

УДК 62-525

Синтез та декомпозиція модульних мехатронних систем на прикладі дискретної пневмоавтоматики

Губарев О.П., Муращенко А.М., Левченко О.В., Бєліков К.О., Бельчанська О.В.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Питання створення надійних в експлуатації та відкритих до модернізації систем мехатроніки є технічною складовою реалізації підходу Industry 4.0. Сучасні виробничі системи вміщують від кількох десятків до кількох сотень виконавчих пристроїв і технологічного обладнання різної фізичної природи, об'єднаних в мехатронну систему. Питання створення в короткі терміни надійних систем керування для пристроїв і обладнання виробничої системи є вкрай важливим в конкурентній боротьбі різних виробників. Швидкоплинна зміна засобів контролю і керування в промисловості додає задачу реінжинірингу автоматизованих систем. Таким чином перед розробником мехатронних виробничих систем постає декілька протиріч: зростання масштабу систем і надійне керування, відкритість до модернізації і стислі терміни проектування, зміна елементних баз і перекваліфікація розробників. Одним із шляхів розв'язання перелічених протиріч є підхід з розділенням розроблюваної системи на частини з подальшою їх розробкою і об'єднанням в однорідну систему, тобто декомпозиції задачі і композиції системи. У даній роботі розглянуто вплив декомпозиції на складність задач для розробника алгоритмів керування і тестування мехатронних систем на структурному рівні. Наведені результати порівняння показників синтезу однорідних систем, та систем, розподілених на складові підсистеми.

Ключові слова: система, декомпозиція, синтез, модульна структура, мехатроніка, алгоритм керування.

Вступ та аналіз літературних даних

Розподілення складних задач синтезу систем мехатроніки на підзадачі, з подальшим їх розв'язанням та об'єднанням отриманих розв'язків в спільному рішенні, має багаторічні традиції в інформаційних технологіях. Приклади використання подібних підходів поширені у розробників автоматизованої техніки, чому відповідають агрегатний підхід, по-модульні складальні виробництва, модульні системи виробничих ланок і інші [1,2,3,4,5]. Процес створення систем мехатроніки неможливий без передбачення подальшої модернізації відповідно до змін умов і критеріїв експлуатації, що відповідає Industry 4.0 [6,7]. Використання декомпозиції задач на етапі проектування суттєво скорочує терміни проектування, випробувань і тестувань, які можуть відбуватися паралельно для декількох фрагментів системи. Подібні підходи були започатковані в обчислювальній техніці і програмуванні та інформаційних технологіях і отримали розвиток в задачах синтезу систем мехатроніки [2,4].

Особливості мехатроніки, яка поєднує інформаційні, електронні і механічні компоненти, не дозволяють застосовувати формальні моделі та методики інформаційних технологій для розробки автоматизованих систем. Одним з варіантів декомпозиції систем мехатроніки є використання циклічно-модульного підходу.

Метою даної роботи є аналіз ефективності розподілу систем мехатроніки на макромодулі різної розмірності та оцінка впливу на час проектування.

Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є узагальнена структура системи мехатроніки, представлена засобами циклічно-модульного підходу. Практична система маніпулятора з вакуумним схватом є типовим представником засобів малої автоматизації (рис. 1).

Система складається з 7 виконавчих пристроїв, оздоблених засобами керування і регулювання (клапанами, дроселями) і 17 датчиками та сенсорами, що забезпечують контроль

відпрацювання виконуваних функцій. Виконавчі пристрої вакуумного схвату об'єднано в окремий макро модуль M2.

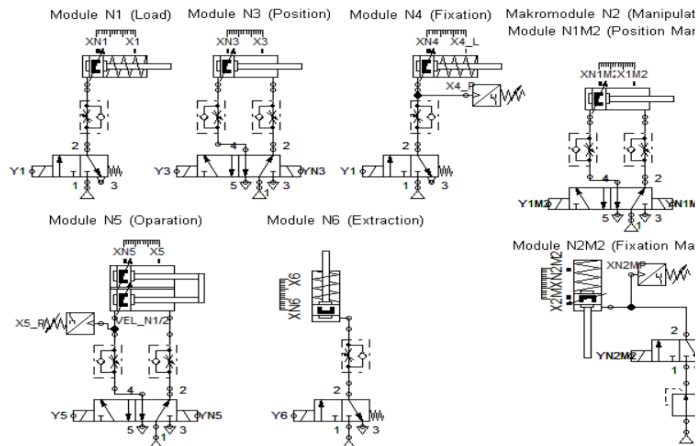


Рисунок 1. Комплект функціональних модулів прикладу системи із засобами електропневмоавтоматики (модулі 1M2 і 2M2 залучено до складу макро модуля вакуумного схвату)

логічний синтез команд керування складових макро модуля:

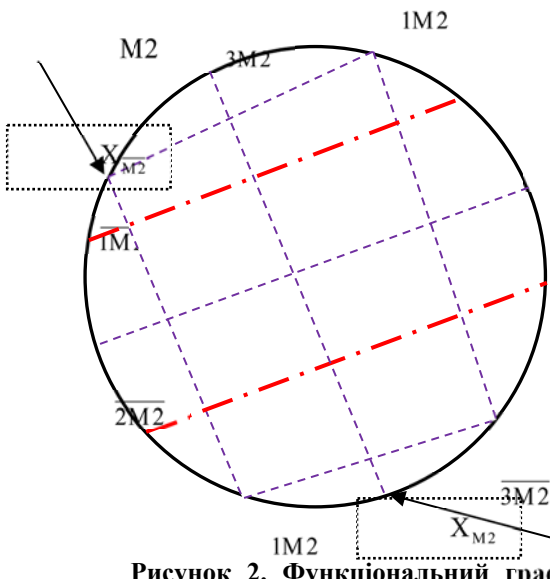


Рисунок 2. Функціональний граф макро модуля M2: пунктирні – лінії зв'язку, штрих-пунктирні – лінії невизначеності, 3M2 – елемент пам'яті

переміщення (рис. 3). Система відпрацьовує наступний цикл: 1: Завантаження деталі – основна дія модуля 1; 2: Забір деталі макро модулем – основна дія макро модуля M2; 3: Перенесення схвату до робочої позиції – основна дія модуля 3; Повернення завантажувача в початковий стан – зворотна дія модуля 1; 4: Вивільнення деталі – зворотна дія

У формальному зображенні макро модуль вакуумного схвату представлено функціональним графом (рис. 2). Виконання основної функції макро модуля - захоплення деталі:

$$Y_{M2} = Y_{1M2} \rightarrow Y_{2M2} \rightarrow Y_{3M2}$$

Виконання зворотної функції макро модуля - вивільнення деталі:

$$Y_{\overline{M2}} = Y_{1M2} \rightarrow Y_{\overline{2M2}} \rightarrow Y_{\overline{3M2}}$$

Для підсистеми схвату виконано дослідження логічної невизначеності, доповнення елементом пам'яті. З врахуванням зовнішніх сигналів керування від основної системи виконано

$$Y_{1M2} = X_{3M2} * X_{2M2} + X_{\overline{3M2}} * X_{2M2} * Y_{M2};$$

$$Y_{2M2} = X_{1M2} * X_{3M2}; Y_{3M2} = X_{1M2} * X_{2M2} * Y_{M2};$$

$$Y_{1M2} = X_{2M2} * X_{3M2} + X_{\overline{2M2}} * X_{3M2};$$

$$Y_{\overline{2M2}} = X_{1M2} * X_{\overline{3M2}}; Y_{\overline{3M2}} = X_{1M2} * X_{2M2}$$

В основній команді 3-го модуля присутній зовнішній сигнал на вмикання макро модуля, а в другому доданку команди 1-го модуля присутній зовнішній сигнал команди на вимкання макро модуля. Вирази цих сигналів команд (Y_{M2} і $Y_{\overline{M2}}$) мають бути побудовані при логічному синтезі основної системи.

У формальному зображенні основної системи задіяні макро модуль і приводи

Порівняльні показники прикладу рис. 1. Таблиця 1

Показник	Однорідна	2 макро модулі
Кількість переходів	23	15+9=24
Логічна невизначеність	6	3+2=5
Елементи пам'яті	1	1+1=2
Кількість модулів	8	7+3=10
Кількість логічних зв'язків (модулі 1M1, 2M2 і 1)	10+4+5=19	8+1+7=16
Відносна	23*8=184	15*7+9*3=132

макромодуля M2; 5: Затискання деталі – основна дія модуля 4; 6: Виконання технологічної обробки – основна дія модуля 5; 7: Повернення технологічного обладнання – зворотна дія модуля 5; 8: Вивільнення деталі – зворотна дія модуля 4; 9: Забір обробленої деталі – основна дія макромодуля M2; 10: Повернення схвату до початкової позиції – зворотна дія модуля 3; 11: Вивільнення деталі – зворотна дія макромодуля M2; 12: Видалення деталі екстрактором – основна дія модуля 6; 13: Повернення екстрактора в початкове положення – зворотна дія модуля 6. Для системи виконано доповнення елементом пам'яті і логічний синтез команд керування: $Y_1 = X_6 * X_7 * X_3 * X_{M2}$; $Y_1 = X_{M2} Y_{M2} = X_1 + X_4 * X_7 * X_3$; $Y_{M2} = X_3 * X_1 * X_7 + X_3 * X_7$; $Y_3 = X_{M2} * X_7$; $Y_3 = X_{M2} * X_7$; $Y_7 = X_6$; $Y_4 = X_{M2} * X_7 * X_3$; $Y_4 = X_5 * X_7$; $Y_5 = X_4 * X_7$; $Y_5 = X_7$; $Y_6 = X_{M2} * X_7 * X_3$; $Y_6 = X_7$; $Y_7 = X_5$.

Застосування розробником макромодуля в якості інструмента при створенні систем не змінює складу функціональних модулів і їх функцій. Кількість виконавчих і керуючих пристроїв і засобів контролю однакова для варіанту однорідної системи та системи з макромодулями. Кількісні показники для однорідної системи і системи після декомпозиції мають приблизно однакові значення (таблиця 1).

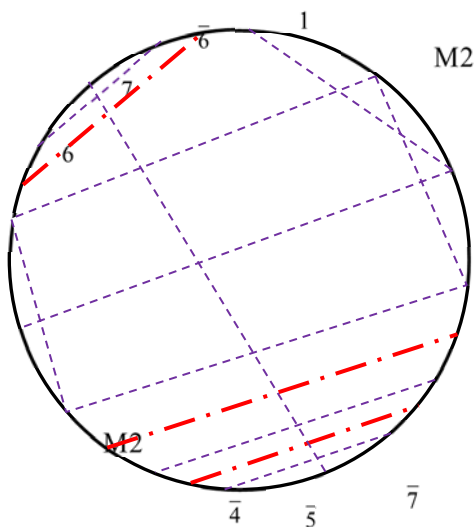


Рисунок 3. Функціональний граф системи з макромодулем M2: пунктирні – лінії зв'язку, штрих-пунктирні – лінії невизначеності, 7 – елемент пам'яті

Оцінка впливу підходу на проектування здійснена за відносною розмірністю системи \tilde{N} , яка вираховується як добуток кількості переходів в процесі z на кількість модулів в системі m : $\tilde{N} = z * m$. За змістом це максимальна кількість логічних умов, які визначають певну дію певного модуля в певному стані системи, застосована для кожної дії. Ці умови є формальним підґрунтям для побудови алгоритму функціонування системи. Для

наведеного прикладу однорідної системи цей показник дорівнює 184. Для розподіленої системи розробник має синтезувати основну систему і підсистему макромодуля. Для основної системи відносна розмірність складає 105, а для макромодуля 27. Для розробника це означає, що необхідна кількість синтезованих і мінімізованих логічних умов, які він має перевірити, зменшена в 1,4 рази. Тобто

$$\tilde{t}_{\text{sin t}} \frac{t_{\text{cont}}^{\text{sin t}}}{t_{\text{mod ul}}^{\text{sin t}}} = \tilde{t}_{\text{test}} \frac{t_{\text{cont}}^{\text{test}}}{t_{\text{mod ul}}^{\text{test}}} = 1,4$$

Наслідком цього можна вважати пропорційне скорочення часу розробки, зменшення часу тестувань, пропорційне зменшення кількості технічних помилок при розробці, тестуванні, укладанні алгоритму керування та часу на їх виправлення. Загальне зменшення часу розробки з використанням макромодульного підходу складатиме:

$$\tilde{t} = \frac{t_{\text{cont}}}{t_{\text{mod ul}}} = \tilde{t}_{\text{sin t}} \frac{t_{\text{cont}}^{\text{sin t}}}{t_{\text{mod ul}}^{\text{sin t}}} + \tilde{t}_{\text{test}} \frac{t_{\text{cont}}^{\text{test}}}{t_{\text{mod ul}}^{\text{test}}} + \tilde{t}_{\text{mistake}} \frac{t_{\text{cont}}^{\text{mistake}}}{t_{\text{mod ul}}^{\text{mistake}}},$$

де $\tilde{t}_{\text{sin t}}$, \tilde{t}_{test} , $\tilde{t}_{\text{mistake}}$ - відсоток часу розробки, що припадає на синтез $\tilde{t}_{\text{sin t}}$ (5 – 15%), тестування

\tilde{t}_{test} (60 – 90%) і виправлення помилок $\tilde{t}_{\text{mistake}} = 100\% - (\tilde{t}_{\text{sin t}} + \tilde{t}_{\text{test}})$ (до 30%).

Час на виправлення помилок має додаткове скорочення через зменшення розмірності об'єктів (системи чи макромодуля), в яких виконується коригування. Для розглянутого прикладу параметр потрапляє в інтервал від 1,4 до 2,1. Друге значення відповідає відсутності помилок (кваліфікований розробник), а перше значення відповідає наявності типових технічних помилок при побудові схеми і алгоритму керування.

Ефективність підходу залежить від відносної розмірності як системи, так і

Порівняльні показники 2-го прикладу Таблиця 2

Показник	Однорідна	3 макромодулі
Кількість переходів	69	23+23+23+3=72
Логічна невизначеність	18	$nD_1 + nD_2 + nD_3 \leq 18$
Елементи пам'яті	nM	nM+3
Кількість модулів	24	24+3=27
Відносна розмірність	69*24=1656	3*(24*8)=576
Показник	Однорідна	3 макромодулі

Порівняльні показники 3-го прикладу Таблиця 3

Показник	Однорідна	2 макромодулі
Кількість переходів	69	35+35+2=72
Логічна невизначеність	18	$nD_1 + nD_2 \leq 18$
Елементи пам'яті	nM	nM+2
Кількість модулів	24	24+2=26
Відносна розмірність	69*24=1656	2*(35*12)=840
Показник	Однорідна	2 макромодулі

макромодулів: кількості модулів в системі m , кількості переходів в процесі z , кількості макромодулів K_{mod} , рівномірності розподілення функціональних модулів по макромодулях.

Для розробника це означає, що кількість синтезованих і мінімізованих логічних умов зменшена в 2,8 рази. Відповідно зменшення терміну розробки, в залежності від співвідношення термінів етапів, складатиме від 2,15 (за відсутності помилок) до 7,5.

Розподіл цієї самої системи на 2 макромодулі більшої розмірності (по 12 функціональних модулів) призводить до наступних показників (таблиця 3).

Висновки

Встановлено, на прикладі системи пневмоавтоматики, що відокремлення в системі одного макромодуля (декомпозиція на 2 складові 2 : 5) скорочує відносну розмірність в 1,4 рази. Розподіл системи на 2 макромодулі однакової розмірності скорочує відносну розмірність в 2 рази. Розподіл системи на 3 макромодулі однакової розмірності скорочує відносну розмірність в 2,8 рази.

Зменшення відносної розмірності розроблюваної системи призводить до зниження вимог до кваліфікації розробника і зменшення терміну розробки і може складати від 2,15 до 7,5 для систем що вміщують від 20 до 30 функціональних модулів.

Відокремлення макромодулів, як правило, має змістовне підґрунтя, яке визначає і кількість макромодулів, і їх розмірності, як було в прикладі з маніпулятором, і кваліфікація розробника. Тобто показник ефективності декомпозиції полягатиме в скороченні термінів розробки та можливості автоматизації більших за масштабним фактором процесів. Цей показник буде формуватися для кожної практичної системи за її вихідними даними та задіяним обладнанням.

Список літератури

1. Egeland, O., Gravdahl, J.T.: Modeling and Simulation for Automatic Control. Marine Cybernetics, Trondheim, Norway (2002)
2. Synthesis of control schemes for hydroficated automation objects.- GmbH & Co. KG. Printed in Germany, 2018
Y. Sokol, M. Cherkashenko, etc
3. Matti Karvonen, Mikko Heikkilä, Mikko Huovaa, Matti Linjamaa Analysis by Simulation of Different Control Algorithms of A Digital Hydraulic Two-Actuator System / International Journal of Fluid Power Volume 15, Issue 1, 2014, pages 33-44.
4. Gavva A. Structural-parametric synthesis of a hydro-mechanical drive of lifting mobilizing mechanism of packet-configuring machines / A. Gavva, L. Kryvoplias-Volodina, N. Yakymchuk // Східно-Європейський журнал передових технологій (Applied mechanics). – Харків, 2017. – 5/7 (89) 2017. – с.38-44.
5. Burennikov Y. Mechatronic Hydraulic System with Adaptive Controller on the Basis of Neural Networks / Kozlov L., Burennikov Y. // Universitatea Tehnica “Gheorghe Asachi” din Iasi Tomul LXI (LXV), Fasc. 1-2, 2015 – P. 132-151.
6. Andreja Rojko. Industry 4.0 Concept: Background and Overview / Andreja Rojko // iJIM Vol. 11, No. 5, 2017, p. 77-90. eISSN: 1865-7923 <https://doi.org/10.3991/ijim.v11i5.7072>
7. T.Bauernhansl, M. ten Hompel, B. Vogel-Heuser. Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung Technologien Migration. Springer-Verlag, 648 s., 2014.

Synthesis and Decomposition of Modular Mechatronic Systems Using the Example of Discrete Pneumautomation

Gubarev O. Murashchenko A.M., Levchenko O., Belikov K., Bilchanska O.

The development of reliable and upgradeable mechatronic systems is a key technical component in implementing the Industry 4.0 approach. Modern production systems include from several dozen to several hundred actuators and technological equipment of various physical natures, integrated into a mechatronic system. The rapid creation of reliable control systems for devices and equipment within production systems is critically important in the competitive struggle among manufacturers. The rapid evolution of control and management tools in the industry adds the challenge of reengineering automated systems. Thus, developers of mechatronic production systems face several contradictions: the increasing scale of systems versus reliable control, openness to modernization versus tight project deadlines, and changing hardware bases versus the need for developer retraining. One of the ways to resolve these contradictions is the approach of dividing the system under development into parts, followed by their individual development and integration into a homogeneous system—i.e., the decomposition of the problem and the composition of the system. This study examines the impact of decomposition on the complexity of tasks for developers of control algorithms and testers of mechatronic systems at the structural level. The results compare the performance of homogeneous systems synthesis with systems divided into constituent subsystems.

Keywords: system; decomposition; synthesis; modular structure; mechatronics; control algorithm.