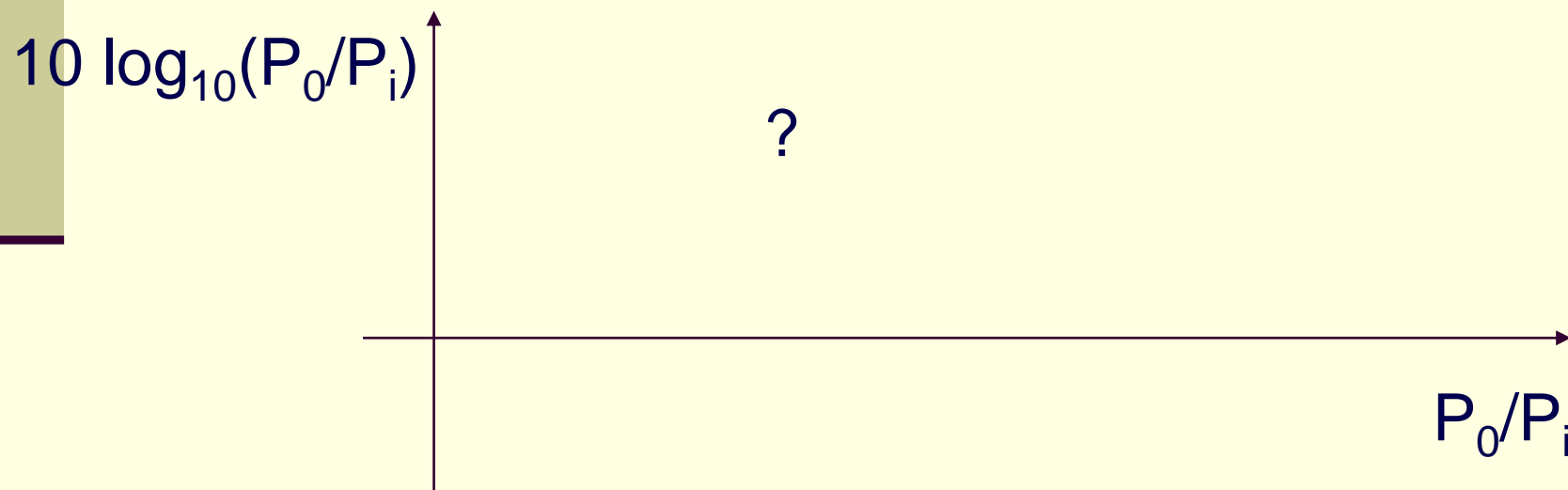


$$\frac{U}{\sqrt{2}} \cong 0.71U \Rightarrow \left( \frac{U}{\sqrt{2}} \right)^2 = \frac{U^2}{2} \approx \frac{P}{2} \Rightarrow -3dB$$

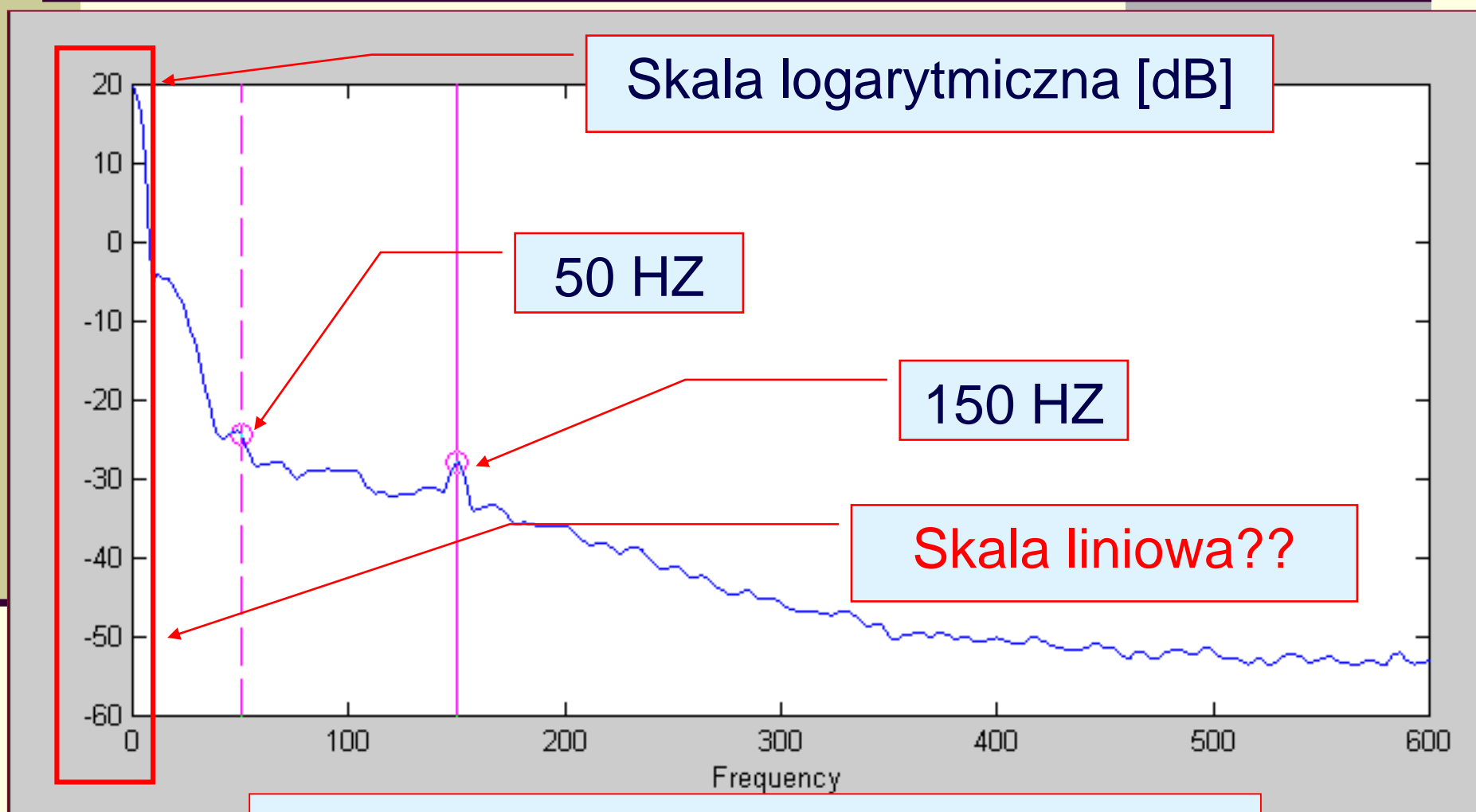
# Skala logarytmiczna

## Ćwiczenie:

Wykreśl funkcję  $10 \log_{10}(P_0/P_i)$  w dla  $(P_0/P_i) \in (0, 1000)$

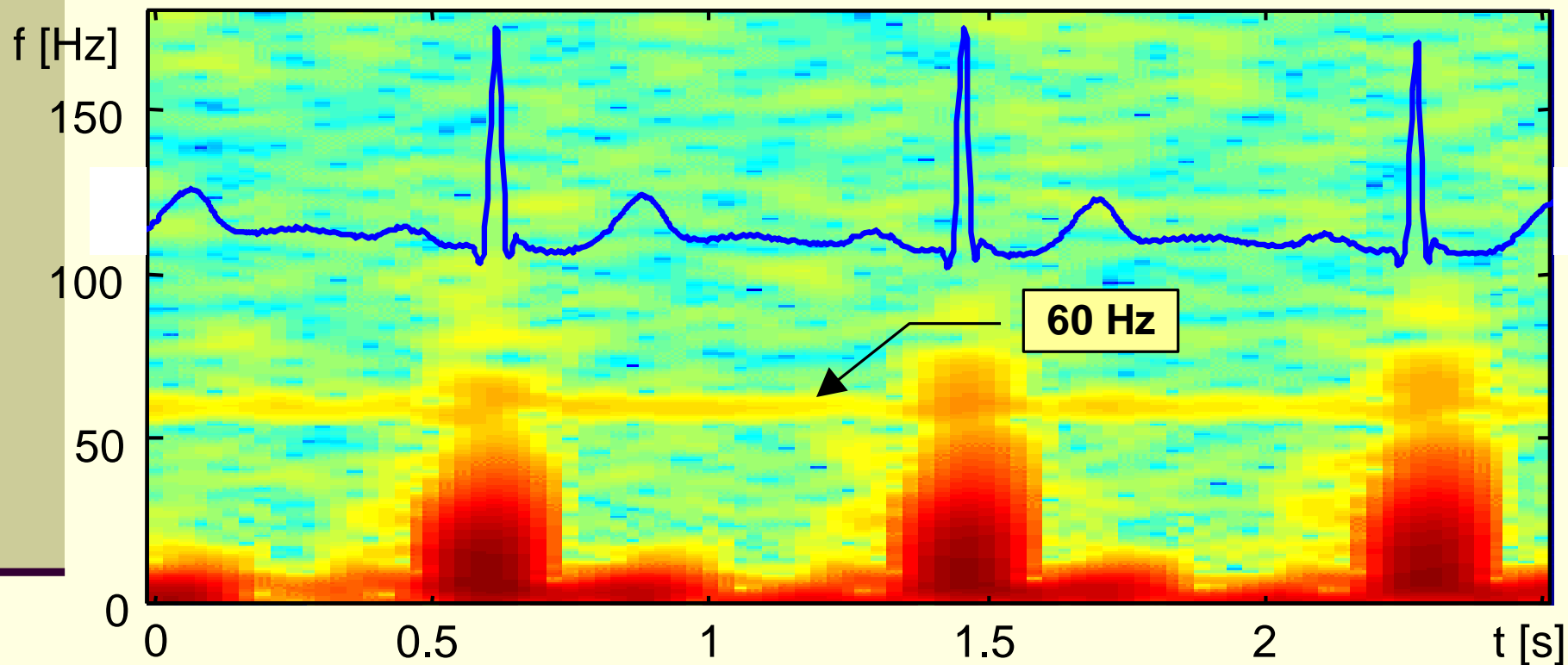


# Analiza widmowa



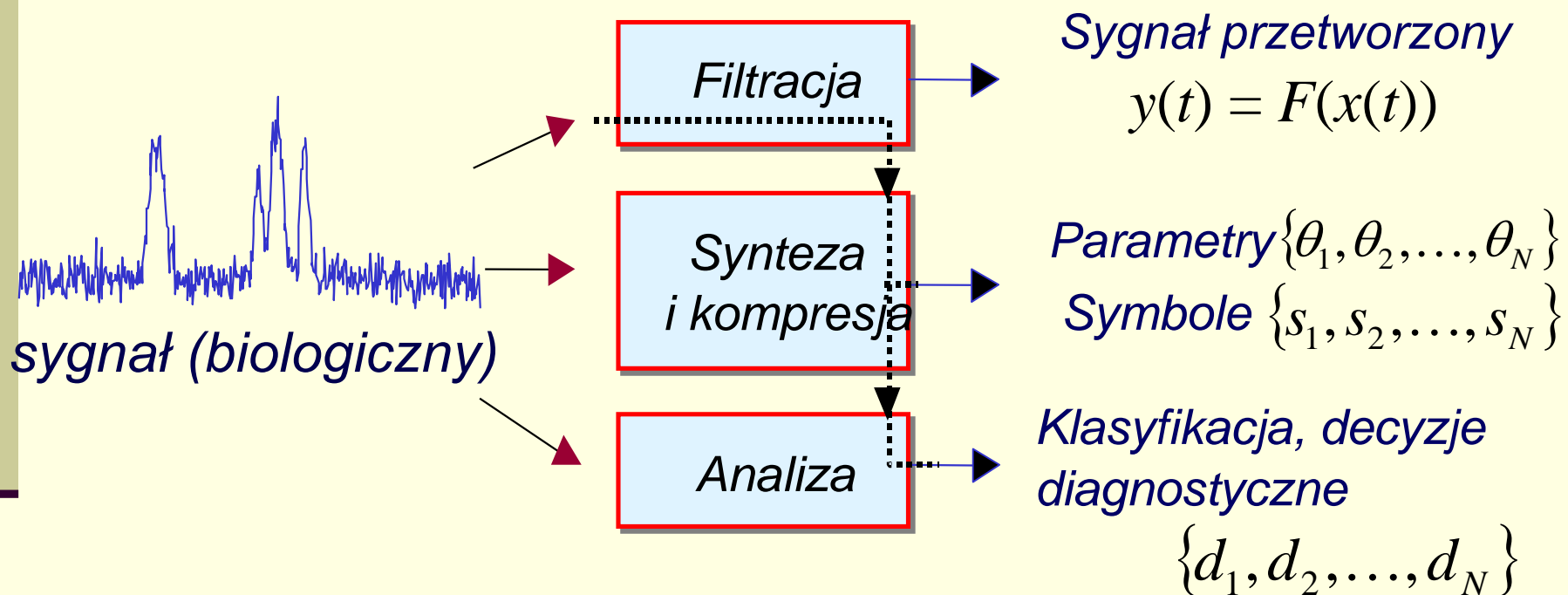
Gęstość widmowa mocy sygnału EKG

# Analiza widmowa



Spektrogram sygnału EKG

# Analiza sygnałów biologicznych



# Bazy danych sygnałów elektrofizjologicznych

---

- MIT/BIH Arrhythmia Database – amerykańska baza sygnałów elektrokardiograficznych opracowana przez *Massachusetts Institute of Technology* i *Beth Israel Hospital* w Bostonie wydana na CD
- CSE Database – europejska baza sygnałów elektrokardiograficznych (ang. *Common Standards for Qualitative Electrocardiography*)

# Pytania sprawdzające

---

## 1. Dlaczego przetwarzamy sygnały?

- a. sygnały mają ograniczoną energię i ograniczony czas trwania
- b. przetwarzanie sygnałów można wykonywać z zastosowaniem komputerów
- c. przetwarzanie i analiza sygnałów jest sposobem na poznawanie procesów i systemów
- d. przetwarzanie sygnałów można realizować w czasie rzeczywistym

## 2. Która definicja najlepiej określa co to jest sygnał dyskretny w czasie?

- a. jest to ciąg liczb naturalnych
- b. jest to ciąg liczb
- c. jest to ciąg liczb określony w ograniczonym zakresie czasie
- d. jest to ciąg wartości napięć

# Pytania sprawdzające

---

## 3. Spadek napięcia o -3dB odpowiada:

- a. dwu-krotnemu spadkowi mocy sygnału
- b. dwu-krotnemu spadkowi energii sygnału
- c. trzy-krotnemu spadkowi napięcia sygnału
- d. dwudziesto- krotnemu spadkowi napięcia sygnału

## 4. Powodem stosowania skali decybelowej jest:

- a) funkcja logarytm ma dodatnie wartości dla argumentu większego od 1
- b) obliczanie logarytmu jest łatwe z zastosowaniem komputera
- c) ponieważ głośność dźwięku człowiek wg skali logarytmicznej
- d) ponieważ w ograniczonym zakresie wartości skali możemy reprezentować bardzo duże zmiany wartości sygnału