

ZBIGNIEW WITOLD ENGEL*

PRZYRODA A MECHANIKA

NATURE AND MECHANICS

Streszczenie

Pomiędzy światem przyrody a osiągnięciami wielu dziedzin nauki, w tym mechaniki, istnieją ściśle analogie. Ludzie od najdawniejszych czasów, obserwując zjawiska zachodzące w przyrodzie i naśladowując je, umieli wykorzystać niektóre spostrzeżenia w praktyce. Mechanika rozumiana w całym swoim szerokim zakresie od zarania dziejów do dzisiaj wykorzystywała zjawiska zachodzące w świecie przyrody, na podstawie których określone zostały definicje i główne zasady.

W artykule przedstawiono niektóre przykłady stosowania zjawisk przyrody w mechanice. Wychodząc od Witruwiusza, poprzez prace Mikołaja Kopernika, Galileusza, Leonarda da Vinci, Lighthilla, współczesne prace uczonych polskich, angielskich i japońskich, pokazano niektóre praktyczne zastosowania zjawisk przyrodniczych.

Słowa kluczowe: przyroda, mechanika

Abstract

There are very precise analogies between Nature and the achievements of many branches of science including mechanics. For time immemorial people have observed the phenomena of nature and following them, they have made use of some observations and found some applications. The basic definitions and crucial principles of mechanics have been formulated as the results of attempts to understand nature.

In the lecture some chosen examples of the application of nature phenomena in mechanics have been presented. Beginning with Vitruvius's works, through Nicolas Copernicus, Galileo, Leonardo da Vinci, Lighthill's works and recent results of a Polish, English and Japanese researchers some application of natural phenomenon have been shown.

Keywords: nature, mechanics

* Prof. dr hab. inż. Zbigniew Witold Engel, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

1. Wstęp

Ludność od zarania dziejów obserwuje zjawiska zachodzące w środowisku przyrodniczym. Zjawiska te przyczyniły się do powstania wielu narzędzi, urządzeń i zainicjowały wszelkie prace techniczne i naukowe. Podstawowe prawa przyrody z wielu dziedzin nauki zostały wykryte i wykorzystane przez świat natury, zanim umysł ludzki je poznał, zrozumiał i opanował. Ludzie, obserwując zjawiska zachodzące w świecie przyrody, naśladowali je w tworzeniu prostych narzędzi czy urządzeń. Jako przykład służyć może wynalezienie łuku. Przeszło 20 000 lat temu człowiek, obserwując ugięcia sprężyste drzew, skonstruował łuk, który jest z punktu widzenia mechaniki przyrządem do gromadzenia energii potencjalnej i jej zamiany na energię kinetyczną strzały. Przypuszcza się, że u podstaw wynalezienia koła leżały obserwacje toczących się pni drzew lub innych brył.

Obserwacja Słońca i innych ciał niebieskich spowodowała, że człowiek szybko zauważył regularność ruchu Słońca, Księżyca i gwiazd stałych. Obserwacja tych ruchów doprowadziła do podjęcia prób ich opisu, a tym samym do początków mechaniki.

Znany niemiecki fizyk, Max Theodor Laue, w swojej monografii „Historia fizyki” napisał [20]: *Na początku była mechanika. Statyka, nauka o równowadze, sięga w czasy starożytne. Powołało ją do życia znaczenie praktyczne, jakie śruba, dźwignia, równia pochyła, wielokrążki – mają przy wykonywaniu ciężkich prac fizycznych (...).* Laue w swoim dziele mówi dalej: *wytłumaczenie jakiegoś procesu w przyrodzie polegać może tylko na powiązaniu go z innymi procesami na podstawie poznanych praw przyrody, a więc na tym, żeby kompleks powiązanych ze sobą procesów opisywać jako całość.*

W artykule będzie mowa o wpływie świata przyrody na mechanikę. Dlaczego na tę dziedzinę nauki? Mechanika stanowi podstawę dla każdej konstrukcji technicznej, o ile jest to konstrukcja mechaniczna. Sięga tym samym w życie codzienne. Znajduje zastosowanie w naukach biologicznych, na przykład jako mechanika elementów organizmu, albo podczas słyszenia. Zajmuje się elastycznym odkształcaniem ciał stałych. Obszarem jej zainteresowań są również prądy w cieczach i gazach oraz nauka o falach i drganiach sprężystych, jakie w ciałach mogą zachodzić.

Głównym czynnikiem inspirującym do przygotowania tego artykułu był wykład inauguracyjny znakomitego polskiego uczonego profesora Maksymiliana Tytusa Hubera pt. „Technika współczesna a wiedza przyrodnicza”, wygłoszony w dniu 9 kwietnia 1946 r. na oficjalnej inauguracji pierwszego po wojnie roku akademickiego na Politechnice Gdańskiej. Profesor Huber stwierdził: *Ponieważ technika w najogólniejszym znaczeniu ma być pojmowana jako umiejętność korzystania ze skarbów przyrody, przeto musi się opierać na znajomości praw rządzących w przyrodzie, czyli na wiedzy przyrodniczej.* Drugim czynnikiem, który zmobilizował nas do przygotowania tego artykułu był wykład profesora Litwiniszyna pt. „Kilka uwag na temat nieciągłych zjawisk przyrodniczych” wygłoszony w 1979 r. podczas nadania mu tytułu doktora honoris causa Akademii Górniczo-Hutniczej.

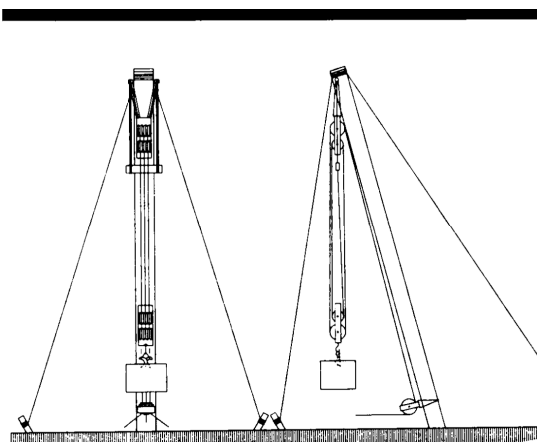
Tak rozumiana mechanika wykorzystywała zjawiska zachodzące w świecie przyrody. W dalszej części artykułu przedstawiono tylko niektóre przykłady wykorzystania zjawisk przyrody do rozwoju mechaniki.

2. Czasy starożytne

Wśród wielu starożytnych twórców mechaniki należy wymienić Arystotelesa (384-322 p.n.e.), dla którego pojęcie ruchu odgrywało podstawową rolę. Uważał, że badanie ruchu prowadzi do poznania przyrody. Należy zwrócić uwagę na fakt, że Arystoteles po raz pierwszy w tytule swojego dzieła „Problemata Mechaniczne” użył słowa „mechanika”.

Do dzisiaj zachowało się dzieło Witruwiusza pt. „O architekturze ksiąg dziesięć” napisane przed przeszło dwoma tysiącami lat. Dzieło to jest kompilacją wielu zagadnień, począwszy od roli i prawideł architektury, przez zasady budowy świątyń, zasady projektowania budowli publicznych z uwzględnieniem problemów akustycznych, opis zegarów słonecznych i wodnych, a skończywszy na opisie machin w księdze dziesiątej.

W rozdziale pierwszym księgi dziesiątej Witruwiusz stwierdza: *Wzorem dla wszelkich mechanizmów była przyroda, która jako nauczyciel i mistrz przez obrót świata nauczyła nas zasad mechaniki. Zastanówmy się bowiem i spójrzmy na związek między Słońcem, Księżycem i pięciu planetami, gdyby nie poruszały się według praw mechaniki, nie mielibyśmy zmian oświetlenia i dojrzałych owoców. Skoro więc nasi przodkowie to zaobserwowali, zaczęli czerpać wzory z natury i naśladować ją, naprowadzeni na to przez boskie dzieła, zastosowali te wzory dla ułatwienia życia. W ten sposób pewne sprawy ułatwiali sobie przez zastosowanie machin i ich obrotów, inne zaś za pomocą instrumentów, a gdy zauważyli, że coś nadaje się do użytku, starali się to stopniowo ulepszać przez badania, sztukę i prawidła [15].*



Rys. 1. Zasada budowy maszyny do podnoszenia ciężarów według Witruwiusza [15]

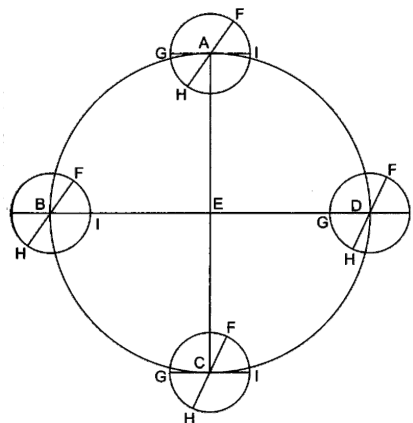
Fig. 1. Principle of design of a machine for hoisting loads (after Vitruvius [15])

3. Mikołaj Kopernik i jego epoka

Profesor Średniawa napisał [13] *Epokowe dzieło Kopernika „De revolutionibus orbium coelestium”, które ukazało się w roku 1543, należące formalnie do astronomii miało zasadnicze znaczenie dla rozwoju idei fizycznych, a zwłaszcza do sformułowania podstaw mechaniki. Do tych słów należy dodać, że obserwacje zjawisk przyrody poczynione przez*

Kopernika przyczyniły się do opisu wielu zjawisk mechanicznych. Obserwując ruch ciał niebieskich, Kopernik stwierdził, że Ziemia posiada ruch potrójny. Pierwszy odbywa się po wielkim kręgu dokoła Słońca, według znaków Zwierzyńca Niebieskiego, w ciągu roku. Drugi ruch Ziemi – to jej własny obrót odbywający się podczas jednej doby dokoła jej biegunów. Trzecim ruchem Ziemi jest ruch zbroczenia. Obserwacje i rozumowanie Kopernika leżą u podstaw analizy ruchów złożonych brył.

Kopernik rozwinął zjawisko precesji, tj. przemieszczanie się osi obrotu ciała. Jan Śniadecki w swoim dziele o „O Koperniku” wydanym w 1802 r. pisze: *Bez początków mechaniki i ogólnej fizyki, za czasów Kopernika wcale nie znanych, prawie było niepodobna wynieść się nad te ciasne i fałszywe pojęcia wielu. Nie dosyć było uważać i tłumaczyć obroty i położenia ciał niebieskich, trzeba było z myślą metafizyczną biegu złączyć myśl fizyczną siły bieg sprawującej i dalej podaje wszystko cokolwiek się rusza i odmienia tak na Ziemi, jak i w głębi nieba, jest działem przedwiecznymi prawami opisanej mechaniki przyrodzenia. Właśnie Kopernik otworzył wstęp do tych wielkich i ogólnych wyobrażeń.*



Rys. 2. Ruchy Ziemi [7]

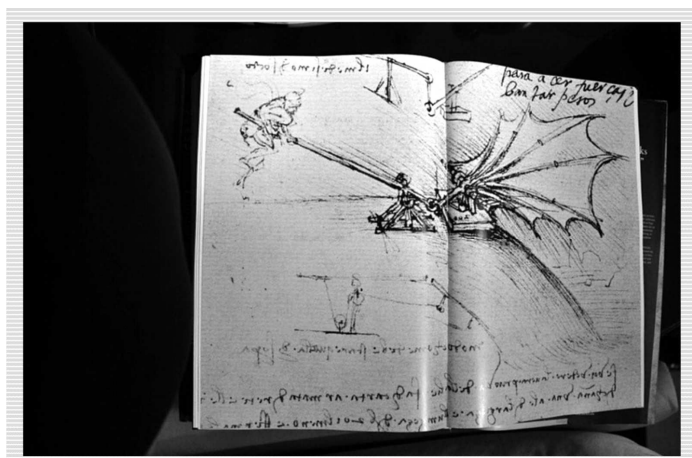
Fig. 2. Earth motions [7]

Obserwacja zjawisk przyrody i jej wpływu na rozwój mechaniki jest związana od lat najdawniejszych z pojęciem grawitacji. Myśl, że ciężenie nie ogranicza się do najbliższego otoczenia Ziemi, lecz działa również pomiędzy ciałami niebieskimi i należy do powszechnych własności materii, jest stara. Elementy tej myśli można znaleźć u Mikołaja Kopernika.

Do pionierów badań zjawisk przyrody i ich zastosowań w technice zaliczyć trzeba **Leonardo da Vinci** (1452–1519). Zajmował się wieloma różnymi działami nauki, techniki i sztuki oraz lataniem, a szkic jego maszyny latającej oparty był na budowie skrzydeł nietoperza.

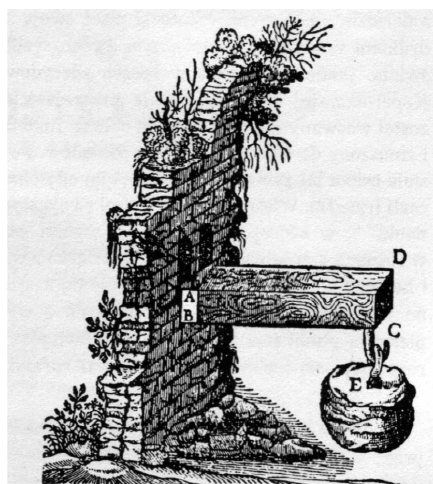
Należy wspomnieć o Galileuszu (Galileo Galilei, 1564–1642) [14], który oprócz innych dziedzin nauki zajmował się mechaniką. W swoim dziele z 1638 r. „Discorsi e dimostrazioni matematiche interno a due nuove scienze alla Mechanica i Monumento lokali” (Rozmowy i dowodzenia matematyczne w zakresie dwóch nowych umiejętności dotyczących mechaniki i ruchów miejscowych, dzieło niekiedy znane jest pod tytułem „Dwie nowe nauki”) dokonał zestawienia metod stosowanych w analizie naprężeń. Rozpatrując zagadnienia belek wydrążonych, stwierdził: *belki takie są stosowane w rzemiośle,*

a jeszcze częściej w tysiącach przypadków przez **przyrodę**, w celu znacznego zwiększenia wytrzymałości bez zwiększenia ciężaru; jako przykłady mogą posłużyć kości ptaków i wiele rodzajów trzcin, które będąc lekkie są bardzo wytrzymałe zarówno na zginanie, jak i pęknięcia. Gdyby źdźbło trawy dźwigające kłos cięższy od niej samej było wykonane z tej samej ilości materiału pełnego, byłoby podatniejsze na zginanie i pęknięcie. Przypomnieć należy, że Galileusz zajmował się wieloma innymi zagadnieniami mechaniki, w tym mechaniki materiałów. Z tego powodu wybitny uczony S. Timoszenko uważa Galileusza za jednego z prekursorów wytrzymałości materiałów [14].



Rys. 3. Szkic z opracowań Leonarda da Vinci [18]

Fig. 3. A sketch from Leonardo da Vinci work [18]



Rys. 4. Szkic z prac Galileusza [14]

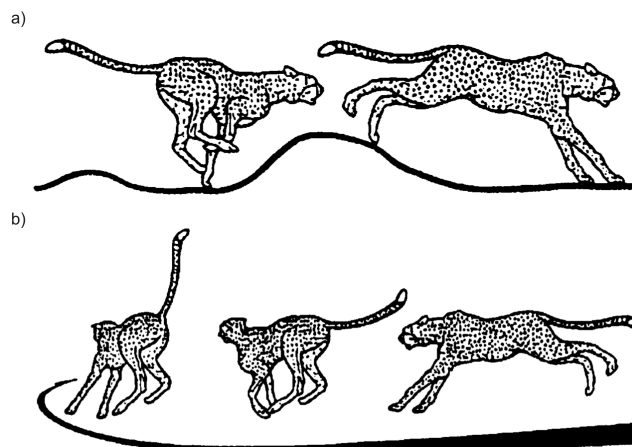
Fig. 4. A sketch from Galileo's work [14]

Na początku XVI wieku działał w Krakowie **Jan Brożek** (1585–1632) profesor Akademii Krakowskiej, jeden z najwybitniejszych matematyków tamtej epoki. W swojej rozprawie z 1612 r. pt. „Quare apes hexagona figura favos construant” wykazuje, że pszczoły budują plastry o sześciokątnych komórkach, dlatego że sześciokąt ma największą powierzchnię przy danym obwodzie, a sześciokątna komórka na największą objętość. Rozprawa ta uważana jest przez wielu badaczy za pierwszą, która dotyczyła bardzo ważnego działu mechaniki – biomechaniki.

4. Świat zwierząt i ptaków

Obserwacje świata zwierząt i ptaków dały konstruktorom i projektantom wiele pomysłów mających praktyczne zastosowanie w technice.

Zainteresowano się jednym z najszybszych zwierząt, tj. gepardem, który reprezentuje jedną z najbardziej idealnych form ruchu, szczególnie podczas pościgu za swoją ofiarą. Prędkość geparda dochodzić może do 120 km/h. Gepard w czasie ruchu, mimo nierówności terenu, utrzymuje się równoległe do powierzchni gruntu, drgania nie przenoszą się do jego ciała, a przez ściąganie i wysuwanie swoich łap dostosowuje się do kształtu terenu.

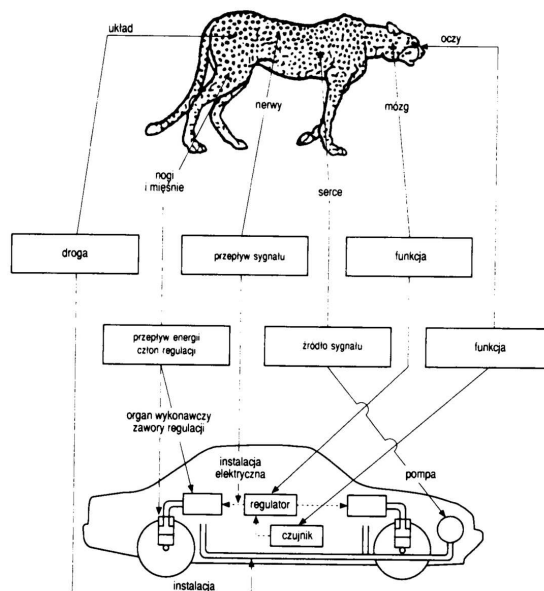


Rys. 5. Gepard podczas ruchu na nierównym terenie (a) oraz przy zmianie kierunku ruchu (b) [5, 8]

Fig. 5. A cheetah's movements while running on irregular surface (a) and during a change of movement direction (b) [5,8]

Zaobserwowano również, że gepard utrzymuje linię wzroku na kierunku poziomym oraz że podejmuje nadzwyczaj szybkie decyzje dotyczące przemieszczenia łap w celu zminimalizowania uderzenia o nawierzchnię i utrzymywania ciała równoległe do niej, a także o sposobie przemieszczenia łap w celu utrzymania stabilności.

Zaobserwowane zjawiska wykorzystane zostały przez konstruktorów zawiesznień samochodów. Na rysunku 6 pokazano analogię pomiędzy elementami ciała geparda a aktywnym układem zawieszenia samochodu.



Rys. 6. Podobieństwo zawieszenia pojazdu samochodowego z gepardem

Fig. 6. Analogy between car suspension and cheetah

W zawieszeniu aktywnym pompa olejowa jest odpowiednikiem serca geparda, siłowniki wraz z zaworami regulacji ciśnienia odpowiadają mięśniom i nogom. Zainstalowane w samochodzie czujniki przyspieszeń są analogiem zmysłu równowagi, natomiast mikroprocesor odpowiada mózgowi, łącza elektryczne nerwom, a instalacje elektryczne układowi krwionośnemu.

Obserwacje świata ptaków przyczyniły się do wielu zastosowań teoretycznych i praktycznych. Słynny angielski uczyony, twórca podstaw teorii hałasów aerodynamicznych, Lord James Lighthill, przed laty stwierdził: *Przyroda przez ewolucję wielu stworzeń trwającą miliony lat przyczyniła się do znalezienia rozwiązań szeregu skomplikowanych problemów dynamiki płynów i ruchu falowego* [10]. Lighthill korzystał z wyników badań wielu przyrodników, w tym ornitologów badających sowy. Ptaki służyły więc jako wzory dla projektantów i konstruktorów. Spośród licznych przykładów omówimy wyniki obserwacji sów [10]. Sowy należą do ptaków, które doskonale poruszają się w nocy i potrafią zlokalizować swój łup, kierując się słuchem. Ich słuch jest czterokrotnie czulszy od słuchu kota. Z nadzwyczajną dokładnością sowa potrafi zlokalizować źródło dźwięku. Asymetryczne położenie uszu umożliwia określenie odległości i położenie źródła dźwięków dochodzących do uszu sowy, umieszczonych poza tzw. szlarą. Do lokalizacji przyczynia się szlara utworzona z talerzowato ułożonych piór wokół dzioba i oczu, która skupia fale akustyczne o wysokich częstotliwościach. Badacze zwrócili uwagę na rodzaj lotu sowy w nocy i w dzień oraz na budowę skrzydeł, przede wszystkim na krawędź natarcia grzebienia piór i krawędź spływu obrzeża. Sowie upierzenie jest miękkie i gęste, a każde pióro na górnej powierzchni pokryte jest puszką. Powoduje to, że pióra, ocierając się o siebie w czasie uderzeń skrzydeł, praktycznie nie generują dźwięków. Opisana budowa, zdaniem obserwatorów, zapobiega zawirowaniu powietrza podczas lotu, a to sprawia, że lot sowy



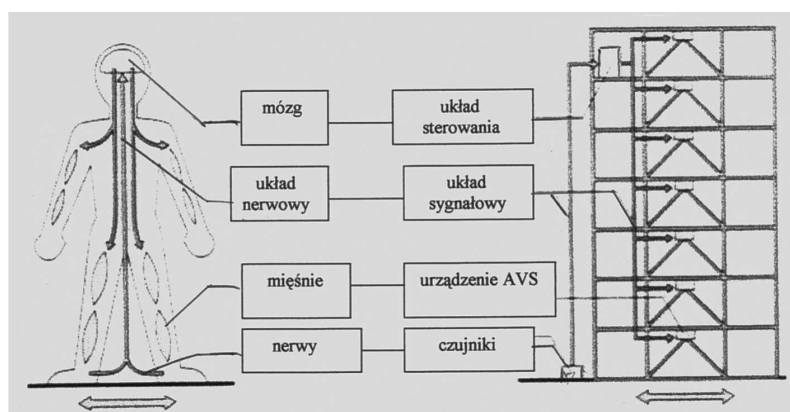
Rys. 7. Szlara sowy

Fig. 7. Owl's facial disk

jest prawie niesłyszalny. Na drodze doświadczalnej stwierdzono, że sowy z odpowiednim obrzeżem krawędzi skrzydeł emitują dźwięk o poziomie mniejszym o 6-7 dB, w porównaniu z ptakami o podobnej masie i tej samej wysokości i prędkości latania. Przedstawione spostrzeżenia służyły projektantom samolotów. Powstała tzw. technologia sowy (*OWL Technology*), która jest i będzie stosowana dla rozwiązywania problemów z aeroakustyki samolotów [10].

5. Organizm człowieka a mechanika

W wielu przypadkach człowiek i jego organy stanowiły podstawę praktycznych zastosowań. Powstały systemy sztucznej inteligencji, które budowane były z stosowaniem różnych strategii zapożyczenia inteligencji od człowieka. Jedną z dróg polega na próbach modelowania w systemach technicznych struktury i zasady działania ludzkiego mózgu. Systemy powstające na tej zasadzie nazywamy sieciami neuronowymi. Dla przykładu można podać sztuczne sieci neuronowe i algorytmy genetyczne. Sztuczne sieci neuronowe powstały jako model rzeczywistych układów nerwowych istot żywych i znalazły zasto-



Rys. 8. Analogia między układem mięśniowo-nerwowym człowieka a budynkiem

Fig. 8. Analogy between human muscular and nervous system and a building

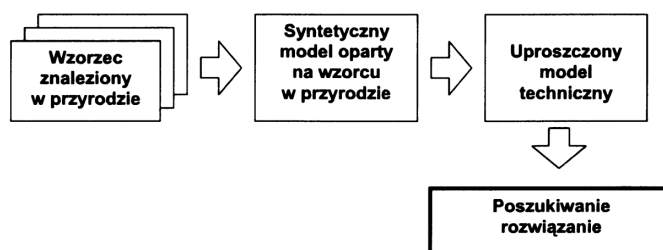
sowanie w wielu działach mechaniki. Próbują odtwarzać zachowanie rozumnego uczenia i adaptacji do środowiska. Sieci te nie tylko rozwiązują stawiane im zadania, lecz również posiadają zdolność uczenia się i adaptacji. Ze względu na ich powszechne zastosowanie nie będą omawiane w niniejszym artykule. Omówimy natomiast jedno z praktycznych zastosowań wykorzystujących analogię pomiędzy układem mięśniowo-nerwowym człowieka a budynkiem umieszczonym na terenach aktywnych sejsmicznie. Na podstawie tych analogii opracowano układ o zmiennej sztywności (Active Variable Stiffnes – AVS).

System ten powstał w wyniku analizy zachowania układu mięśniowo-nerwowego człowieka przebywającego na niestabilnym podłożu, np. na podłodze poruszającego się autobusu. W przypadku organizmu człowieka sterowanie położeniem odbywa się przez napinanie odpowiednich partii mięśni, inicjowanymi impulsami pochodzącymi z układu nerwowego.

6. Nowe dyscypliny wiedzy a mechanika

W drugiej połowie XX wieku powstały nowe dyscypliny naukowe, jak na przykład biomechanika, biocybernetyka, bioinformatyka, bionika, inżynieria biomedyczna, biomateriały, bioakustyka, a ostatnio neurocybernetyka. Biomechanika zdefiniowana jest jako nauka o ruchu i mechanizmach ruch ten wywołujących, ze szczególnym uwzględnieniem człowieka i zwierząt. Początki biomechaniki współczesnej w Polsce zawdzięczamy między innymi profesorowi Adamowi Moreckiemu. Biomechanika rozwija się w wielu ośrodkach naukowych, w tym również na Politechnice Krakowskiej. Bionika jest interdyscyplinarną dziedziną wiedzy badającą budowę i zasady działania organizmów żywych oraz zastosowania ich praktycznie w technice na wzór tych organizmów. Omawiając zasady i reguły organizmów żywych, można zauważyć, że są one zbieżne z zasadami obowiązującymi w projektowaniu maszyn i urządzeń. Poznanie tych zasad oraz szersze wykorzystanie rozwiązań, które występują w świecie przyrody, mogą przyczynić się do szybszego rozwoju maszyn i urządzeń, w tym robotów i manipulatorów [11].

Profesor Andrzej Samek omawiając zasady i reguły budowy organizmów żywych [11], wskazuje, że są one zbieżne z zasadami obowiązującymi w projektowaniu maszyn i urządzeń. Poznanie tych zasad oraz szersze wykorzystanie rozwiązań występujących w naturze może w ogromnym stopniu przyczynić się do szybszego rozwoju maszyn i wzbogacić je o nietypowe konstrukcje.



Rys. 9. Schemat postępowania w bionice [11]

Fig. 9. Scheme of procedure in bionics

Do zadań bioniki zaliczyć należy:

- naśladowanie naturalnych sposobów wytwarzania związków chemicznych;
- imitowanie mechanizmów istniejących w przyrodzie;
- wykorzystanie zasad organizacji społecznego zachowania organizmów.

Zadania te coraz częściej stosowane w praktyce.

Należy również wspomnieć o tzw. inteligencji roju (*smart swarm*), przez którą rozumiemy zasadę samoorganizacji, polegającą na tym, iż każdy członek społeczności przyrody (np. mrówek) czerpie informacje na temat otoczenia i swojej roli nie od zwierzchnika, lecz ogromnej liczby interakcji z innymi osobnikami.

7. Wnioski

Obserwacje zjawisk i istot żywych występujących w otaczającym nas świecie przyrody, wskazują na istnienie prawidłowości pomiędzy przyrodą a osiągnięciami techniki i nauki. Świat przyrody był i jest źródłem wielu osiągnięć mechaniki.

Od zarania dziejów występujące w przyrodzie ściśle określone uwarunkowania i organizmy wykorzystywane były przez wielu uczonych i projektantów w działaniach spełniających prawa mechaniki. W artykule pokazano tylko niektóre analogie pomiędzy światem przyrody a mechaniką i układami mechanicznymi. Istnieje jeszcze wiele zjawisk w przyrodzie, które z powodzeniem mogą być wykorzystane w badaniach związanych z szeroko pojętą mechaniką.

Literatura

- [1] A r y s t o t e l e s, *Zachęta do filozofii, fizyka*, PWN, Warszawa 2010.
- [2] D u g a s R., *A History of Mechanics*, Dover Publications, New York 1988.
- [3] E n g e l Z., *Z dziejów mechaniki w Krakowie*, Wyd. ITE, Radom (w druku).
- [4] E n g e l Z.W., E n g e l Z.J., *Świat przyrody a wibroakustyka*, Materiały XXXVII Ogólnopolskiego Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Katowice 2010, 21-30.
- [5] E n g e l Z., *Metody aktywne w akustyce – marzenia czy rzeczywistość*, Materiały XLII OSA, Białowieża 1995, 25-36.
- [6] H e r o d o t, *Dzieje*, Czytelnik, Warszawa 2008.
- [7] K o p e r n i k M., *O obrotach ciał niebieskich i inne pisma*, Agnostini, Warszawa 2001.
- [8] K o w a l J., *Sterowanie drganiami*, Gutenberg, Kraków 1996.
- [9] K u c h a r z e w s k i F., *Mechanika w swym rozwoju historycznym*, Instytut Wydawniczy „Biblioteka Polska”, Warszawa 1924.
- [10] L i l l e y G.M., *The Silent Flight of the Owl (with applications of „Owl Technology” to the design of future quiet commercial aircraft)*, Referat plenarny, 16 Congress on Sound and Vibration, Kraków 2009.
- [11] M o r e c k i A., E k i e l J., *Cybernetyczne układy ruchu zwierząt i robotów*, PWN, Warszawa 1979.
- [11] S a m e k S., S i o m a A., *Bionika – twórcza inspiracja dla inżynierów*, A, S. Prasa i Książka, Katowice 2007.

- [12] Śniadecki J., *O Koperniku*, Ossolineum, Wrocław 2005.
- [13] Średniawa B., *Historia filozofii przyrody i fizyki w Uniwersytecie Jagiellońskim*, Wyd. Retro-Art, Warszawa 2001.
- [14] Timoszenko S.P., *Historia wytrzymałości materiałów*, Wyd. Arkady, Warszawa 1966.
- [15] Witruwiusz, *O architekturze ksiąg dziesięć*, Wyd. Pruszyński, Warszawa 1999.
- [16] Wróblewski A.K., *Historia fizyki*, PWN, Warszawa 2006.
- [17] *Inżynieria biomedyczna. Księga współczesnej wiedzy tajemnej w wersji przystępnej i przyjemnej* (pod red. R. Tadeusiewicza), Wyd. AGH, Kraków 2008.
- [18] Taddei M., Zanon E., Laurenza D., *Leonardo dreidimensional. Mit Computergrafik auf der Spur des genialen Erfinders*, Belser Verlag, Stuttgart 2006.
- [19] *Neurocybernetyka teoretyczna*, pod red. naukową R. Tadeusiewicza, Wyd. Uniwersytetu Warszawskiego, 2010.
- [20] Laue M., *Historia fizyki*, PWN, Warszawa 1957.
- [21] Litwiniszyn J., *Kilka uwag na temat nieciągłych zjawisk przyrodniczych*, Zeszyty Naukowe AGH, Górnictwo, z. 122, Kraków 1984, 20-23.