

Krzysztof Falkowski

Wprowadzenie do mechatroniki

Warszawa 2010



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Politechnika Warszawska
Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych
Studia Podyplomowe dla Nauczycieli Przedmiotów Zawodowych
02-524 Warszawa, ul. Narbutta 84, tel. 22 849 43 07, 22 234 83 48
ipbmvr.simr.pw.edu.pl/spin/, e-mail: sto@simr.pw.edu.pl

Opiniodawca: dr inż. Jerzy GUSTOWSKI

Projekt okładki: Norbert SKUMIAŁ, Stefan TOMASZEK

Projekt układu graficznego tekstu: Grzegorz LINKIEWICZ

Skład tekstu: Krzysztof FALKOWSKI, Janusz BONAROWSKI

Publikacja bezpłatna, przeznaczona dla słuchaczy Studiów Podyplomowych dla Nauczycieli Przedmiotów Zawodowych.

Copyright © 2010 Politechnika Warszawska

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich.

ISBN 83-89703-37-8

Druk i oprawa: Drukarnia Expol P. Rybiński, J. Dąbek Spółka Jawna,
87-800 Włocławek, ul. Brzeska 4

Spis treści

Wstęp	5
1. Opis systemu mechatronicznego. Definicja i struktura systemu mechatronicznego	7
1.1. Wstęp.....	8
1.2. Definicja systemu mechatronicznego.....	10
1.3. Struktura systemu mechatronicznego.....	14
2. Podstawy modelowania i opisu układów mechatronicznych.....	19
2.1. Wstęp.....	20
2.2. Analogi elektryczne, mechaniczne i hydrauliczne	21
2.3. Podstawowe struktury złożonych układów mechatronicznych ..	30
3. System sterowania układów mechatronicznych.....	41
3.1. Wstęp	42
3.2. Sterowanie w układzie otwartym i zamkniętym.....	44
3.3. Sterowanie sekwencyjne	48
4. Literatura.....	53

Wstęp

Niniejsze materiały zostały opracowane w ramach realizacji projektu pn. „STUDIA PODYPLOMOWE DLA NAUCZYCIELI PRZEDMIOTÓW ZAWODOWYCH – mechatronika, pojazdów i maszyn, komputerowo wspomagane projektowanie i wytwarzanie, bezpieczeństwo człowieka w środowisku pracy i ergonomia” finansowanego ze środków UNII EUROPEJSKIEJ w ramach PROGRAMU OPERACYJNEGO – KAPITAŁ LUDZKI. Materiały przeznaczone są dla słuchaczy tych studiów kierunku „Mechatronika pojazdów i maszyn” prowadzonych na Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej.

Niniejsze opracowanie przygotowano dla przedmiotu pt. „Wprowadzenie do mechatroniki”. Jego zawartość merytoryczna w pełni odpowiada zakresowi opisanemu w sylabusie opracowanym dla tego przedmiotu.

Całość opracowanych materiałów dydaktycznych dla ww. przedmiotu zawarta została w 3 rozdziałach. Rozdział 1 został poświęcony sformułowaniu definicji i strukturze systemu mechatronicznego. Skupiono się głównie na wyłonieniu cech systemu, które wyróżniają produkty mechatroniczne.

W rozdziale 2 przeprowadzono analizę układów o różnej naturze fizycznej. Wprowadzono modele analogów mechaniczno-elektryczno-hydraulicznych oraz przedstawiono prawa syntezy układów o różnej naturze fizycznej.

Rozdział 3 to charakterystyka procesów sterowania w maszynach i urządzeniach mechatronicznych. W rozdziale zdefiniowano podstawowe układy regulacji i sterowania oraz podano definicję podstawowych elementów toru sterowania.

Przedmiot realizowany jest w formie wykładów (8 godzin). Głównym celem przedmiotu jest:

- zapoznanie z definicją i strukturą systemu mechatronicznego,
- opis podstawowych elementów urządzenia mechatronicznego,

- przedstawienie metod modelowania struktur mechatronicznych.

Podczas wykładów poruszone zostaną następujące zagadnienia:

1. Opis systemów mechatronicznych. Definicja systemu mechatronicznego.
2. Obszary zastosowania systemów mechatronicznych.
3. Struktura i cechy charakterystyczne systemów mechatronicznych..
4. Przegląd podstawowych elementów i układów pomiarowych w systemach mechatronicznych
5. Przegląd podstawowych elementów wykonawczych.
6. Zadania i miejsce podsystemu sterowania w systemach mechatronicznych.
7. Podstawowe algorytmy sterowania analogowego i cyfrowego
8. Przetwarzanie sygnałów w systemach mechatronicznych.
9. Wykorzystanie elementów sztucznej inteligencji do sterowania i rozszerzania funkcji użytkowych systemów mechatronicznych
10. Wprowadzenie do modelowania systemów mechatronicznych

Przedmiot kończy się egzaminem sprawdzającym wiedzę teoretyczną w formie pisemnej.

Poniższy materiał jest zbiorem podstawowych informacji niezbędnych do zrozumienia zagadnień związanych z postrzeganiem systemów mechatronicznych.

1

Opis systemu mechatronicznego. Definicja i struktura systemu mechatronicznego

W tym rozdziale:

- Definicja systemu mechatronicznego.
- Struktura sytemu mechatronicznego

1.1. Wstęp

W wielu publikacjach, reklamach, ofertach pracy można spotkać termin mechatronika. Kilka lat temu pojawił się zawód mechatronik (inżynier mechatronik, technik mechatronik, monter mechatronik, itp.). Uczelnie techniczne otwierają wydziały, które w swojej nazwie posiadają termin „mechatronika” lub „mechatroniczny” i prowadzą zajęcia zgodnie ze standardem nauczania „Mechatronika”.

W tym miejscu można się zastanowić, skąd takie zainteresowanie specjalistami w tej dziedzinie? Czy to może jest tylko moda na dobrze brzmiące nazwy kierunków kształcenia?

Jeżeli uważnie przyjrzymy się różnym urządzeniom w naszym domu i pracy, to możemy zauważyć pewne zmiany. Większość urządzeń w naszych domach posiada wyświetlacze i programatory. Po włączeniu nie wymagają zmuśnego strojenia ustawiania. Ponadto ilość elementów elektronicznych w klasycznych urządzeniach mechanicznych znacznie się zwiększyła. W starszych urządzeniach gospodarstwa domowego „*elektryczny*” był tylko silnik napędzający. Przykładowo nowoczesna pralka (pisanie automatyczna obecnie jest zbędne) potrafi zważyć ubranie i do zadeklarowanego celu prania optymalnie dobrać ilość wody, czynnik piorący, temperaturę i przeprowadzić proces odprowadzenia wody. Kończąc pranie dobiera parametry wirowania i suszenia, tak aby pranie nie uległo uszkodzeniu. Ponadto proces prania można przeprowadzić o określonej porze dnia, tygodnia, itd.

Można zadać kilka pytań pomocniczych. Dlaczego pralka ma tak rozbudowane funkcje?

Dobór automatyczny parametrów prania skutkuje oszczędnością energii, a tym samym przynosi korzyści ekonomiczne. Dopasowanie parametrów prania, wirowania i suszenia do rodzaju materiału powoduje mniejsze zużycie odzieży, a tym samym otrzymamy konkretną wartość ekonomiczną. Oprócz wymiernych korzyści ekonomicznych można dodatkowo wyróżnić:

- korzyści ekologiczne, które polegają na zmniejszeniu zanieczyszczenia środowiska w wyniku produkcji energii (oszczędzanie energii podczas prania),

Opis systemu mechatronicznego. Definicja i struktura systemu mechatronicznego

- większą trwałość odzieży pranej, co powoduje mniejsze zużycie energii (podczas produkcji odzieży), mniejszą ilość odpadów (zużyta odzież),
- ergonomię (prosta i funkcjonalna obsługa pralki),
- wydłużenie eksploatacji przez podwyższenie niezawodności, która polega na dopasowaniu parametrów procesu do możliwości urządzenia.



Rysunek 1.1. Produkt mechatroniczny

W innych urządzeniach taki jak samoloty, samochody itp. zwiększenie niezawodności skutkuje również podniesieniem poziomu bezpieczeństwa.

Przedstawione cechy nowoczesnej pralki świadczą o nadaniu jej cech adaptacyjnych. Dlatego nowoczesna pralka potrafi dostosować program prania do warunków otoczenia i celu prania.

Dlaczego starsze pralki nie miały możliwości np. płynnej regulacji prędkości wirowania? Problem sprowadza się do sterowania prędkością obrotową silników elektrycznych prądu przemiennego. Silniki elektryczne prądu przemiennego w starszych urządzeniach wykorzystywano tylko jako napęd. Regulacja prędkości realizowana była przez przekładnie (np. przekładnia pasowa zmniejszająca prędkość obrotową). Jeżeli występował problem sterowania prędkością obrotową, to korzystano głównie z napędów prądu stałego. Ze względów technologicznych i ekonomicznych nie umieszczano w pralkach napędów prądu stałego. Obecnie dynamiczny rozwój układów elektroenergetycznych, do zasilania silników prądu przemiennego w połączeniu z algorytmami sterowania i cyfrowymi regulatorami umożliwia precyzyjne sterowanie prędkością obrotową silników elektrycznych.

Takich urządzeń domowego użytku można wyróżnić w naszym otoczeniu znacznie więcej. Jednak prawdziwy postęp w dziedzinie technologii mechatronicznych można zaobserwować w kosmonautyce, lotnictwie, budownictwie i technologiach morskich. Wiele urządzeń technicznych posiada podsystemy, które można nazwać mechatronicznymi, jednak jako całość nie są urządzeniami mechatronicznymi. Przykładem takiego urządzenia jest nowoczesny samochód, którego poszczególne układy są urządzeniami mechatronicznymi (ABS, układ sterowania silnikiem, klimatyzacja). Jednak samochód jako całość nie jest urządzeniem mechatronicznym. Obserwując trend zmian w konstrukcjach samochodów, można stwierdzić, że samochód przyszłości będzie takim produktem.

Doskonałym przykładem urządzeń mechatronicznych są współczesne statki powietrzne. Samolot jako całość wykazuje cechy adaptacji do panujących warunków otoczenia. Zależnie od zakresu lotu, systemy pokładowe statku powietrznego bez wiedzy załogi zmieniają geometrie profilu skrzydła, tłumią drgania oraz stabilizują parametry ruchu statku powietrznego. Współczesny samolot jest jednym zintegrowanych systemem łączącym kadłub, skrzydła, silniki, systemy awioniczne, monitoringu, autodiagnostyki i ratownictwa w jedną całość.

W rozdziale przedstawiona zostanie definicja mechatroniki, cechy charakterystyczne urządzenia i systemy mechatroniczne oraz przedstawiona zostanie struktura i podstawowe elementy systemu mechatronicznego.

1.2. Definicja systemu mechatronicznego

Definicji systemu mechatronicznego jest wiele, lecz brak jest jednoznacznej definicji. Na potrzeby powyższych materiałów przytoczonych zostanie kilka przykładowych definicji.

Mechatronika to integracja maszyn i mechanicznych układów, elektronicznych i elektrycznych urządzeń, oprogramowania komputerowego celem otrzymania produktu „inteligentnego”, przystosowującego się do zmiennych warunków otoczenia i przeznaczenia poprzez manipulacje programowe. To interdyscyplinarne podejście do rozwiązywania problemów inżynierskich rozszerza i dodaje nowe wymiary dla idei konstruowania środków technicznych służących człowiekowi. [6]

Mechatronika może być widziana jako fuzja dyscyplin mechanicznych i elektrycznych w nowoczesnych procesach inżynierskich. Jest ona względnie nowym pojęciem w konstruowaniu systemów, urządzeń i produktów, ukierunkowanych na osiągnięcie optymalnej równowagi

Opis systemu mechatronicznego. Definicja i struktura systemu mechatronicznego

miedzy podstawową strukturą mechaniczną i jej całkowitym sterowaniem. [1]

Mechatronika jest synergiczną kombinacją inżynierii mechanicznej, elektrycznej i informatycznej w celu zintegrowanego konstruowania inteligentnych układów, a w szczególności mechanizmów i maszyn. [6]

Zgodnie z przytoczonymi definicjami „*mechatronika*” jest integracją takich dziedzin jak mechanika, elektronika i nowoczesne techniki komputerowe. Jednak słowo integracja nie może być rozumiane jako połączenie lub suma.

„A mechatronic system is not just a marriage of electric and mechanical systems and is more than just a control system; it is a complete integration of all of them.” [7]

„System mechatroniczny nie jest połączeniem (dosłownie małżeństwem) elektronicznego i mechanicznego systemu i jest czymś więcej niż system sterowania, system mechatroniczny jest ich pełną integracją (nową jakością)”. [tłumaczenie autora]

W systemie mechatronicznym część elektroniczna i mechaniczna stanowi jeden system, który różni się od tradycyjnych rozwiązań pewnymi cechami. Do podstawowych cech należy zaliczyć adaptacyjność, optymalność i „inteligencję”.

Pojęcie mechatronika powstało jako połączenie dwu słów:

mechanika + *elektronika* = mechatronika

Termin mechatronika wprowadzony został w 1969 roku przez firmę Yaskawa Electric Corporation i od 1971 roku był chroniony jako nazwa handlowa. Nazwy tej używano na określenie urządzeń mechanicznych wspieranych przez układy elektroniczne. Pierwszymi urządzeniami tego typu były lustrzankowe aparaty fotograficzne, w których zastosowano mechatroniczne podejście przy projektowaniu układu podnoszenia lustra. Od 1982 roku termin „mechatronika” przestał być chroniony prawem handlowym.

Z przedstawionej genezy słowa mechatronika można wyciągnąć wniosek:

„Powstanie systemów i urządzeń mechatroniczny jest konsekwencją ewolucji układów mechanicznych.”

ROZDZIAŁ 1

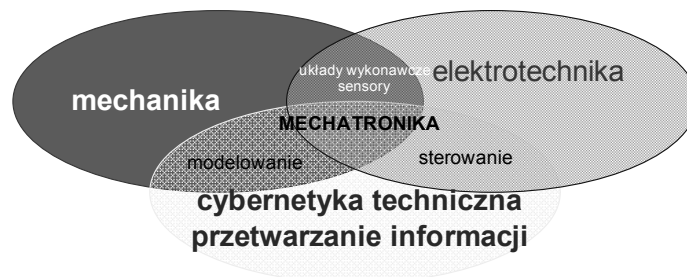
W obszarze konstrukcji mechanicznych osiągnięto granicę możliwości konstrukcyjnych i technologicznych. Nowe konstrukcje realizowane w ujęciu klasycznym nie gwarantowały dalszej poprawy parametrów użytkowych i funkcjonalnych. Przykładem mogą być łożyska, powszechnie stosowane do ograniczenia tarcia, które powstaje między wirującymi parami kinematycznymi (wirniki i obudowa maszyny). Do łożyskowania wykorzystuje się łożyska ślizgowe i toczne. Łożyska tego typu mają ograniczenia ze względu na dopuszczalną maksymalną prędkość obrotową. Łożyska toczne przeznaczone do łożyskowania wysokoobrotowych wirników są wykonane ze specjalnych materiałów i są bardzo drogie. Ponadto w systemach łożyskowania, z łożyskami tego typu, niezbędne jest stosowanie systemu smarowania i chłodzenia. Dodatkowe ograniczenia pojawiają się, kiedy łożyska muszą pracować w środowisku aktywnym lub wysokiej próżni.

Poszukiwanie nowych rozwiązań łożyskowania wirników doprowadziło do zbudowania łożysk niekonwencjonalnych (np. aerosprężyste). Dopiero zastosowanie podejścia mechatronicznego umożliwiło zbudowanie łożysk magnetycznych eliminujących większość wad jakie posiadają łożyska klasyczne.

Trzecia z podanych definicji wprowadza pojęcie „synergii”. Pojęcie to stosowane jest w chemii i oznacza uzyskanie nowej jakości przy połączeniu dwu lub więcej różnych substancji. Przykładem może być połączenie dwóch gazów wodoru i tlenu. Wynikiem takiego połączenia jest woda. Według „Słownika wyrazów obcych i zwrotów obcojęzycznych” synergia to:

współdziałanie, kooperacja czynników, skuteczniejsza niż suma ich oddziaływań.

Na rysunku przedstawione są elementy składające się na synergiczną całość systemu mechatronicznego.



Rysunek 1.2. Mechatronika

Opis systemu mechatronicznego. Definicja i struktura systemu mechatronicznego

Jak przedstawiono na rysunku 1.2 na styku układów mechanicznych i elektrotechniki występują układy wykonawcze (siłowniki, silniki – przetworniki elektrycznych sygnałów sterujących na mechaniczne zmienne procesowe) oraz elementy pomiarowe obejmujące czujniki mierzące zmienne procesowe (czujniki do pomiaru wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi).

We wspólnym obszarze cybernetyki technicznej i elektrotechniki występują procesowe techniki obliczeniowe, które sprowadzają się do zaawansowanych metod sterowania złożonymi procesami. Systemy elektroniki cyfrowej w połączeniu z nowoczesnymi algorytmami sterowania umożliwiają zbudowanie urządzeń o optymalnych parametrach pracy. Spełnienie wysokich wymagań jest możliwe przez zastosowanie sterowania optymalnego, sterowania od wektora stanu, sterowania odpornego oraz powszechnego zastosowania regulatorów PID i ich pochodnych. Znaczny postęp osiągnięto po zastosowaniu cyfrowych układów sterowania i regulacji.

We wspólnym obszarze cybernetyki technicznej i mechaniki znajdują się metody numeryczne umożliwiające zaawansowane projektowanie oraz prowadzenie badań symulacyjnych, mających na celu wirtualną weryfikację zaprojektowanego urządzenia. Ze względu na szczególną interdyscyplinarność mechatroniki, brak jest obecnie oprogramowania wspierającego pełny proces projektowania systemu mechatronicznego. Natomiast dostępne są nowoczesne modelery 3D umożliwiające generowanie trójwymiarowych modeli i ich statyczną i dynamiczną weryfikację (ocena wytrzymałości metodą elementów skończonych). Proces tworzenia systemu mechatronicznego wspierany jest przez programy do projektowania i symulowania układów elektrycznych, elektronicznych, hydraulicznych i pneumatycznych. Projektowania układu sterowania wspierane jest przez programy wykorzystujące metody numeryczne do optymalizacji i doboru praw sterowania, weryfikacji i oceny zaprojektowanego układu sterowania oraz zaawansowanego przetwarzania sygnałów.

Nowoczesne narzędzia wspomagające proces komputerowego projektowania CAD (ang. Computer Aided Design) mogą być wykorzystane do szybkiego prototypowania, projektowania współbieżnego oraz programowania systemów sterowania. Ponadto w badaniach złożonych systemów mechatronicznych prowadzi się analizy rozkładu pól magnetycznych, elektrycznych, termicznych i przepływów metodą elementów skończonych.

1.3. Struktura systemu mechatronicznego

W poprzednim podrozdziale określono cechy systemu mechatronicznego jako produktu będącego synergiczną kombinacją takich dziedzin jak mechanika, elektrotechnika i cybernetyka techniczna. Oprócz przytoczonych cech można zauważyć charakterystyczną strukturę systemu mechatronicznego. Elementy tworzące strukturę systemu mechatronicznego są produktami, które powstały jako suma oddziaływań między poszczególnymi dziedzinami.

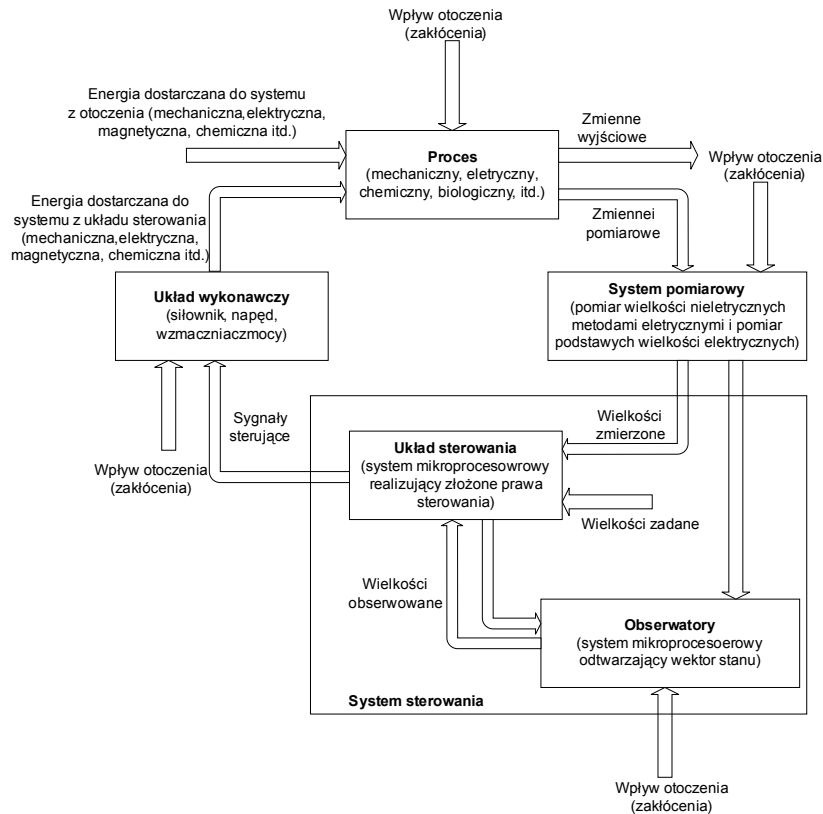
W strukturze systemu mechatronicznego można wyróżnić:

- a. Siłowe układy wykonawcze zamieniające elektryczne sygnały sterujące na mechaniczne zmienne procesowe.
- b. Czujniki/sensory przeznaczone do pomiaru elektrycznych i nieelektrycznych zmiennych procesowych metodami elektrycznymi.
- c. Układy sterowania oraz identyfikacji zmiennych procesowych.

Układy wykonawcze i sensory powstały jako synergia elektrotechniki i mechaniki, natomiast układy sterowania i identyfikacji są synergia cybernetyki technicznej i elektrotechniki.

Na rysunku 1.3 przedstawiony jest schemat strukturalny systemu mechatronicznego. W strukturze systemu podstawowym elementem jest proces. Pod pojęciem procesu będziemy rozumieć system podstawowy, który realizuje główny cel systemu mechatronicznego. Przykładem może być statek powietrzny, który wykonuje lot zgodnie z ustaloną trajektorią oraz profilem. Parametry poruszającego się statku powietrznego opisane będą przez zbiór zmiennych procesowych takich jak wektor prędkości kątowych, liniowych, sił i momentów aerodynamicznych, itp. Proces może posiadać różną naturę. W większości są to systemy mechaniczne, ale może to być proces elektryczny, chemiczny lub biologiczny. Przykładem takiego systemu jest reaktor chemiczny, w którym zachodzą różne reakcje, piec do centralnego ogrzewania (gazowy lub elektryczny) itp.

Opis systemu mechatronicznego. Definicja i struktura systemu mechatronicznego



Rysunek 1.3. Struktura systemu mechatronicznego

Proces podstawowy pobiera energię z dwu źródeł. Część energii jest dostarczanej do procesu z otoczenia. Energia ta nie jest sterowana. Druga część energii pobierana jest przez system w sposób sterowany. Energię tą dostarczają układy wykonawcze.

Proces charakteryzowany jest przez zbiór zmiennych stanu. Zmienne stanu dzielą się na mierzalne i niemierzalne. W większości systemów zmienne stanu mierzalne posiadają naturę fizyczną (są wyrażane przez jednostki fizyczne zgodnie z przyjętym systemem miar). Część zmiennych stanu jest niedostępna przez pomiar ze względu na brak bezpośrednich metod pomiaru lub brak fizycznej możliwości umieszczenia czujnika.

Zmienne procesowe ulegają ciągłym zmianom w wyniku oddziaływania zakłóceń zewnętrznych, które powodują fluktuacje zmiennych wyjściowych oraz destabilizację procesu. Przykładem może być lot statku

powietrznego, który w wyniku cyrkulacji atmosfery zmienia profil i trajektorie lotu.

Do pomiaru zmiennych wyjściowych wykorzystuje się czujniki mierzące wielkości nieelektryczne metodami elektrycznymi i czujniki określające podstawowe zmienne procesowe elektryczne (natężenie prądu elektrycznego i napięcie prądu elektrycznego). Pomiar wielkości nieelektrycznych realizowany jest przez czujniki parametryczne i generacyjne. W konstrukcji czujników parametrycznych wykorzystuje się zmianę parametru elektrycznego czujnika spowodowaną wielkością mechaniczną. Przykładem może być termometr rezystancyjny, w konstrukcji którego występuje zmieniająca się rezystancja pod wpływem temperatury lub tensometr, który pod wpływem siły ściskającej lub rozciągającej zmienia swoją rezystancję. W konstrukcji czujników parametrycznych wykorzystuje się zmianę rezystancji, pojemności elektrycznej kondensatorów lub indukcyjności własnej i wzajemnej cewek.

Inną grupą są czujniki generacyjne, w których nieelektryczne zmienne procesowe generują napięcie prądu elektrycznego, lub przepływ prądu elektrycznego. Przykładem są termometry termoelektryczne (termopary) lub czujniki piezoelektryczne.

W systemach mechatronicznych czujniki połączone są w system pomiarowy. System taki złożony jest z wielu różnych czujników umożliwiających pomiar zmiennych procesowych (np. monitorowanie stanu nowoczesnego silnika spalinowego obejmuje kilkanaście czujników mierzących takie wielkości jak prędkość obrotowa, poziom drgań, pozycję wału silnika, ilość tlenu w spalinach, itp.).

Kolejnym elementem jest system sterowania. System ten na podstawie zmierzonych zmiennych wyjściowych steruje procesem. System ten zapewnia „inteligencję” w systemie mechatronicznym. Oprócz układów sterowania, system ten obejmuje układy identyfikujące zmienne procesowe i obserwatory stanu procesu. Zadaniem obserwatorów i układów identyfikujących jest oszacowanie zmiennych procesowych, które nie są dostępne bezpośrednio przez pomiar.

System sterowania realizowany jest w technologii cyfrowej. Dlatego niezbędne jest wyposażenie systemu w układy wejściowe, które zapewniają dopasowanie amplitudy i częstotliwości sygnałów przetwarzanych do przetwornika analogowo-cyfrowego. Cyfrowy system sterowania składa się z układów realizujących prawa regulatorów (np. PID, H^∞ lub LQG). Oprócz regulatorów w systemie znajdują się kombinacyjne i sekwencyjne elementy sterujące, które są odpowiedzialne za zakresy pracy

Opis systemu mechatronicznego. Definicja i struktura systemu mechatronicznego

urządzenia. Przetwarzanie znacznej ilości zmiennych procesowych wymaga zastosowania odpowiednich jednostek cyfrowych, zapewniających pracę sytemu w czasie rzeczywistym.

Sygnały sterujące, jako sygnały informacyjne nie posiadają odpowiedniego poziomu energii. Dlatego w strukturze systemu mechatronicznego występują układy wykonawcze, które zamieniają elektryczne sygnały sterujące na wielkości nieelektryczne i elektryczne o odpowiednim poziomie energii.

W grupie układów wykonawczych możemy wyróżnić:

- elektryczne silniki liniowe i obrotowe,
- pneumatyczne napędy obrotowe i siłowniki,
- hydrauliczne napędy obrotowe i siłowniki,
- wzmacniacze mocy,
- przekładnie, reduktory i sprzęgła,
- elektromagnesy,
- zawory hydrauliczne i pneumatyczne,
- piezoelektryczne napędy obrotowe i siłowniki.
- specjalne maszyny i urządzenia.

W literaturze przedmiotowej spotyka się pojęcie „aktor” jako termin określający układ wykonawczy. Termin ten zapożyczony został z języka angielskiego „actuator”. Wraz z pojawieniem się tego pojęcia pojawiła się dziedzina zajmująca się układami wykonawczymi, która nazywa się „aktoryka”.

ROZDZIAŁ 1

2

Podstawy modelowania i opisu układów mechatronicznych

W tym rozdziale:

- Analogi w mechatronice
- Prawo ciągłości i równowagi w mechatronice
- Złożone struktury w systemach mechatronicznych

2.1. Wstęp

Z mechatroniką związane jest pojęcie systemu. W większości publikacji używa się określenia „system mechatroniczny”. Jako system rozumiemy układ, który posiada wejścia i wyjścia. W systemie zaniedbywana jest jego wewnętrzna struktura (rysunek 2.1).



Rysunek 2.1. System

W mechatronice posługujemy się elementami o różnej naturze, ponieważ system mechatroniczny to synergiczna integracja układów o różnych właściwościach fizycznych. W strukturze systemu mechatronicznego można wyróżnić elementy mechaniczne, elektryczne, pneumatyczne i hydrauliczne. Każdy z tych elementów jest opisany przez inne wielkości fizyczne. Układ mechaniczny charakteryzowany jest przez sztywność, bezwładność i masę, natomiast układ elektryczny opisany będzie przez pojemność elektryczną, indukcyjność oraz rezystancję (opór elektryczny). Podobnie można postąpić opisując układ pneumatyczny, hydrauliczny i cieplny.

Ponieważ system mechatroniczny może zawierać elementy o różnej naturze fizycznej, to proces jego projektowania może prowadzić do wielu nieporozumień. Dlatego należy wprowadzić jednoznaczny opis systemu mechatronicznego, niezależny od natury procesu. Oczywiście nie można pominąć właściwości fizycznych elementu. Opór elektryczny będzie nadal oporem a bezwładność masy pozostanie bezwładnością, jednak w dalszej analizie elementy można będzie podzielić na trzy podstawowe grupy:

- elementy wprowadzające bezwładność,
- elementy rozpraszające energię,
- elementy gromadzące energię.

W systemach mechatronicznych wprowadza się analogii, które definiują określone zachowanie układu niezależnie od jego natury fizycznej.

Korzystając z właściwości analogów można wykonać opis złożonych systemów, a do takich należą systemy mechatroniczne. Do zbudowania złożonego systemu mechatronicznego niezbędne jest połączenie analogów w jeden system. Łączenie analogów realizowane jest przez strukturę szeregową, równoległą i ze sprzężeniem zwrotnym.

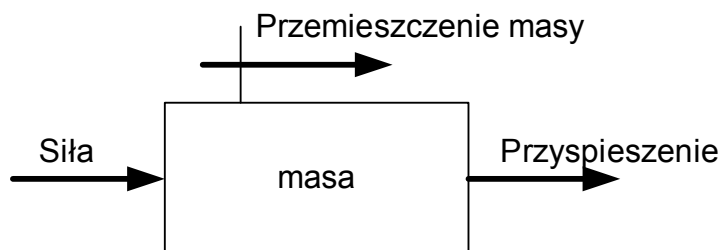
W rozdziale omówione zostaną podstawowe analogii i struktury złożone.

2.2. Analogi elektryczne, mechaniczne i hydrauliczne

Opis podstawowych struktur zostanie przeprowadzany dla układów elektrycznych, mechanicznych i hydraulicznych. Niezależnie od fizycznej natury elementu możemy wyróżnić elementy wprowadzające bezwładność, tłumienie (rozpraszanie energii) i sztywność (gromadzenie energii).

Układ mechaniczny

Jeżeli do ciała o masie m przyłożona zostanie siła F , to zmianie ulegnie prędkość z jaką ciało będzie się poruszać. Jak długo będzie przyłożona siła, to ciało to będzie zmieniać prędkość, ze stałym przyspieszeniem (rysunek 2.2).



Rysunek 2.2. Masa - bezwładność

Zgodnie z II prawem dynamiki Newtona wartość siły F jest równa iloczynowi przyspieszenia a i masy m ciała:

$$F_m(t) = m \cdot a(t)$$

Podana właściwość ciała materialnego nazywa się bezwładnością. Jest to cecha, która charakteryzuje ruch ciała w inercyjnym układzie odniesienia. Jeżeli na ciało nie działa siła, lub działają siły, które się równoważą (wypadkowa działających sił równa jest zero), to ciało porusza się ze stałą prędkością lub pozostaje w spoczynku. Natomiast zmiana prędkości ciała wymaga przyłożenia siły do ciała lub wartość wypadkowa sił działających na ciało musi być różna od zera.

Przedstawiona zasada dotyczy ruchu liniowego i obrotowego. W przypadku ruchu obrotowego sile odpowiada moment siły, prędkości liniowej prędkość kątowna, natomiast masie odpowiada moment bezwładności.



Rysunek 2.3. Sprężyna – magazyn energii

Kolejnym elementem charakteryzującym układy mechaniczne jest sprężyna. Parametrem charakteryzującym sprężynę jest sztywność k , której wartość jest równa:

$$k = \frac{F_s(t)}{x(t)}$$

gdzie: $F(t)$ – siła, $x(t)$ – przemieszczenie.

Odwrotnością sztywności jest podatność:

$$\kappa = \frac{x(t)}{F_s(t)}$$

Sprężyna jest mechanicznym elementem, który gromadzi energię. Sprężyny były wykorzystywane do napędzania zegarów („mechaniczna bateria”). Sprężystość ściągów wykorzystuje się w łuku i kuszy do wyrzucania pocisków.

Odształcona sprężyna gromadzi energię. Energia jest zwracana po powrocie sprężyny do stanu wyjściowego:

$$E = \frac{1}{2}kx^2$$

UWAGA!

Ponieważ energia jest równa:

$$E = \int_0^x F ds$$

uwzględniając siłę sprężystości:

$$F = ks$$

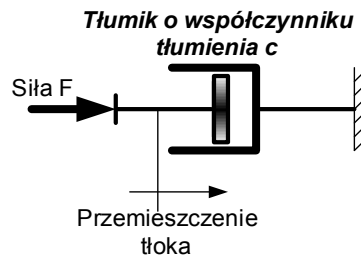
to:

$$E = \int_0^x ks ds = \frac{1}{2}ks^2 \Big|_0^x = \frac{1}{2}kx^2$$

Kolejnym elementem w grupie układów mechanicznych jest tłumik. Zadaniem tłumika jest przeciwdziałanie ruchowi. Przykładem może być amortyzator tłumiący drgania i jednocześnie izolujący maszynę od podłoża. Ruch tłoka w amortyzatorze jest tłumiony przez ciecz znajdującą się w cylindrze pod tłokiem. Siła oporu jaką stawia tłumik jest proporcjonalna do prędkości ruchu tłoka:

$$F_b = c \frac{dx}{dt}$$

gdzie: c – współczynnik tłumienia.



Rysunek 2.4. Tłumik – opór mechaniczny

Podczas ruchu tłoka energia dostarczana do elementu jest zamieniana w ciepło. Tym samym następuje rozproszenie energii przez tłumik.

W tabeli poniżej zestawiono podstawowe zależności dla układu wykonującego ruch postępowy (translacyjny) i obrotowy (rotacyjny). Dla poszczególnych ruchów wyznaczono zależności na siłę, moment i energię.

ROZDZIAŁ 2

Element mechaniczny	Siła/Moment	Akumulowana lub rozpraszana energia
Ruch postępowy		
Masa m	$F_m = m \frac{d^2 x}{dt^2}$	$E = \frac{1}{2} m v^2$
Tłumienie b	$F_c = b \frac{dx}{dt}$	$P = b v^2$
Sprężyna k	$F_s = kx$	$E = \frac{1}{2} k x^2$
Ruch obrotowy		
Moment bezwładności I	$M_m = I \frac{d^2 \alpha}{dt^2}$	$E = \frac{1}{2} I \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2$
Tłumienie c	$M_c = c \frac{d\alpha}{dt}$	$P = c \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2$
Sprężyna k	$M_s = k\alpha$	$E = \frac{1}{2} k \alpha^2$

Układ elektryczny

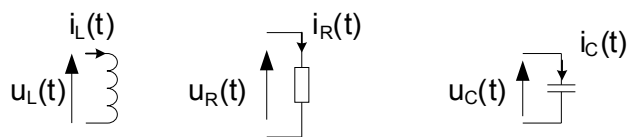
Dla układów elektrycznych można wyróżnić indukcyjność, rezystancję i pojemność elektryczną. Przy opisie układów elektrycznych posługujemy się napięciem prądu elektrycznego u jako wielkością wyjściową, natomiast wielkością wejściową jest natężenie prądu elektrycznego i płynącego przez element.

Wartości spadku napięcia u jest równa dla:

- elementu o indukcyjności L (cewka):
$$u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$
- elementu o rezystancji R (rezystor/opornik):
$$u_R(t) = Ri(t)$$
- elementu o pojemności C (kondensator):

$$u_c(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt$$

Indukcyjność L Rezystancja R Kondensator C



Rysunek 2.5. Indukcyjność – bezwładność, rezystancja – tłumienie, pojemność elektryczna – gromadzenie energii

Natężenie prądu elektrycznego, to ruch ładunku elektrycznego q , stad natężenie prądu elektrycznego jest równe:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$$

Uwzględniając powyższą zależność, otrzymamy wartości spadków napięć dla:

- elementu o indukcyjności L (cewka):

$$u_L(t) = L \frac{d^2q(t)}{dt^2}$$

- elementu o rezystancji R (rezystor/opornik):

$$u_R(t) = R \frac{dq(t)}{dt}$$

- elementu o pojemności C (kondensator):

$$u_c(t) = \frac{1}{C} q(t)$$

Jeżeli porównamy zależności opisujące układy elektryczne i mechaniczne to można zauważyć, że element indukcyjny odpowiada masie elementu mechanicznego. Kolejne elementy elektryczne odpowiadają odpowiednio elementom mechanicznym:

- ✓ rezystancja \Rightarrow tłumieniu,
- ✓ pojemność \Rightarrow podatności (odwrotność sztywności),
- ✓ ładunek elektryczny \Rightarrow przemieszczeniu,
- ✓ napięcie prądu elektrycznego \Rightarrow sile.

ROZDZIAŁ 2

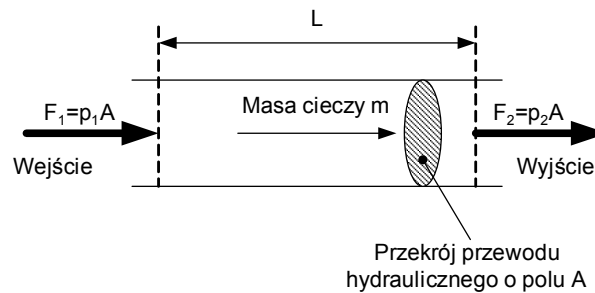
Podobnie jak dla układu mechanicznego w tabeli poniżej zebrano podstawowe zależności określające napięcie prądu elektrycznego, natężenie prądu elektrycznego i energię akumulacji i dyssypacji w układach elektrycznych.

Element elektryczny	Napięcie prądu elektrycznego	Natężenie prądu elektrycznego	Energia rozpraszana i akumulowana
Indukcyjność (bezwładność)	$u_L(t) = L \frac{d^2 q(t)}{dt^2}$	$i_L(t) = \frac{1}{L} \int u(t) dt$	$E = \frac{1}{2} L i_L^2(t)$
Rezystancja (tłumienie)	$u_R(t) = R \frac{dq(t)}{dt}$	$i_R(t) = \frac{1}{R} u(t)$	$P = R i_R^2(t)$
Kondensator (akumulator energii elektrycznej)	$u_C(t) = \frac{1}{C} q(t)$	$i_C(t) = C \frac{du(t)}{dt}$	$E = \frac{1}{2} C u_C^2(t)$

Układ hydrauliczny

Kolejna grupa, to elementy hydrauliczne. Podobnie jak dla elementów mechanicznych i elektrycznych można wyróżnić elementy wprowadzające bezwładność (długie przewody hydrauliczne), opór hydrauliczny i akumulator energii (zbiornik cieczy).

W długim przewodzie hydraulicznym o przekroju A i długości L masa cieczy musi zostać przesunięta. Na wejściu przewodu podane jest ciśnienie p_1 , a tym samym przyłożona jest do masy cieczy siła F_1 .



Rysunek 2.6. Długi przewód hydrauliczny

Na wyjściu przewodu występuje ciśnienie p_2 i siła F_2 . Różnica siły na wejściu i wyjściu przewodu (siła wypadkowa) jest równa:

$$F_1 - F_2 = p_1 A - p_2 A = (p_1 - p_2) A$$

Siła wypadkowa nadaje przyspieszenie a masie cieczy m znajdującej się w przewodzie:

$$ma = (p_1 - p_2) A$$

Masa cieczy znajdującej się w przewodzie jest równa:

$$m = AL\rho$$

gdzie:

A – pole przekroju przewodu hydraulicznego,

L – długość przewodu hydraulicznego.

ρ – gęstość cieczy przepływającej przez przewód hydrauliczny.

Uwzględniając w powyższej zależności II – gie prawo Newtona:

$$F_w = m \cdot \frac{dv}{dt}$$

gdzie v jest prędkością przepływającej cieczy, otrzymamy:

$$AL\rho \frac{dv}{dt} = (p_1 - p_2) A$$

Przepływ cieczy jest równy:

$$q = Av$$

UWAGA!

Przepływ jest wydatkiem objętościowym którego jednostki są następujące:

$$\text{jednostki } \left[\frac{m^3}{s} \right] = [m^2] \left[\frac{m}{s} \right]$$

Uwzględniając przepływ w powyższych zależnościach:

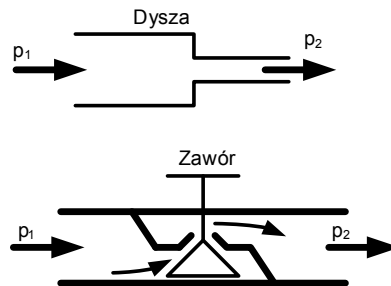
$$L\rho \frac{dq}{dt} = (p_1 - p_2) A$$

Ostatecznie równanie można zapisać jako:

$$I \frac{dq}{dt} = (p_1 - p_2)$$

gdzie: I – jest indukcyjnością hydrauliczną:

$$I = q \frac{L}{A}$$



Rysunek 2.7. Opór hydrauliczny.

Kolejnym elementem jest opór hydrauliczny, który jest oporem jaki stawia zawór lub dysza o zmiennym przekroju przepływającej cieczy. Opór hydrauliczny charakteryzuje się spadkiem ciśnienia na wyjściu elementu względem jego wejścia. Opór nie powoduje zmiany przepływu. Element tego typu zachowuje się analogicznie jak opór elektryczny (rysunek 2.7).

Zależność między przepływem objętościowym q a różnicą ciśnienia na wejściu p_1 i wyjściu p_2 oporu hydraulicznego R jest następująca:

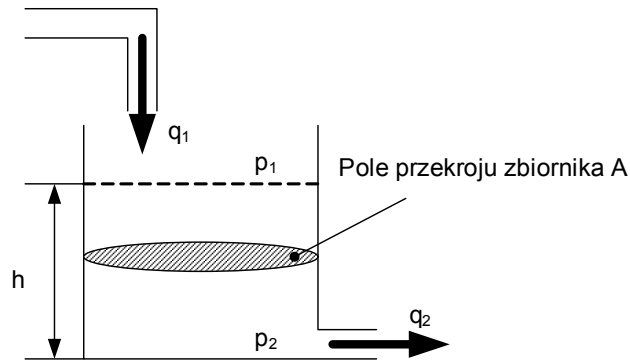
$$(p_1 - p_2) = Rq$$

Jak wynika z przedstawionej zależności odpowiednikiem przepływu objętościowego jest natężenie prądu elektrycznego w elementach elektrycznych, natomiast różnica ciśnień na wejściu i wyjściu odpowiada spadkowi napięcia prądu elektrycznego.

UWAGA!

Przedstawiona zależność może być traktowana jako prawo Ohma dla układów hydraulicznych. Jednak opór hydrauliczny w większości przypadków jest nieliniowy i zależy od wartości przepływu.

Ostatnim elementem jest zbiornik cieczy, który gromadzi energię potencjalną jaką posiada masa m cieczy zamknięta w objętości zbiornika V .



Rysunek 2.8. Zbiornik jako element gromadzący energię.

Zmiana objętości cieczy w zbiorniku zależy od różnicy ilości cieczy wpływającej do zbiornika (przepływ q_1) i ilości cieczy wypływającej ze zbiornika (przepływ q_2):

$$q_1 - q_2 = \frac{dV}{dt}$$

Ponieważ objętość cieczy w zbiorniku $V=Ah$ (A – pole przekroju zbiornika, h – wysokość/poziom cieczy w zbiorniku):

$$q_1 - q_2 = A \frac{dh}{dt}$$

Ciśnienie jakie ciecz wywiera na dno zbiornika jest równe:

$$p = h\rho g$$

Uwzględniając ciśnienie p w różnicy ciśnień, otrzymamy:

$$q_1 - q_2 = A \frac{d\left(\frac{p}{\rho g}\right)}{dt} = \frac{A}{\rho g} \frac{dp}{dt}$$

$$q_1 - q_2 = C \frac{dp}{dt}$$

gdzie: C – jest pojemnością hydrauliczną:

$$C = \frac{A}{\rho g}$$

ROZDZIAŁ 2

Można zauważyć podobieństwo między pojemnością elektryczną i hydrauliczną. Poniżej zestawiono podstawowe zależności na energię i przepływ objętościowy podstawowych elementów hydraulicznych.

Podstawowy element hydrauliczny	Przepływ objętościowy	Akumulacja i rozproszenie energii
Indukcyjność hydrauliczna	$q = \frac{1}{L} \int (p_1 - p_2) dt$	$E = \frac{1}{2} I q^2$
Opór hydrauliczny	$q = C \frac{d(p_1 - p_2)}{dt}$	$P = \frac{1}{R} (p_1 - p_2)^2$
Pojemność hydrauliczna	$q = \frac{p_1 - p_2}{R}$	$E = \frac{1}{2} C (p_1 - p_2)^2$

Podobną analizę można przeprowadzić dla elementów pneumatycznych. Podstawowa różnica jaka pojawia się między elementami hydraulicznymi i pneumatycznymi związana jest z większą ściśliwością gazów. Właściwość ta pomijana jest w analizie układów hydraulicznych.

2.3. Podstawowe struktury złożonych układów mechatronicznych

Podstawowe elementy mechatroniczne (mechaniczne, hydrauliczne, elektryczne, itp.) łączone są w złożone struktury, które uzyskuje się przez połączenie szeregowo i równoległe. Pełen opis układów można otrzymać po uwzględnieniu prawa ciągłości i równowagi. Poniżej przedstawione zostaną podstawowe zasady wyznaczania złożonych układów mechatronicznych oraz omówione będą metody analizy.

Prawo ciągłości i równowagi.

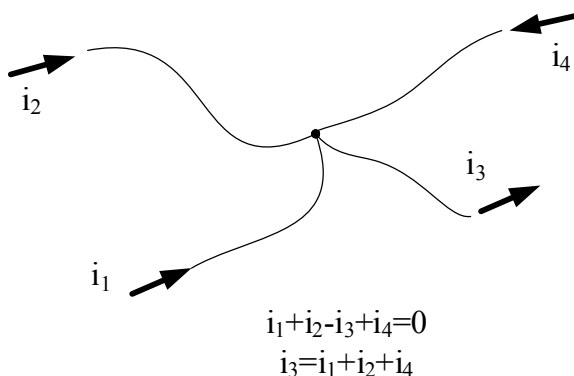
Do opisu złożonych układów mechatronicznych wykorzystuje się trzy podstawowe prawa.

Prawo równowagi. Zgodnie z tym prawem, każdy układ pozostaje w stanie równowagi jeżeli suma zmiennych wejściowych jest równa sumie zmiennych wyjściowych. Przykładem tego prawa jest:

- pierwsze prawo Kirchoffa dla układów elektrycznych:

$$\sum_{k=0}^n i_k = 0$$

gdzie i_k jest k-tym prądem wpływającym lub wypływającym z węzła. Prąd wpływający występuje ze znakiem plus natomiast wypływający ma znak minus.

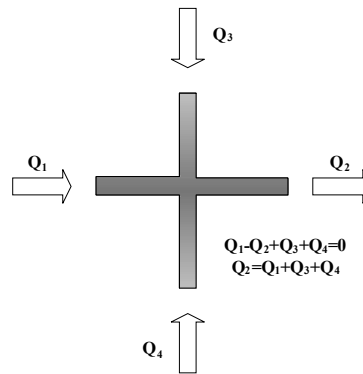


Rysunek 2.9. Pierwsze prawo Kirchoffa

- pierwsze prawo Kirchoffa dla układów hydraulicznych,

$$\sum_{k=0}^n Q_k = 0$$

gdzie Q_k jest k-tym wydatkiem wpływającym lub wypływającym do węzła. Wydatek wpływający występuje ze znakiem plus natomiast wypływający posiada znak minus.



Rysunek 2.10. Pierwsze prawo Kirchoffa dla układu hydraulicznego

- pierwsza zasada dynamiki, zgodnie z którą ciało pozostaje w spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym jeżeli suma sił działających na ciało równa jest zero:

$$\sum_{k=0}^n F_k = \mathbf{0}$$

gdzie F_k – k-ta siła działająca na ciało.

Kolejnym prawem, które jest wykorzystywane w analizie złożonych układów mechatronicznych, jest prawo ciągłości. Zgodnie z tym prawem suma zmiennych procesowych w układzie jest równa zero.

Przykładem tego prawa jest:

- drugie prawo Kirchoffa dla układów elektrycznych. Zgodnie z tym prawem suma spadków napięć w obwodzie zamkniętym jest równa zero:

$$\sum_{k=0}^n u_k = 0$$

gdzie u_k jest k-tym napięciem w obwodzie. Znak napięcia zależy od przyjętego umownie kierunku sumowania.

- drugie prawo Kirchoffa dla układów hydraulicznych. Zgodnie z tym prawem suma ciśnień w obwodzie hydraulicznym musi równać się zero:

$$\sum_{k=0}^n p_k = 0$$

gdzie p_k jest k-tym ciśnieniem w układzie hydraulicznym. Znak napięcia zależy od przyjętego umownie kierunku sumowania.

- suma przemieszczeń w układzie mechanicznym jest równa zero:

$$\sum_{k=0}^n x_k = 0$$

gdzie: x_k – k-te przemieszczenie.

Podane powyżej prawo równowagi i ciągłości można odnieść do elementów o różnych właściwościach fizycznych. Ogólnie prawo równowagi dotyczy superpozycji wielkości wejściowych, natomiast prawo ciągłości superpozycji zmiennych procesowych.

Oprócz powyższych praw w opisie układów korzysta się ze związków fizycznych. W poszczególnych działach fizyki podane są związki opisujące zależności między wielkościami fizycznymi. Przykładem takiego związku fizycznego jest prawo Ohma opisującego zależność między zmianą prądu i napięcia zależnie od impedancji układu.

Połączenie szeregowe i równoległe elementów mechatronicznych.

Niezależnie od natury układów, elementy z których są zbudowane można łączyć w struktury szeregowe i równoległe. Dla układów elektrycznych połączenie szeregowe jest równe sumie impedancji poszczególnych elementów, natomiast połączenie równoległe tych elementów jest równe sumie odwrotności impedancji.

Tabela 2.1.

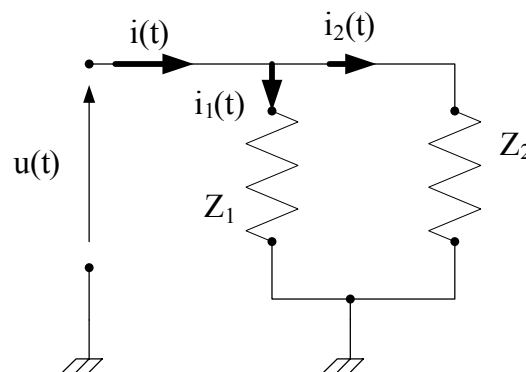
Połączenie	Zastępcza impedancja
Szeregowe n impedancji	$Z_{z\alpha} = \sum_{k=1}^n Z_k$
Równoległe n impedancji	$Z_{z\alpha} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{Z_k}}$

ROZDZIAŁ 2

Podobnie można łączyć elementy tłumiące i sprężyste w układach mechanicznych. W tabeli poniżej przedstawione są podstawowe zależności na zastępczą sztywność i tłumienie.

Tabela 2.2.

Połączenie		Zastępczy element
Sztywność	Szeregowe	$c_z = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{c_i}}$
	Równoległe	$c_z = \sum_{i=1}^n c_i$
Tłumienie	Szeregowe	$b_z = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{b_i}}$
	Równoległe	$b_z = \sum_{i=1}^n b_i$



Rysunek 2.11. Połączenie równoległe dwu impedancji

Zastępcza impedancja dla połączenia równoległego wyznaczona zostanie zgodnie z rysunkiem 2.11. Prąd wpływający do węzła (i) oraz prądy wypływający z węzła (i_1 , i_2), zgodnie z I prawem Kirchoffa są równe:

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t) \quad (2.1)$$

Poszczególne prądy są równe:

$$i(t) = \frac{u(t)}{Z_z} \quad i_1(t) = \frac{u(t)}{Z_1} \quad i_2(t) = \frac{u(t)}{Z_2} \quad (2.2)$$

gdzie:

$u(t)$ – napięcie zasilające układ,

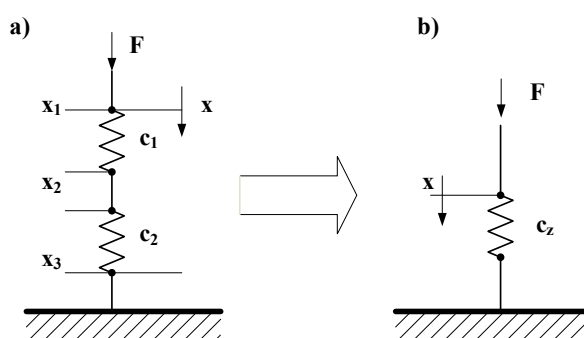
Z_z, Z_1, Z_2 – odpowiednio impedancja zastępcza, impedancja elementu „1” i impedancja elementu „2”.

Uwzględniając (2.2) w (2.1), otrzymamy:

$$\frac{u(t)}{Z_z} = \frac{u(t)}{Z_1} + \frac{u(t)}{Z_2}$$

$$Z_z = \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}}$$

Otrzymana zależność odpowiada zastępczej impedancji podanej w tabeli 2.1.



Rysunek 2.12. Zastępcza sztywność układu połączonego szeregowo złożonego ze sprężyny c_1, c_2

Następnie przeprowadzimy analizę dla układu mechanicznego połączonego szeregowo o strukturze przedstawionej na rysunku. Zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku przemieszczenie całkowite układu wywołane działaniem siły F jest równe x , stąd:

$$x = x_1 + x_2 + x_3$$

ROZDZIAŁ 2

Ponieważ $x_3=0$, to $x = x_1 + x_2$. Każda ze sprężyn jest obciążona siłą F , stąd przemieszczenie każdej sprężyny jest równe:

$$x = \frac{F}{c_z} \quad x_1 = \frac{F}{c_1} \quad x_2 = \frac{F}{c_2}$$

Ostatecznie otrzymamy:

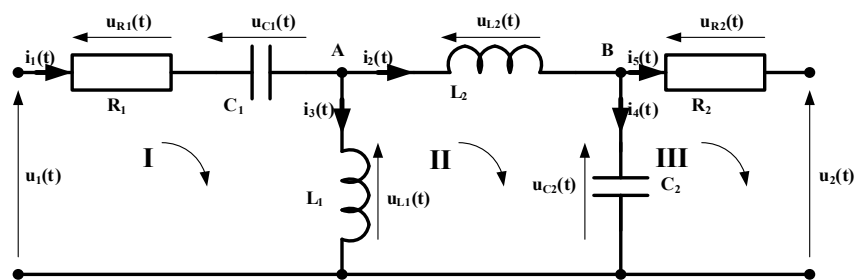
$$\frac{F}{c_z} = \frac{F}{c_1} + \frac{F}{c_2}$$

$$c_z = \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2}}$$

Wyznaczona zależność odpowiada zastępczej sztywności połączenia szeregowego przedstawionego w tabeli 2.2. Podobnie można wyznaczyć zależności struktur szeregowych i równoległych dla układów o innej naturze fizycznej.

Analiza układu elektrycznego

Poniżej wyznaczona zostanie zależność między napięciem wejściowym u_1 i napięciem wyjściowym u_2 dla układu przedstawionego na rysunku poniżej.



Rysunek 2.13. Schemat analizowanego układu.

Zgodnie z pierwszym prawem Kirchowa w analizowanym układzie można wyróżnić dwa węzły, dla których równania prądów są następujące (prawo równowagi):

$$\text{■ } (A) \quad i_1(t) = i_2(t) + i_3(t) \quad (B) \quad i_2(t) = i_4(t) + i_5(t)$$

W przedstawionym układzie występują trzy oczka, dla których można wyznaczyć równania zgodnie z drugim prawem Kirchoffa (prawo ciągłości):

$$\begin{aligned} \text{I)} \quad u_1(t) &= u_{R1}(t) + u_{C1}(t) + u_{L1}(t) \\ \text{II)} \quad u_1(t) &= u_{L1}(t) + u_{L2}(t) + u_{C2}(t) \\ \text{III)} \quad u_2(t) &= u_{R2}(t) + u_{C2}(t) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Poszczególne napięcia odpowiednio są równe:

$$\begin{aligned} u_{R1}(t) &= R_1 i_1(t) & u_{C1}(t) &= \frac{1}{\omega C_1} i_1(t) & u_{L1}(t) &= \omega L_1 i_3(t) \\ u_{R2}(t) &= R_2 i_5(t) & u_{C2}(t) &= \frac{1}{\omega C_2} i_4(t) & u_{L2}(t) &= \omega L_2 i_2(t) \end{aligned} \quad (2.4)$$

gdzie: ω – częstość prądu zasilania $\omega = 2\pi f$, f – częstotliwość prądu zasilania.

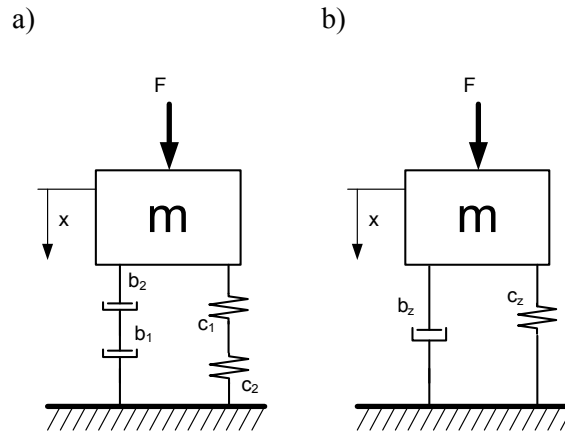
Uwzględniając (2.4) w (2.3), otrzymamy:

$$\begin{aligned} \text{I)} \quad u_1(t) &= R_1 i_1(t) + 1/(\omega C_1) i_1(t) + [\omega L_1] i_3(t) \\ \text{II)} \quad 1/(\omega C_2) i_4(t) + [\omega L_1] i_2(t) + [\omega L_1] i_3(t) &= 0 \\ \text{III)} \quad u_2(t) &= R_2 i_5(t) + 1/(\omega C_2) i_4(t) \end{aligned}$$

Rozwiązując układ pięciu równań (dwa węzły A, B i trzy oczka I, II, III) można wyznaczyć związek między napięciem wejściowym u_1 i wyjściowym u_2 . Związek między poszczególnymi wielkościami można wyznaczyć jako transmitancję, funkcję przejścia lub model w przestrzeni stanu. Powyższe zależności mogą być wyrażone w funkcji czasu lub częstotliwości (operator Laplace'a s).

Analiza układu mechanicznego

Analizie poddany zostanie układ przedstawiony na rysunku 2.14.a. Dla analizowanego układu wyznaczona zostanie zależność między siłą zewnętrzną F a przemieszczeniem masy x . Układ zbudowany jest z masy m podpartej na dwu sprężynach c_1 i c_2 oraz dwu tłumikach b_1 i b_2 . Sprężyny i tłumiki połączone są szeregowo.



Rysunek 2.14. Układ mechaniczny

Powyższy układ można zastąpić układem o strukturze przedstawionej na rysunku 2.14.b.

Układ z rysunku 2.14.b można opisać równaniem różniczkowym:

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + b_z \frac{dx(t)}{dt} + c_z x(t) = F(t) \quad (2.5)$$

gdzie:

b_z – zastępczy współczynnik tłumienia,

c_z – zastępczy współczynnik tłumienia.

Zastępczy współczynnik tłumienia jest równy:

$$b_z = \frac{1}{\frac{1}{b_1} + \frac{1}{b_2}} = \frac{1}{\frac{b_1 + b_2}{b_1 b_2}}$$

$$b_z = \frac{b_1 b_2}{b_1 + b_2} \quad (2.6)$$

Zastępcza sztywność jest równa:

$$c_z = \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2}} = \frac{1}{\frac{c_1 + c_2}{c_1 c_2}}$$

$$c_z = \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2} \quad (2.7)$$

Uwzględniając (2.6) i (2.7) w (2.5) otrzymamy równanie różniczkujące opisujące relacje między siłą zewnętrzną i przemieszczeniem masy:

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \frac{b_1 b_2}{b_1 + b_2} \frac{dx(t)}{dt} + \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2} x(t) = F(t) \quad (2.5)$$

Podobnie jak dla układu elektrycznego rozwiązując równanie różniczkowe (2.5) można wyznaczyć funkcję przejścia, transmitancję lub model w przestrzeni stanu.

ROZDZIAŁ 2

3

System sterowania układów mechatronicznych

W tym rozdziale:

- Sterowanie w układzie zamkniętym i otwartym
- Sterowanie sekwencyjne

3.1. Wstęp

W strukturze systemu mechatronicznego znajduje się system sterowania. System ten jest odpowiedzialny za prawidłową realizację zadań jakie ma wykonać system mechatroniczny. Do podstawowych zadań systemu sterowania zaliczamy:

- stabilizację parametrów niezbędnych do realizacji zadania,
- adaptację parametrów wyjściowych i struktury systemu mechatronicznego do zmiennych warunków otoczenia,
- stabilizację parametrów układu i struktury systemu mechatronicznego przy występowaniu zakłóceń zewnętrznych,
- automatyczny wybór zakresu pracy systemu mechatronicznego, zależnie od wpływu otoczenia i realizowanego zadania.

Przytoczone zadania realizowane są przez:

- sterowanie w układzie otwartym,
- sterowanie z pętlą sprzężenia zwrotnego (w układzie zamkniętym),
- sterowanie nadążne,
- stabilizację,
- sterowanie adaptacyjne,
- sterowanie sekwencyjne i kombinacyjne.

Przedstawiony powyżej podział można znacznie rozszerzyć i uszczegółwić, co wykracza poza ramy przedmiotu i wkracza w obszar teorii systemów sterowania.

Podany opis zostanie rozszerzony o podział ze względu na realizację regulatorów i torów sterowania na:

- sterowanie analogowe,

- sterowanie dyskretno – analogowe,
- sterowanie dyskretnie.

Układy sterowania analogowe były powszechnie stosowane w starszych systemach mechatronicznych. W wielu aplikacjach można spotkać pneumatyczne regulatory, które ze względu na warunki pracy nie mogą być zastąpione przez regulatory elektryczne (np. w petrochemiach, kopalniach ze względu na niebezpieczeństwo wybuchu metanu). Podstawową zaletą regulatorów analogowych jest szybkość działania. Regulatory tego typu pracują zawsze w czasie rzeczywistym (co nie jest takie proste do osiągnięcia w systemach sterowania dyskretnego). Jednak ich podstawową wadą jest podatność parametrów regulatora na działanie zakłóceń zewnętrznych (dryf parametrów spowodowany zmianą temperatury, procesy starzenia, itp.).

Regulatory dyskretnie składają się z części sprzętowej (hardware) i programowej (software). Jako sprzęt wykorzystuje się różne struktury programowalne o architekturze mikrokomputera z dołączonymi specjalistycznymi wejściami i wyjściami. Układy wejścia/wyjścia (I/O) umożliwiają mikrokomputerowi komunikację z otoczeniem, a tym samym sterowanie procesami analogowymi i dyskretnymi. W tej grupie można wyróżnić sterowniki PLC, sterowniki mikroprocesorowe (np. PC-104, 80C51, PIC itp.), układy programowalne (PLA, FPGA itd.), sterowniki z procesorami sygnałowymi. Hardware jest najczęściej strukturą uniwersalną, dopiero odpowiednie oprogramowanie sterownika zamienia go w regulator. Software jest algorytmem regulatora lub sterownika, zapisanym w jednym z języków programowania (np. algorytm regulatora PID, H^∞ , automat Moora, układ kombinacyjny itd.).

UWAGA!

Nie należy utożsamiać pojęcia „sterowanie dyskretnie” ze „sterowaniem cyfrowym”. Każdy sygnał cyfrowy jest również sygnałem dyskretnym, ponieważ sygnały dyskretnie dzielą się na: próbkowane, kwantowane i cyfrowe. Natomiast sygnał cyfrowy jest to sygnał poddany próbkowaniu, następnie kwantowaniu i w ostatnim etapie kodowaniu. Dlatego regulator/sterownik cyfrowy steruje procesem dyskretnym na podstawie sygnałów dyskretnych, które poddane są dodatkowo kwantowaniu i kodowaniu.

Zależnie od natury procesu możemy mówić o sterowaniu liniowym i nieliniowym. Jeżeli proces opisany jest równaniami liniowymi, wtedy proces sterowania realizowany jest przez sterowniki liniowe. Dla ukła-

dów opisanych przez równania nieliniowe proces sterowania realizowany jest przez regulator nieliniowy lub przez regulator liniowy, ale zaprojektowany dla określonego punktu pracy procesu nieliniowego.

W dalszej części rozdziału przedstawione zostaną podstawowe zagadnienia związane ze sterowaniem systemów mechatronicznych.

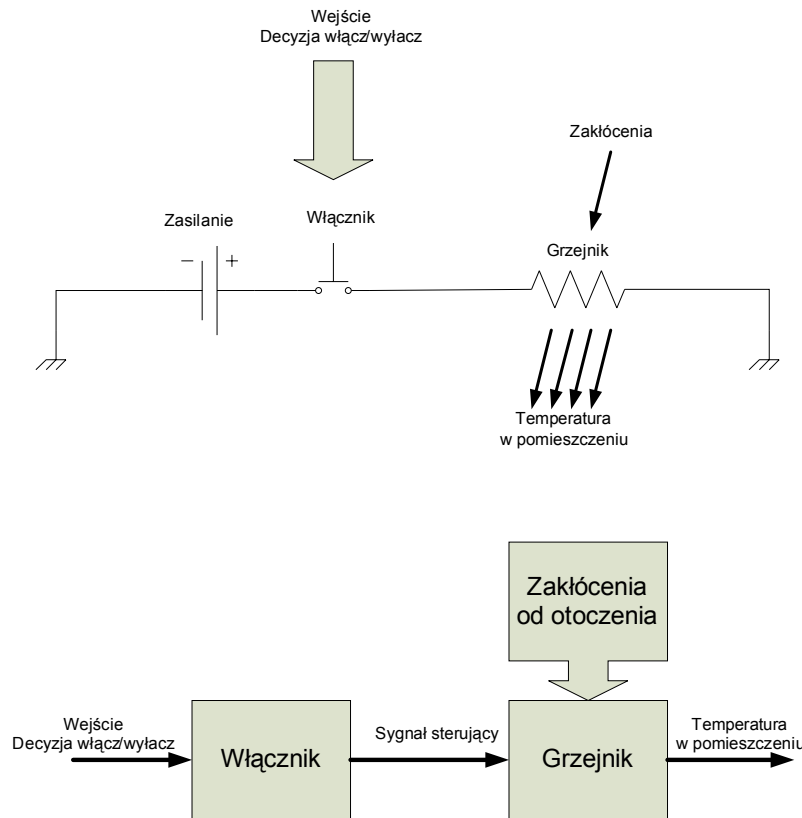
3.2. Sterowanie w układzie otwartym i zamkniętym

Wyróżniamy dwa podstawowe typy układów sterowania. Pierwszy to układy ze sterowaniem otwartym (open loop), natomiast drugi, to układy ze sterowaniem zamkniętym (closed loop).

Układ sterowania otwartego (rys. 3.1) jest bardzo często spotykany w sprzęcie użytku codziennego. Każdy z nas posiada urządzenia, które uruchamiamy przez włączenie (np. oświetlenie, ogrzewanie itp.). Układy sterowania otwartego posiadają podstawową zaletę jaką jest niski koszt realizacji oraz bardzo prosta konstrukcja. Przykładem może być układ sterowania ogrzewaniem w pomieszczeniu (rysunek 3.1).

Załóżmy, że w pomieszczeniu znajduje się grzejnik. Proces sterowania sprowadza się tylko do decyzji: włączyć grzejnik lub nie. Jeżeli grzejnik zostanie włączony, to w pomieszczeniu zacznie robić się ciepło, aż do uzyskania odpowiedniej temperatury. Jednak grzejnik nie wyłączy się, będzie nadal nagrzewał pomieszczenie. Jeżeli wprowadzone zostanie zakłócenie (np. otwarte zostanie okno), to grzejnik nie zmieni mocy grzania (np. zwiększony pobór prądu), a temperatura w pomieszczeniu będzie znacznie niższa od żądanej. Takich rozwiązań można w otoczeniu człowieka znaleźć znacznie więcej. Dobrym przykładem jest pralka automatyczna. Celem procesu prania jest uzyskanie czystych ubrań. Proces ten przebiega zgodnie z przyjętym programem, nad przebiegiem którego czuwa układ sterowania sekwencyjnego, poziom wody i temperatury jest stabilizowany, ale pralka tylko pierze. Natomiast nie uwzględnia czy prane ubranie jest wystarczająco czyste. Po zakończonym cyklu prania i wyjęciu ubrań może się okazać, że nie wszystkie zamieczyszczenia zostały usunięte. Sam proces prania odbywa się w układzie otwartym, który kończy się niezależnie od stanu wykonania zadania po ustalonym czasie.

System sterowania układów mechatronicznych



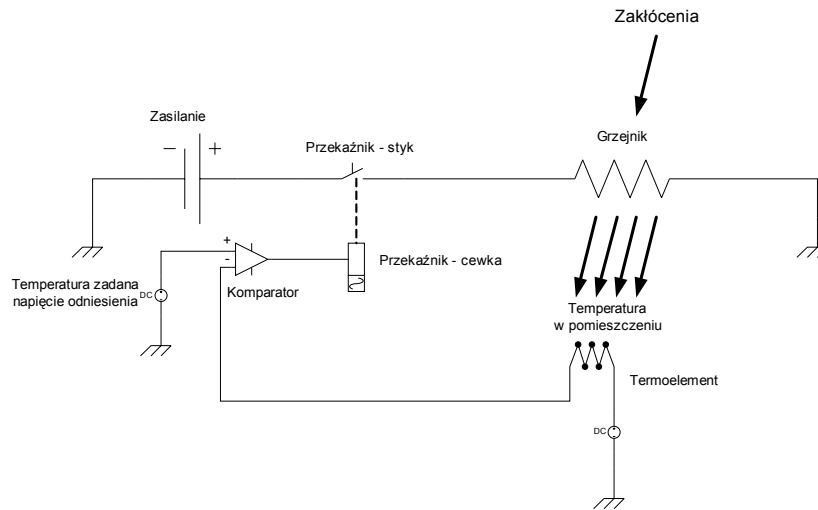
Rysunek 3.1. Sterowanie w układzie otwartym – ogrzewanie pomieszczenia.

Jak doprowadzić do sytuacji, w której grzejnik będzie pracował do momentu uzyskania odpowiedniej temperatury? Jeżeli wyposażymy grzejnik w układ do pomiaru temperatury, to możemy sprawdzić, czy temperatura w pomieszczeniu jest równa temperaturze zadanej. Możemy rozpatrzyć trzy przypadki:

1. wartość temperatury w pomieszczeniu jest niższa od temperatury zadanej $t < t_z$,
2. wartość temperatury w pomieszczeniu jest wyższa od temperatury zadanej $t > t_z$,
3. wartość temperatury w pomieszczeniu jest równa temperaturze zadanej $t = t_z$.

Grzejnik jest włączony tylko w jednym przypadku, kiedy temperatura w pomieszczeniu jest mniejsza od zadanej. Jeżeli nastąpi zrównanie

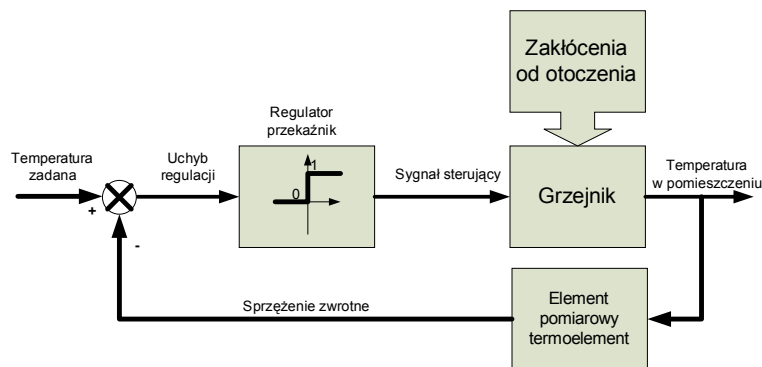
temperatury, to grzejnik wyłączy się i tak długo będzie wyłączony aż temperatura w pomieszczeniu spadnie poniżej temperatury zadanej.



Rysunek 3.2. Sterowanie w układzie zamkniętym – stabilizacja temperatury w pomieszczeniu.

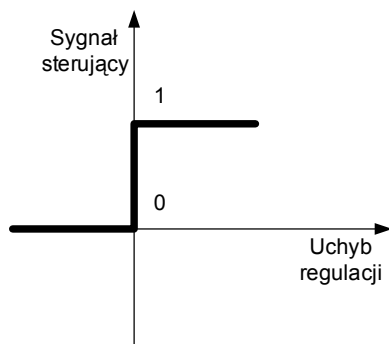
Do wykrycia tych stanów można wykorzystać układ realizujący różnicę między wartością zadaną i rzeczywistą (rysunki 3.2 i 3.3). Wynikiem odejmowania jest uchyb regulacji, który jest bezpośrednio podany na element sterujący (regulator). Wartość uchybu jest równa:

1. $e > 0$ dla $t < t_z$,
2. $e < 0$ dla $t > t_z$,
3. $e = 0$ dla $t = t_z$.



Rysunek 3.3. Sterowanie w układzie zamkniętym

Regulator zależnie od wartości uchybu wypracuje sygnał sterujący. Do sterowania grzejnikiem wykorzystano przełącznik, który po podaniu odpowiedniej wartości napięcia przyłączy zasilanie grzejnika. Na rysunku 3.2 przedstawiono schemat układu zamkniętego ze sprzężeniem zwrotnym.



Rysunek 3.4. Charakterystyka regulatora – przełącznika.

Przedstawiony powyżej schemat działania odpowiada układowi sterowania zamkniętego z ujemnym sprzężeniem zwrotnym (rysunek 3.3). Zastosowanie dodatniego sprzężenia zwrotnego (suma temperatury zadanej i rzeczywistej) doprowadzi do ciągłego działania grzejnika, ponieważ wartość uchybu będzie zawsze większa od zera. Dodatnie sprzężenie zwrotne prowadzi do niestabilnej pracy układów i nie jest stosowane.

Do sterowania wykorzystuje się różnego typu regulatory. W rozpatrywanym przypadku wykorzystano regulator zbudowany z przełącznika dwupołożeniowego. Na rysunku 3.4 przedstawiona jest charakterystyka statyczna przełącznika.

Jak można zauważyć w strukturze układu sterowania występują:

- obiekt sterowania,
- regulator,
- sumator,
- tor sprzężenia zwrotnego.

Dodatkowo można wyróżnić w torze sprzężenia zwrotnego element pomiarowy.

3.3. Sterowanie sekwencyjne

W wielu przypadkach proces sterowania sprowadza się do odpowiedniej reakcji układu na wystąpienie zdarzenia lub zbioru zdarzeń. Jeżeli zdarzenie zachodzi przyjmuje ono stan „on” lub „true” lub „1”. Brak występowania zdarzenia określany jest jako „off” lub „false” lub „0”. Przykładem wartość „1” jest włączenie światła natomiast „0” oznacza wyłączenie światła. Innym przykładem może być proces produkcji, gdzie „1” oznacza wykonanie określonej czynności, natomiast „0” sygnalizuje brak wykonania tej czynności.

UWAGA!

Przypisanie wartości sygnału „0” lub „1” jest umowne. W wielu aplikacjach występują sytuacje, gdzie gotowość układu jest sygnalizowana podaniem wartości „0” (np. bit startu w RS-232). Zastosowanie odpowiednich wartości podyktowane jest rozwiązaniami technologicznymi jak również jednoznacznością odczytu poszczególnych stanów.

Reakcja układu sterowania zależy od zajścia zdarzenia. Przykładem może być czujnik ruchu (np. używany do włączania oświetlenia chodnika przed domem). Jeżeli czujnik wykryje obecność ruchu nastąpi automatyczne włączenie oświetlenia chodnika. Lampa świeci się przez określony czas, a potem gaśnie. Jak wynika z przedstawionego przykładu układ ten nie tylko reaguje na sygnał z czujnika ruchu, ale występuje dodatkowo zależność czasowa. Ponowne zapalenia lampy nie nastąpi natychmiast mimo wystąpienia ruchu. W tym przypadku jest to układ sterowania kombinacyjnego z zależnościami czasowymi.

Tabela 3.1.

Oznaczenie czujnika/ zdarzenie	Stan	Wartość sygnału
a – czujnik ruchu	Brak ruchu	1
	Ruch	0
b – czujnik zmierzchu	Dzień	1
	Noc	0

W przykładzie przedstawiono reakcję układu na wystąpienie jednego zdarzenia. W układach sterowania oświetleniem występuje dodatkowo czujnik zmierzchu. Zadaniem tego czujnika jest zabezpieczenie lampy przed włączeniem się w ciągu dnia.

Układ sterowania reaguje na dwuelementowy wektor zdarzeń. Lampa zapali się tylko wtedy, gdy pojawi się ruch w polu obserwacji czujnika i będzie noc. Do dalszej analizy przyjmujemy wektor zdarzeń [a b] zgodnie z tabelą 3.1. Układ sterowania reaguje na cztery różne kombinacje wektora wejściowego.

Tabela 3.2.

Czujnik a zdarzenie a	Czujnik b zdarzenie b	Włączenie lampy
Wektor zdarzeń [a b]		
0	0	Tak - „1”
1	0	Nie - „0”
0	1	Nie - „0”
1	1	Nie - „0”

Układ sterowania (tabela 3.2) realizuje funkcję logiczną:

$$f(a, b) = a\bar{b} = \overline{(a + b)}$$

Przedstawiona powyżej funkcja logiczna realizuje operację logiczną NOR, czyli negację sumy logicznej (prawo de Morgana).

Układów logicznych działających na podobnej zasadzie, można spotkać znacznie więcej wśród urządzeń codziennego użytku. W wielu przypadkach zajście określonej grupy zdarzeń powoduje odpowiednią reakcję układu sterowania.

Układy sterowania możemy podzielić na:

- układy kombinacyjne,
- układy sekwencyjne,
- układy z zależnościami czasowymi,
- układy z uwzględnieniem liczby zdarzeń.

Układy kombinacyjne charakteryzuje się tym, że każdej określonej kombinacji wektora wejściowego odpowiada jednoznaczny wektor wyjściowy. Przykład podany powyżej przedstawia układ kombinacyjny.

Układ sekwencyjny (określany jest również jako układ z pamięcią) charakteryzuje się tym, że wektor wyjściowy zależy nie tylko od wektora wejściowego, ale również od stanu, w którym znajduje się układ. Przykładem może być prosty proces włączania światła. Naciskając

włącznik spowodujemy zapalenie się światła, ale pod warunkiem, że wcześniej było wyłączone. Natomiast kolejne naciśnięcie włącznika spowoduje wyłączenie światła, pod warunkiem że światło jest włączone wcześniej. Jak wynika z prostego przykładu zmiana stanu na wyjściu jest zależna od wektora wejściowego (naciśnięcie przycisku) i od aktualnego stanu wyjść układu. Układ sekwencyjny zbudowany jest z układu kombinacyjnego i sprzężenia zwrotnego. Zależnie od struktury układu sekwencyjnego można je podzielić na:

- automaty Mealy'ego,
- automaty Moore'a.

UWAGA!

W układach sekwencyjnych występuje sprzężenie zwrotne, które podobnie jak w 3.2 wprowadza wektor wyjść na wejście układu. Jednak wartość wyjściowa nie podlega sumowaniu lub odejmowaniu od wartości wejściowej. Wektor wyjść jest traktowany jako fragment wektora wejściowego. Dlatego nie występuje w tym przypadku pojęcie dodatniego czy ujemnego sprzężenia zwrotnego, natomiast jest to nadal proces autoregresji.

Układy z zależnościami czasowymi są to układy kombinacyjne lub sekwencyjne, w których dodatkowo występują przesunięcia czasowe między zmianą wektora wejściowego a zmianą wektora wyjść. Opóźnienie to nie jest spowodowane propagacją sygnałów w wewnętrznej strukturze układu (opóźnienie transportowe), tylko wynika z algorytmu działania układu sterującego.

W wielu układach stan na wyjściu jest podtrzymywany przez określony czas mimo zmiany stanu wektora wejść.

Układ uwzględniający liczbę zdarzeń jest układem sekwencyjnym lub kombinacyjnym, w którym zmiana stanu wyjścia następuje dopiero, po wystąpieniu określonej ilości zmian wektora wejść. Przykładem może być licznik, który sygnalizuje na wyjściu przyjscie określonych ilości impulsów. Takie liczniki stosuje się często do sterowania buforami w ciągach produkcyjnych (wykrycie określonej liczby elementów w buforze, co skutkuje sygnalizacją i wstrzymaniem przyjmowania kolejnych elementów do bufora).

Ponadto sekwencyjne układy sterowania można podzielić na asynchroniczne i synchroniczne. W układach synchronicznych zmiana stanu na wyjściu układu może nastąpić tylko w określonych przypadkach wyzna-

System sterowania układów mechatronicznych

czanych przez zewnętrzny sygnał. Sygnał synchronizujący określany jest „zegarem” lub „clock” (powszechne wprowadzanie słów pochodzących z języka angielskiego). W układach asynchronicznych zmiana wektora wyjściowego następuje wraz ze zmianą stanu wektora wejść.

Literatura

- [1] Heimann B., Gerth W., Popp K., *Mechatronika komponenty metody przykłady*, PWN, Warszawa 2001r.
- [2] Schmid D., Baumann A., Kaufmann H., Paetzold H., Zippel B. , *Mechatronika*, Wydawnictwo REA Warszawa 2002r.
- [3] Mrozek B., Mrozek Z., *Matlab 5.x Simulink 2.x*, Wydawnictwo PLJ, Warszawa 1998r.
- [4] Gawrysiak M., *Mechatronika i projektowanie mechatroniczne*. Wyd. Politechniki Białostockiej 1997.
- [5] Chorowski B., Werszko M., *Mechaniczne urządzenia automatyki*. WNT, Warszawa 1990.
- [6] Gosiewski Z., Osiecki J.: Panasiuk J., *Elementy Mechatroniki*, Wyd. Wojskowej Akademi Technicznej, Warszawa 2007.
- [7] Bolton W., *Mechatronics*, Longman, 1999, (pozycja w języku angielskim).