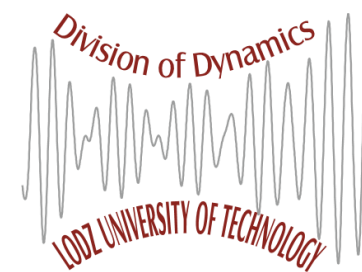


Blok obieralny:

Mechatronika w maszynach energetycznych i przepływowych



Lista przedmiotów w bloku:

Nazwa przedmiotu	Nr karty przedmiotu	Wykład	Lab	Jednostka
Modelowanie procesów energetycznych	01 35 0166 00	15	15	I12
Automatyzacja systemów energetycznych	01 35 0168 00	15	30	I12
Dynamika maszyn wirnikowych	01 35 0170 00	30	30	K13
Dynamika i diagnostyka energetycznych maszyn przepływowych	01 35 0172 00	15	30	I12

I12 – Instytut Maszyn Przepływowych

K13 – Katedra Dynamiki Maszyn

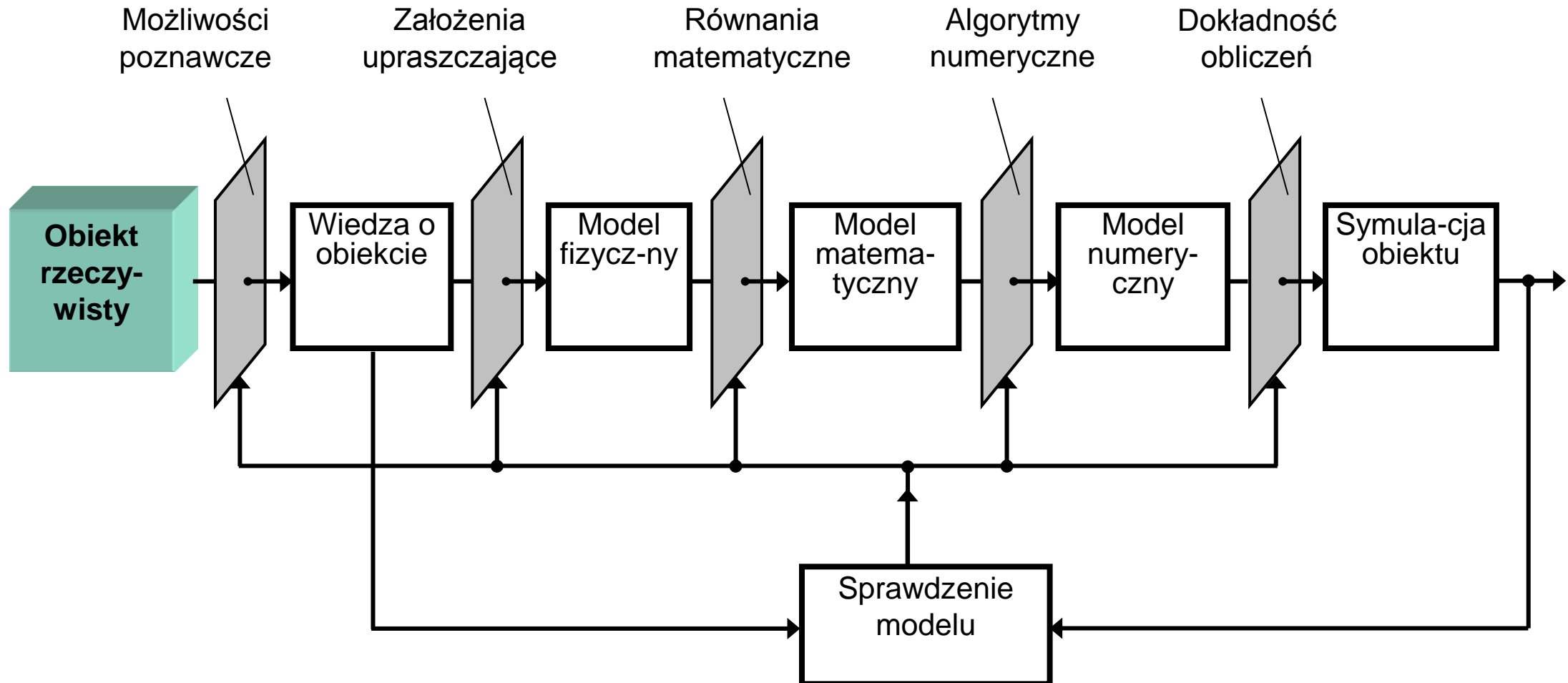
Modelowanie procesów energetycznych

Adam Papierski

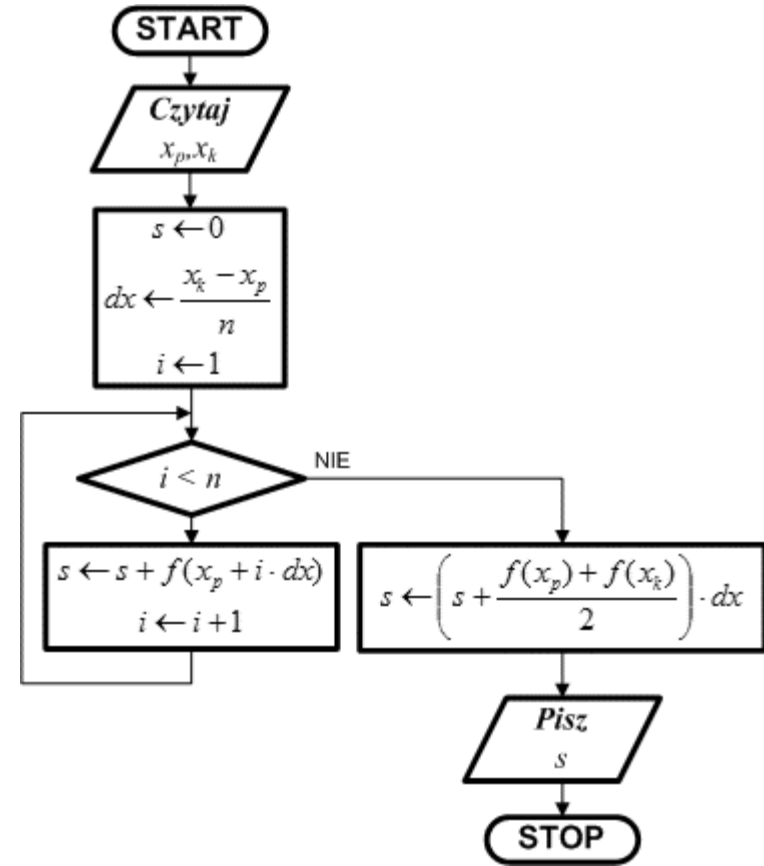
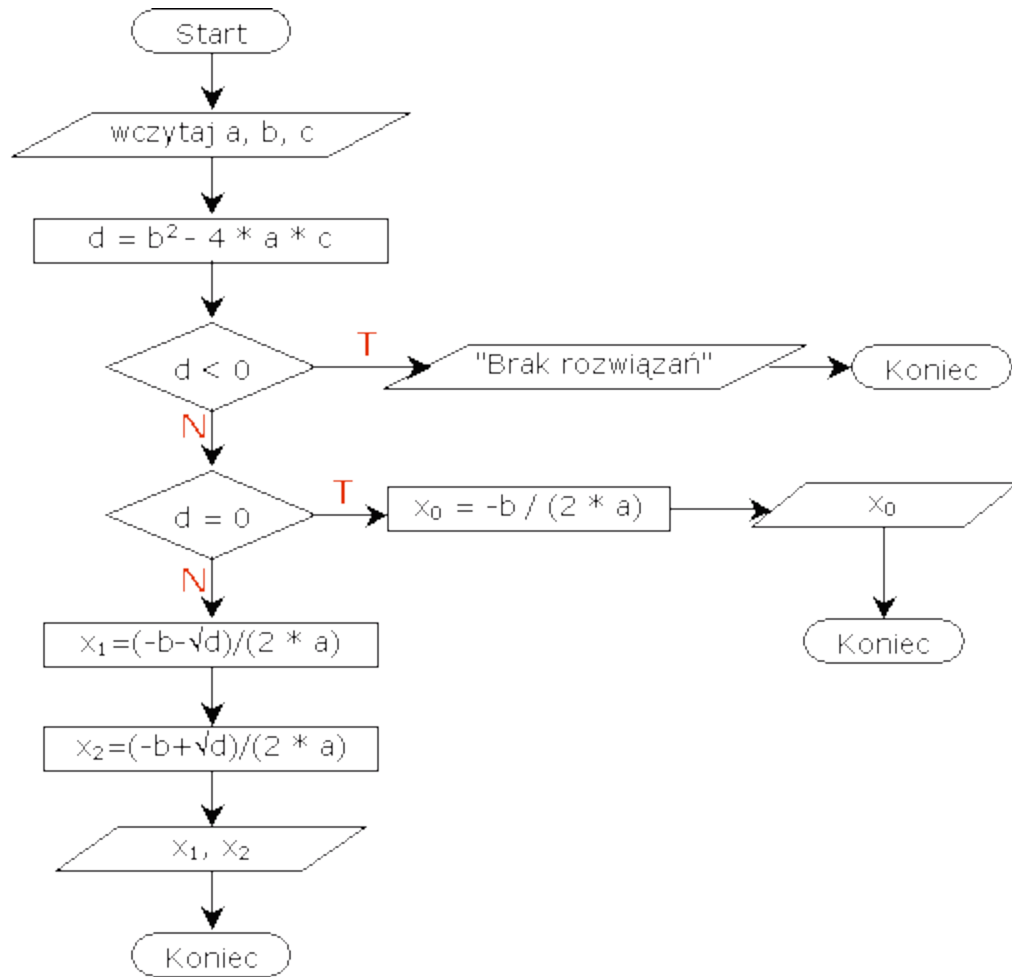
Modelowanie procesów energetycznych

1. Istota i cel modelowania
2. Algorytmy numeryczne
3. Optymalizacja
4. Model matematyczny zjawiska pompowania sprężarki
5. Modelowanie zjawiska pompowania sprężarki
6. Modelowanie wytwornicy pary, wymienników, pomp, turbiny, skraplacza, chłodni, kondensatora
7. Obieg Lindego
8. Modelowanie obiegu Lindego
9. Optymalizacja układu rekuperacyjnego podgrzewu wody zasilającej kocioł
10. Optymalizacja siłowni hybrydowej będącej sprzężeniem bloku opalanego węglem z turbiną gazową zasilaną gazem ziemnym

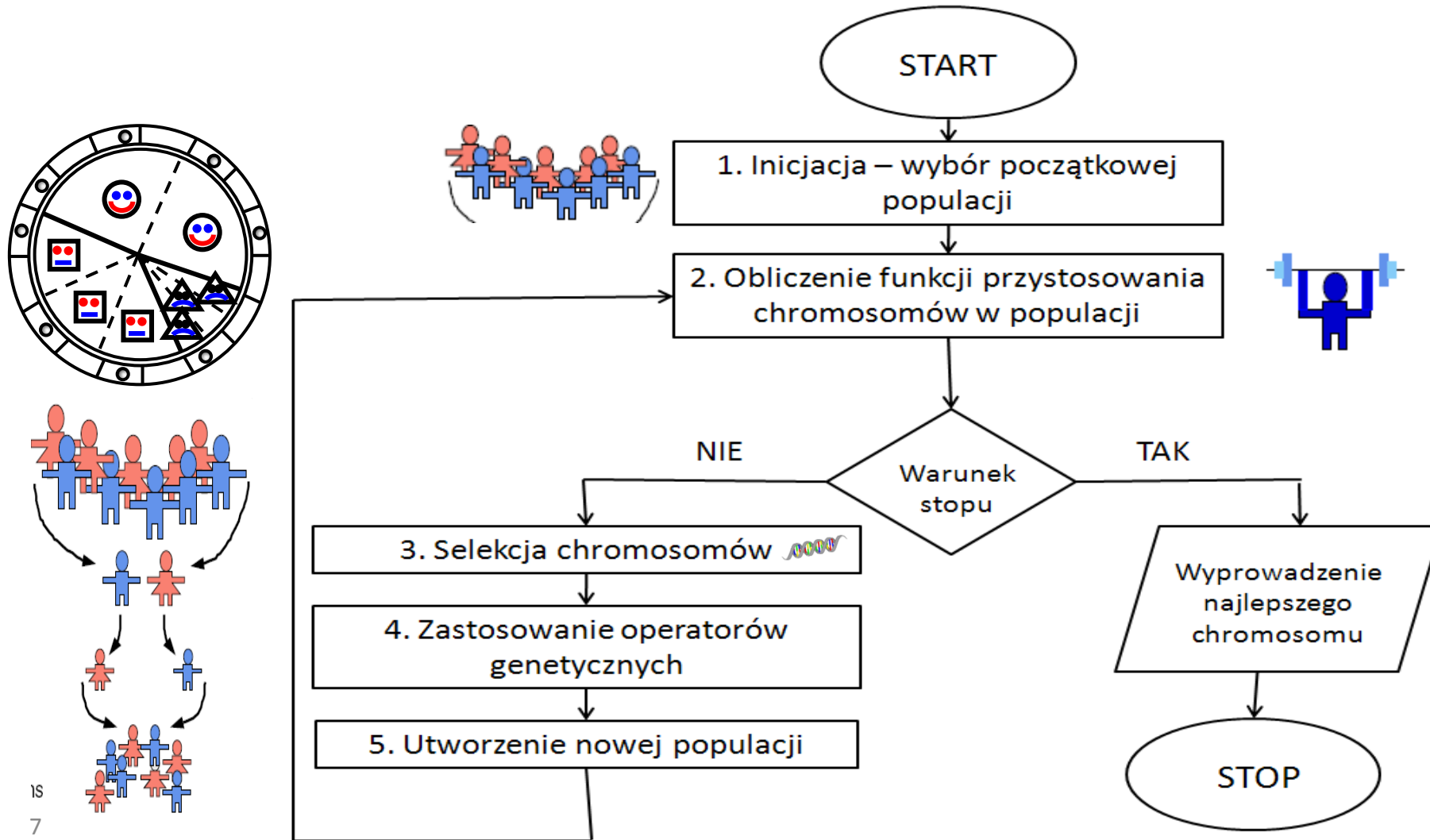
Istota i cel modelowania



Algorytmy numeryczne

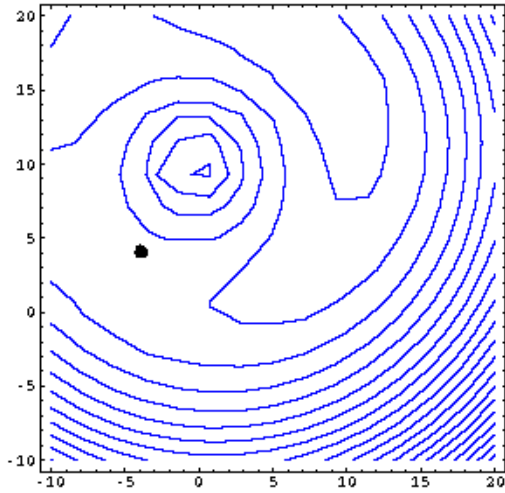


Optymalizacja algorytmy genetyczne

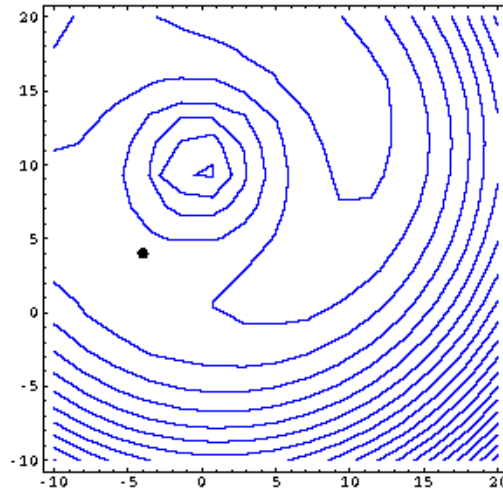


Optymalizacja nieliniowa

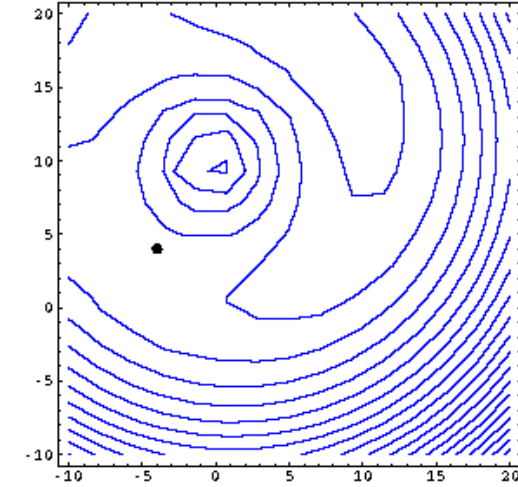
Metody gradientowe



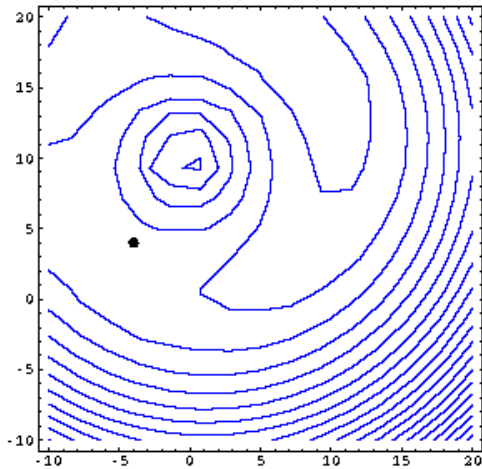
Metoda simpleks



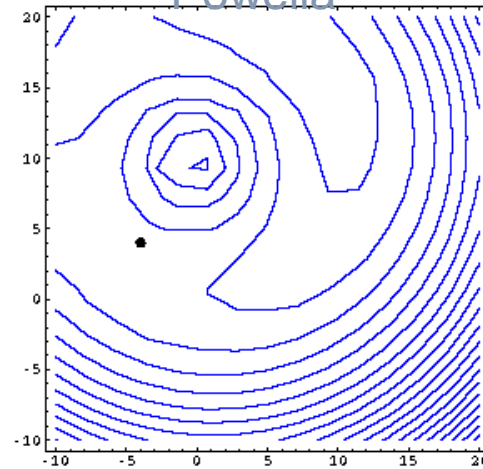
Kierunków sprzężonych
Powella



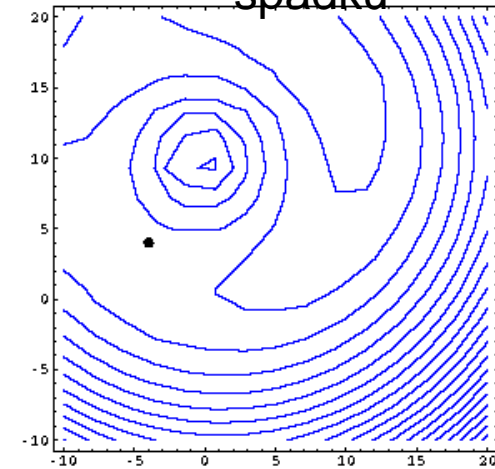
Metoda najszybszego
spadku



Gradientów sprzężonych Fletcher
Reevesa

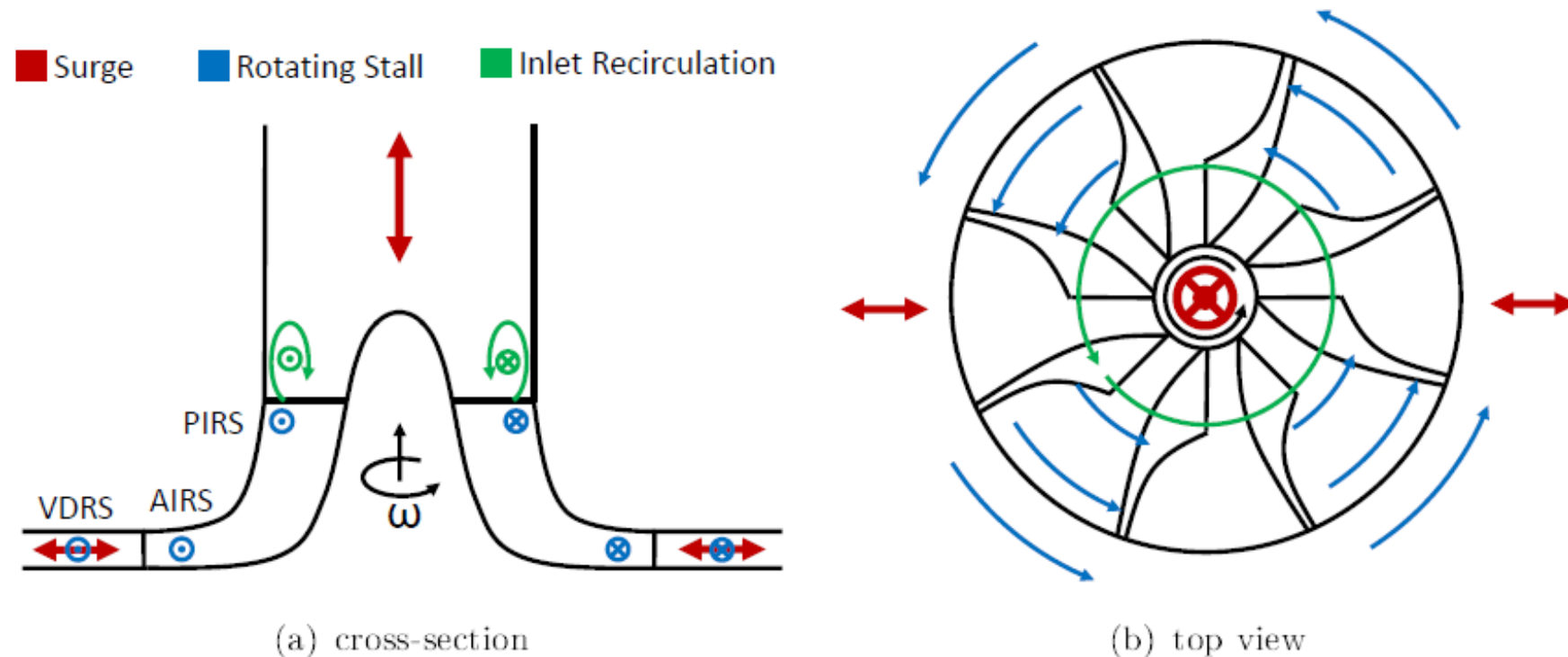


Metoda Newtona



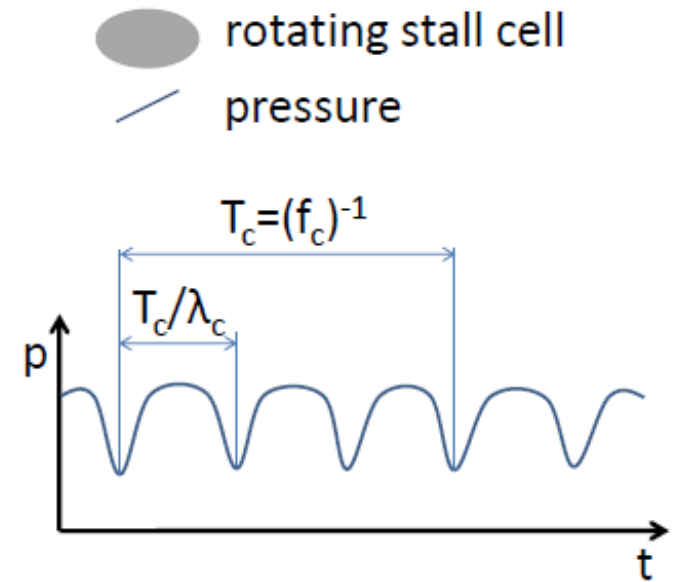
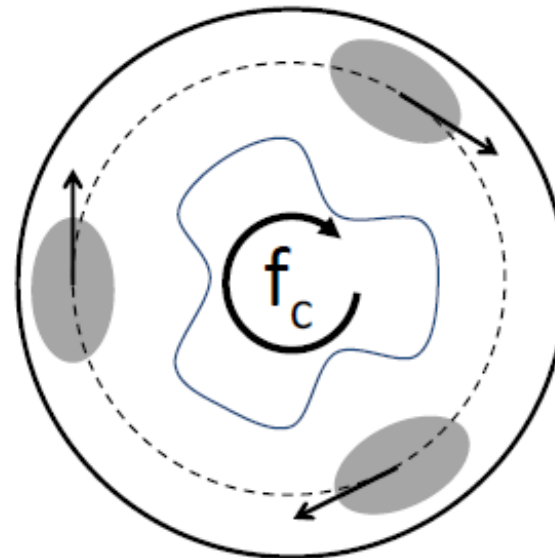
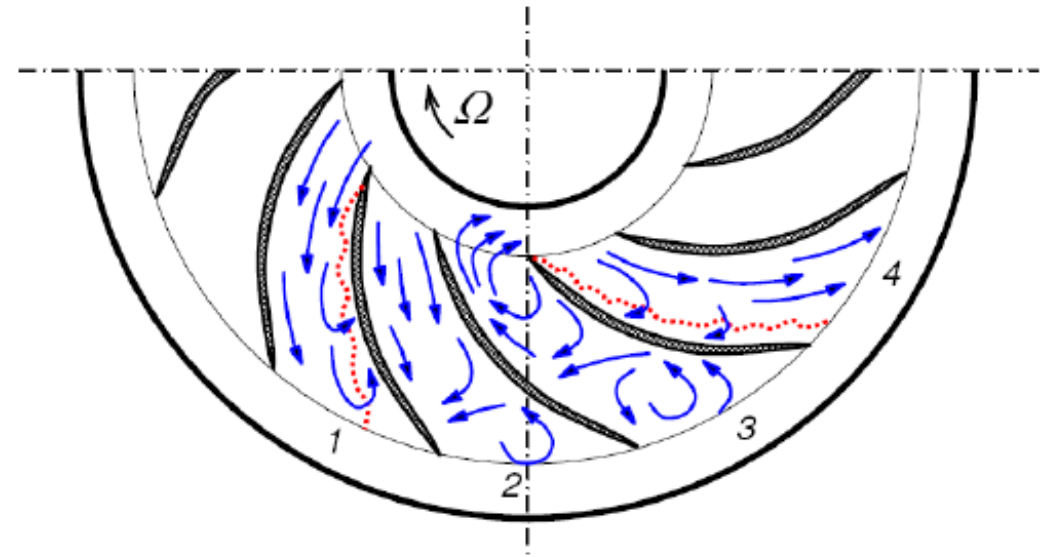
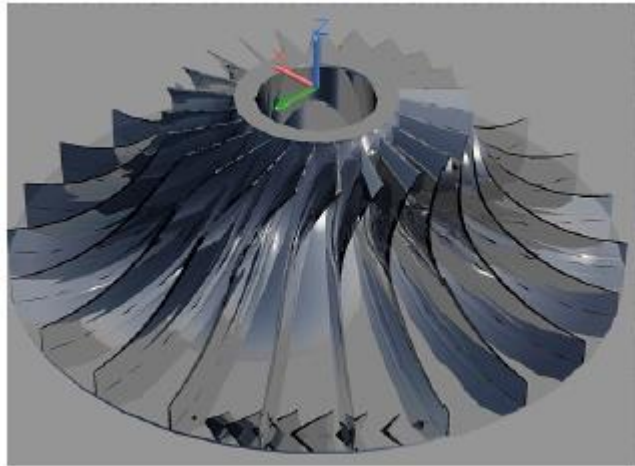
Metoda quasi
Newtona

Model matematyczny zjawiska pompowania sprężarki



Miejsca powstawania struktur wirowych w kole wirnikowym sprężarki

Oderwanie wirujące w kole wirnikowym sprężarki promieniowej



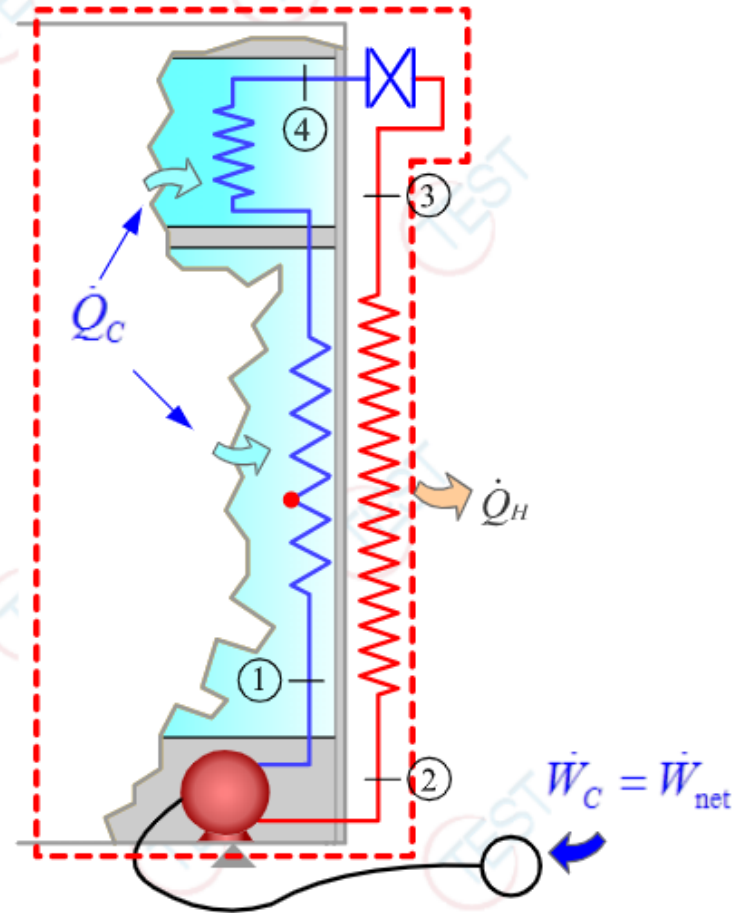
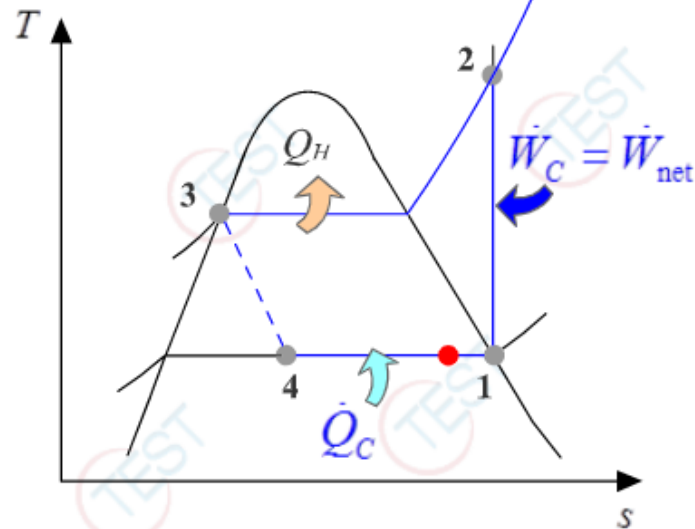
Obieg LINDEGO

(Move pointer along the bar to select a frame; click anywhere else to play or pause)

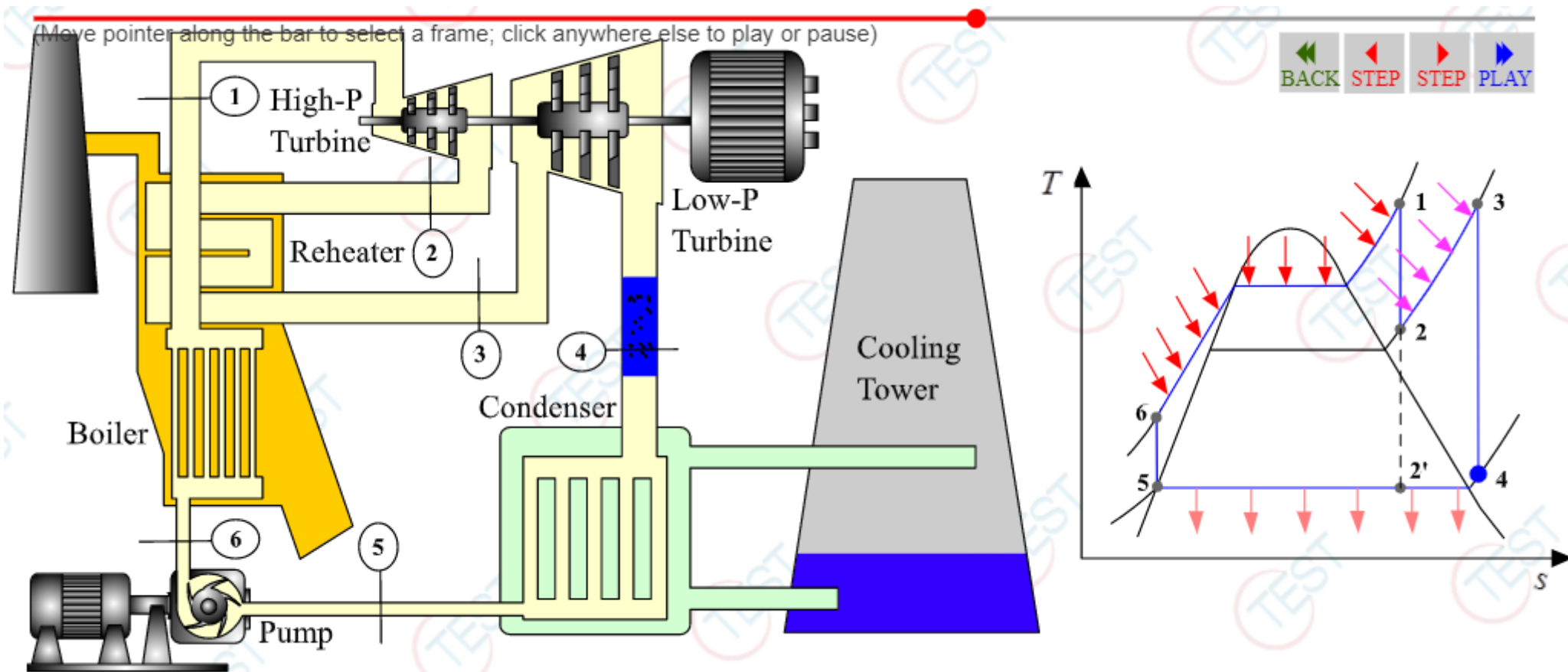
Household Refrigerator Cycle



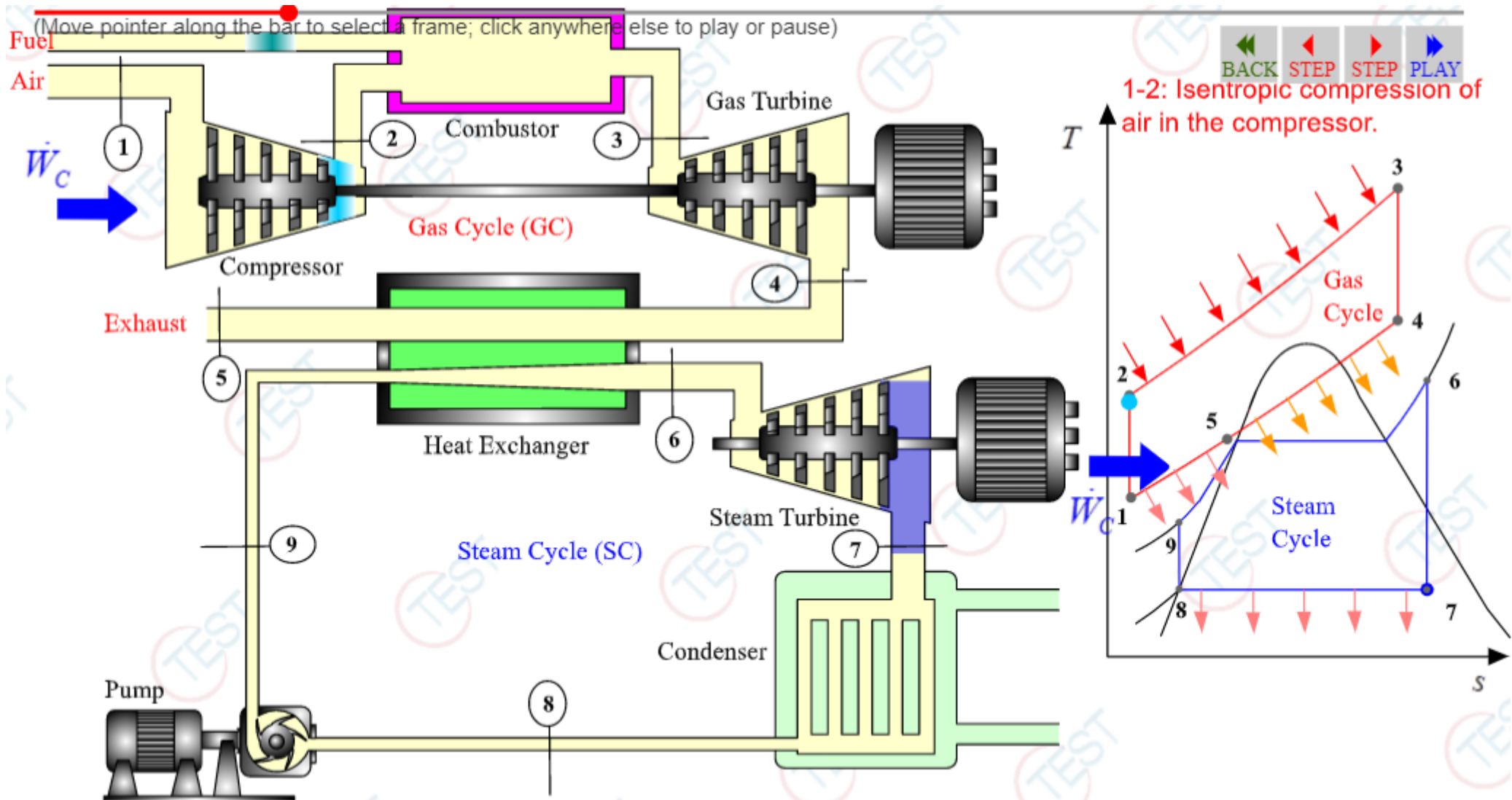
$$\text{COP}_R = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{W}_{\text{net}}} = \frac{\dot{m}(h_1 - h_4)}{\dot{m}(h_2 - h_1)} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$



Optymalizacja układu rekuperacyjnego podgrzewu wody zasilającej kocioł



Optimalizacja siłowni hybrydowej będącej sprzężeniem bloku opalanego węglem z turbiną gazową zasilaną gazem ziemnym



Licencjonowane oprogramowanie

- Wizualna platforma do analizy problemów przepływowo-termicznych,
- weryfikowanie obliczeń odręcznych, realizowanie scenariuszy „co-jeśli”,
- wizualizacja systemów cieplnych
- świetna pomoc w opanowaniu termodynamiki.

The Expert System for Thermodynamics 

Prof. S. Bhattacharjee, San Diego State University
www.thermofluids.net • https://energy.sdsu.edu

Academic Mode*

Some of the Things You Could Do with TEST

Basics	TESTapps	Interactives	Solving Problems
<ul style="list-style-type: none">• Finding Help and Navigating TEST• Customize the Unit Converter• Calculate Expressions, Functions and More• Find a Suitable Animation on Any Topic• Look up properties from tables and verify interpolated results• Create a TEST account in seconds			

Greetings, Dr. Papierski!

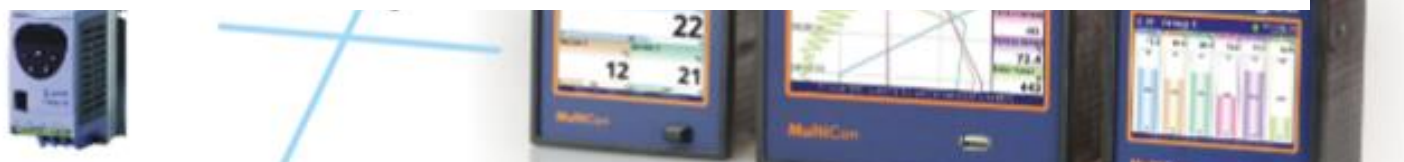
License valid for: 1010 days

"Thermodynamics is a funny subject. The first time you go through it, you



Automatyzacja systemów energetycznych

dr inż. Tomasz Pałczyński



Podstawowe problemy związane z automatyzacją nowoczesnych maszyn i urządzeń stosowanych w energetyce, wybranymi technikami modelowania obiektów i wybranymi nowoczesnymi narzędziami do modelowania i sterowania maszyn i urządzeń.



prędkość obrotowa



impulsy



ciśnienie



przepływ



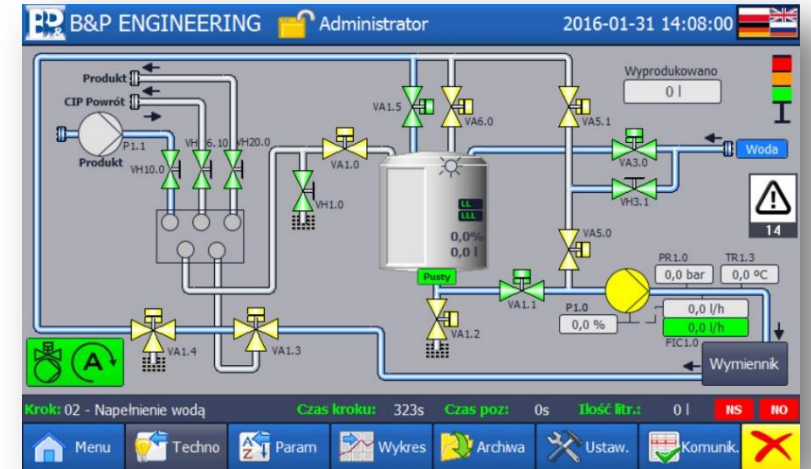
temperatura



Wykłady

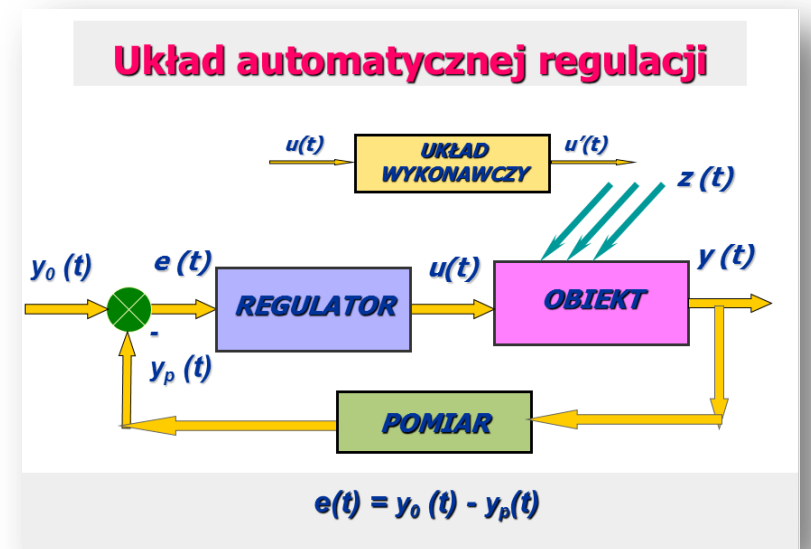
1. Automatyizacja i mechatronika w budowie i eksploatacji nowoczesnych maszyn i urządzeń.

Kierunki rozwoju. Prezentacja wybranych nowoczesnych rozwiązań systemów przemysłowych. Inteligentne algorytmy sterowania - ogólna charakterystyka. Przykładowe dziedziny zastosowania.



2. Wybrane zagadnienia analizy układów automatycznej regulacji.

Obiekty regulacji i ich modele. Opis matematyczny dynamiki układów liniowych w ujęciu czasowym i częstotliwościowym. Opis matematyczny i budowa schematów blokowych przykładowych urządzeń mechanicznych.



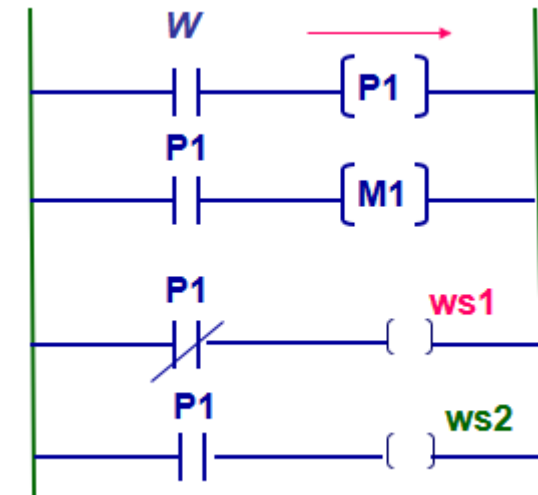
Wykłady

3. Maszyny i urządzenia jako obiekty regulacji.

Problemy funkcjonalne automatyzacji. Klasyfikacja układów. Analiza działania przykładowych urządzeń mechanicznych jako obiektów regulacji. Układy jedno i wieloparametrowe. Układy kaskadowe. Regulacja typu master-slave. Regulatory PID. Całkowanie - zalety i ograniczenia stosowania w regulacji rzeczywistych maszyn.

4. Sterowniki programowalne PLC.

Struktura i elementy współczesnych przemysłowych sterowników PLC. Rozwiązania sprzętowe. Sterownik PLC GE Fanuc. Elementy oprogramowania. Język schematów drabinkowych.



5. Komputerowe systemy pomiarowe.

Struktura i konfiguracje komputerowych systemów kontrolno - pomiarowych. Wprowadzenie do analizy sygnałów. Przetwarzanie analogowo - cyfrowe. Interfejsy pomiarowe.

6. Przemysłowe sieci transmisji danych. *Architektura systemów pomiarowo-kontrolnych - multiplekserowa, sieciowa. Przykładowe sieci przemysłowe Profibus, HART. Elementy oprogramowania.*

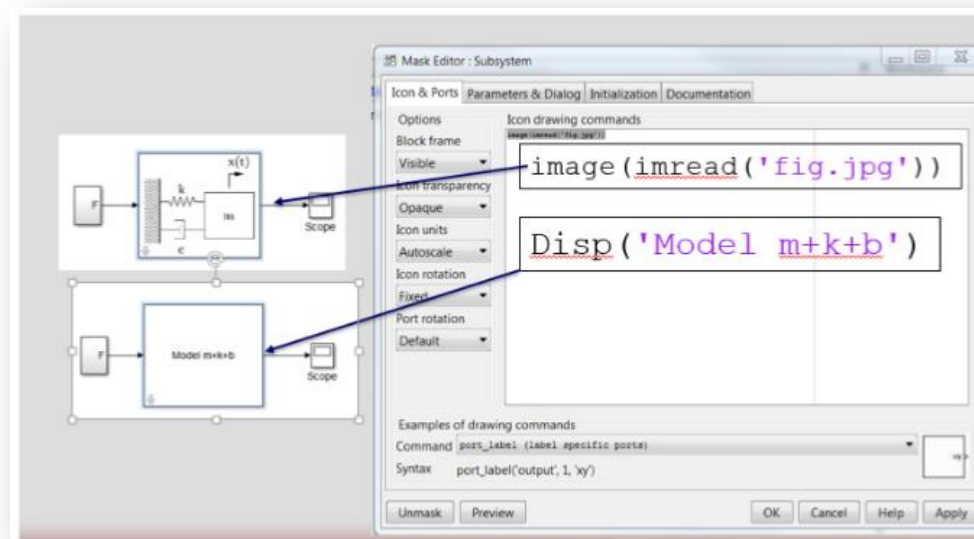
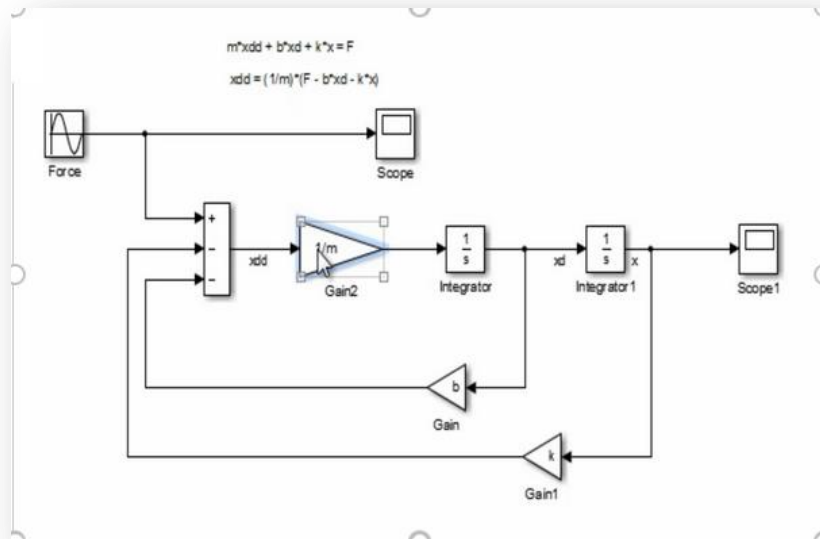
7. Nadrzędne i rozproszone systemy sterowania.

Tendencje w zakresie budowy systemów rozproszonych. Wymagania stawiane wybranym obiektom i aplikacje nadzorujące te obiekty. Wymiana informacji między węzłami sieci.

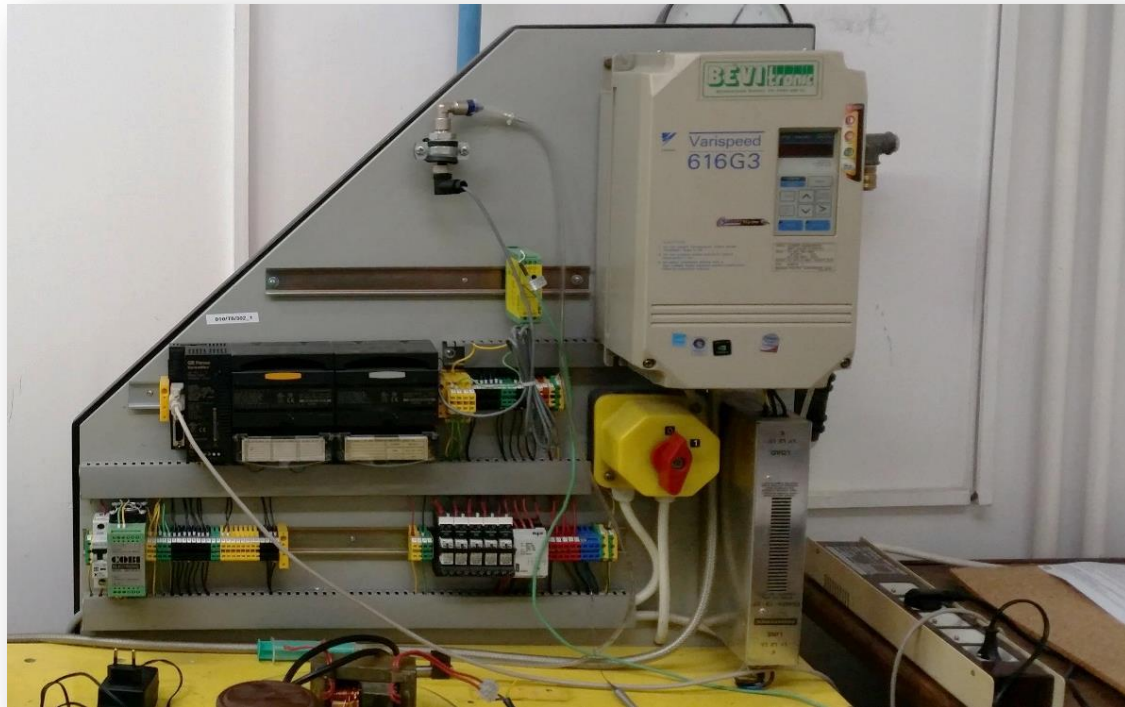


Laboratoria

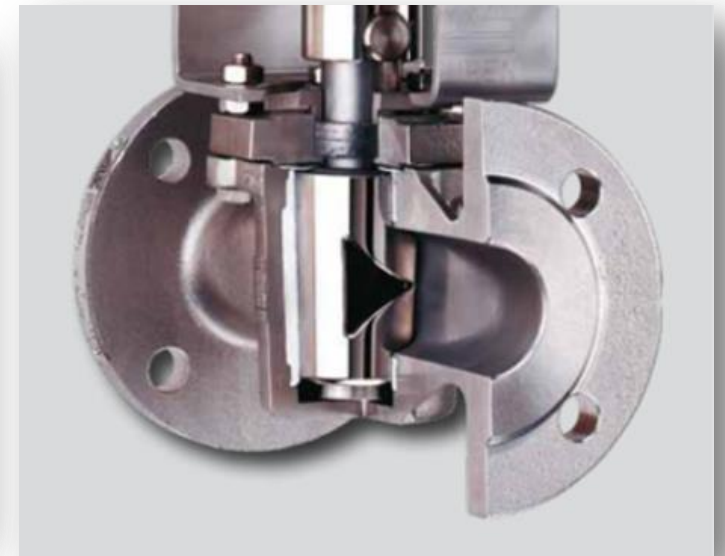
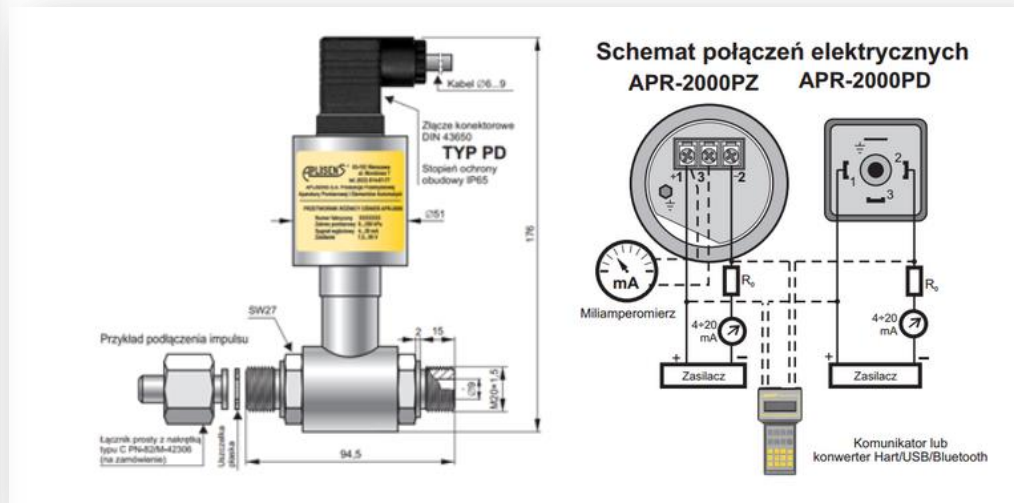
1. Simulink I - Modelowanie UAR w środowisku Matlab/Simulink
2. Simulink II - Modelowanie układów dynamicznych o jednym i dwóch stopniach swobody w środowisku Matlab/Simulink



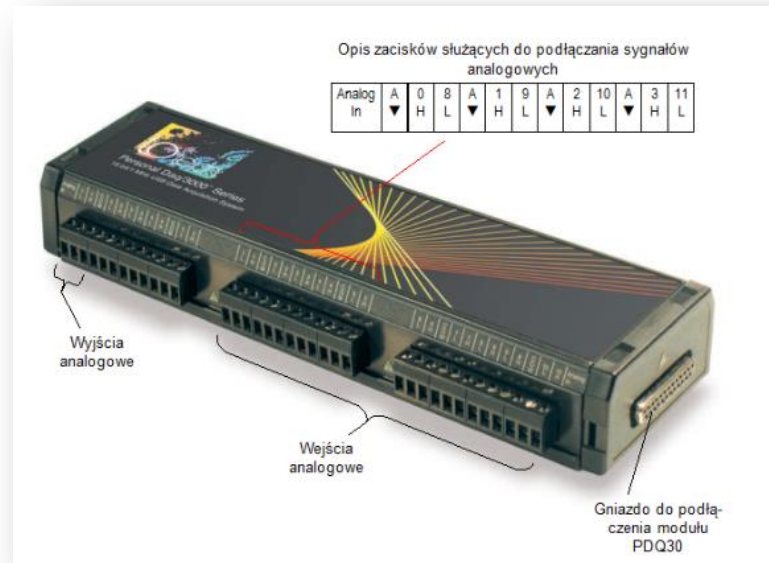
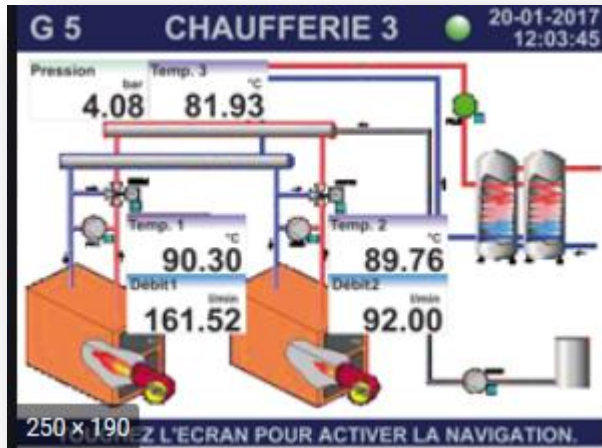
3. Sterowniki PLC I Realizacja zautomatyzowanego algorytmu pracy silnika napędzającego pas transmisyjny
4. Sterowniki PLC II Realizacja zautomatyzowanego algorytmu pracy silnika wentylatora ze sprzężeniem zwrotnym



- 5. Strumień masy - Automatykacja procesu pomiaru strumienia masy powietrza w rurociągu z wykorzystaniem przemysłowego rejestratora SIMEX CMC-99
- 6. UAR z zaworem proporcjonalnym - układ automatycznej regulacji (z PID) strumienia masy powietrza w rurociągu z wykorzystaniem przemysłowego rejestratora SIMEX CMC-99

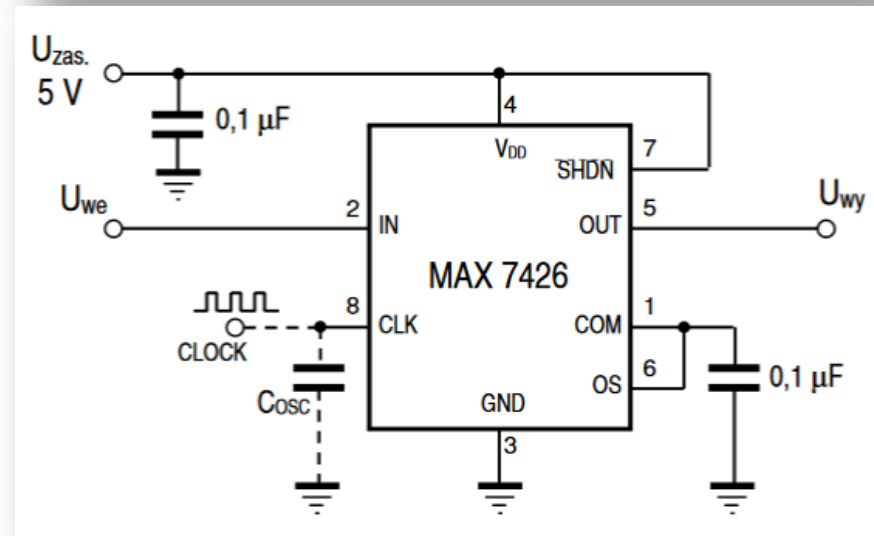
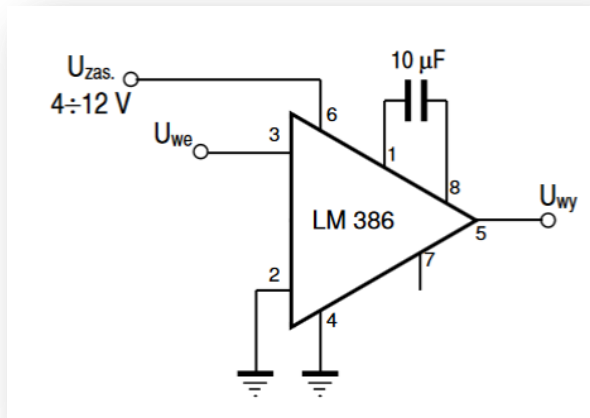
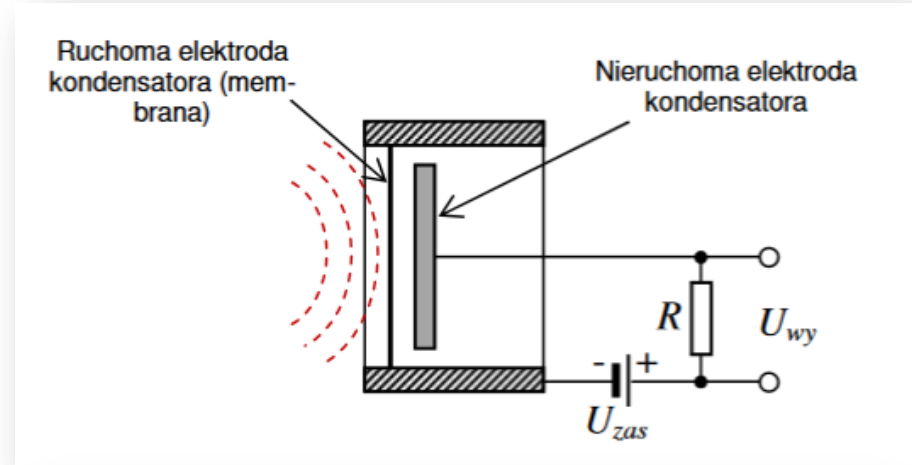
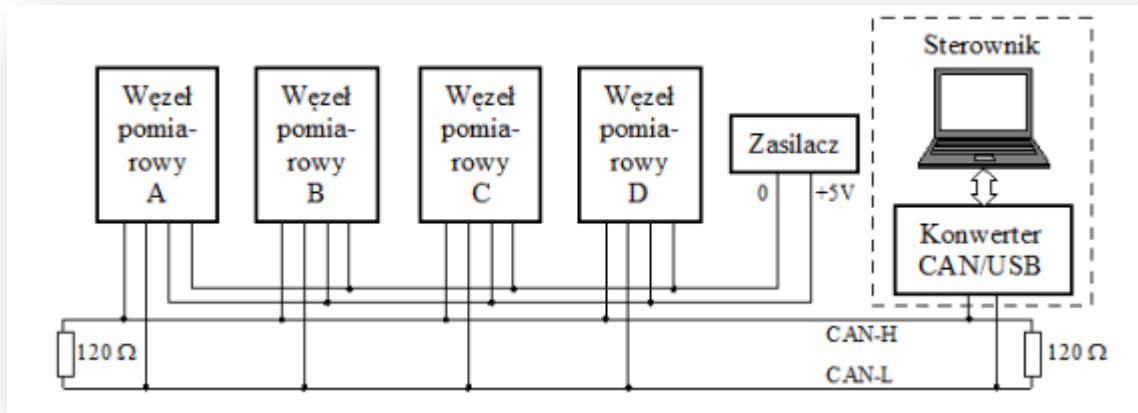


7. SCADA - Zastosowanie środowiska SCADA do wizualizacji wybranych procesów energetycznych z wykorzystaniem przemysłowego rejestratora SIMEX CMC-99.
8. Zapoznanie się z systemem pomiarowym Personal Daq / 3000 i jego oprogramowaniem
9. Zapoznanie się z systemem pomiarowym USB-6008 i jego oprogramowaniem



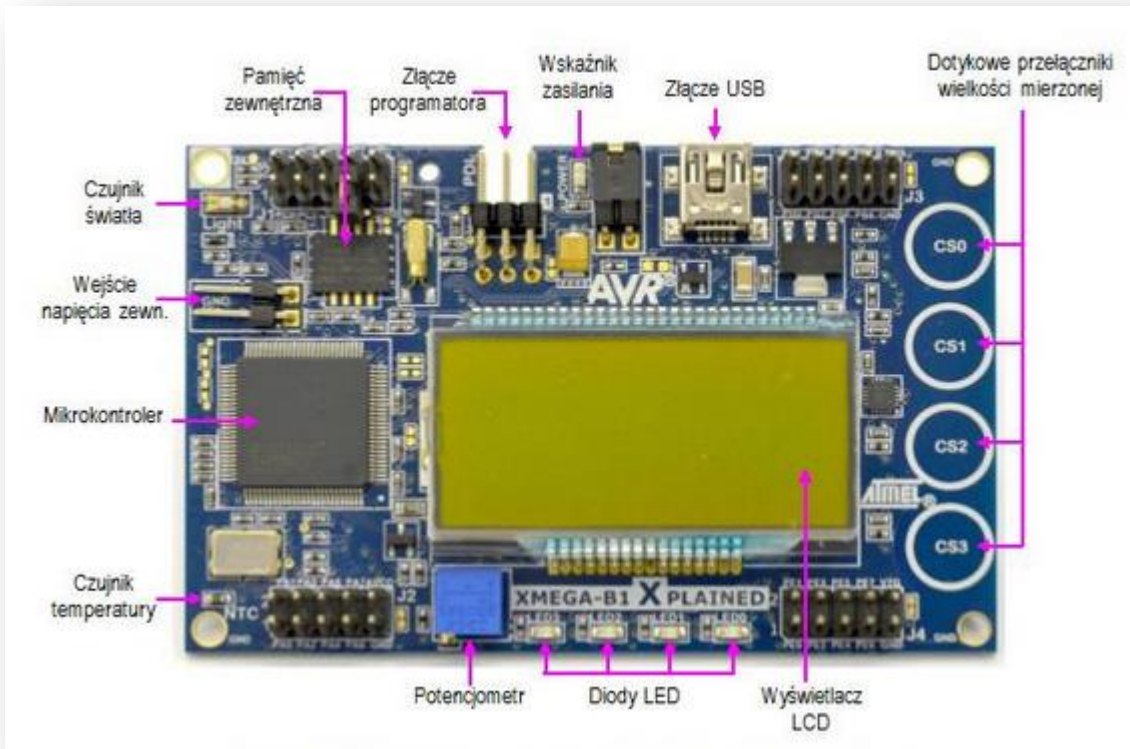
10. Rozproszony system pomiarowy

11. Wejściowe elementy toru pomiarowego: czujnik pomiarowy, wzmacniacz i filtr dolnoprzepustowy



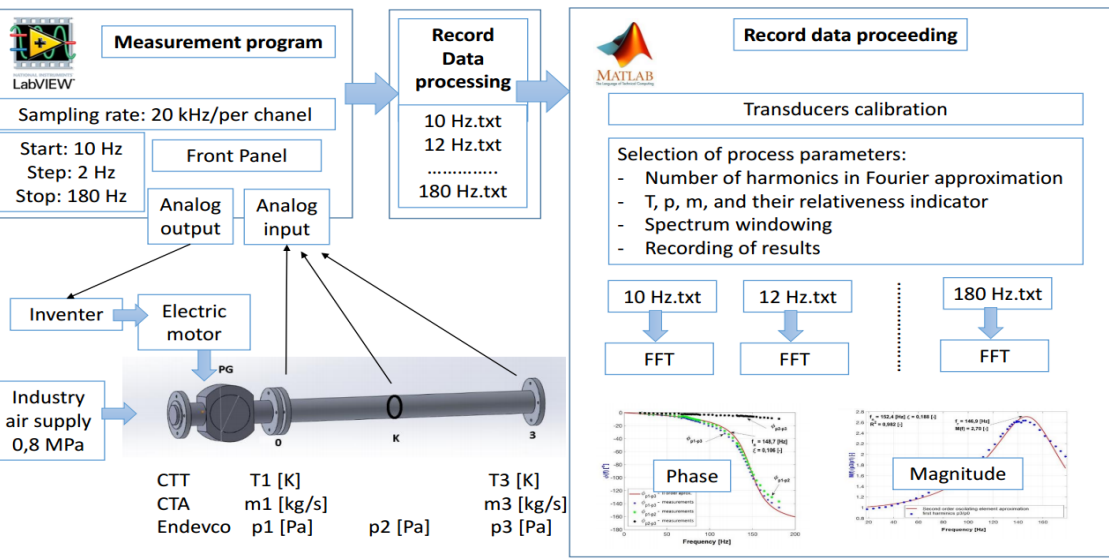
12. Zastosowanie mikrokontrolerów z wbudowanymi przetwornikami A/C w systemach pomiarowych

13. Podstawy obsługi :Rejestrator przemysłowy, DAQExpress



14. Wyznaczanie parametrów układu oscylacyjnego II rzędu metodą eksperymentalną

15. Stanowisko badawcze do badania przepływów pulsacyjnych w środowisku LabView i Matlab



DYNAMIKA MASZYN WIRNIKOWYCH



Wirnik turbiny parowej Parsonsa z ORP Wicher

Przedmiot obejmuje modelowanie dynamiczne układów wirujących. Jako ilustracja rozważań teoretycznych, rozpatrywane są zachowania dynamiczne różnych prostych modeli maszyn i urządzeń wirnikowych. Rozwiązania zagadnień przeprowadzane są zarówno w dziedzinie czasu, jak i w dziedzinie częstotliwości.



Tarcze wirnikowe turbiny parowej

Model układu o jednym stopniu swobody

Równanie ruchu:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = m_w \mu \omega^2 \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$\ddot{x} + 2h \dot{x} + \alpha^2 x = q_0 \omega^2 \sin(\omega t) \quad (2)$$

gdzie:

$$2h = \frac{c}{m},$$

$$\alpha^2 = \frac{k}{m}, \quad (3)$$

$$q_0 = \frac{m_w \mu}{m}.$$

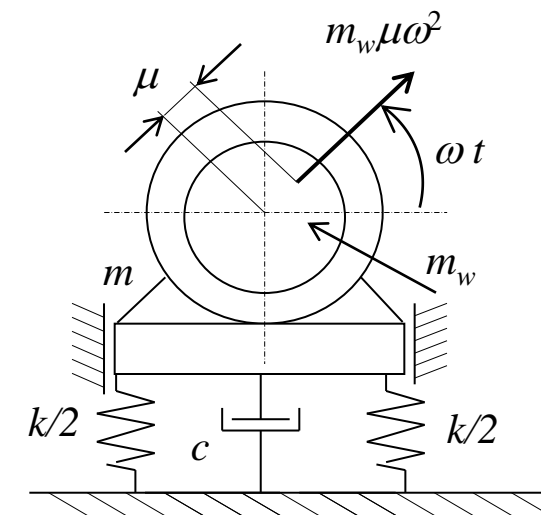
Rozwiązanie szczególne równania ruchu (2):

$$x = A \sin(\omega t - \varphi), \quad (4)$$

gdzie:

$$A = \frac{q_0 \omega^2}{\sqrt{(\alpha^2 - \omega^2)^2 + 4h^2 \omega^2}}, \quad (5)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{2h\omega}{\alpha^2 - \omega^2}. \quad (6)$$

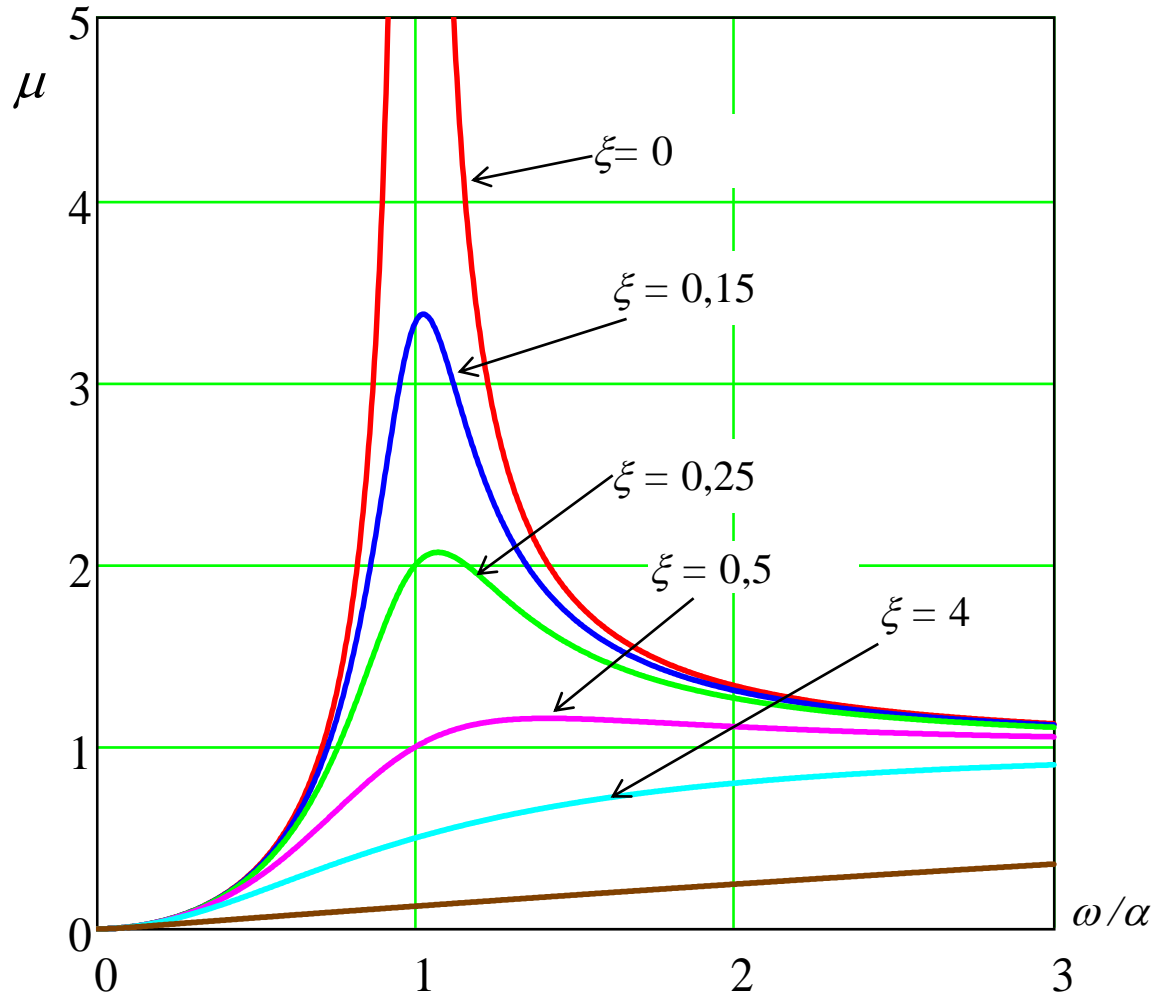
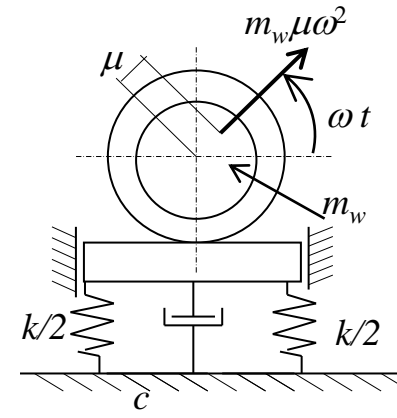


Wykresy rezonansowe modelu układu o jednym stopniu swobody

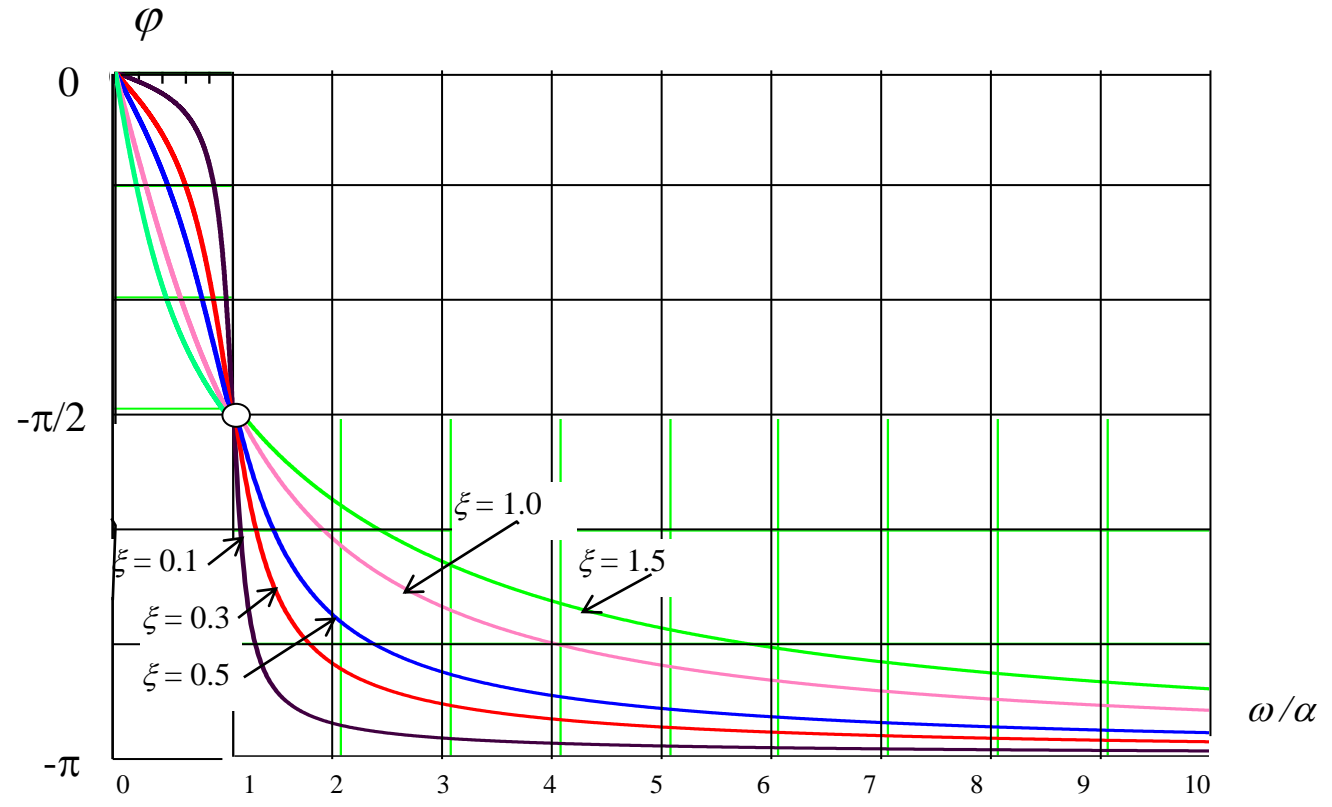
$$\mu = \frac{A}{q_0} = \frac{\frac{\omega^2}{\alpha^2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\alpha^2}\right)^2 + 4 \frac{h^2}{\alpha^2} \frac{\omega^2}{\alpha^2}}} = \frac{r^2}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + 4 \xi^2 r^2}}$$

$$\varphi = \arctg \frac{2 h \omega}{\alpha^2 - \omega^2} = \arctg \frac{2 \xi r}{1 - r^2}$$

gdzie: $\xi = \frac{h}{\alpha}, \quad r = \frac{\omega}{\alpha}$



Amplitudowy wykres rezonansowy



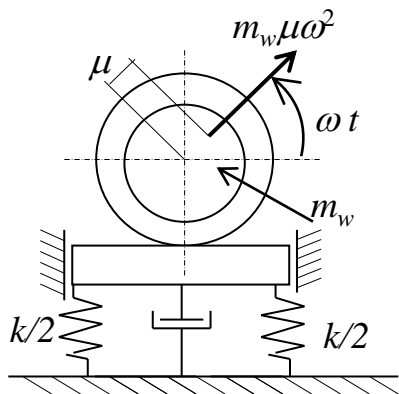
Fazowy wykres rezonansowy

Wykresy rezonansowe modelu układu o jednym stopniu swobody we współrzędnych w skali logarytmicznej

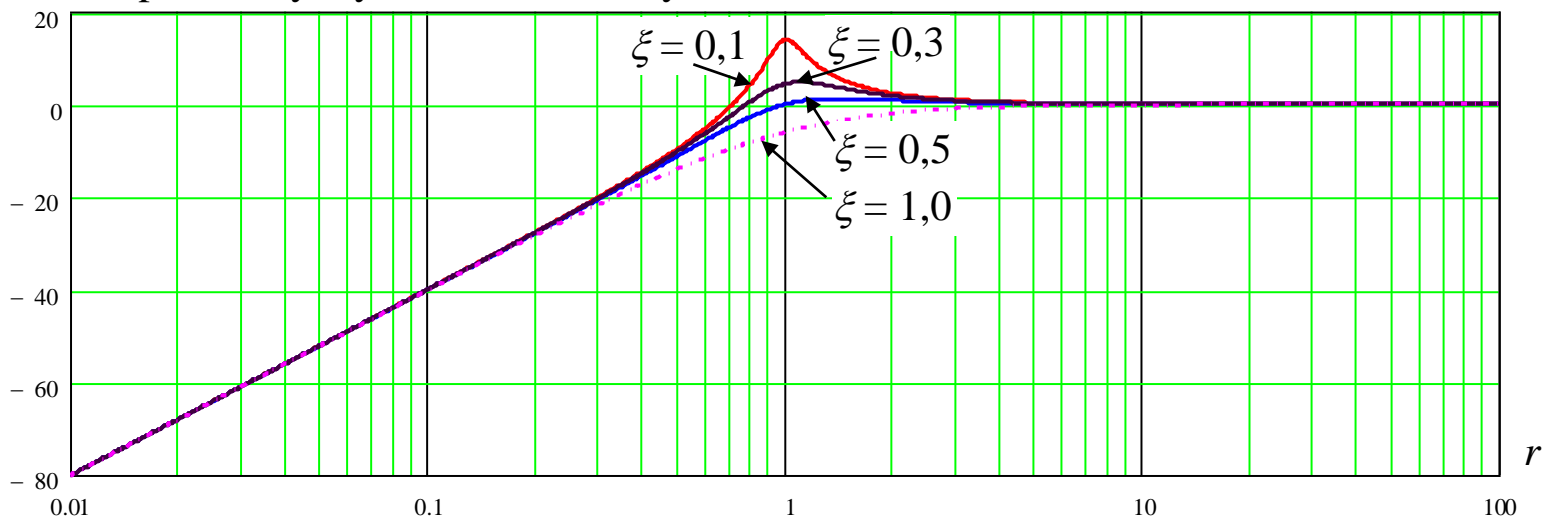
$$L = 20 \log \frac{r^2}{\sqrt{(1-r^2)^2 + 4\xi^2 r^2}} \text{ [dB]}$$

$$\varphi = \arctg \frac{2\xi r}{1-r^2}$$

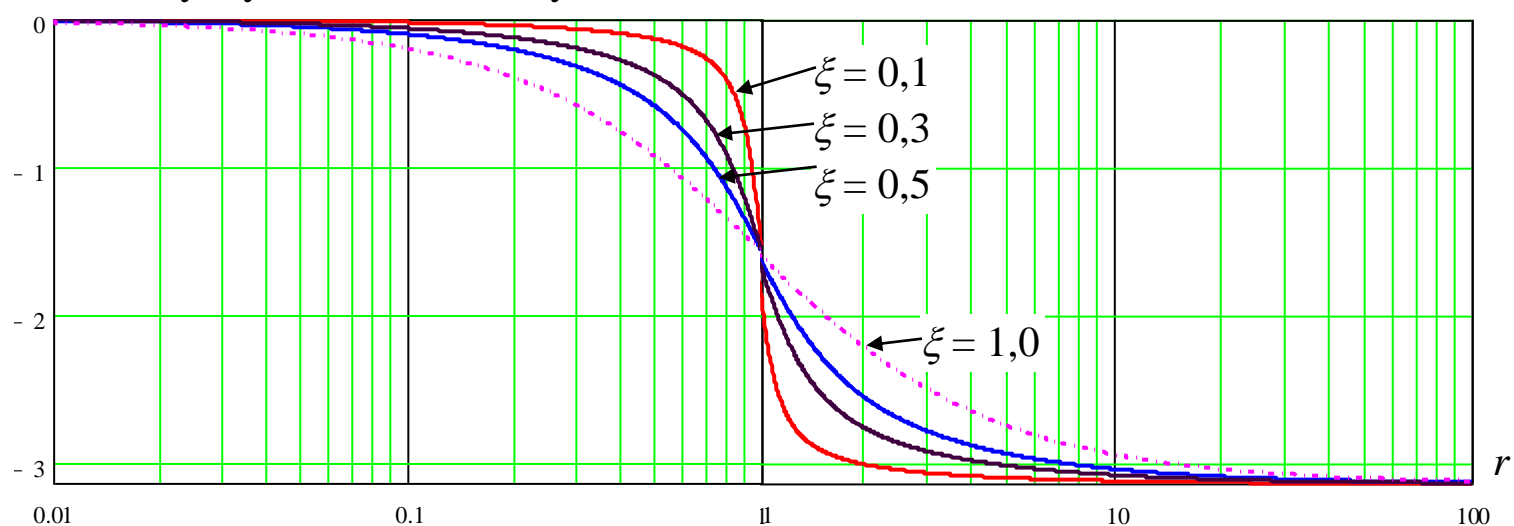
gdzie: $\xi = \frac{h}{\alpha}, \quad r = \frac{\omega}{\alpha}$



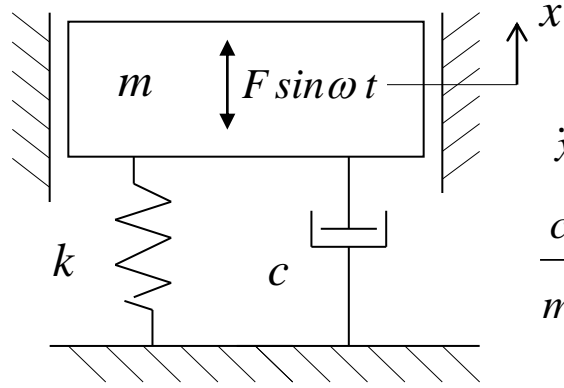
Amplitudowy wykres rezonansowy



Fazowy wykres rezonansowy



Izolacja drgań modelu układu o jednym stopniu swobody



Izolacja czynna - siłowa

$$\ddot{x} + 2h\dot{x} + \alpha^2 x = q \sin(\omega t)$$

$$\frac{c}{m} = 2h; \quad \frac{k}{m} = \alpha^2; \quad \frac{F}{m} = q$$

$$x = A \sin(\omega t - \varphi),$$

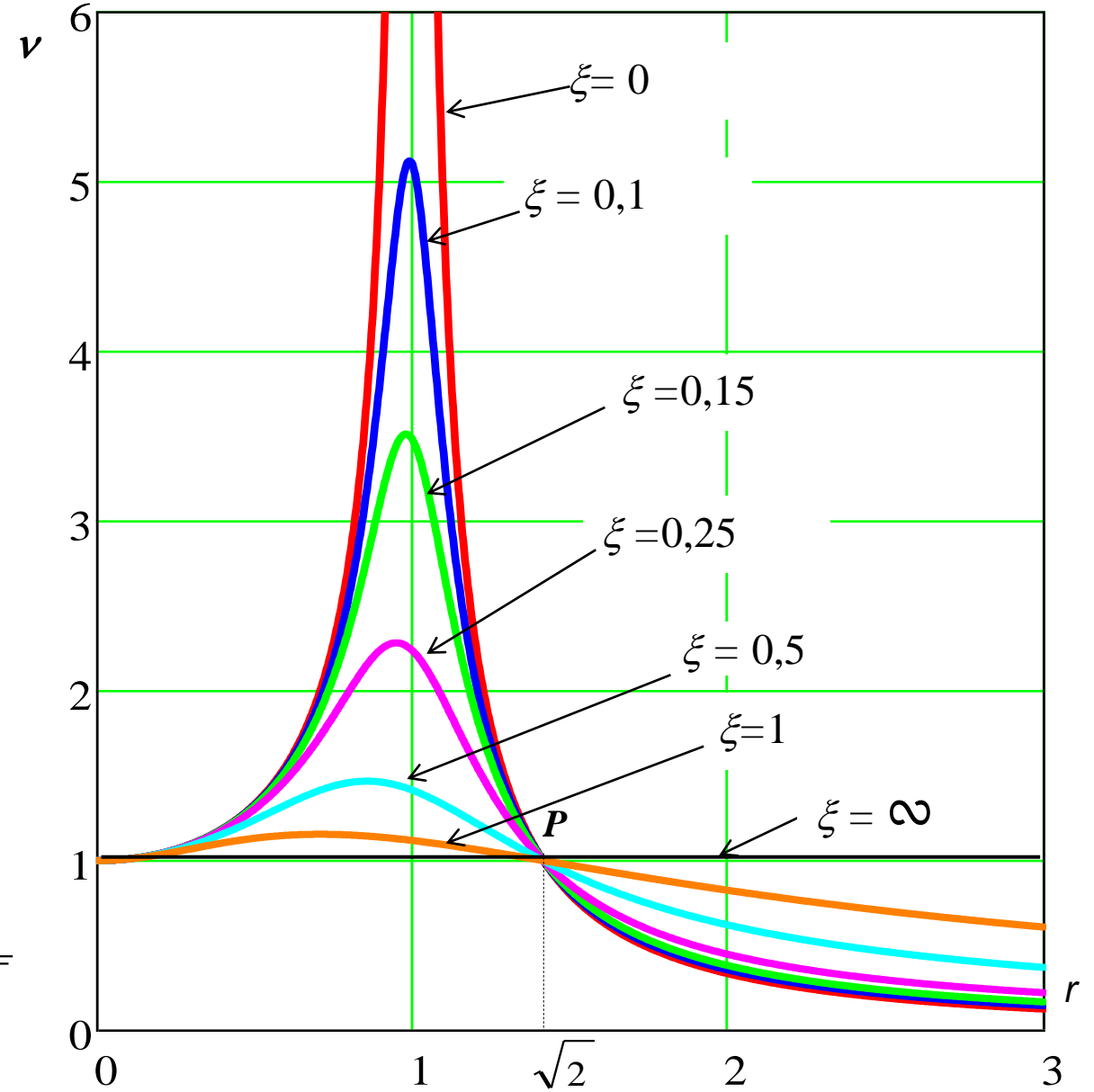
$$S = kx = kA \sin(\omega t - \varphi),$$

$$R = c\dot{x} = cA\omega \cos(\omega t - \varphi),$$

$$P_{max} = \sqrt{S_{max}^2 + R_{max}^2} = \sqrt{(kA)^2 + (c\omega A)^2}.$$

Współczynnik przeniesienia amplitudy siły:

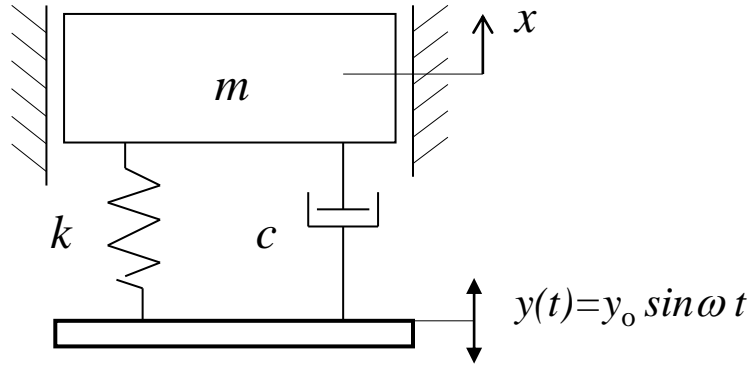
$$v = \frac{P_{max}}{F} = \frac{\sqrt{1 + 4 \frac{h^2}{\alpha^2} \frac{\omega^2}{\alpha^2}}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\alpha^2}\right)^2 + 4 \frac{h^2}{\alpha^2} \frac{\omega^2}{\alpha^2}}} = \frac{\sqrt{1 + 4\xi^2 r^2}}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + 4\xi^2 r^2}}$$



Wykres rezonansowy współczynnika przeniesienia

Izolacja drgań modelu układu o jednym stopniu swobody

Izolacja bierna - przemieszczeniowa



$$\ddot{x} + 2h \dot{x} + \alpha^2 x = Q \sin(\omega t + \beta),$$

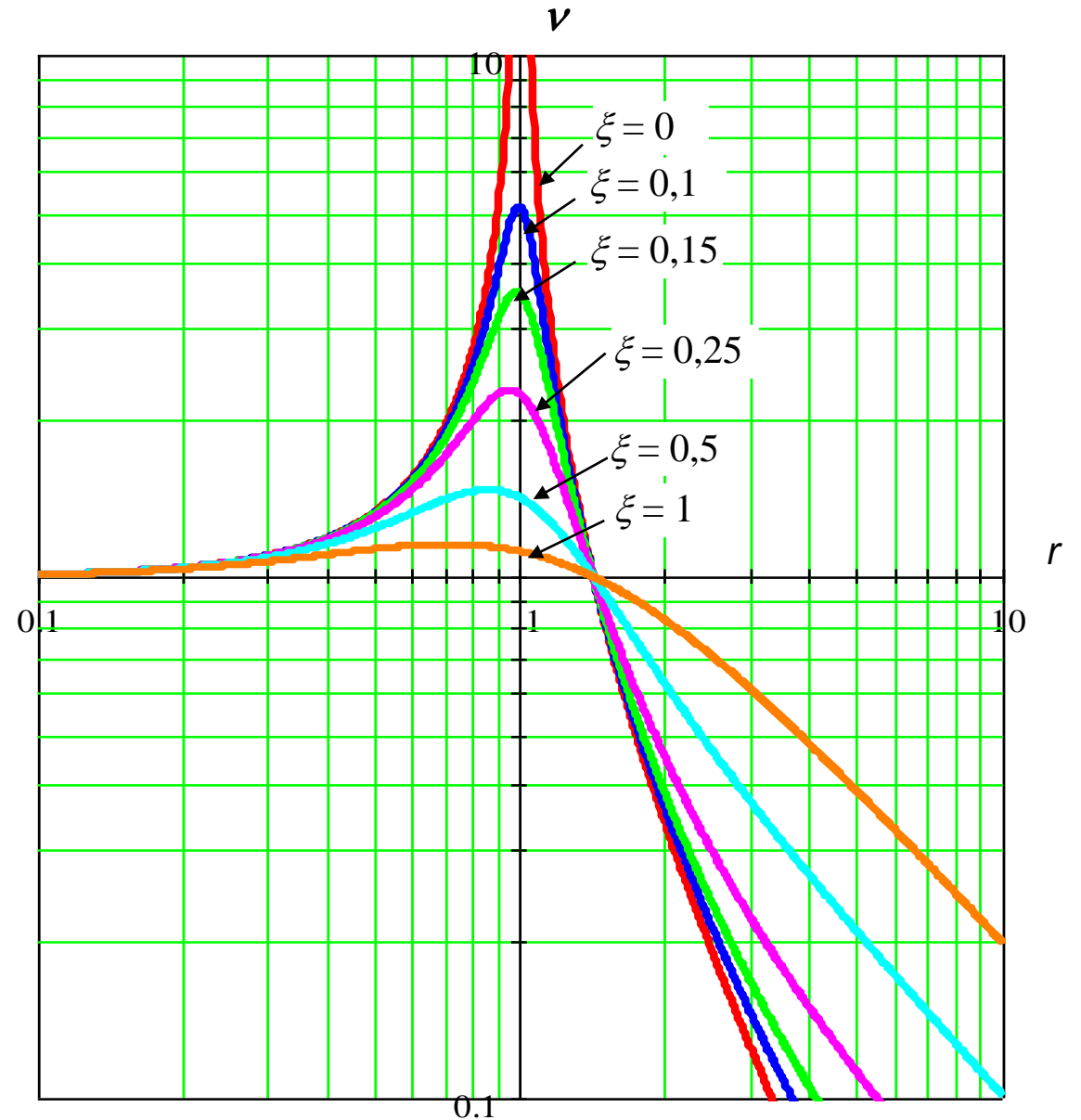
$$Q = \sqrt{(2hy_0\omega)^2 + (y_0\alpha^2)^2}, \beta = \arctg \frac{c\omega}{k}$$

$$x_s = A \sin(\omega t + \beta - \varphi)$$

$$A = \frac{Q}{\sqrt{(\alpha^2 - \omega^2)^2 + 4h^2\omega^2}} = \frac{y_0 \sqrt{\alpha^4 + 4h^2\omega^2}}{\sqrt{(\alpha^2 - \omega^2)^2 + 4h^2\omega^2}}$$

Współczynnik przeniesienia amplitudy przemieszczenia:

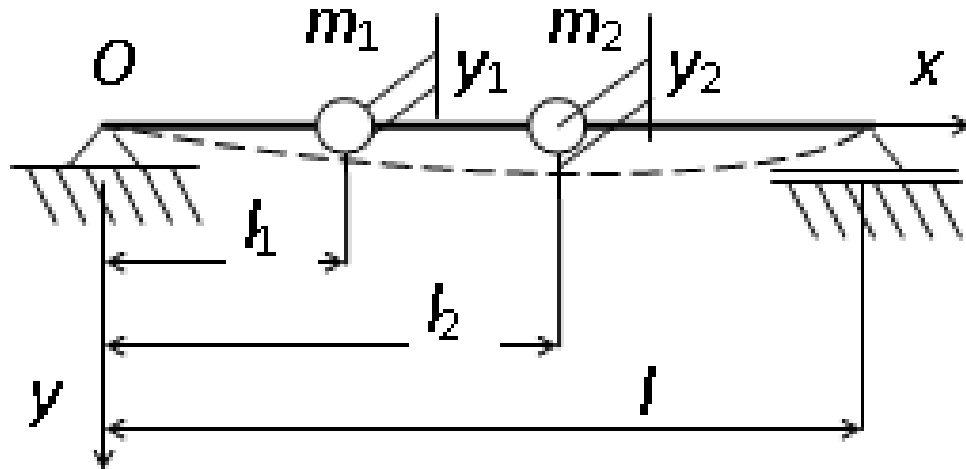
$$v = \frac{A}{y_0} = \frac{\sqrt{1 + 4 \frac{h^2}{\alpha^2} \frac{\omega^2}{\alpha^2}}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\alpha^2}\right)^2 + 4 \frac{h^2}{\alpha^2} \frac{\omega^2}{\alpha^2}}} = \frac{\sqrt{1 + 4\xi^2 r^2}}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + 4\xi^2 r^2}}$$



Wykres rezonansowy współczynnika przeniesienia we współrzędnych w skali logarytmicznej

Częstotliwości drgań swobodnych wału z osadzonymi masami skupionymi

Rozpatrywany jest wirnik w postaci wału z osadzonymi dwoma elementami o masach skupionych



Rozpatrywany wirnik dwumasowy

Związki pomiędzy statycznymi ugięciami wału a siłami działającymi w miejscach osadzenia mas:

$$y_1 = \delta_{11} P_1 + \delta_{12} P_2 \quad (1)$$

$$y_2 = \delta_{21} P_1 + \delta_{22} P_2$$

gdzie: δ_{ij} – współczynnik wpływu wyrażający ugięcie wału w punkcie i wywołane siłą jednostkową przyłożoną w punkcie j ,

Macierz współczynników wpływowych dla wału dwumasowego:

$$[\delta] = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} \\ \delta_{21} & \delta_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

W rachunku macierzowym równania (1) mają postać:

$$\{y\} = [\delta] \{P\} \quad (3)$$

gdzie: $\{y\} = \{y_1 \ y_2\}^T$ – wektor przemieszczeń mas skupionych;

$\{P\} = \{P_1 \ P_2\}^T$ – wektor sił reakcji wału na masy skupione.

$$\{P\} = [\delta]^{-1} \{y\} = [k] \{y\} \quad (4)$$

gdzie: $[k] = [\delta]^{-1}$ - macierz sztywności

$$[k] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{12} & k_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\delta_{22}}{\Delta} & -\frac{\delta_{12}}{\Delta} \\ -\frac{\delta_{12}}{\Delta} & \frac{\delta_{11}}{\Delta} \end{bmatrix} \quad (5)$$

gdzie: $\Delta = \delta_{11} \delta_{22} - \delta_{12}^2$.

Częstotliwości drgań swobodnych wału z osadzonymi masami skupionymi

Macierzowe równanie ruchu drgającego mas skupionych umieszczonych na bezmasowym wale ma postać:

$$[m]\{\ddot{y}\} = -[k]\{y\} \quad \text{gdzie:} \quad [m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & m_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

Dla układu dwumasowego równanie (6) ma postać:

$$m_1 \ddot{y}_1 + k_{11} y_1 + k_{12} y_2 = 0 \quad (7)$$

$$m_2 \ddot{y}_2 + k_{12} y_1 + k_{22} y_2 = 0$$

Dla głównych postaci drgań poszukuje się rozwiązań harmoniczych

$$y_1 = A_1 \sin(\alpha t); \quad y_2 = A_2 \sin(\alpha t) \quad (8)$$

Po podstawieniu (8) do (7) otrzymuje się układ równań wzg. A_1 i A_2

$$(k_{11} - \alpha^2 m_1) A_1 + k_{12} A_2 = 0 \quad (9)$$

$$k_{12} A_1 + (k_{22} - \alpha^2 m_2) A_2 = 0$$

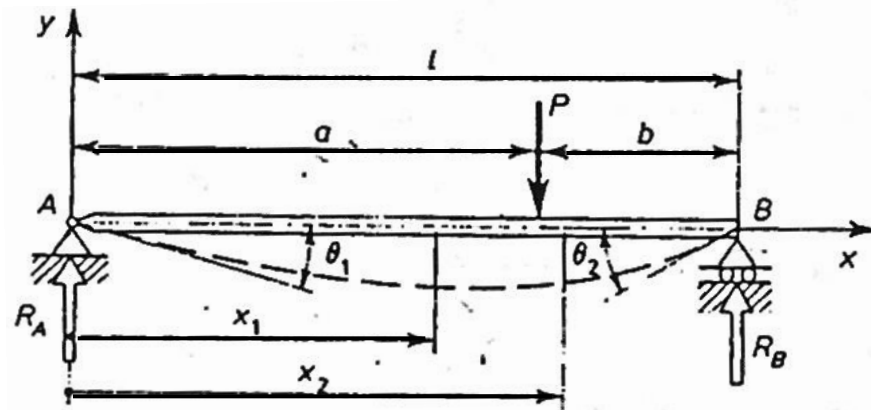
Z warunku istnienia niezerowych rozwiązań na A_1 i A_2 otrzymuje się równanie częstotliwości, z którego wyznacza się poszukiwane częstotliwości drgań własnych układu α_1 oraz α_2

$$\begin{vmatrix} k_{11} - \alpha^2 m_1 & k_{12} \\ k_{12} & k_{22} - \alpha^2 m_2 \end{vmatrix} = 0 \quad (10)$$

W ogólnym przypadku wału z n masami równanie częstości ma postać:

$$|[k] - \alpha^2 [m]| = 0 \quad (11)$$

Wyznaczanie współczynników wpływu dla wału na prostym podparciu



$$\text{Reakcje na podporach:} \quad R_A = \frac{P b}{l}; \quad R_B = \frac{P a}{l} \quad (12)$$

Równania różniczkowe osi ugiętej belki:

$$EJ y_1'' = -\frac{P b}{l} x_1 \quad \text{dla } 0 \leq x_1 \leq a, \quad (13)$$

$$EJ y_2'' = -\frac{P b}{l} x_2 + P(x_2 - a) \quad \text{dla } a \leq x_2 \leq l.$$

Warunki brzegowe i warunki ciągłości:

$$y_1(x_1 = 0) = 0, \quad y_2(x_2 = l) = 0, \quad (14)$$

$$y_1(x_1 = a) = y_2(x_2 = a), \quad y_1'(x_1 = a) = y_2'(x_2 = a).$$

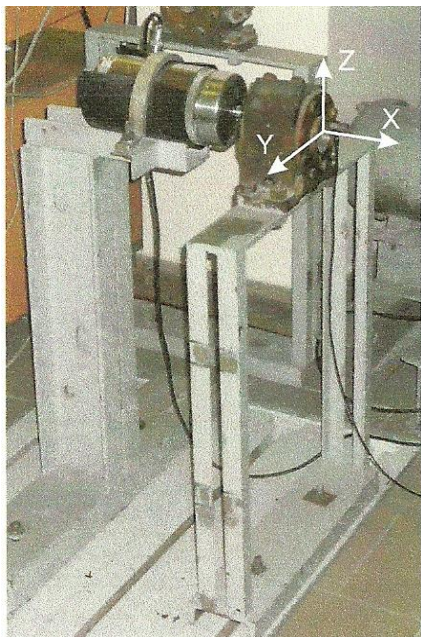
Po scałkowaniu równań (13) i wykorzystaniu warunków (14) otrzymuje się wyrażenia na ugięcia belki

$$y_1 = \frac{P b}{6 EJ} [-x_1^3 + (l^2 - b^2)x_1], \quad (15)$$

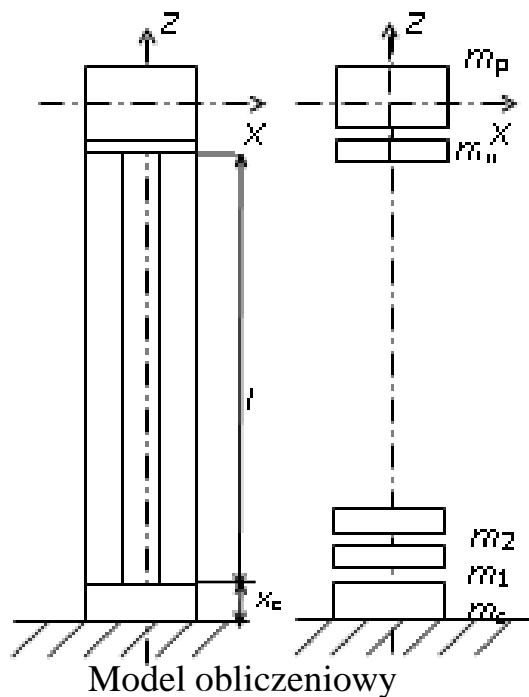
$$y_2 = \frac{P b}{6 l EJ} [-bx_2^3 + b(l^2 - b^2)x_2 + l(x_2 - a)^3].$$

Na podstawie (15) wyznacza się współczynniki wpływu δ_{ij} .

Badania dynamiki podpory łożyskowej

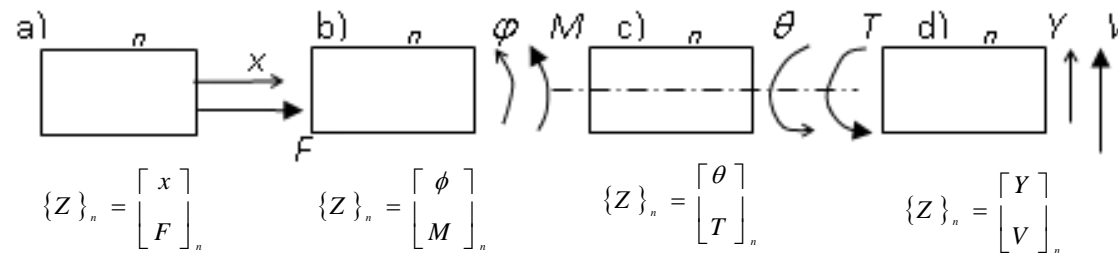


Stanowisko laboratoryjne



Model obliczeniowy

Obliczenia numeryczne. Podpora jako układ o skończonej liczbie stopni swobody. Metoda Myklestada.



Wektory stanu dla: a) rozciągania, b) zginania, c) skręcania, d) ścinania.

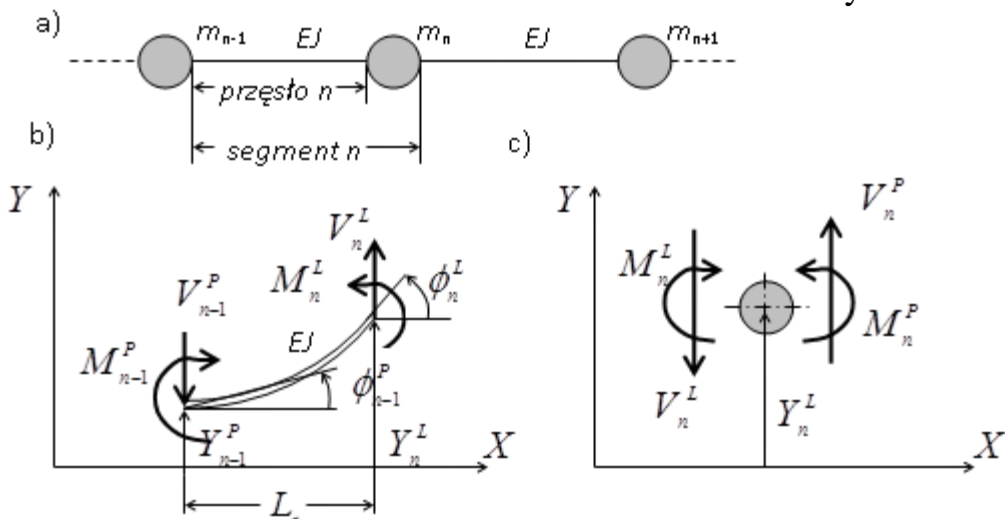
Podpora rozpatrywana jest jako struktura belkowa, którą dzieli się na skończoną liczbę segmentów. Zakłada się, że masy segmentów skupione są na ich końcach. Przy zginaniu i ścinaniu wektor stanu podpory ma postać:

$$\{Z\}_n = \begin{bmatrix} Y \\ \phi \\ M \\ V \end{bmatrix}_n = [Y \quad \phi \quad M \quad V]_n^T. \quad (1)$$

Macierze części sprężystej i masowej segmentu n są postaci:

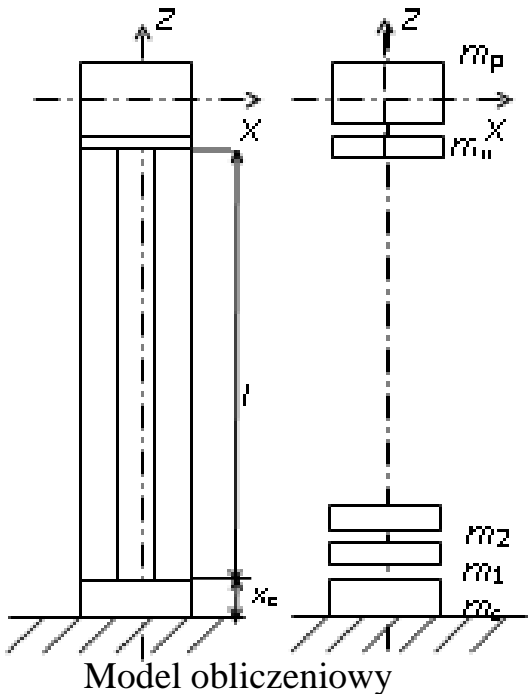
$$\begin{bmatrix} Y \\ \phi \\ M \\ V \end{bmatrix}_n^L = \begin{bmatrix} 1 & L & \frac{L^2}{2EJ} & -\frac{L^3}{6EJ} \\ 0 & 1 & \frac{L}{EJ} & -\frac{L^2}{2EJ} \\ 0 & 0 & 1 & -L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ \phi \\ M \\ V \end{bmatrix}_{n-1}^P \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} Y \\ \phi \\ M \\ V \end{bmatrix}_n^P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha^2 J_0 & 1 & 0 \\ -\alpha^2 m & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ \phi \\ M \\ V \end{bmatrix}_n^L \quad (3)$$



Podział układu poddanego zginaniu i ścinaniu na segmenty belkowe

Badania dynamiki podpory łożyskowej c.d.



Macierz przeniesienia n -tego segmentu belkowego określa się po wstawieniu (2) do (3):

$$\begin{bmatrix} Y \\ \phi \\ M \\ V \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} 1 & L & \frac{L^2}{2EJ} & -\frac{L^3}{6EJ} \\ 0 & 1 & \frac{L}{EJ} & -\frac{L^2}{2EJ} \\ 0 & -\alpha^2 J_0 & 1 - \alpha^2 J_0 \frac{L}{EJ} & -L + \alpha^2 J_0 \frac{L^2}{2EJ} \\ -\alpha^2 m & -\alpha^2 mL & -\alpha^2 m \frac{L^2}{2EJ} & 1 + \alpha^2 m \frac{L^3}{6EJ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ \phi \\ M \\ V \end{bmatrix}_{n-1} \quad (4) \Rightarrow \{Z\}_n^p = H_n \{Z\}_{n-1}^p \quad (5)$$

Wektor stanu n -tego elementu jest związany z wektorem stanu $\{Z\}_0^p$ na brzegu układu zależnością:

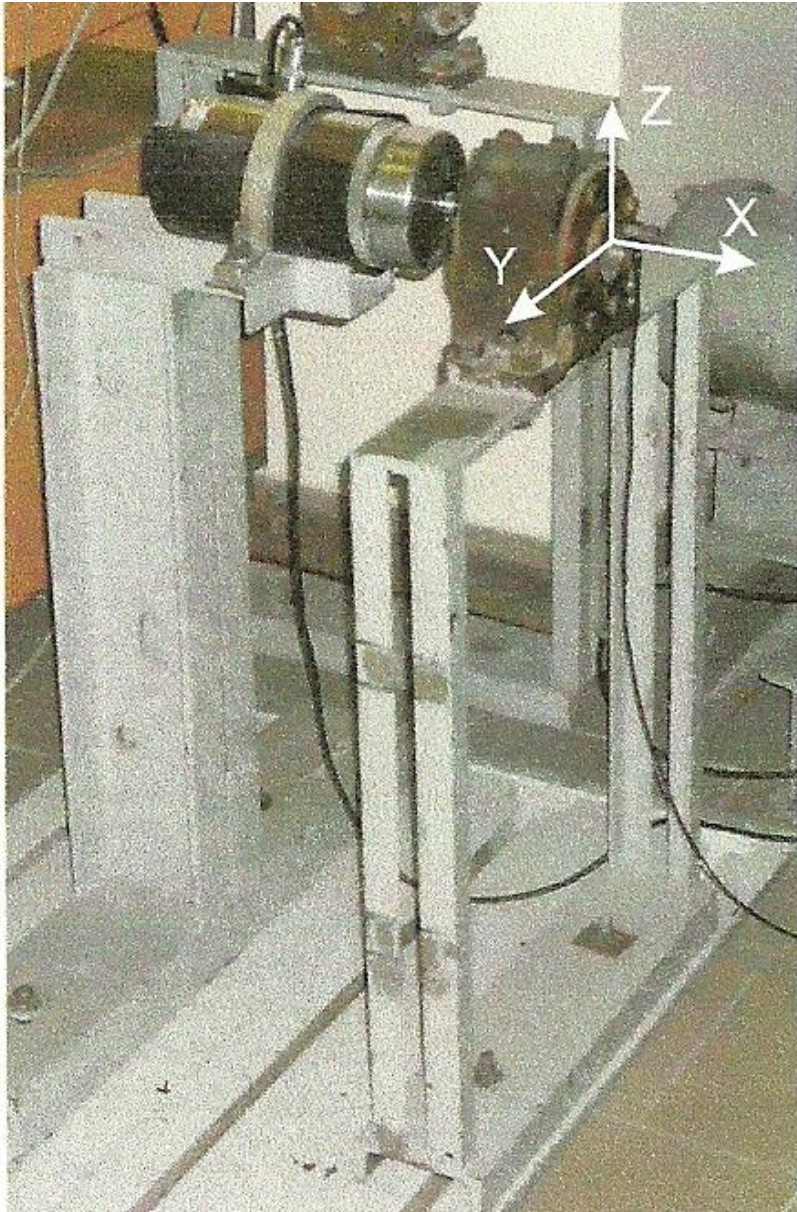
$$\{Z\}_n^p = \{H_n H_{n-1} \dots H_2 H_1\} \{Z\}_0^p \quad (6)$$

Tab.1. Warunki brzegowe dla różnych sposobów podparcia

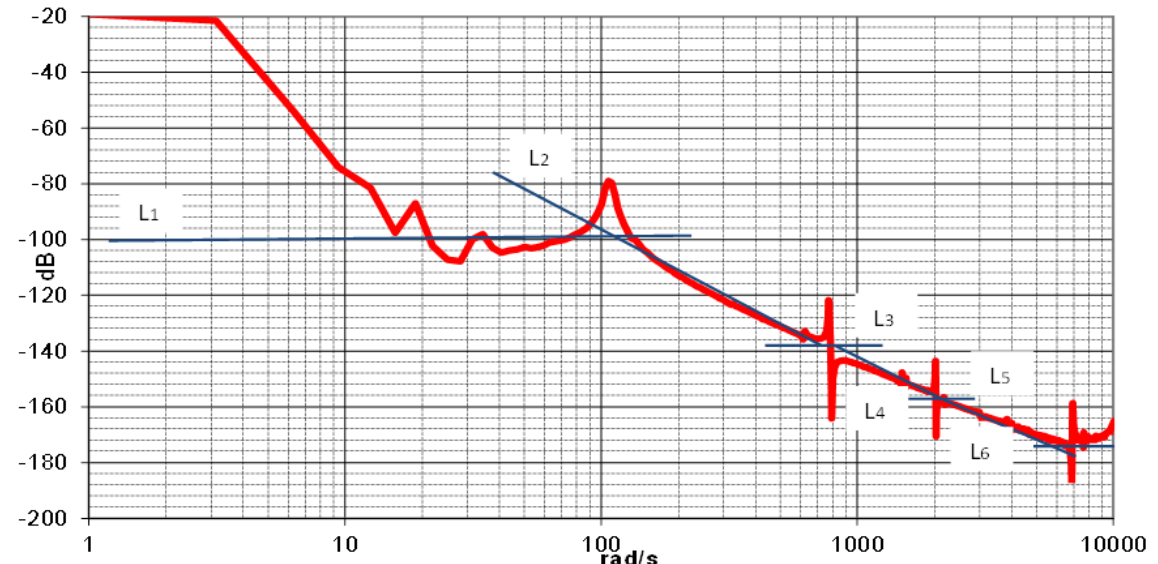
	Y	ϕ	M	V
Proste podparcie	0	ϕ	0	V
Swobodny koniec	Y	ϕ	0	0
Zamurowanie	0	0	M	V

Z Tab.1 wynika, że w początkowym punkcie (miejscu 0) belki mamy do czynienia z dwoma niezerowymi warunkami początkowymi uzależnionymi od rodzaju podparcia. Podobnie dzieje się na drugim końcu belki. Procedura obliczeń częstości własnych w metodzie Myklestada, polega na założeniu wartości częstości własnej α i przeprowadzeniu obliczeń z zastosowaniem macierzy przeniesienia. Wartość częstości α , która spełnia jednocześnie warunki brzegowe na obu końcach układu jest poszukiwaną częstością drgań własnych.

Badania dynamiki podpory łożyskowej. Badania doświadczalne.



Stanowisko laboratoryjne

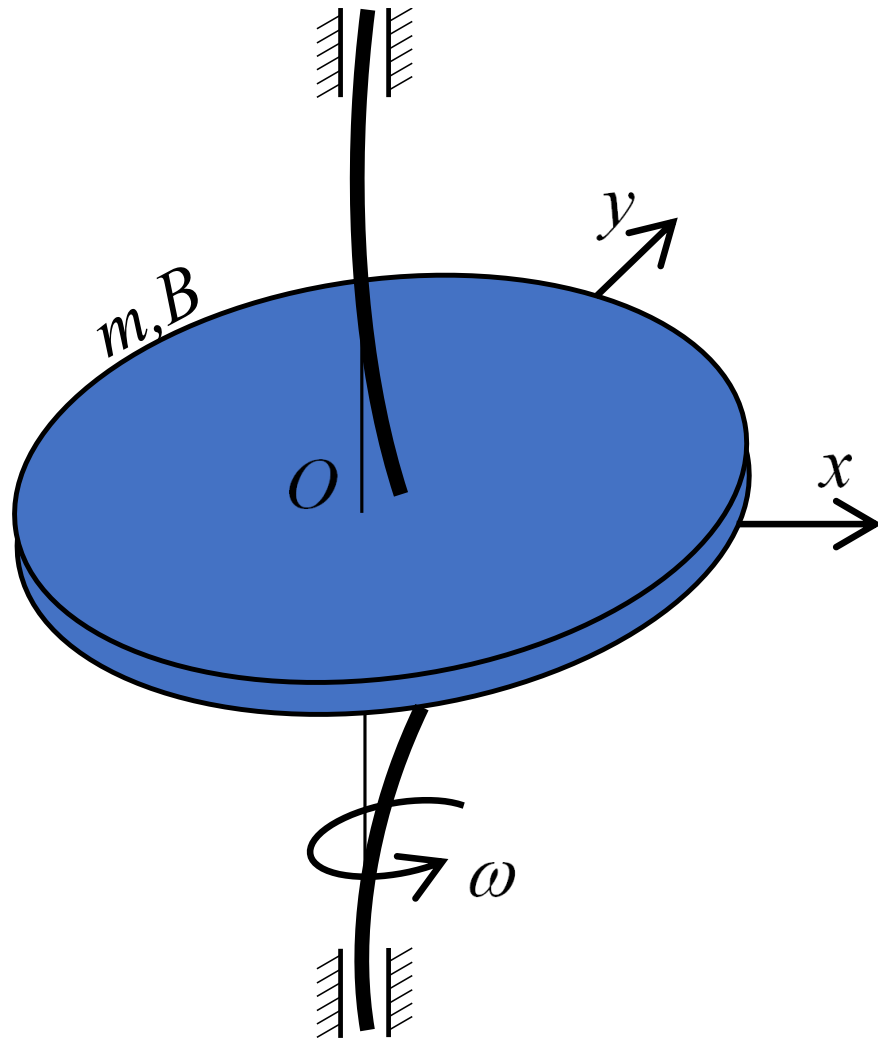


Logarymiczna charakterystyka częstotliwościowa podpory łożyskowej.

Tab.2. Identyfikacja transmitancji podpory

Asymptoty	Częstotliwość rogowa [rad/s]	Nachylenie [dB/dek]	Zmiana nachylenia [dB/dek]	Czynnik	Transmitancja czynnika
L ₁	0	0	0	n = 0	$k = 10^{-5}$
L ₂	117.22	-40	-40	biegunowy 2-go rzędu	$\frac{s^2}{117.22^2} + \frac{2(0.63)s}{117.22} + 1$
L ₃	788.60	0	+40	zerowy 2-go rzędu	$\frac{s^2}{788.60^2} + \frac{2(0.43)s}{788.60} + 1$
L ₄	812.83	-40	-40	biegunowy 2-go rzędu	$\frac{s^2}{812.83^2} + \frac{2(0.43)s}{812.83} + 1$
L ₅	1963.36	0	+40	zerowy 2-go rzędu	$\frac{s^2}{1963.36^2} + \frac{2(0.57)s}{1963.36} + 1$
L ₆	2208.00	-40	-40	biegunowy 2-go rzędu	$\frac{s^2}{2208^2} + \frac{2(0.48)s}{2208} + 1$

Badanie wpływu efektu żyroskopowego na częstotliwości własne i prędkości krytyczne wirnika tarczowego



Rozpatrywany wirnik tarczowy

Równania ruchu tarczy:

$$m \ddot{z} + k_{11} z + k_{12} \varphi = 0, \quad (1)$$

$$B \ddot{\varphi} - 2i\omega B \dot{\varphi} + k_{22} \varphi + k_{12} z = 0,$$

gdzie:

$$z = x + iy,$$

$$\varphi = -\varphi_y + i\varphi_x, \quad (2)$$

$$i = \sqrt{-1}.$$

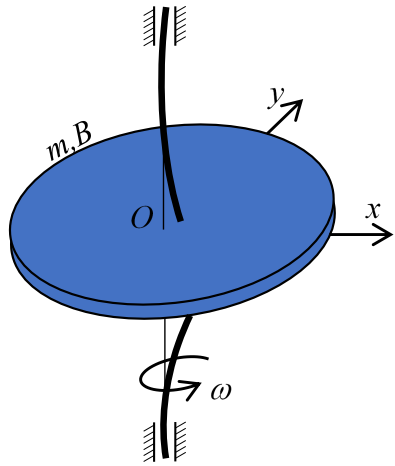
Rozwiązania równań ruchu:

$$z = Z e^{i\lambda t}, \quad \varphi = \Phi e^{i\lambda t}. \quad (3)$$

Po uwzględnieniu (3) w (1) otrzymuje się równanie częstotliwości drgań własnych tarczy w postaci

$$\begin{vmatrix} -m\lambda^2 + k_{11} & k_{12} \\ k_{12} & -B\lambda^2 + 2B\omega\lambda + k_{22} \end{vmatrix} = 0 \quad (4)$$

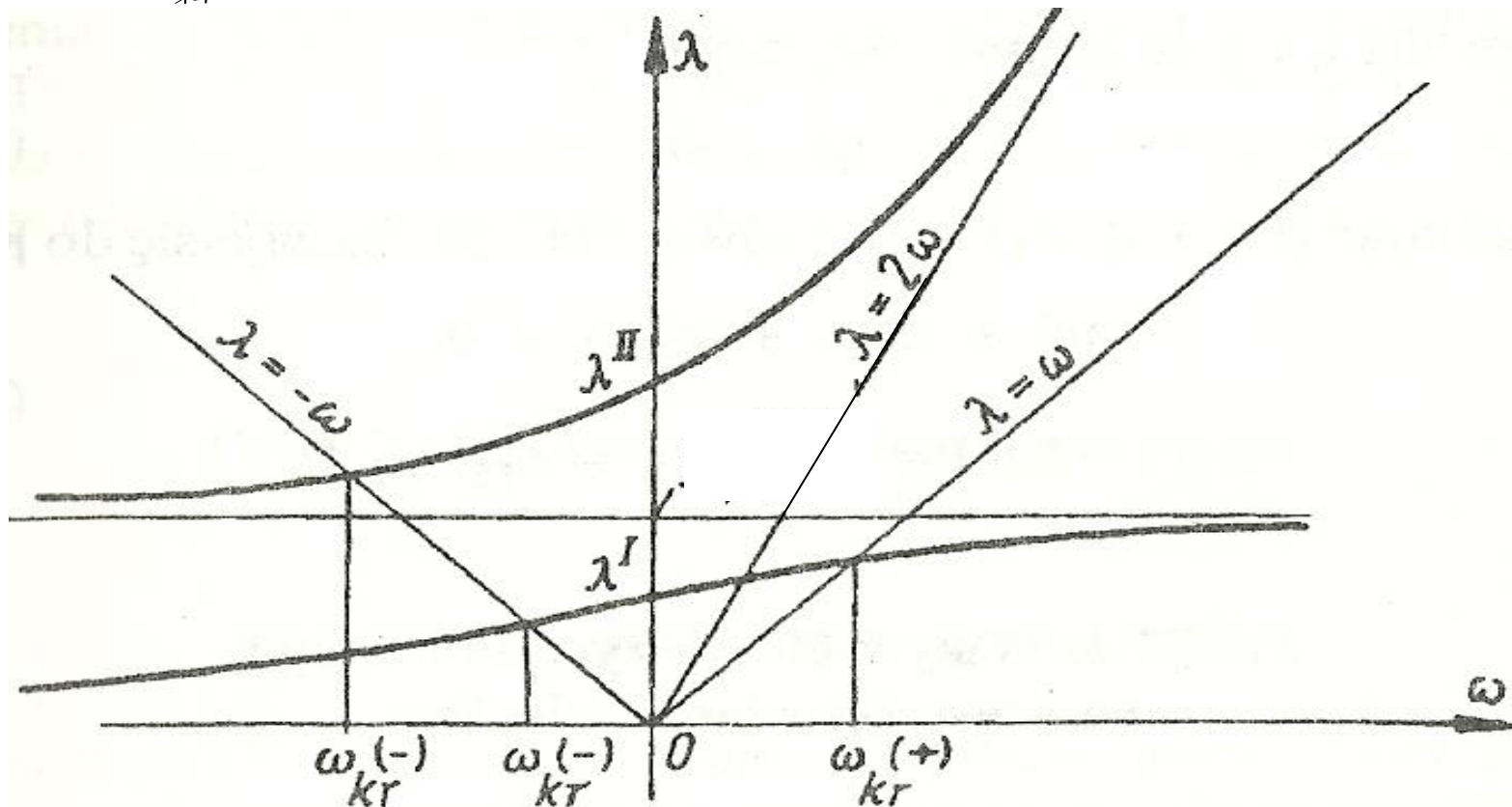
Badanie wpływu efektu żyroskopowego na częstotliwości własne i prędkości krytyczne wirnika tarczowego



Rozwiązując równanie (4) ze względu na ω otrzymuje się

$$\omega = \frac{\lambda^4 - \left(\frac{k_{11}}{m} + \frac{k_{22}}{B} \right) \lambda^2 + \frac{k_{11} k_{22} - k_{12}^2}{B m}}{2 \left(\lambda^3 - \frac{k_{11}}{m} \lambda \right)} \quad (5)$$

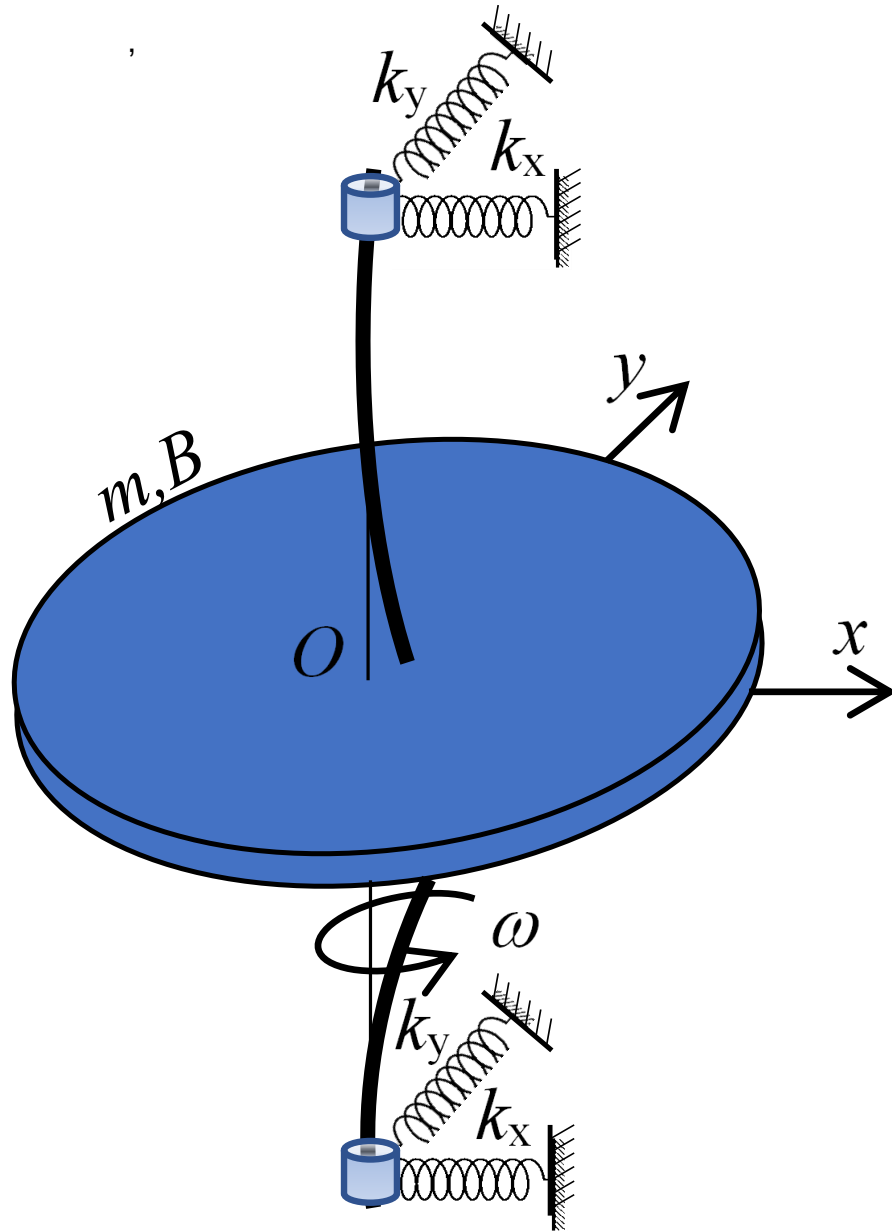
Na podstawie (5) wyznacza się wykres $\lambda(\omega)$. Odcięte punktów przecięcia wykresu $\lambda(\omega)$ z prostą $\lambda = \omega$ są prędkościami krytycznymi odpowiadającymi precesji prostej wirnika. Punkty przecięcia wykresu $\lambda(\omega)$ z prostą $\lambda = -\omega$ wyznaczają prędkości krytyczne odpowiadające precesji odwrotnej wirnika.



Funkcja $\lambda = \lambda(\omega)$ posiada dwie asymptoty wynikające z zerowania się mianownika (5). Pierwsza asymptota ma postać linii poziomej o równaniu $\lambda = (k_{11}/m)^{1/2}$, druga linii ukośnej o równaniu $\lambda = 2\omega$.

Wykres częstotliwości drgań własnych λ w zależności o prędkości kątowej ω .

Wpływ podatności podparcia na częstotliwości własne i prędkości krytyczne wirnika tarczowego



Równanie ruchu tarczy:

$$[M] \{x\} + [C] \{\dot{x}\} + [K] \{x\} = \{0\} \quad (1)$$

gdzie:

$$[M] = \text{diag} [m, B, m, B]$$

$$\{x\} = \{x, \varphi_y, y, \varphi_x\}^T$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2\omega B \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\omega B & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

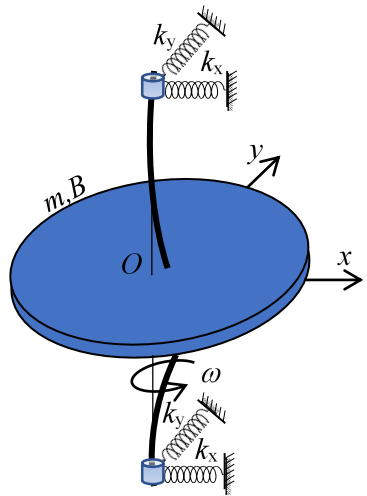
$$[K] = \begin{bmatrix} k_{x1} & -k_{x12} & 0 & 0 \\ -k_{x12} & k_{x2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{y1} & k_{y12} \\ 0 & 0 & k_{y12} & k_{y2} \end{bmatrix}$$

$$k_{x1} = \frac{2 k_x k_{11}}{2 k_x + k_{11}} \quad k_{y1} = \frac{2 k_y k_{11}}{2 k_y + k_{11}} \quad k_{x12} = \frac{2 k_x k_{12}}{2 k_x + k_{12}}$$

$$k_{y12} = \frac{2 k_y k_{12}}{2 k_y + k_{12}} \quad k_{x2} = \frac{2 k_x k_{22}}{2 k_x + k_{22}} \quad k_{y2} = \frac{2 k_y k_{22}}{2 k_y + k_{22}}$$

Rozpatrywany wirnik tarczowy na podatnym podparciu

Wpływ podatności podparcia na częstotliwości własne i prędkości krytyczne wirnika tarczowego



$$[M]\{x\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (1)$$

Rozwiązania równania ruchu:

$$x = X e^{i\lambda t},$$

$$\varphi_y = \Phi_y e^{i\lambda t},$$

$$y = Y e^{i\lambda t},$$

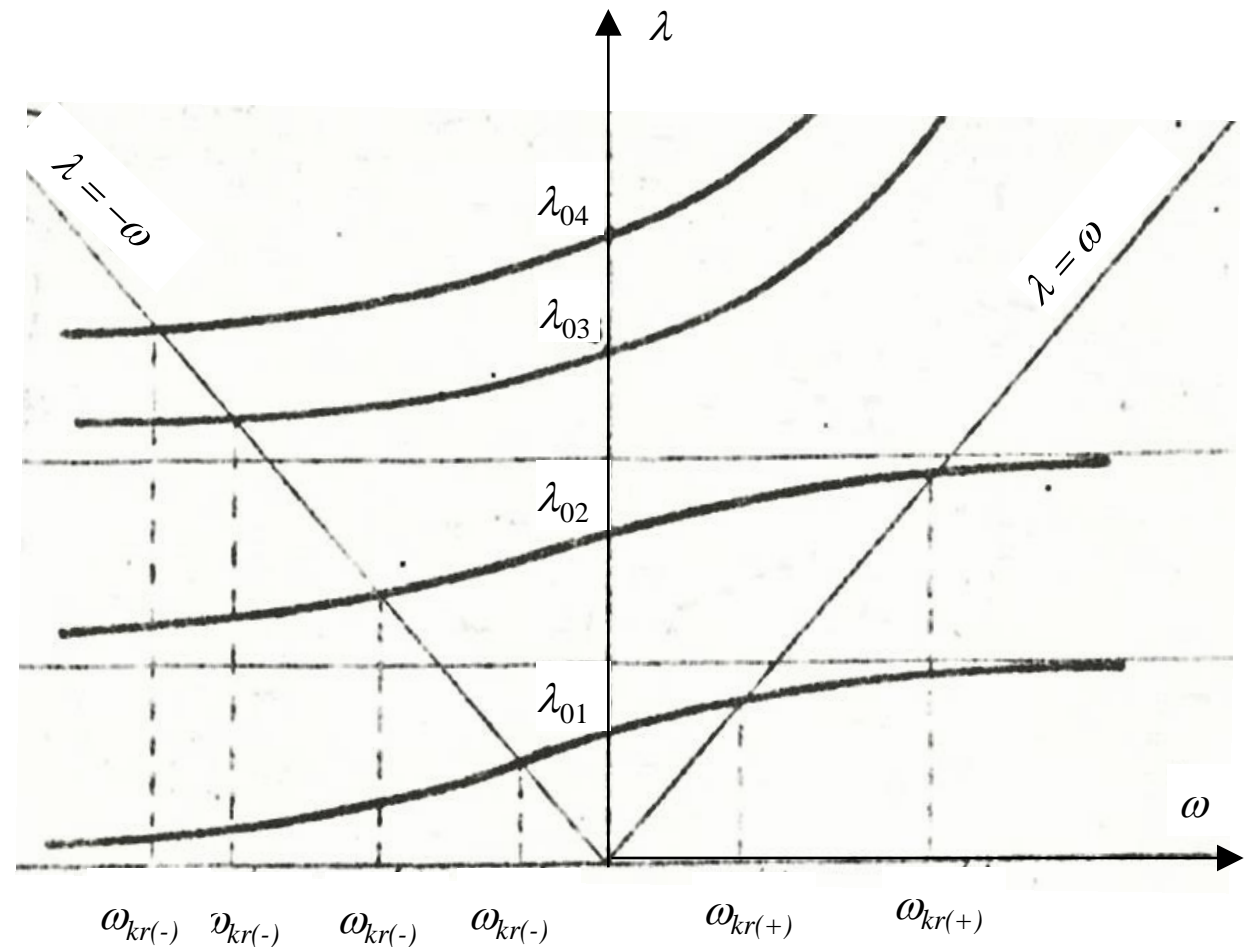
$$\varphi_x = \Phi_x e^{i\lambda t}. \quad (2)$$

Po uwzględnieniu (2) w (1) otrzymuje się równanie częstotliwości drgań własnych tarczy w postaci

$$\begin{vmatrix} -m\lambda^2 + k_{x1} & -k_{x12} & 0 & 0 \\ -k_{x12} & -B\lambda^2 + k_{x2} & 0 & -2B\omega\lambda \\ 0 & 0 & -m\lambda^2 + k_{y1} & k_{y12} \\ 0 & 2B\omega\lambda & k_{y12} & -B\lambda^2 + k_{y2} \end{vmatrix} = 0 \quad (3)$$

Rozwiązując równanie (4) ze względu na ω otrzymuje się

$$\omega = \pm \frac{1}{2B\lambda} \sqrt{\frac{k_{y12}^2 (k_{x2} - B\lambda^2)}{k_{y1} - m\lambda^2} - (k_{x2} - B\lambda^2)(k_{y2} - B\lambda^2) + \frac{k_{x12}^2 (k_{y2} - B\lambda^2)}{k_{x1} - m\lambda^2} - \frac{k_{x12}^2 k_{y12}^2}{(k_{y1} - m\lambda^2)(k_{x1} - m\lambda^2)}} \quad (4)$$



Wykres częstotliwości drgań własnych λ w zależności o prędkości kątowej ω .



Dynamika i diagnostyka energetycznych maszyn przepływowych

Wirujący wał podparty w łożyskach jest nieodłącznym elementem struktury większości maszyn i w konsekwencji stanowi najbardziej powszechne rozwiązanie techniczne związane z przekazywaniem energii mechanicznej.

Dla dobrego zilustrowania skali problemu związanego z rozwojem tego rozwiązania technicznego, trzeba zauważyć, że około 25% mocy generowanej do napędu setek milionów samochodów, pociągów, samolotów, statków i okrętów, i maszyn energetycznych funkcjonujących współcześnie na naszej planecie ulega dyssypacji na skutek procesów tarcia i drgań w układach przekazywania mocy. Tym zjawiskom towarzyszy zużycie i utrata niezawodności więc ekonomiczne efekty tych procesów są znacznie wyższe od kosztów rozpraszonej energii.

Głównym celem intensywnych badań i poszukiwania nowych rozwiązań w dziedzinie konstrukcji tych układów jest obniżenie strat, podniesienie niezawodności oraz zwiększenie gęstości strumienia przekazywanej energii co implikuje wzrost sprawności maszyny i ogranicza zużycie. Rozwój nowych technologii i metod obliczeniowych powoduje, że w ostatnich dekadach obserwuje się znaczące postępy w konstrukcji oraz sposobach nadzoru funkcjonowania tych rozwiązań technicznych. Postęp ten jest szczególnie zauważany w budowie i eksploatacji nowoczesnych energetycznych maszyn przepływowych.



Dynamika i diagnostyka energetycznych maszyn przepływowych

Te nowoczesne rozwiązania techniczne określa się często mianem niekonwencjonalnych.

Znajdujemy tu np. łożyska smarowane nietypowymi mediami (gazem, parą) stanowiącymi jednocześnie media robocze realizowanych obiegów termodynamicznych, aktywne łożyska magnetyczne lub unikalne systemy aktywnego tłumienia drgań wirujących wałów maszyn.

*Dysponując rozbudowanym, specjalizowanym dla realizacji założonych celów dydaktycznych laboratorium, gdzie istnieją stanowiska umożliwiające zapoznanie studentów z tymi nowoczesnymi technologiami w budowie i eksploatacji systemów przekazywania napędu maszyn, proponujemy włączenie do programu kształcenia na kierunku Mechatronika przedmiotu „ **Dynamika i diagnostyka energetycznych maszyn przepływowych**”.*

Podstawowym celem przedmiotu jest zaznajomienie słuchaczy z praktycznymi aspektami budowy i eksploatacji nowoczesnych maszyn przepływowych małej i średniej mocy i ich układów przekazywania energii mechanicznej. Wszystkie omawiane na wykładzie przykłady nowoczesnych technologii i rozwiązań technicznych w budowie i eksploatacji maszyn energetycznych i ich komponentów prezentowane są w trakcie ćwiczeń laboratoryjnych, podczas których studenci pod kierunkiem prowadzących zajęcia praktycznie zapoznają się z najnowocześniejszymi trendami i technologiami w budowie i eksploatacji wirnikowych maszyn przepływowych.



Dynamika i diagnostyka energetycznych maszyn przepływowych

Program proponowanego kursu zawiera 15 godzin wykładu i 30 godzin laboratorium obejmujących następujące treści merytoryczne:

- Problemy i definicje związane z określaniem stanu technicznego i wymaganiami dla maszyny wirnikowej w trakcie eksploatacji (dyspozycyjność, podatność eksploatacyjna, ryzyko w eksploatacji maszyn i systemów przemysłowych, macierze ryzyka eksploatacyjnego systemów przemysłowych);*
- Pomiar drgań i obróbka sygnałów pomiarowych w dynamice i diagnostyce maszyn oraz ich interpretacja, obowiązujące normy, typowe przyczyny awarii;*
- Wymagania związane z rzeczywistymi charakterystykami dynamicznymi maszyny. Metodologia projektowania charakterystyk dynamicznych systemów wirujących maszyn przepływowych;*
- Podstawy modelowania rzeczywistych systemów wirujących maszyn (wirnikowych) - przykłady modeli numerycznych zbudowanych dla celów eksploatacji oraz przykładowe analizy dynamiczne maszyn przepływowych zgodne z obowiązującymi normami;*
- Przykłady rzeczywistych analiz przemysłowych maszyn przepływowych oraz prezentacja wybranych zjawisk i uwarunkowań eksploatacyjnych - zestaw pokazowych eksperymentów laboratoryjnych;*
- Trendy rozwoju nowoczesnej konstrukcji i eksploatacji maszyn - aktywna kontrola drgań systemów wirujących maszyn - przykłady realizacji technicznych - zestaw pokazowych eksperymentów laboratoryjnych.*