

**ZN PK**

---

**seria INŻYNIERIA ELEKTRYCZNA I KOMPUTEROWA  
nr 1**

Zbigniew Mrozek

**Komputerowo wspomagane  
projektowanie systemów  
mechatronicznych**

## **Computer Aided Design of Mechatronic systems**

### **Summary**

Author presents how to use software engineering tools in design of mechatronic systems. UML is graphical language for visualizing, constructing and documenting artefacts of systems. UML models are essential for communication among project teams and to manage the complexity as they increase in scope and scale. UML improves design quality and reduces time to market.

CAD/CAM and CAE tools are widely used in design but they do not solve problems of integration of subsystems of different physical nature. This can be achieved using UML and Modelica, new language for physical modelling.

Example of modelling and simulation and prototyping are included, as well as glossary related to mechatronic design and references. In author's opinion, UML and Modelica will be widely accepted in mechatronic design.

## **Etablissement d'un projet mécatronique assisté par ordinateur**

### **Résumé**

De plus en plus, les composants mécaniques, électroniques et logiciels sont intégrés dans un seul produit. L'auteur présente la possibilité d'application des langage de modélisation des systèmes informatiques pour des projets mécatroniques.

Les diagrammes faits en langage UML permettent la modélisation des systèmes avec différents niveaux d'abstraction. Chaque type de diagrammes peut présenter les éléments du système en cours de conception avec des points de vue différents. L'utilisation d'une forme graphique pour rédiger la documentation facilite la communication entre les spécialistes de différents domaines, durant toutes les étapes de la réalisation du projet. Ces points sont importants pour réduire le temps de développement et satisfaire aux besoins de la norme et de la qualité.

Le langage Modelica est très efficace pour la modélisation de systèmes à l'interface entre diverses disciplines scientifiques, parce qu'il utilise les principes de la modélisation physique. De l'avis de l'auteur, l'utilisation conjointe des langages UML et Modelica peut permettre à la fois de concevoir proprement des projets et aussi de rédiger la documentation afférente. L'ensemble peut s'appliquer à différents champs d'application.

Quelques exemples de modélisations, de simulations et de constructions de prototypes sont présentés, ainsi qu'un glossaire et des références relatifs à la conception de systèmes mécatroniques.

## Streszczenie

Autor przedstawia możliwość wykorzystania języków modelowania systemów informatycznych i innych narzędzi inżynierii oprogramowania do projektowania mechatronicznego. Diagramy w języku UML pozwalają na modelowanie systemów na różnych poziomach abstrakcji. Diagramy pokazują te elementy przyszłego systemu, które są aktualnie istotne, a pomija bądź upraszcza pozostałe elementy. Projekty wyrobów mechatronicznych są zazwyczaj tworzone przez wieloosobowe zespoły fachowców różnych specjalności. Użycie sformalizowanej, graficznej formy dokumentowania na wszystkich etapach projektowania ułatwia komunikowanie się członków zespołu.

Proces projektowania jest wspierany przez narzędzia CAD/CAM i CAE, ale nie rozwiązują one problemu integracji podzespołów o różnej naturze fizycznej. Nowym narzędziem do modelowania systemów interdyscyplinarnych jest język Modelica. Jest on oparty na koncepcji modelowania fizycznego, co oznacza wymóg spełnianie praw fizyki również w złączach pomiędzy elementami składowymi modelu, jak np. w grafie wiązań.

Autor zamieszcza przykłady modelowania, symulacji i prototypowania. Praca zawiera słownik ważniejszych terminów i obszerną literaturę.

Zdaniem autora, Modelica i UML będą wkrótce uznanymi narzędziami wspomagającymi projektowanie systemów mechatronicznych.

## SPIS TREŚCI

<b>1. WSTĘP</b> .....	<b>11</b>
1.1. Cel pracy .....	12
1.2. Zakres pracy .....	13
1.3. Teza naukowa .....	18
<b>2. KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE PROJEKTOWANIA I PRODUKCJI</b> .....	<b>19</b>
2.1. Systemy CAD/CAM .....	21
2.2. PDM - system zarządzania danymi projektowymi i produkcyjnymi .....	22
2.3. Mechatronika.....	24
2.4. Projektowanie systemów mechatronicznych .....	27
2.4.1. Potrzeba komputerowego wspomaganie w projektowaniu systemów mechatronicznych .....	28
2.4.2. Produkcja jednostkowa i masowa .....	29
2.5. Podsumowanie rozdziału .....	30
<b>3. PROJEKTOWANIE JAKO CZĘŚĆ CYKLU ŻYCIA PRODUKTU</b> .....	<b>32</b>
3.1. Tradycyjny sposób projektowania wyrobów .....	32
3.2. Mechatroniczne podejście do projektowania wyrobów .....	34
3.3. Zarządzanie projektem i etapy projektowania.....	38
3.3.1. Inicjowanie projektu, specyfikacja i analiza wymagań.....	38
3.3.2. Faza projektowania wstępnego .....	40
3.3.3. Projektowanie szczegółowe podsystemów .....	41
3.3.4. Szybkie prototypowanie i symulacja HiL układu sterowania .....	44
3.3.5. Faza implementacji (projektowanie fizyczne) .....	45
3.3.6. Konserwacja, modernizacja oraz użycie wyrobu.....	45
3.4. Podsumowanie rozdziału .....	45
<b>4. WYKORZYSTANIE UML W PROJEKTOWANIU MECHATRONICZNYM</b> .....	<b>48</b>
4.1. Język UML.....	49
4.2. Przykład metodyki organizacji prac projektowych .....	51

4.2.1. Kolejność i sposób tworzenia diagramów UML.....	52
4.2.2. Diagram przypadków użycia .....	54
4.2.3. Scenariusz .....	56
4.2.4. Diagram architektury systemu .....	57
4.2.5. Obiekty i klasy .....	57
<b>4.3. Diagramy dynamiczne w UML .....</b>	<b>60</b>
4.3.1. Diagram sekwencyjny.....	60
4.3.2. Diagram współpracy .....	61
4.3.3. Diagram stanów .....	62
4.3.4. Diagram aktywności (czynności).....	64
<b>4.4. Przykłady wykorzystania diagramów UML .....</b>	<b>64</b>
4.4.1. Specyfikowanie wymagań i określenie architektury systemu.....	64
4.4.2. Określenie funkcjonalności systemu.....	71
<b>4.5. Wybrane pakiety CASE wykorzystujące język uml .....</b>	<b>73</b>
4.5.1. Rational Suite Enterprise .....	74
4.5.2. Rational Rose RealTime .....	74
4.5.3. Artisan Real Time Studio.....	75
<b>4.6. Podsumowanie rozdziału .....</b>	<b>76</b>
<b>5. OPROGRAMOWANIE WSPOMAGAJĄCE MODELOWANIE I SYMULACJĘ .....</b>	<b>79</b>
<b>5.1. SIMULINK .....</b>	<b>79</b>
5.1.1. MATLAB .....	80
5.1.2. Biblioteki bloków Blockssets .....	82
5.1.3. Biblioteka MSL (Mechatronics Simulink Library).....	83
5.1.4. Robot Control Library.....	84
5.1.5. SimMechanics.....	84
<b>5.2. STATEFLOW .....</b>	<b>85</b>
<b>5.3. Generowanie kodu czasu rzeczywistego z użyciem RTW .....</b>	<b>86</b>
<b>5.4. Modelica .....</b>	<b>87</b>
5.4.1. Modelica jako język modelowania graficznego i obiektowego .....	89
5.4.2. Tworzenie klas modeli.....	91
5.4.3. Biblioteka standardowa i biblioteka dodatkowa modeli .....	97
<b>5.5. Dymola .....</b>	<b>101</b>
5.5.1. Moduł Dymosim – Dynamic Model Simulator.....	102
5.5.2. Moduł Dymoview .....	103
<b>5.6. Saber – symulator dla systemów elektry-cznych, elektronicznych, mechanicznych, hydraulicznych i mieszanych.....</b>	<b>103</b>
<b>5.7. Podsumowanie rozdziału .....</b>	<b>104</b>

## **6. ROLA MODELOWANIA I IDENTYFIKACJI W PROJEKTOWANIU SYSTEMÓW MECHATRONICZNYCH .. 106**

<b>6.1. Modelowanie systemów mechatronicznych .....</b>	<b>107</b>
6.1.1. Przykład podsystemu mechanicznego.....	108
6.1.2. Model kinematyczny i dynamiczny podsystemu mechanicznego.....	109
6.1.3. Integracja podsystemów w schematach blokowych SIMULINKA .....	111
6.1.4. Identyfikacja .....	111
<b>6.2. Szybkie prototypowanie układu sterowania dla systemów mechatronicznych....</b>	<b>112</b>
6.2.1. Symulacja komputerowa.....	114
6.2.2. Dostrajanie parametrów sterownika wirtualnego.....	115
6.2.3. Przygotowanie modelu sterownika do symulacji w czasie rzeczywistym .....	116
6.2.4. Metoda HiL (hardware in the loop) .....	117
<b>6.3. Rozwiązania sprzętowe wspomagające prototypowanie.....</b>	<b>120</b>
<b>6.4. Prototypowanie systemów na sprzęcie specjalistycznym .....</b>	<b>122</b>
6.4.1. Modelowanie sterowników wirtualnych w pamięci karty dSPACE .....	122
6.4.2. Karty pomiarowe z przetwornikami ADDA jako interfejs do procesu .....	123
<b>6.5. Prototypowanie systemów na sprzęcie docelowym.....</b>	<b>125</b>
6.5.1. Mikrosterowniki i oprogramowanie dSPACE TargetLink .....	126
6.5.2. Zestawy uruchomieniowe ASIC/FPGA .....	126
6.5.3. Prototypowanie regulatorów na komputerze przemysłowym .....	127
6.5.4. Prototypowanie na komputerze PC z kartą przetworników ADDA.....	127
<b>6.6. Systemy operacyjne czasu rzeczywistego .....</b>	<b>128</b>
6.6.1. VxWorks i Tornado .....	129
6.6.2. Java J2ME.....	130
6.6.3. Rozszerzenia systemu Windows i DOS do pracy w czasie rzeczywistym.....	131
<b>6.7. Podsumowanie rozdziału .....</b>	<b>131</b>
<b>7. PRZYKŁAD: MODELE I UKŁADY STEROWANIA RAMIENIEM ELASTYCZNYM ROBOTA.....</b>	<b>135</b>
<b>7.1. Inicjowanie projektu .....</b>	<b>135</b>
<b>7.2. Faza specyfikacji wymagań .....</b>	<b>137</b>
7.2.1. Przypadki użycia i aktorzy.....	138
<b>7.3. Faza analizy WYMAGAŃ i projektowania wstępnego.....</b>	<b>139</b>
7.3.1. Analiza wymagań, diagramy.....	140
7.3.2. Projektowanie wstępne, wybór struktury systemu .....	141
<b>7.4. Modelowanie i weryfikacja eksperymentalna modeli .....</b>	<b>143</b>
7.4.1. Stanowisko do dynamicznej identyfikacji elastycznego ramienia robota .....	144
7.4.2. Przegląd literatury: model i sterowanie ramieniem elastycznym robota.....	148

<b>8</b>	Mrozek Z, Komputerowo wspomagane projektowanie systemów mechatronicznych, ZN PK, Kraków 2002	
7.4.3.	Model analityczny belki elastycznej .....	153
7.4.4.	Symulacja dynamiki belki elastycznej z użyciem biblioteki MSL .....	157
7.4.5.	Model matematyczny ramienia elastycznego w przestrzeni stanu .....	158
7.4.6.	Model transmitancyjny dyskretny ramienia elastycznego .....	163
7.4.7.	Identyfikacja z użyciem sygnału stochastycznego .....	165
7.4.8.	Identyfikacja z użyciem sygnału prostokątnego .....	173
<b>7.5.</b>	<b>Implementacja układu sterowania (projektowanie fizyczne).....</b>	<b>187</b>
7.5.1.	Symulacja HiL w czasie rzeczywistym.....	187
<b>7.6.</b>	<b>Konserwacja, modernizacja oraz utylizacja wyrobu .....</b>	<b>192</b>
<b>7.7.</b>	<b>Podsumowanie rozdziału .....</b>	<b>193</b>
<b>8.</b>	<b>WNIOSKI KOŃCOWE .....</b>	<b>197</b>
	<b>Literatura.....</b>	<b>200</b>
	<b>Słownik wybranych terminów.....</b>	<b>210</b>
	<b>Streszczenie.....</b>	<b>214</b>
	<b>Summary.....</b>	<b>215</b>
	<b>Résumé .....</b>	<b>216</b>