

**ĆWICZENIA LABORATORYJNE  
Z MECHANIKI**

Praca zbiorowa pod redakcją

**KRZYSZTOFA S. JANUSZKIEWICZA  
JULIUSZA GRABSKIEGO**

ŁÓDŹ 2008

## Spis treści

<i>Przedmowa</i> .....	5
<b>Ćwiczenie 1.</b> Badanie zjawiska tarcia ( <b>W. Zwoliński, W. Lubnauer, K. S. Januszkiewicz</b> ) .....	7
<b>Ćwiczenie 2.</b> Wyznaczanie sił w prętach modelu kratownicy ( <b>W. Lubnauer</b> ) .....	21
<b>Ćwiczenie 3.</b> Wyznaczanie zredukowanego momentu bezwładności układu mechanicznego i masowych momentów bezwładności tarcz kołowych ( <b>M. Kazimierska Grębosz</b> ) .....	29
<b>Ćwiczenie 4.</b> Wyznaczanie momentu hamującego i kinetycznego współczynnika tarcia dla hamulca klockowego i taśmowego ( <b>B. Mianowski</b> ) .....	39
<b>Ćwiczenie 5.</b> Wyznaczanie okresu małych i dużych wahań wahadła fizycznego ( <b>B. Mianowski</b> ) .....	47
<b>Ćwiczenie 6.</b> Wyznaczanie współczynnika restytucji i impulsu reakcji dynamicznych w czasie uderzenia ( <b>A. Jach, J. Grabski</b> ) .....	59
<b>Ćwiczenie 7.</b> Wyznaczanie prędkości precesji żyroskopu. Wahadło stabilizowane żyroskopem ( <b>B. Mianowski</b> ) .....	67
<b>Ćwiczenie 8.</b> Wyznaczanie reakcji dynamicznych łożysk wirnika ( <b>W. Lubnauer</b> ) .....	77
<b>Ćwiczenie 9.</b> Zastosowanie żyroskopów w nawigacji ( <b>R. Ratajczyk</b> ) .....	85
<b>Ćwiczenie 10.</b> Komputerowa symulacja ruchu ciała sztywnego. Współczynnik restytucji ( <b>J. Grabski, K. S. Januszkiewicz</b> ) .....	96
<b>Ćwiczenie 11.</b> Drgania układu o jednym stopniu swobody ( <b>K. S. Januszkiewicz</b> ) .....	104
<b>Ćwiczenie 12.</b> Drgania układu o dwóch stopniach swobody. Dynamiczny eliminator drgań ( <b>K.S. Januszkiewicz</b> ) .....	114
<b>Ćwiczenie 13.</b> Badanie stanów równowagi układu mechanicznego ( <b>W. Lubnauer</b> ) .....	129
<b>Ćwiczenie 14.</b> Wyznaczenie reakcji dynamicznych w ruchu kulistym ( <b>A. Polka</b> ) .....	135
<b>Ćwiczenie 15.</b> Wyznaczanie prędkości kątowych ciał na podstawie twierdzenia o pochodnej krętu ( <b>B. Mianowski</b> ) .....	146
<b>Ćwiczenie 16.</b> Badanie stanów równowagi mechanizmów płaskich o jednym stopniu swobody ( <b>J. Strzałko</b> ) .....	155
<b>Ćwiczenie 17.</b> Maszyny proste – wielokrążki ( <b>J. Strzałko, J. Grabski</b> ) ....	169

<i>Ćwiczenie 18.</i> Tarcie cięgien o powierzchnię walcową – wzór Eulera ( <b>J. Strzałko, J. Grabski</b> ) .....	179
<i>Ćwiczenie 19.</i> Wyznaczanie wartości energii rozpraszanej podczas zderzenia ciał ( <b>J. Strzałko, J. Grabski</b> ) .....	189
<i>Ćwiczenie 20.</i> Wirtualne modelowanie układów mechanicznych ( <b>J. Grabski</b> ) .....	199
<i>Literatura</i> .....	211

Katedra Dynamiki Maszyn  
Materiały dydaktyczne

## Przedmowa

Podręcznik „Ćwiczenia laboratoryjne z mechaniki” pod redakcją K. S. Januszkiewicza i J. Grabskiego zawiera opisy stanowisk laboratoryjnych oraz opisy przeprowadzanych na nich ćwiczeń laboratoryjnych z mechaniki.

Przedstawiony zestaw ćwiczeń jest wykorzystywany na zajęciach dla różnych kierunków studiów, przede wszystkim na Wydziale Mechanicznym Politechniki Łódzkiej, ale także na Wydziale Organizacji i Zarządzania oraz na studiach międzywydziałowych prowadzonych przez Centrum Kształcenia Międzynarodowego PŁ.

Prace nad utworzeniem laboratorium mechaniki zainicjował prof. Michał E. Niezgodziński. Koncepcje i projekty stanowisk badawczych powstały w kierowanym przez niego Zespole Mechaniki<sup>1</sup> Instytutu Mechaniki Stosowanej PŁ. Autorami projektów konstrukcji stanowisk laboratoryjnych byli: Bogumił Mianowski (stanowiska do ćwiczeń nr: 4, 5, 7, 8, 14, 15; modyfikacja stanowiska do ćwiczenia nr 6; współpraca przy opracowaniu stanowisk do ćwiczeń nr: 2, 3), Krzysztof S. Januszkiewicz (stanowiska do ćwiczeń nr 11 i 12), Włodzimierz Lułnauer (stanowiska do ćwiczenia nr 2 i do pierwszej wersji ćwiczenia nr 8), Marianna Kazimierska-Grębosz (stanowisko do ćwiczenia nr 3), Andrzej Polka (współpraca przy opracowaniu stanowiska do ćwiczenia nr 14), Roman Ratajczyk (stanowisko do ćwiczenia nr 9), Jarosław Strzałko (stanowiska do badania stanów równowagi mechanizmów płaskich – w tym opracowaniu oznaczone jako nr 16), Zygmunt Towarek (stanowisko do ćwiczenia nr 6), Waław Zwoliński (stanowisko do ćwiczenia nr 1). Wykonanie stanowisk doświadczalnych (budowa urządzeń, stojaków, ram, przygotowanie linii pomiarowych) nie byłoby możliwe bez zaangażowania się w te prace ówczesnych pracowników Zespołu: Andrzeja Gossa, Henryka Kacalaka, Wojciecha Kaliny, Jana Mikulskiego, Janusza Modrzejewskiego i Władysława Pawlaka.

Pierwszy skrypt *Ćwiczenia laboratoryjne z mechaniki ogólnej* – pod redakcją M.E. Niezgodzińskiego – zawierający opis trzynastu ćwiczeń ukazał się w roku 1986. W następnych latach stanowiska pomiarowe ulegały modyfikacji, a ćwiczenia były uzupełniane o programy komputerowe wspomagające obliczenia. Wprowadzono także dodatkowe ćwiczenie nr 10 (opracowane przez Juliusza Grabskiego) dotyczące komputerowej symulacji ruchu. Kolejna wersja skryptu to *Laboratorium mechaniki ogólnej* wydane pod redakcją Tadeusza Niezgodzińskiego przez Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej (Łódź 1994), zawierała opis piętnastu ćwiczeń.

Następna wersja skryptu uwzględniała zmiany w laboratorium mechaniki, jakich dokonano w latach 1986-2002. Była ona kontynuacją – jeśli chodzi o tematykę – wykorzystywanego dotychczas opracowania *Laboratorium mechaniki ogólnej*; dotyczyła tych samych stanowisk badawczych, ale została inaczej opracowana.

---

<sup>1</sup>Zespół Mechaniki został w roku 1991 przekształcony w Katedrę Mechaniki Ogólnej (Wydział Mechaniczny PŁ).

Z powodu różnych przeszkód została wydana jedynie ich część: *Ćwiczenia laboratoryjne z mechaniki – dla kursu magisterskiego* (Wydawnictwo PŁ, 2005).

Kilka spośród zamieszczonych tu ćwiczeń (nr: 16, 17, 18, 19) powstało w utworzonym w roku 2003 Zakładzie Mechaniki Analitycznej Katedry Systemów Produkcji. Zostały one opracowane i wydane w formie skryptu *Ćwiczenia laboratoryjne z mechaniki – przez J. Strzałko i J. Grabskiego* (Wydawnictwo PŁ, 2006). W tym opracowaniu znalazły się ich zmodyfikowane wersje.

Po reorganizacji niektórych jednostek Wydziału Mechanicznego w roku 2005 zarówno Katedra Mechaniki Ogólnej, jak i Zakład Mechaniki Analitycznej wraz z istniejącymi laboratoriami dotyczącymi mechaniki, zostały dołączone do Katedry Dynamiki Maszyn kierowanej przez prof. T. Kapitaniaka, a kierownikiem przedmiotu został prof. K. Czołczyński.

Przygotowany obecnie skrypt zawiera opis ćwiczeń, które są aktualnie wykorzystywane przy prowadzeniu zajęć laboratoryjnych z mechaniki. W skrypcie są opisane stanowiska laboratoryjne, na których przeprowadza się eksperymenty i dokonuje pomiarów. Przedstawione są również teoretyczne podstawy analizowanych zagadnień oraz modele (fizyczne, matematyczne i wirtualne) używane w analizie. Redagowanie całej pracy wymagało wprowadzenia znacznych zmian w opisach ćwiczeń – zmiany te staraliśmy się uzgodnić z zainteresowanymi tym Autorami.

Przy omówieniu każdego z ćwiczeń jest podany cel ćwiczenia, a następnie – po krótkim wprowadzeniu – przedstawiony jest teoretyczny opis omawianego zjawiska oraz opis stanowiska badawczego i przebiegu pomiarów. Ponadto został wskazany sposób opracowania wyników (polegający na wykonaniu pomocniczych obliczeń oraz analizie niepewności pomiarów) i przygotowania sprawozdania (w tym sformułowanie wniosków). W końcowej części opisu ćwiczenia zostały zamieszczone pytania i problemy, które będą poruszane przy sprawdzaniu wiadomości studentów dotyczących danego ćwiczenia.

W tym miejscu chcielibyśmy podziękować wszystkim, którzy w latach 1985-2008 brali udział w pracach związanych z projektowaniem, wykonaniem, oprzyrządowaniem i opisem stanowisk badawczych znajdujących się w laboratorium mechaniki. Należy szczególnie podkreślić zaangażowanie Profesora Michała E. Niezgodzińskiego w tworzeniu od podstaw tego laboratorium. To właśnie dzięki Jego inicjatywie i skuteczności działań - w nie zawsze sprzyjających okolicznościach - studenci otrzymali możliwość lepszego opanowania zagadnień mechaniki technicznej. Składamy również podziękowania Koledze Bogumiłowi Mianowskiemu za udostępnienie bardzo precyzyjnie wykonanych przez Niego (w programie „Solid Edge”) rysunków stanowisk badawczych.

Łódź, wrzesień 2008

K.S. Januszkiewicz, J. Grabski