ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2000
Seria: GÓRNICTWO z. 246 Nr kol. 1480

Józef WOJNAROWSKI
Politechnika Śląska, Gliwice

OD NEOMECHANIKI DO MECHATRONIKI

Streszczenie. Rozwój technologii elektronicznych i technik obliczeniowych, a także wytwarzanie nowych materiałów technicznych przyczyniły się do konstruowania inteligentnych zespołów maszynowych, zwanych obecnie układami mechatronicznymi. Złożoność tych układów wymaga odpowiedniego formalizmu w studium modelowania. Metoda grafów wiązań jest takim przyjaznym narzędziem, ponieważ bazuje na opisie przepływu mocy w różnorodnych fizykalnie elementach, podzespołach oraz integralnie w całym układzie. W pracy przedstawiono zastosowania grafów wiązań w modelowaniu układów mechatronicznych.

FROM NEOMECHANICS TO MECHATRONICS

Summary. The paper discusses development of the concept o mechatronic systems based on the functional approach. The development of electronic and computation technics, as also the manufacture of modern technical materials, influenced the creation of intelligent devices, called now mechatronic systems. Due to the high degree of sophistication, a formal approach is necessary when modelling. The bond graphs method presents such a friendly tool, as it is based on the power flow in various physical components, sub-systems and integrated systems. The application of bond graph connections in the modelling of the mechatronic system is presented.

1. Wprowadzenie

Współczesne maszyny charakteryzują się optymalnym zastosowaniem podzespołów elektronicznych i układów sterowania. Dzięki rozwojowi elektronicznej technologii powstały instrumentalne możliwości integracji w procesie projektowania i w produkcji maszyn, polegające na synergicznym łączeniu technologii mechanicznej i hydraulicznej z elektryczną, optyczną i informatyczną.

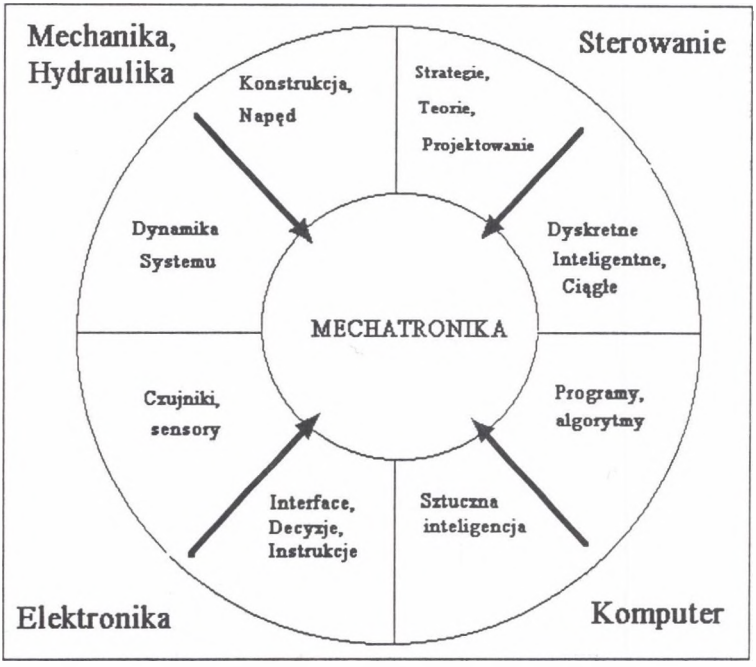
Ta integracja wymaga wciąż doskonalenia metod modelowania, środków projektowania i tych narzędzi z dyscyplin, które są niezbędne dla zespołu projektującego, aby osiągnąć zintegrowany mechatroniczny wytwór. Stanowi to wyraz jedności współczesnej technologii, która jest przeciwstawieniem różnicowania się i mnożenia specjalności[1)].

Wiemy, że w maszynie, w zakresie przekazywania strumienia energii, możemy wyróżnić podukłady mechaniczne, elektryczne, hydrauliczne i pneumatyczne. W takim ujęciu analizą przepływu mocy zajmował się już w 1926 r. George Constantinesco [1]. Sformułował on wówczas zasadę przepływu energii, wyróżniając jej trzy rodzaje: mechaniczną, płynną i elektryczną.

Wyróżnioną dyscypliną, zajmującą się synergizmem układów mechanicznych, hydraulicznych i elektrycznych w przekazywaniu mocy nazwał **neomechaniką.**

Proces integracyjny w systemach maszynowych, wymagający z jednej strony zastosowania takich technologii, jak: elementy mikroelektroniki, procesory, czujniki (sensory), wzbudniki, a z drugiej - rozwiniętych technik modelowania, adaptacyjnych systemów sterowania i bardzo szybkiego przetwarzania danych, doprowadził do zmiany w podejściu do projektowania i konstruowania maszyn.

Ta dyscyplina wyróżniona została terminem "mechatronika" przez M.Kajitani w 1986 r. [2]. **Mechatronika**[2] *to nowa filozofia projektowania, łącząca elektronikę, mechanikę oraz informatykę i to już na wstępnym etapie tego procesu, z uwzględnieniem synergicznego współdziałania w wytwarzaniu bardziej wydajnych, inteligentnych i niezawodnych maszyn we wszystkich obszarach zastosowań (rys.1).*



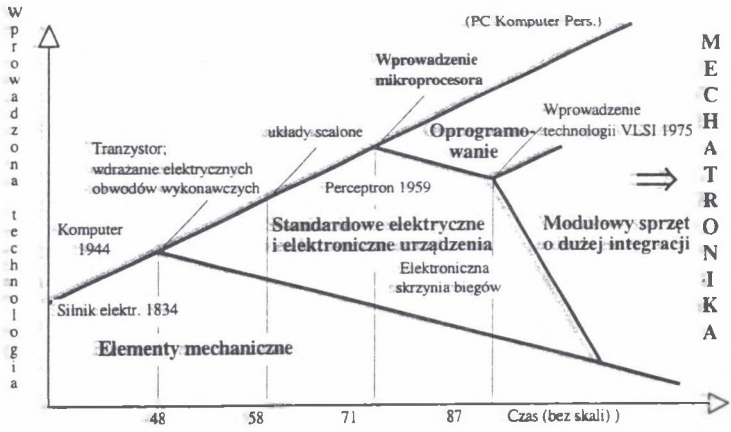
Rys.1. Model mechatroniczny jako układ o mieszanej technologii
Fig.1. Mechatronic model as a system of the mixed technology

[1] Zjawska obserwowanego na niektórych wydziałach uczelni technicznych.
[2] Jest to akronim słów mechanika i elektronika. W literaturze można spotkać kilkanaście definicji. W [10] podano w oryginalnym brzmieniu 10 definicji.

Mechatronika, coraz bardziej akceptowana, stała się wyzwaniem dla inżynierów w projektowaniu współczesnych zespołów maszynowych. Jest to konsekwencja wysokiej konkurencyjności rynku oraz technicznego i ekonomicznego postępu w technologii elektroniki, w szczególności w zakresie nowych generacji mikroprocesorów.

Sieci neuronowe [7,8] i sztuczna inteligencja jako wynik naśladowania zjawisk natury dały asumpt do zastosowań w aktywnym współdziałaniu podzespołów elektrycznych i elektronicznych z podukładami mechanicznymi. Współdziałając np. z drgającym podukładem mechanicznym mogą względnie szybko stabilizować jego niestabilny ruch. Można więc twierdzić, że nową dyscypliną wiedzy będzie **neomechanika**[3], maszyna z inteligentnym synergicznym sterowaniem [7]. **Neomechanika** jest to dyscyplina techniki zajmująca się inteligentnym sterowaniem (**neo**) określonym ruchem systemu technicznego (mechanika), którego celem jest wytwarzanie, przetwarzanie i transmisja energii [7].

Zauważmy, że pierwotnie przez mechatronikę rozumiano zastosowanie mikroelektroniki w technice, dzisiaj pojęcie to rozumiemy jako jedność współczesnej technologii. I mimo iż z terminem mechatronika utożsamia się lata osiemdziesiąte, to początki jej sięgają lat czterdziestych, kiedy wdrażano elementy układów wykonawczych. Urządzenia te w tym czasie były sterowane przez elektroniczne regulatory, które reprezentowały *pierwszą* generację urządzeń. Kiedy zaczęto produkcję elementów półprzewodnikowych, nastąpiło przejmowanie roli sterowania przez oprogramowane komputery. Była to *druga* generacja urządzeń mechatronicznych. Natomiast maszyny działające w układach o dużym stopniu integracji tworzą *trzecią* generację urządzeń mechatronicznych, czyli tzw. supermechanikę. Na rys.2 przedstawiono ten trend przewartościowania na korzyść podukładów elektroniki w wytwarzaniu maszyn [9]. Stosując w metodologii projektowania mechatronicznego odpowiedni poziom technik modelowania, możemy doprowadzić do zmniejszenia udziału podukładów mechanicznych w wytwarzanych maszynach.



Rys.2. Ewolucja podukładów mechatronicznych
Fig.2. Evalution of mechatronic subsystem

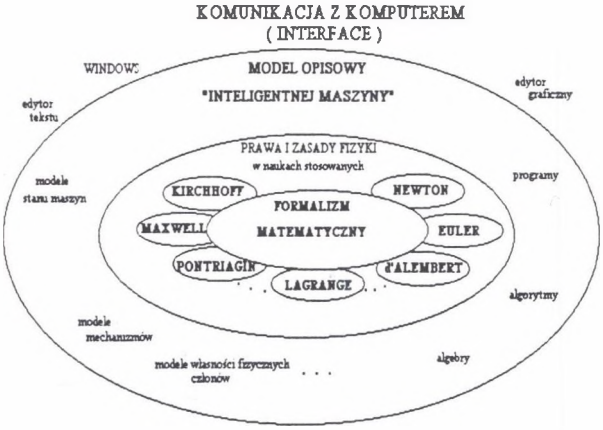
[3] Pojęcie to zostało pierwszy raz wprowadzone w pracy [7].

2. O modelowaniu układów mechatronicznych

Z przedstawionego ujęcia wynika, że pojęcie mechatroniki jest ściśle związane ze zmianą filozofii projektowania, jaka zaistniała w ostatnim ćwierćwieczu w inżynierii mechanicznej. Rozwój tanich elementów mikroelektronicznych do szybkiego przetwarzania danych pociągnął za sobą radykalną zmianę w podejściu do projektowania i konstruowania nowych generacji maszyn.

Użycie komputerów w kombinacji mikroelektroniki w obecnych wytworach maszynowych wpływa na to, że działanie zespołu maszynowego jest wzmacniane przez adaptacyjne układy sterowania w taki sposób[4], że w urządzeniu mechatronicznym w przekazywaniu energii następuje synergiczne współdziałanie podukładów mechanicznych, hydraulicznych, elektrycznych, elektronicznych, optycznych i innych. Innymi słowy, mechatroniczne urządzenia są to układy, w których współdziałają systemy o mieszanej technologii, mimo iż pierwotnie te urządzenia wykorzystywały kombinację trzech technologii: mechanicznej, elektrycznej i technice sterowania.

Można twierdzić, że mechatronika rozwinęła się jako metoda redukcji złożoności poprzez adaptację interdyscyplinarnych technologii. Mechatronika, posługując się mechanicznymi podukładami przekazywania energii, staje się stosowaną dziedziną nauki, integrującą oprogramowanie numeryczne, informatykę, sztuczną inteligencję i teorię sterowania w projektowaniu i wytwarzaniu maszyn nowych generacji. Jest więc oczywiste, iż modelowanie układów mechatronicznych wymaga podejścia interdyscyplinarnego [9]. Oznacza to, że w studium modelowania takich układów istnieje potrzeba tworzenia programów, które by wspomagały proces modelowania poprzez zastosowanie odpowiednich praw i zasad fizyki, a także, by automatycznie przetwarzały modele matematyczne na algorytmy komputerowe, zgodnie z odpowiednimi **paradygmatami mechatroniki**. Formułowany system modelowania musi więc obejmować bazę wiedzy pandyscyplinarnej [6] oraz możliwość dokonywania obliczeń czy też operacji symbolicznych w symulacji dynamiki ruchu i w integracji procesu projektowania (rys.3).



Rys.3. Pandyscyplinarność w modelowaniu układów mechatronicznych
Fig.3. Pandisciplinesin modeling of mechatronic systems

[4] Na przykład, z genetycznymi algorytmami.

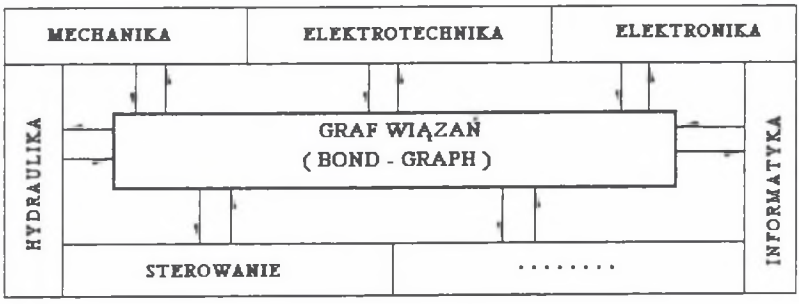
Stosując wymienione zasady i prawa nauk stosowanych, mechantroniczne projektowanie wymaga integracji urządzeń mechanicznych ze sterowaniem elektronicznym i odpowiednim stopniem automatyzacji.

Ważnym aspektem modelowania układu mechatronicznego jest duże zróżnicowanie jego podsystemów. Modelowanie takich ścieżek przepływu energii w maszynach dowodzi, że możliwe jest wyodrębnienie w nich podukładów elementarnych, reprezentujących zachowania energetyczne, podstawowych procesów fizycznych systemu. Taki sposób modelowania układów fizycznych zaproponował Paynter, wprowadzając w 1961r. grafy wiązań [3,4,10,11].

3. O modelowaniu w formalizmie grafów wiązań

Wybór wyidealizowanego modelu opisującego ze względu na klasę badanych zjawisk badanego zespołu maszynowego prowadzi do opisu jego konfiguracji bądź do wyznaczenia charakterystyk dynamicznych. Sformułowanie modeli w postaci grafów obciążonych i grafów wiązań (bondgraphs) umożliwia prowadzenie w sposób systemowy badań złożonych układów maszynowych [3,4,10,11]. Grafy wiązań można uznać za odpowiednią metodę modelowania układów fizycznych, ponieważ bezpośrednio przedstawiają ujęcie charakterystyk energetycznych ich podsystemów i elementów i to z różnych dziedzin techniki: mechaniki, hydrauliki, elektrotechniki, informatyki (rys.4). Dlatego też formalizm grafów wiązań jest uznanym narzędziem modelowania w projektowaniu układów mechatronicznych [1].

Przepływ mocy w układzie jest wyrażony iloczynem zmiennych przepływowej i biegunowej. Fakt ten implikuje modelowanie za pomocą dwu zmiennych, co jest koncepcją zdecydowanie różniącą się od tradycyjnych podejść do modelowania układów dynamicznych, a także do sposobu projektowania.



Rys.4. Integrujące miejsce grafów wiązań w mechatronice
Fig.4. Integrating place of bond graphs in mechatronics

Sposób transformacji elementarnych grafów charakterystycznych przekształceń w grafy przepływu informacji przedstawiono we wszystkich wcześniejszych pracach [11, 12, 13].

Metoda grafów wiązań może być zaliczana do metod topologicznych, gdyż tak na etapie modelowania, jak również na etapie analizy w dużym stopniu wykorzystuje się strukturę układu. Zauważmy jeszcze, że główna idea metody grafów wiązań polega na:

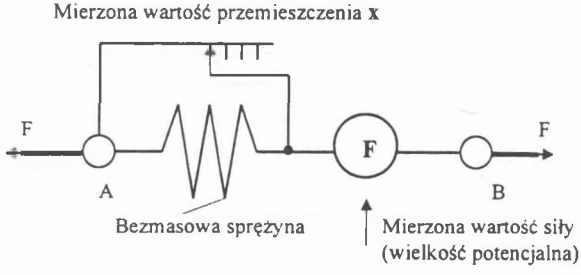
1. Spostrzeżeniu, że w układach technicznych da się wyodrębnić zaledwie kilka elementów o różnych cechach z punktu widzenia przekazywania mocy.
2. Przedstawieniu układu tych elementów za pomocą grafów wiązań.
3. Sformalizowaniu postępowania przy generowaniu równań ruchu układu.

Całość działań prowadzi do zbudowania grafu wiązań na podstawie informacji o elementach układu i ustaleniu przyczynowości.

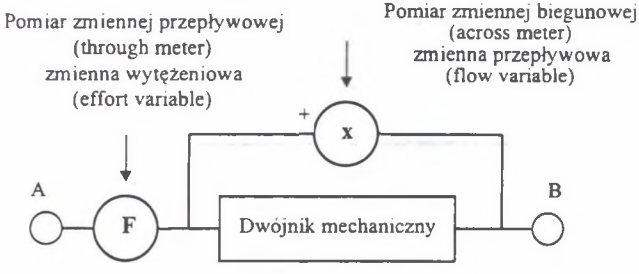
Wymienionym powyżej punktom można przyporządkować *szczegółowe* etapy modelowania za pomocą grafów wiązań. Są to: (1) wyróżnienie podukładów i ich opis ilościowy, (2) przygotowanie schematu funkcyjnego układu, (3) przygotowanie listy parametrów i warunków początkowych, (4) budowa grafu wiązań i określenie jego przyczynowości, (5) ustalenie listy założeń, (6) generowanie równań ruchu, (7) symulacja i eksperyment numeryczny.

Fakt, że podstawowym celem metody grafów wiązań (bondgrafów) jest modelowanie układów fizycznych o różnych nośnikach energii, spowodował, że terminologia tej metody różni się od ustalonej na gruncie mechaniki. Nieodzowne jest więc zapoznanie się z pierwotnymi pojęciami zmiennych w tej metodzie.

a) Postać modelowa



b) Postać blokowa



Rys.5. Topologia pomiaru fizykalnych zmiennych[5)]
Fig.5. Measurement topology of physical variables

[5)] Przyjęta w literaturze [3] klasyfikacja zmiennych fizykalnych o nazwie „effort" i „flow" jest niezgodna dla układów mechanicznych, ponieważ np. prędkość jest zmienną biegunową.

W pracach [3,4] wyodrębniono klasę zmiennych ze względu na topologię pomiaru. Są to (rys.5):

e(t) - zmienne wytężeniowe "effort",

f(t) - zmienne przepływowe "flow".

Przyporządkowując każdej krawędzi grafu wiązań te zmienne, uzyskujemy graf wiązań, w którym modelowany jest przepływ strumienia energii, ponieważ iloczyn tych zmiennych jest mocą

$$\mathbf{P(t) = e(t)\, f(t)} \tag{1}$$

W tabl.1 przedstawiono zmienne wytężeniowe i przepływowe dla kilku rodzajów układów o różnej naturze fizycznej.

Tablica 1

Dziedzina	e(t)	f(t)
Mechanika (ruch postępowy)	siła F(t)	prędkość liniowa v(t)
Mechanika (ruch obrotowy)	moment M(t)	prędkość obrotowa ω(t)
Hydraulika	ciśnienie p(t)	objętościowy wydatek q(t)
Elektrotechnika	napięcie U(t)	natężenie prądu i(t)
Termodynamika	temperatura T(t)	entropia S(t)

Na podstawie zmiennych e(t) i f(t) można zdefiniować następujące wielkości:

przemieszczenie: $$\mathbf{x(t) = x(0) + \int f(t)dt,} \tag{2}$$

pęd: $$\mathbf{p(t) = p(0) + \int e(t)dt,} \tag{3}$$

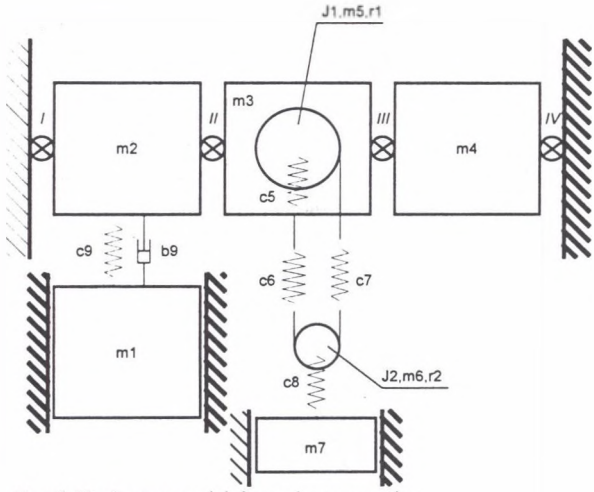
energię: $$\mathbf{E(t) = E(0) + \int P(t)dt.} \tag{4}$$

4. Model mechatroniczny suwnicy pomostowej

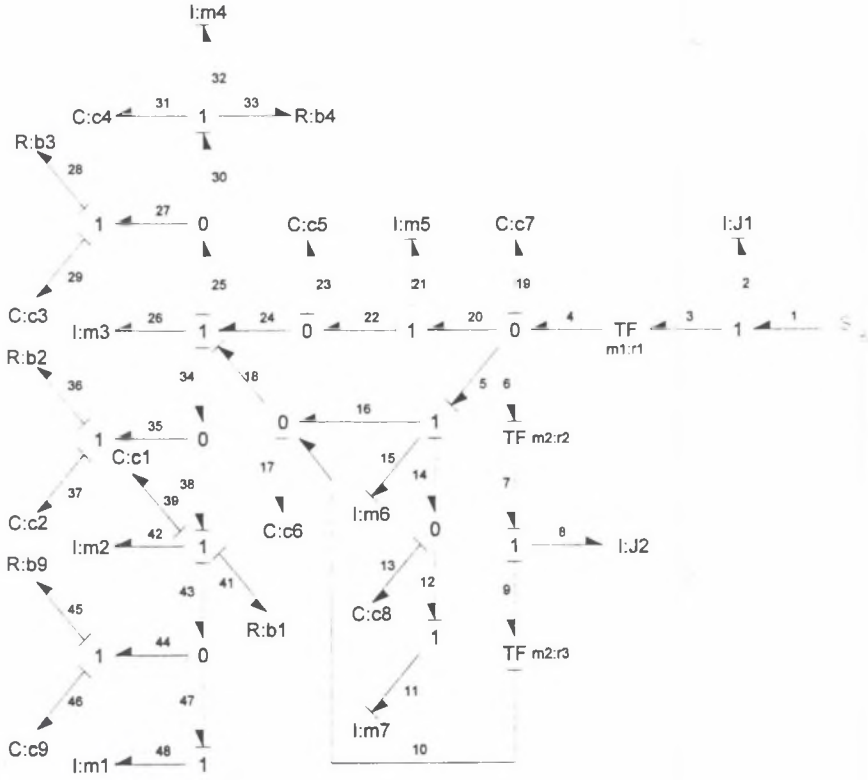
Przyjmując dyskretny model dynamiczny w formalizmie suwnicy pomostowej o dziewięciu stopniach swobody z mechanizmem podnoszenia w środkowym położeniu mostu (rys.6) utworzono jej graf wiązań (rys.7).

Graf ten może stanowić podstawę do przeprowadzenia analizy ruchu sterowanego modelowanego układu.

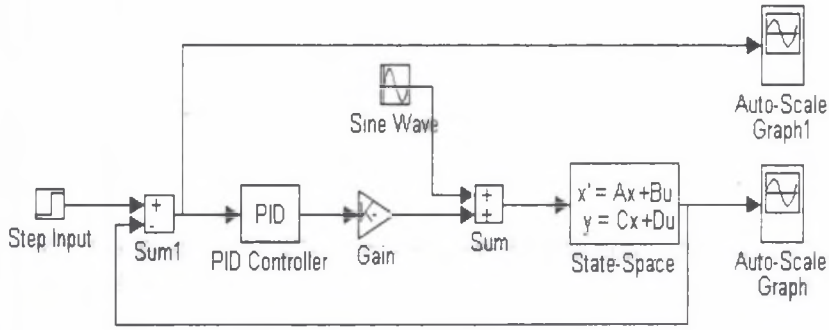
W badaniach numerycznych ruchu sterowanego suwnicy pomostowej zastosowano program SIMULINK. Jako układ regulacji przyjęto dostępny w bibliotece programu SIMULINK regulator PID. Model dynamiczny sterowanego ruchu suwnicy pomostowej przedstawiono na rys.8.



Rys.6. Dyskretny model dynamiczny suwnicy
Fig 6. Discreet dynamical model of the crane



Rys.7. Graf wiązań modelu suwnicy z rys.6
Fig.7. Bond graph of the model of crane from fig.6



Rys.8. Schemat sterowania ruchu suwnicy
Fig.8. Block diagram a control of crane motion

5. Podsumowanie

Współczesny rozwój technologii elektronicznych i technik obliczeniowych, jak również wytwarzanie nowych materiałów technicznych wpłynęły na konstruowanie "inteligentnych" i wydajniejszych zespołów maszynowych, określanych jako układy mechatroniczne, które łączą w sobie te technologie. Większość definicji mechatroniki podaje, że jest to technologia integrująca sterowanie elektroniczne (komputer) z systemami mechanicznymi [7]. Chociaż definicja mechatroniki w istocie odnosi się do dwóch technologii - mechaniki i elektroniki, to nowe odkrycia w technologii sterowania, np. technika światłowodowa, technologia laserowa również, siłą faktu, wchodzą w skład tej definicji. Można twierdzić, że wychodząc od mechatroniki można opisać nową generację maszyn w systemowy sposób. Charakterystyczną cechą takich maszyn jest udział programów komputerowych operacyjnych i aplikacyjnych, niezbędnych do ich działania, czyli do realizacji ustalonego ciągu operacji zaproponowanego procesu produkcyjnego.

Podstawowymi podukładami technicznymi układów mechatronicznych są elementy wielowejściowe. Przez ich wejścia może następować wzajemne oddziaływanie na siebie i inne elementy układu. Bardzo dobrze odzwierciedla to graf wiązań, gdzie krawędzie uwidaczniają strukturę połączeń między elementami. Zgodnie z regułami metody, obok krawędzi reprezentujących wejścia lub wyjścia, zaznacza się zmienne wytężeniowe i przepływowe. Zmienne wytężeniowe umieszczone są po stronie półstrzałki, natomiast zmienne przepływowe po przeciwnej jej stronie. Półstrzałka określa również skierowanie przepływu strumienia energii w układzie, ujmowanej liczbowo za pomocą mocy P.(t).

Opis modelowania za pomocą grafów wiązań ułatwia prowadzenie studium modelowania i symulację komputerową układów mechatronicznych. Półstrzałka określa również skierowanie przepływu strumienia energii w układzie, ujmowanej liczbowo za pomocą mocy P(t). Graf przepływu informacji tworzy wprost model analogowy i prowadzenie symulacji

analogowej, np. za pomocą programu VISSIM, którego pakiet przeznaczony jest do przeprowadzania symulacji układów dynamicznych.

Wydaje się, że istnieje potrzeba definiowania nowych układów nie w kategoriach technologii (konkretu), ale w rozumieniu funkcji, jakie wykonują. Tak więc, jeśli mówimy o inteligentnym sterowaniu ruchu w układzie technicznym, którego celem jest wytwarzanie, przekształcenie i przesyłanie energii, to jest to w istocie układ neomechaniczny [7]. Jest to koncepcja w sferze abstraktu, definiująca układy o wyraźnym rozdzieleniu funkcji sterowania (neuro) i ruchu oraz siły (mechanika) bez żadnej konkretnej technologii w zamyśle. Pojęcie neuromechaniki oparte jest na zrozumieniu, że system techniczny wytwarza, przekształca i przesyła dogodną informację, która może występować w postaci zmian energii, masy lub informacji sterującej. Uniwersalność tej koncepcji czyni ją niezależną od technologii zastosowanych przy realizacji tych systemów. Przy takim podejściu układy mechatroniczne należą do neuromechaniki.

Można twierdzić, że w kształtowaniu jakości kształcenia inżynierów mechatronika zajmuje określone miejsce. Dlatego nowocześnie wykształcony inżynier winien, opanować nie tylko właściwe paradygmaty modelowania mechatronicznego, ale także posiąść rozumienie działań najnowszych urządzeń mechatronicznych, spotykanych już na co dzień.

LITERATURA

1. Constantinesco G.: Transmission of Power - The Present, the Future, Newcastle - upon - Tyne, Published by the North East Coast Institution of Engineering and Skipbuilders, Bolbec Hall, London 1926, p.1-66
2. Kajitani M.: A concept of Mechatronics. J.Robotics and Mechatronics V.1 nr.1 June 1989.
3. Karnopp D.C. and Rosenberg R.C.: System Dynamics. A Unifield Approach, John Wiley 1975
4. Paynter H.M.: Analysis and Design of Engineering System. MIT Press Cambridge, Mass. 1961
5. Rosenblatt F.: Principles of Neurodynamics, Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms, Spartan Books, 1962
6. Salminen V. and Verho A.: Systematic and Innovative Design of a Mechatronic Systems. Mechatronics, Vol.2, No 3, 1992, pp.239-256
7. Stecki S., Wojnarowski J.: Modelling and Design of Neomechanic Systems. ZN Pol.Śl.. s.Mechanika, z.122 (1995) pp. 289-303
8. Tadeusiewicz R.: Sieci neuronowe, Akad.Oficyna Wyd.RM, Warszawa 1993
9. Dinsdale J.: The Electronic Gearbox: Mechatronics in Action, Engineering Designer, July 1989
10. Viitanen P. and others: Modelling and Simulation of Mechatronical Devices, Mechatronics Vol 2, No 3, 1992, pp.231-238

11. Wojnarowski J.: Zastosowanie grafów w analizie drgań układów mechanicznych. PWN Warszawa-Wrocław 1981
12. Wojnarowski J.: Zastosowanie grafów wiązań w modelowaniu i projektowaniu układów mechatronicznych. Mat. Konf. TMM Białystok 1996 s.36-51
13. Wojnarowski J.: Grafy wiązań w nauczaniu mechatroniki. Mat. Konf. Edukacja w Mechatronice, Kraków 1998 s.171-182

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Ewald Macha

Abstract

Current development of electronic and computation technics and also the manufacture of modern technical materials have influenced the creation of intelligent devices and machines, called now mechatronic systems. Although the definition of mechatronics specifically refers to two technologies - mechanics and electronics, new development in control technologies, e.g. fibre optics, laser technology are also included in the definition.

It exists a need to define these new systems not in terms of technology but also in their functions of performing. Thus, we define neuromechanics as an intelligent control of motion and associated forces of engineering systems.

The systems that use specific technologies such as mechatronics, belong to a subset of neuromechanics. Most definitions of mechatronics state that it is a technology integrating electronic (computer) control with mechanical systems.

The paper makes reference to progress from neomechanics to mechatronics and discusses the concept of mechatronics systems based on the functional approach and identification of system structure consisting of control, power and external subsystems. The paper also presents the methodology of modelling of mechatronic systems using power bond graphs technique.