

МЕТОДИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ МЕМС АКСЕЛЕРОМЕТРІВ

Д.т.н. І.Ш. Невлюдов, В.О. Бортнікова, Харківський національний університет радіоелектроніки

У статті запропоновано методи автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення МЕМС акселерометрів. Розроблений метод вибору технологічного процесу покладено в основу методу автоматизованого проектування технологічних процесів, що дозволить підвищити ефективність проектних робіт.

В статье предложены методы автоматизированного проектирования технологических процессов изготовления МЭМС акселерометров. Разработанный метод выбора технологического процесса положен в основу метода автоматизированного проектирования технологических процессов, что позволит повысить эффективность проектных работ.

In the article the methods of automated designing of technological processes of manufacture of MEMS accelerometers are offered. The developed method of selecting the technological process is based on the method of automated design of technological processes, which will increase the efficiency of design work.

Ключові слова: метод, МЕМС акселерометр, автоматизація проектування, технологічні процеси

Вступ

Сучасні тенденції виробництва ґрунтуються на впровадженні нових рішень та технологій Industry 4.0, IoT, хмарних сервісів тощо. Застосування таких підходів на підприємстві обумовлено тим, що вони дозволяють використовувати великі обчислювальні ресурси, гнучкість, швидке нарощування ресурсів і їх збільшення при необхідності. Важливу роль в технології Industry 4.0 відіграють сучасні технічні засоби автоматизації (сенсори, виконавчі пристрої, регулятори тощо), які повинні забезпечувати необхідний рівень точності, параметри швидкодії, малі масогабаритні характеристики, високу функціональність, низьке енергоспоживання та вартість. У зв'язку з цим широке застосування знайшли датчики, які виготовлені з використання технологій МЕМС.

МЕМС акселерометри є складовою частиною багатьох засобів автоматизації та вирішують широкий спектр задач. Сучасні наукові дослідження направлені на моделювання та розробку нових конструкцій МЕМС акселерометрів для ефективного використання їх фізичних властивостей, що пов'язано як з особливостями конструкції чутливого елемента так і конструкції готового датчика. Розробка нових МЕМС акселерометрів і їх технологія виробництва пов'язані зі складною науково-технічною задачею розробки технологічного процесу виготовлення з урахуванням вимог забезпечення

геометричних і функціональних параметрів. У свою чергу технологія виготовлення МЕМС акселерометрів поєднує в собі сучасні технологічні прийоми мікроелектроніки, що в сукупності створює безліч варіантів технологічних процесів (ТП) і їх послідовностей. У ситуації, що склалася, необхідні нові підходи для створення САПР, які задовольняють зростаючі потреби синтезу оптимальних та ефективних ТП. В умовах такого розвитку існуючі підходи до автоматизації проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів повинні враховувати вимоги стандартів Industry 4.0, передбачати можливість зворотного зв'язку між різними частинами підприємства, з великого потоку даних отримувати необхідну і достатню інформацію для оперативного адаптування роботи систем автоматизованого проектування до виробничих умов.

Незважаючи на сучасні розробки в області САПР і велику кількість науково-дослідних робіт залишається невирішена проблема, яка полягає в підвищенні ефективності автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів з врахуванням специфіки багаторівневого автоматизованого проектування і зростання кількості типів МЕМС акселерометрів та варіантів їх виготовлення, обмеженістю існуючих математичних моделей і методів. Тому розробка методів автоматизованого проектування технологічних процесів є актуальною задачею.

Метод вибору типового технологічного процесу виготовлення МЕМС акселерометрів

Для того щоб вибрати типовий ТП необхідно здійснити пошук акселерометра-аналога, а потім отримати типовий ТП для них, здійснити вибір необхідного і зробити його доопрацювання. Завдання пошуку аналога-акселерометра зводиться до завдання класифікації МЕМС акселерометрів на основі наявної інформації. Вихідна інформація для автоматизованого проектування формується за допомогою математичної моделі МЕМС акселерометрів представленої [1], а структура за допомогою структурно-параметричної моделі ТП представленої в [2].

Таким чином метод вибору типового ТП виготовлення МЕМС акселерометрів представляє собою опис послідовності дій, що застосовуються при автоматизованому проектуванні ТП для МЕМС акселерометрів. Він полягає в наступному [3]:

Крок 1. Введення вектора параметрів A_k . Кожен параметр P задається індексом $P = \{P_n \text{ якщо } x \leq P \leq y\}$, тоді в вектор параметрів записується значення кожного з параметрів, де $P = n$. У разі відсутності параметра в вектор записується нуль.

Крок 2. Розрахунок вагових коефіцієнтів параметрів.

Крок 3. Перерахунок матриці параметрів МЕМС акселерометрів з урахуванням вагових коефіцієнтів.

Крок 4. Формування вектора простору ознак опису МЕМС акселерометрів.

Крок 5. Розрахунок матриці відстаней.

Крок 6. Формування ієрархічного дерева кластерів.

Крок 7. Побудова дендрограми.

Крок 8. Аналіз отриманих результатів.

Крок 9. Вибір типового ТП.

Грунтуючись на отриманих результатах можливо провести аналіз ТП, які використовуються для того чи іншого кластера, що дозволить здійснити вибір типового ТП і доопрацювати його до необхідного.

Тоді можна зробити припущення, що в один і той же кластер можуть потрапити МЕМС акселерометри з різними ТП. Тоді позначимо різні ТП як вектор T_1, T_2, \dots, T_n в рамках кожного кластера. У кожному кластері вони розташовані за ступенем близькості векторів параметрів МЕМС акселерометрів і як наслідок ТП. Це дасть можливість зробити рекомендацію щодо вибору ТП таким чином, що побудови нового ТП для акселерометрів, які потрапили в даний кластер, зводиться до завдання значень вхідних і вихідних параметрів ТП, а також параметрів переходів і при необхідності додавання нових операцій або видалення. На основі запропонованого методу вибору типового ТП виготовлення МЕМС акселерометрів отримуємо сформовані рекомендовані ТП, які представляють собою впорядковані за ступенем переваги (від кращих до гірших) безліч ТП виходячи із заданих критеріїв. В [3] наведено приклад запропонованого методу.

Враховуючи те, що пошук типового ТП ведеться в межах реалізованих ТП, то також відома інформація щодо часу виконання ТП (t) та собівартості ТП (C).

Завдання вибору з безліч типових ТП виготовлення МЕМС акселерометрів є багатокритеріальним завданням, тому для оцінки якості ТП виготовлення МЕМС акселерометрів повинна використовуватися сукупність безлічі таких параметрів як t і C , тоді компромісним рішенням завдання вибору типового ТП формально визначається системою двох критеріїв:

$$\begin{cases} t \rightarrow \min, & t \leq t^* \in \{t_{\min}, t_{\max}\}, \\ C \rightarrow \min, & C \leq C^* \in \{C_{\min}, C_{\max}\}, \end{cases}$$

де $\{t_{\min}, t_{\max}\}, \{C_{\min}, C_{\max}\}$ – множини, мінімальних і максимальних значень параметрів t і C ;

t^* і C^* – допустимі значення параметрів, які знаходяться в діапазоні

Необхідно визначити найкращий варіант ТП, враховуючи, що пріоритети параметрів можуть змінюватися виходячи з поточних потреб і їх необхідно оперативно змінювати. Для пошуку рішень вибору типового ТП на основі двох критеріїв повинно бути компромісним рішенням одночасно для двох функцій. Обґрунтування вибору того чи іншого параметра є відповідальним і далеко не завжди очевидним завданням.

Оскільки задача має труднощі пов'язані з тим, що різні критерії мають протиріччя при виборі по одному параметру, може привести до погіршення якості іншого параметра. Щоб вирішити це завдання пропонується звести її до однокритеріальної задачі такого виду:

$$C \rightarrow \min, t \leq t^*.$$

Таким чином за допомогою методу перебору [4] можна визначити найліпший варіант за рахунок підбору обладнання, що відповідає поставленій оптимізаційній задачі.

В роботі [5] наведено чисельний експеримент запропонованого методу вибору типових технологічних процесів ТП виготовлення МЕМС акселерометрів в ході якого використані різні методики розрахунку матриць відстаней, результати яких експериментально довели працездатність методу. Для підвищення ефективності запропоновано використовувати методи інтелектуального аналізу даних для забезпечення високої швидкості обробки даних та досягти високої якості роботи.

Проведено експериментальне дослідження методу та обґрунтовано теоретичні положення запропоновані в методі.

Метод автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення МЕМС акселерометрів

Виготовлення МЕМС акселерометрів реалізується з використанням різних приватних технологій, заснованих на різних методах обробки заготовки. Внаслідок цього виникає завдання формування технологічного маршруту і його синтезу. Вирішення цього завдання має ітераційний характер, тобто здійснюється в кілька послідовних етапів, з поступовим уточненням змісту технологічного маршруту виготовлення МЕМС акселерометра. Пропонується наступний метод автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення МЕМС акселерометрів:

Крок 1. Введення вхідної інформації з 3D-моделі МЕМС акселерометра і технічного завдання на його виготовлення.

Крок 2. Формування вектора параметрів МЕМС акселерометрів з отриманих даних.

Крок 3. Розрахунок вагових коефіцієнтів параметрів.

Крок 4. Вибір множини типових ТП. Інакше *Крок 9.*

Крок 5. Вибір типового ТП виготовлення МЕМС акселерометрів.

Крок 6. Зміна структури ТП.

Крок 7. Оцінка характеристик ТП. Якщо обмеження не виконуються повернутися к *Кроку 6.*

Крок 8. Формування маршрутної карти виготовлення МЕМС акселерометрів. Збереження інформації та характеристик ТП.

Крок 9. Пошук по БД операцій отримання елементів конструкції МЕМС акселерометрів, перехід до *Кроку 6* інакше до *Кроку 10.*

Крок 10. Додавання нових операцій в ТП.

Крок 11. Пошук необхідного обладнання для виконання операцій, перехід до Кroku 6 інакше до Кroku 12.

Крок 12. Додавання нового обладнання виготовлення МЕМС акселерометрів, перехід до Кroku 6.

Кroku 13. Пошук по БД операцій отримання елементарних елементів МЕМС акселерометрів, перехід до Кroku 9 інакше Кroku 10.

Для проведення експериментального дослідження розроблено програмний модуль автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів «AcSAM» [6]. Для доказу адекватності розроблених методів автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів, проведено ряд експериментальних досліджень на тестових зразках з різними типами акселерометрів і конструктивно-функціональними параметрами. За допомогою ПМ «AcSAM» отримана структура технологічного процесу, обрано обладнання, отримані характеристики ТП і згенерована маршрутна карта. В таблиці 1 представлений порівняльний аналіз за приведеною вартістю розробленого і базового ТП.

Таблиця 1
Порівняльний аналіз розробленого ТП і базового

	Розроблений ТП	Базовий ТП
Програма випуску акселерометрів, шт	100000	
Заданий час виконання ТП, с	864000	
Розрахований час виконання ТП, с	857393	864000
Кількість змін	10	10
Оптова ціна обладнання, грн	17500000	18000000
Кількість всього обладнання, шт	21	37
Середній термін служби обладнання, років	15	12
Витрати на покупку сировини і напівфабрикатів, грн	282808,75	
Витрати на електроенергію, грн	187839,834	2475372,656
Наведені витрати, грн	2372898,55	5224181,4

Висновки

Запропоновано метод вибору типових ТП виготовлення МЕМС акселерометрів на підставі використання методу ієрархічної кластеризації та методів

інтелектуального аналізу даних, що дозволило підвищити оперативність прийняття проектних рішень. Для оптимізації ТП введені критерії вибору черговості операцій запропоновано комплексний показник, що враховує собівартість та час виконання ТП. Вибір черговості і змісту технологічних операцій здійснюється за допомогою зведення цієї задачі до однокритеріальної та використовуючи метод перебору.

Розроблений метод вибору ТП покладено в основу методу автоматизованого проектування технологічних процесів, що дозволить підвищити ефективність проектних робіт, а так само зниження приведених витрат.

На базі розробленого програмного модулю «AcSAM» проведено експериментальні дослідження та доведено працездатність запропонованих методів. Використання запропонованих методів дозволить зменшити наведені витрати на 45,42 % розробленого ТП порівняно з базовим.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Nevlyudov I. Accelerometer parameters Decomposition model for technological process design automation / I. Nevlyudov, V. Yevsieiev, S. Miliutina, V. Bortnikova // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Збірник наукових праць. Серія: Комп'ютерні системи проектування теорія і практика. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. - № 828. - С. 11-15.
2. Невлюдов И.Ш. Структурно-параметрическая модель технологического процесса изготовления МЭМС акселерометра./ И.Ш. Невлюдов, В.О. Бортникова // Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація». - Покровськ.: ДВНЗ заклад «Донецький національний технічний університет», 2017. - № 1(30)'2017.- С. 6-16.
3. Невлюдов И. Ш. Модель принятия решения на этапе проектирования технологического процесса изготовления МЭМС акселерометров/ И. Ш. Невлюдов, А.В. Пономарева, В.О. Бортникова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси.- Харків: НТУ «ХП», 2016. - № 4(1176). - С.63–67.
4. Петров Э.Г. Синтез и идентификация моделей многофакторного оценивания и оптимизации/ А.О. Оверзгельдыев, Э.Г. Петров, К.Э Петров. – Киев: «Наукова думка», 2002. – 163 с.
5. Nevlyudov I. MEMS accelerometers classification using machine-learning methods./ I. Nevlyudov, G. Ponomaryova, S. Miliutina, V. Bortnikova // Перспективи технології і методи проектування МЕМС (MEMSTECH 2017): матеріали XII «Перспективні технології і методи проектування МЕМС»: MEMSTECH 2017. - Львів: Видавництво «Львівська політехніка», 2017. - С. 1-5.
6. Комп'ютерна програма «Автоматизована система проектування технологічного процесу виготовлення акселерометрів «AcSAM» («AcSAM») (авторське свідоцтво). Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 65348 від 16.05.16.