

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

БОРТНІКОВА ВІКТОРІЯ ОЛЕГІВНА
Підпис

УДК 658.512

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ
МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ**

05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: Заслужений діяч науки і техніки України,
Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки,
доктор технічних наук, професор
Невлюдов Ігор Шакирович,
завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій,
автоматизації та мехатроніки, Харківський національний
університет радіоелектроніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Лобур Михайло Васильович,
завідувач кафедри системи автоматизованого проектування,
Національний університет «Львівська політехніка»;

доктор технічних наук, професор
Нефьодов Леонід Іванович,
завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-
інтегрованих технологій, Харківський національний
автомобільно-дорожній університет.

Захист відбудеться « 26 » березня 2019 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.02 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки, за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки 14.

Автореферат розісланий «22» лютого 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.052.02

Підпис

Л. В. Колесник

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розробка нових мікроелектромеханічних систем (МЕМС) – акселерометрів і технологія їх виробництва пов'язані зі складною науково-технічною задачею розробки технологічних процесів (ТП) з урахуванням вимог забезпечення геометричних і функціональних параметрів, а також необхідністю пошуку нових підходів до створення систем автоматизованого проектування (САПР), які б задовольняли зростаючі потреби синтезу оптимальних та ефективних ТП і необхідність інтеграції до промислових стандартів Industry 4.0.

Значний внесок у методологію побудови САПР внесли наукові школи під керівництвом: Аверченкова В.І., Безкоровайного В.В., Горанського Г.К., Капустіна Н.М., Митрофанова С.П., Нефьодова Л.І., Норенкова І.П., Петренка А.І., Петрова Е.Г., Прасола І.В., Стояна Ю.Г., Тимченка А.А., Цветкова В.Д., інших вітчизняних та закордонних вчених. Подальший розвиток методологія САПР для МЕМС знайшла у роботах таких вчених, як Bracewell R., Chakrabarti A., Du H., Gupta K., Schwarz P., Xu C.X., Zha X.F., Лобура М.В., Невлюдова І.Ш., Семенця В.В. та інших. Науково-технічні розробки в цій галузі ведуться в США, Німеччині, Японії, Росії, Польщі, Україні та в інших країнах.

Незважаючи на численні публікації та розробки в галузі САПР ТП, на сьогодні наявним є протиріччя між необхідністю підвищення ефективності автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів з врахуванням багаторівневої специфіки та обмеженістю існуючого математичного забезпечення САПР ТП. Це обумовлює актуальність науково-технічної задачі розробки нових і удосконалення існуючих моделей та методів автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки Харківського національного університету радіоелектроніки в період з 2013 по 2016 рік в рамках науково-дослідних робіт: держбюджетна тема № 277 «Створення експериментальних зразків компонентів мікросистемної техніки для виробництв з інтелектуальними властивостями і їх впровадження» (№ ДР 0113U0003582); держбюджетна тема № 300 «Створення мікрооптоелектромеханічних засобів для інтелектуальних технологічних систем промислового обладнання та робототехніки» (№ ДР 0115U002433), які виконувалися згідно наказів Міністерства освіти і науки України. У межах зазначених тем здобувачем, як виконавцем, розроблено математичні моделі, методи та програмне забезпечення для вирішення задачі підвищення ефективності проектування технологічних процесів виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів.

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення

МЕМС акселерометрів, шляхом зниження вартості і часу їх проектування та виготовлення, за рахунок розробки та удосконалення моделей, методів і програмного забезпечення.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз сучасного стану проблеми автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення МЕМС акселерометрів;
- розробити математичну модель визначення МЕМС акселерометра-аналога за його функціонально-конструктивними показниками;
- удосконалити модель структурно-параметричного синтезу технологічного процесу виготовлення МЕМС акселерометрів за рахунок розробки моделей вибору операцій та обладнання;
- розробити узагальнений метод автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення МЕМС акселерометрів, який базується на двох часткових методах: вибору типових технологічних процесів та пошуку аналогів окремих елементів технологічних процесів;
- програмно реалізувати розроблені моделі і методи, провести експериментальне дослідження ефективності та практичну апробацію отриманих теоретичних результатів.

Об'єктом дослідження є проектування технологічних процесів виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів.

Предметом дослідження є моделі та методи автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення МЕМС акселерометрів.

Методи досліджень. Проведення досліджень базується на методах математичного та комп'ютерного моделювання, класифікації, обчислювального інтелекту – для розробки узагальненого методу автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів та їх часткових методів; дискретного програмування, оптимізації – для розробки математичної моделі визначення МЕМС акселерометра-аналога, вибору технологічних операцій та обладнання; математичної логіки, теорії множин – для формалізації функціонально-конструктивних обмежень параметрів МЕМС акселерометрів; теорії графів, математичної логіки, чисельних методах – для розробки структурно-параметричної моделі ТП виготовлення МЕМС акселерометрів; методах імітаційного моделювання – для розробки імітаційної моделі ТП виготовлення МЕМС акселерометра, а також теорії алгоритмів, методах організації графічного діалогу побудови інтерфейсу користувача.

Наукова новизна одержаних результатів. Теоретичні та експериментальні дослідження, наведені в дисертаційній роботі, дозволили вирішити важливе наукове завдання підвищення ефективності автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів.

До нових, одержаних особисто автором, належать такі результати:

- вперше розроблено математичну модель визначення МЕМС акселерометра-аналога, для якої формалізовано критерії часу і вартості виготовлення, маси та

площі МЕМС акселерометра та враховано функціонально-конструктивні обмеження, що дозволяє визначити найкращий варіант МЕМС акселерометра-аналога для здійснення вибору типового технологічного процесу;

– вперше розроблено узагальнений метод автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення МЕМС акселерометрів, який базується на двох часткових методах: вибору типових технологічних процесів і пошуку аналогів окремих елементів технологічного процесу, що дозволяє отримати ефективний технологічний процес за рахунок зниження вартості та часу виготовлення;

– удосконалено модель структурно-параметричного синтезу технологічного процесу виготовлення МЕМС акселерометрів, яка, на відміну від відомих, шляхом вибору типового технологічного процесу, операцій і обладнання, дозволяє отримати структуру технологічного процесу і у випадку необхідності обрати більш ефективне технологічне обладнання;

– удосконалено метод вибору типових технологічних процесів виготовлення МЕМС акселерометрів, який, на відміну від існуючих, на основі методів ієрархічної кластеризації та інтелектуального аналізу даних, який дозволяє визначити взаємозв'язок між функціонально-конструктивними показниками МЕМС акселерометра-аналога і типовим технологічним процесом та знизити вартість і час на проектування.

Практичне значення наукових результатів дисертації полягає в тому, що на основі запропонованих математичних моделей і методів розроблено програмний модуль «АсСАМ» для проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів як складову частину системи автоматизованого проектування ТП.

Усі математичні моделі та методи, реалізовані в програмному модулі «АсСАМ», апробовані та довели свою працездатність на прикладі вирішення тестових завдань автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів.

Практичне значення дисертаційної роботи полягає у тому, що отримані результати можуть бути використані для автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів з подальшим створенням технічної документації у вигляді маршрутної карти для їх виготовлення.

Практичну значимість отриманих результатів і розробленого модуля автоматизованого проектування підтверджено актами впровадження на підприємстві ТОВ «Овен», впровадженням в учбовий процес Харківського національного університету радіоелектроніки, Запорізького національного технічного університету, Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, та авторським свідоцтво № 65348 від 16.05.16 р.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані безпосередньо здобувачем та опубліковані в роботах [1-29]. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: у [3-4], [12-13, 21-23], [24], [16], [20], [28] – математична модель визначення МЕМС акселерометра-аналога за

функціонально-конструктивними обмеженнями; у [1] – удосконалена модель вибору обладнання; у [5], [17-18, 19, 26-27] – удосконалений метод вибору типових ТП виготовлення МЕМС акселерометрів завдяки використанню методів ієрархічної кластеризації та інтелектуального аналізу даних; у [6], [24], [15] – удосконалена модель структурно-параметричного синтезу ТП виготовлення МЕМС акселерометрів; у [7], [8], [19] – узагальнений метод автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів, заснований на двох методах: вибору типових ТП і пошуку аналогів окремих елементів ТП.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи апробовані на: 18-му, 19-му, 20-му Міжнародному молодіжному форумі «Радіoeлектроніка та молодь в ХХІ столітті» (Харків, 2014-2016 рр.); 24-й Міжнародній кримській конференції «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2014 р.); Всеукраїнській науково-практичній Internet-конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку» (Черкаси, 2015-2017 рр.); Всеукраїнській студентській науковій конференції «Наукова Україна» (Дніпропетровськ, 2015 р.); конференції «Дні науки в Донецькому національному технічному університеті» (Красноармійськ, 2015 р.); 25-й Міжнародній конференції «Новые технологии и машиностроение» (Коблево-Харків, 2015 р.); 14-й Міжнародній науково-технічній конференції «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів» (Кременчуг, 2015 р.); Міжрегіональній науково-практичній конференції молодих вчених «ТАК: телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології» (Красноармійськ, 2015; Покровськ, 2016, 2017 рр.); 12-й і 13-й Міжнародній конференції «Perspective Technologies and Methods in MEMS Design» (Поляна-Свалява, 2016, 2017 рр.); 14-й Міжнародній конференції «The Experience of Designing and Applications of CAD Systems in Microelectronics» (Львів, 2017 р.); Українсько-польській конференції «CAD in Machinery Design. Implementation and Educational Issues» (Львів, 2016 р.); Міжнародній науково-технічній Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами» (Київ, 2017 р.).

Публікації. Результати дисертаційних досліджень опубліковано у 29 наукових роботах: у тому числі 9 статей [1-9] у фахових наукових виданнях, з яких статті [2-9] опубліковано в спеціалізованих фахових виданнях України; 1 стаття [1] – у закордонному науковому виданні, 19 тез доповідей на наукових конференціях [10-28] та 1 авторське свідоцтво [29]. Публікації [16], [18], [19] включені до наукометричної бази Scopus.

Структура роботи. Дисертаційна робота є рукописом і складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел із 180 найменувань (19 с.), 6 додатків (58 с.), 55 рисунків, 15 таблиць. Загальний обсяг роботи складає 248 сторінок, з них 152 сторінок основного тексту.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність роботи, визначено мету та завдання, визначено наукову новизну роботи і практичне значення отриманих результатів, наведено дані про впровадження результатів роботи, її апробацію, публікації та особистий внесок здобувача, сформульовані основні положення та висновки.

Перший розділ присвячений огляду та аналізу сучасного стану проблем автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів. У розділі розглянуті основні особливості конструкцій і ТП виготовлення МЕМС акселерометрів, математичні моделі та методи автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів в умовах сучасного виробництва, розглянуті сучасні системи автоматизованого проектування.

Конструкції МЕМС акселерометрів залежать від принципу їх дії (ємнісні, п'єзоелектричні та інші). Структура ТП, кількість і послідовність етапів, операцій, переходів, обладнання змінюється залежно від типу та структури МЕМС акселерометра. Існуючі системи автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів використовують стохастичні методи вирішення, що призводить до збільшення часу проектування ТП. Враховуючи це необхідно проводити удосконалення існуючих моделей і методів, які покладено в основу систем автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів.

За результатами проведеного аналізу сформульовано мету та задачі дисертаційної роботи, які передбачають розробку та удосконалення математичних моделей, методів і програмного забезпечення для розв'язання задачі підвищення ефективності автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів шляхом зниження вартості та часу проектування і виготовлення.

Основні результати розділу опубліковано у роботах [3-4, 11-12, 15, 25, 27, 28].

У **другому розділі** розроблено математичну модель визначення МЕМС акселерометра-аналога за функціонально-конструктивними показниками.

Подамо МЕМС акселерометр у вигляді ієрархічної структури. Тоді у загальній постановці задачі: існує множина МЕМС акселерометрів A_k , з якої необхідно визначити найкращий варіант МЕМС акселерометра-аналога $a^o \in A_k$ (де A_k – множина варіантів) з урахуванням заданих обмежень на вартість, час виготовлення, масу, площу та функціонально-конструктивні обмеження. Для визначення кількісної оцінки кожного варіанту $a \in A_k$ МЕМС акселерометра-аналога використовують часткові критерії (час і вартість виготовлення, маса та площа МЕМС акселерометра).

Якщо визначено структуру МЕМС акселерометра-аналога, тоді відомо: множина типів призначення $A_k = \{A_k^a\}$, кожний тип МЕМС акселерометра задано множиною структур $A_k^a = \{A_k^{as}\}$, кожна з яких характеризується множиною функціонально-конструктивних показників $A_k^{as} = \{A_k^{asp}\}$.

Частковий критерій мінімізації часу виготовлення MEMC акселерометра:

$$T = \min_{a \in Ak} \sum_{a=1}^{a'} \sum_{s=1}^{s'} \sum_{p=1}^{p'} T_{asp} X_{asp}, \text{ обмеження на час: } \sum_{a=1}^{a'} \sum_{s=1}^{s'} \sum_{p=1}^{p'} T_{asp} X_{asp} \leq T_3. \quad (1)$$

Частковий критерій мінімізації вартості виготовлення MEMC акселерометра:

$$C = \min_{a \in Ak} \sum_{a=1}^{a'} \sum_{s=1}^{s'} \sum_{p=1}^{p'} C_{asp} X_{asp}, \text{ обмеження на вартість: } \sum_{a=1}^{a'} \sum_{s=1}^{s'} \sum_{p=1}^{p'} C_{asp} X_{asp} \leq C_3. \quad (2)$$

Частковий критерій мінімізації маси виготовленого MEMC акселерометра:

$$M = \min_{a \in Ak} \sum_{a=1}^{a'} \sum_{s=1}^{s'} \sum_{p=1}^{p'} M_{asp} X_{asp}, \text{ обмеження на масу: } \sum_{a=1}^{a'} \sum_{s=1}^{s'} \sum_{p=1}^{p'} M_{asp} X_{asp} \leq M_3. \quad (3)$$

Частковий критерій мінімізації площі виготовлення MEMC акселерометра:

$$G = \min_{a \in Ak} \sum_{a=1}^{a'} \sum_{s=1}^{s'} \sum_{p=1}^{p'} G_{asp} X_{asp}, \text{ обмеження на площу: } \sum_{a=1}^{a'} \sum_{s=1}^{s'} \sum_{p=1}^{p'} G_{asp} X_{asp} \leq G_3. \quad (4)$$

Обмеження на значення функціонально-конструктивних показників MEMC:

$$\sum_{s=1}^{s'} \sum_{p=1}^{p'} P_{asp} X_{asp} \leq P^*, \forall a = \overline{1, a'}, \quad (5)$$

де $C_{asp}, T_{asp}, M_{asp}, G_{asp}$ – вартість, час виготовлення, маса та площа кожного MEMC акселерометра a -го типу з s -ою структурою p -ми функціонально-конструктивними показниками; C_3, T_3, M_3, G_3 – допустиме значення вартості, часу, маси та площі відповідно; $X_{asp} = \{0;1\}$ – дискретна змінна; якщо обраний a -ий тип з s -ою структурою та p -ми показниками $X_{asp}=1$, в іншому випадку $X_{asp}=0$.

Кортеж функціонально-конструктивних показників MEMC акселерометра:

$$P_{asp} = \langle Se, Sg, T, Pe, K, Ph \rangle,$$

де Se – матеріал чутливого елемента (арсенід галію, фосфід галію, нітрид галію, індій-галій (Ce); кварц чи діоксид кремнію (Qu); нітрид і карбід кремнію (Ni); кремній (Sl)); Sg – тип навантаження на чутливий елемент (стиснення (Com),

зсув (Sh), вигин (Fl)); T – кількість осей (одноосьові (α_o), двоосьові (α_t), трьохосьові (α_{th})); Pe – робочі характеристики (чутливість (Sx), діапазон вимірюваних прискорень (Rm), частотний діапазон (Ry), роздільна здатність (f), нелінійність (nL), поперечна осьова чутливість (St), коефіцієнт затухання (Dr)); K – показники контролю (температурний коефіцієнт чутливості (Tk), температурний діапазон (Tr), межа навантаження (Ls), чутливість основи до деформації (Ss), чутливість до магнітних полів (Sm)); Ph – фізичні показники (параметр корпусу (H), положення електричного з'єднувача (El), ізоляція (I), тип кабелю (C), кріплення (Cr)).

На базі формалізації часткових критеріїв вартості та часу виготовлення, маси, об'єму МЕМС акселерометра сформовані задачі вибору за одним чи декількома частковими критеріями та розроблені моделі розв'язання окремих завдань у залежності від ступеня визначеності вихідної інформації.

Основні результати розділу опубліковано у роботах [1, 4, 12-13, 21-23, 24, 28].

У третьому розділі удосконалено модель структурно-параметричного синтезу ТП виготовлення МЕМС акселерометрів.

Визначено послідовність 14 загальних етапів виготовлення МЕМС акселерометрів. Етапи Q є послідовністю $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_{14}\}$, а заготівка Ψ є множиною заготовок, необхідних для виготовлення МЕМС акселерометра – $\Psi = \{\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_i\}$, де $i = \overline{1, n}$:

$$\Psi_0 \xrightarrow{Q'_1} \Psi'_1 \xrightarrow{Q_2} \Psi_2 \xrightarrow{Q_3} \dots \xrightarrow{Q'_{i3}} \Psi'_{i3} \xrightarrow{Q'_{i4}} \Theta, \quad (6)$$

де Ψ_0 – початкова заготовка; Q_i – етапи, які впливають на зміну геометричних та фізичних параметрів заготовок; Q'_i – етапи, які не впливають на зміну геометричних і фізичних параметрів заготовок; Θ – кінцевий виріб (МЕМС акселерометр).

З урахуванням того, що етапи Q_5 (етап отримання елементів) і Q_6 (етап отримання компонентів) виконуються паралельно між собою, а етапи отримання чутливого елемента (ЧЕ) МЕМС акселерометрів $Q_5 - Q_{10}$ паралельно з етапом виготовлення корпусу $Q_3 - Q_4$, то можна подати ТП виготовлення МЕМС акселерометрів у вигляді графової моделі (рис. 1).

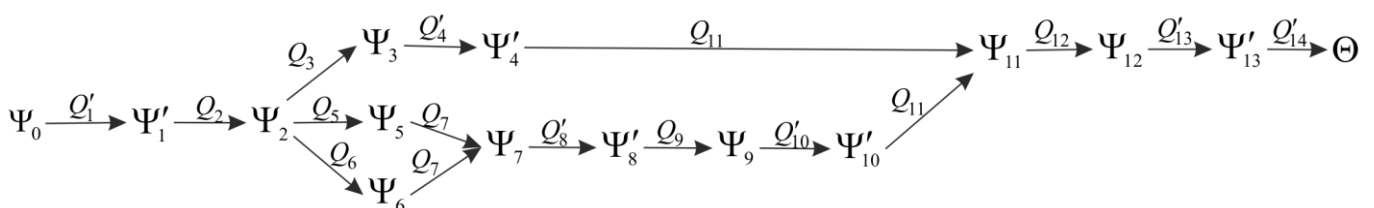


Рисунок 1 – Графова модель ТП виготовлення МЕМС акселерометрів на рівні етапів

Якщо розглядати рівень проектування технологічних операцій (ТО), то кожен етап Q_i можна подати як ряд ТО O_p :

$$\begin{aligned} \Psi_0 \Rightarrow (\{O'_{11} \rightarrow O'_{12} \rightarrow \dots \rightarrow O'_{1p}\} \in Q'_1) \Rightarrow (\{O_{21} \rightarrow O_{22} \rightarrow \dots \rightarrow O_{2p}\} \in Q_2) \Rightarrow \\ \Rightarrow (\{O_{31} \rightarrow O_{32} \rightarrow \dots \rightarrow O_{3p}\} \in Q_3) \Rightarrow (\{O'_{41} \rightarrow O'_{42} \rightarrow \dots \rightarrow O'_{4p}\} \in Q'_4) \wedge \\ \wedge (\{O_{51} \rightarrow O_{52} \rightarrow \dots \rightarrow O_{5p}\} \in Q_5) \wedge (\{O_{61} \rightarrow O_{62} \rightarrow \dots \rightarrow O_{6p}\} \in Q_6) \Rightarrow \\ \Rightarrow (\{O_{71} \rightarrow O_{72} \rightarrow \dots \rightarrow O_{7p}\} \in Q_7) \Rightarrow (\{O'_{81} \rightarrow O'_{82} \rightarrow \dots \rightarrow O'_{8p}\} \in Q'_8) \Rightarrow \\ \Rightarrow (\{O_{91} \rightarrow O_{92} \rightarrow \dots \rightarrow O_{9p}\} \in Q_9) \Rightarrow (\{O'_{101} \rightarrow O'_{102} \rightarrow \dots \rightarrow O'_{10p}\} \in Q'_{10}) \Rightarrow \\ \Rightarrow (\{O_{111} \rightarrow O_{112} \rightarrow \dots \rightarrow O_{11p}\} \in Q_{11}) \Rightarrow (\{O_{121} \rightarrow O_{122} \rightarrow \dots \rightarrow O_{12p}\} \in Q_{12}) \Rightarrow \\ (\{O'_{131} \rightarrow O'_{132} \rightarrow \dots \rightarrow O'_{13p}\} \in Q'_{13}) \Rightarrow (\{O'_{141} \rightarrow O'_{142} \rightarrow \dots \rightarrow O'_{14p}\} \in Q'_{14}) \Rightarrow \Theta, \end{aligned}$$

де \Rightarrow – порядок послідовності виконання кожного етапу; O_{1p}, O_{2p}, O_{14p} – впорядкована послідовність операцій; $p = \overline{1, n}$ – порядковий номер ТО O_{1p}, O_{2j}, O_{14k} у відповідних етапах Q'_1, Q_2, Q'_{14} ; O_{ip} – ТО, які впливають на зміну геометричних і фізичних параметрів заготовок; O'_{ip} – ТО, які не впливають на зміну геометричних та фізичних параметрів заготовок.

На основі цього можна подати фрагмент моделі структурно-параметричного синтезу ТП виготовлення МЕМС акселерометрів:

$$\begin{aligned} \Psi_0, S_0 \xRightarrow[S_1]{V_{i1}} (\{N_{i1}\} \in \Omega'_{i1}) \in O'_{11} \xrightarrow{P_{i1} = V_{i2}} (\{N_{i2}\} \in \Omega'_{i2}) \in O'_{12} \xrightarrow{P_{i2} = V_{i3}} \dots \\ \dots \xrightarrow{P_{ip-1} = V_{ip}} (\{N_{ip}\} \in \Omega'_{ip}) \in O'_{1p} \in Q'_1 \xRightarrow[S_2]{P_{i1} = V_{i2}} \Psi'_1 \xRightarrow[V_{i2}]{P_{i1} = V_{i2}} (\{N_{i1}\} \in \Omega_{i1}) \in O_{21} \xrightarrow{P_{i1} = V_{i2}} \\ \xrightarrow{P_{i1} = V_{i2}} (\{N_{i2}\} \in \Omega_{i2}) \in O_{22} \xrightarrow{P_{i2} = V_{i3}} \dots \xrightarrow{P_{ip-1} = V_{ip}} (\{N_{ij}\} \in \Omega_{ij}) \in O_{2p} \in Q_2 \xRightarrow{P_{i2}} \\ \xRightarrow[S_3]{P_{i2}} \Psi_2 \xRightarrow[V_{i3}]{P_{i1} = V_{i2}} (\{N_{i1}\} \in \Omega_{i1}) \in O_{31} \xrightarrow{P_{i1} = V_{i2}} (\{N_{i2}\} \in \Omega_{i2}) \in O_{32} \xrightarrow{P_{i2} = V_{i3}} \dots \xrightarrow{P_{ip-1} = V_{ip}} \\ \xrightarrow{P_{ip-1} = V_{ip}} (\{N_{ij}\} \in \Omega_{ij}) \in O_{3p} \in Q_3 \xRightarrow[S_4]{P_{i3}} \Psi_3 \xRightarrow[V_{i4}]{P_{i3}} \dots \xRightarrow[S_{14}]{P_{i3}} \Psi'_{13} \xRightarrow[V_{i4}]{P_{i3}} (\{N_{i1}\} \in \Omega_{i1}) \in O_{141} \xrightarrow{P_{i1} = V_{i2}} \\ \xrightarrow{P_{i1} = V_{i2}} (\{N_{i2}\} \in \Omega_{i2}) \in O_{142} \xrightarrow{P_{i2} = V_{i3}} \dots \xrightarrow{P_{ip-1} = V_{ip}} (\{N_{ik}\} \in \Omega'_{ik}) \in O_{14} \in Q'_{14} \xRightarrow{P_{i14}} \Theta, \end{aligned}$$

де Ω – основні переходи; Ω' – допоміжні переходи; V_i – вхідні параметри операції; P_i – вихідні параметри операції; N_i – параметри переходу; S – сировина, необхідна

для виконання ТО O_{ip} ; S_0 – первинна сировина.

Після визначення типових структур ТП необхідно здійснити вибір найкращого варіанту. Для цієї задачі відома множина типових ТП для визначеного класу МЕМС акселерометрів-аналогів, для якої відома вартість \bar{C} та час виконання ТП \bar{t} .

Необхідно визначити найкращий типовий ТП $\tau^o \in TP$ за критеріями вартості та часу виконання, де TP – множина варіантів типових ТП. Вибір здійснюється за критерієм вартості та обмеженням за часом:

$$\begin{cases} \bar{C} = \min_{\tau \in TP} \sum_{\tau=1}^{\tau} \bar{C}_{\tau} Y_{\tau}; \\ \sum_{\tau=1}^{\tau} \bar{t}_{\tau} Y_{\tau} \leq t^*, \end{cases}$$

де $\bar{C}_{\tau}, \bar{t}_{\tau}$ – вартість та час виконання ТП τ -го типового ТП; $Y_{\tau} = \{0;1\}$ – дискретна змінна; якщо вибрано τ -ий типовий ТП $Y_{\tau}=1$, в іншому випадку $Y_{\tau}=0$.

Визначивши типовий ТП необхідно вибрати операції на кожному етапі. Нехай відома множина операцій O_{ip} на кожному i -му етапі, кожна з яких виконується для отримання e -ого елемента S_e^3 та n -го компонента S_n^2 , для яких відомі час \bar{t} та вартість її виконання \bar{C} . Необхідно визначити найкращий варіант послідовності операцій: $p^o \in Q$ на кожному i -ому етапі Q_i , за часом і вартістю виконання операцій.

Вибір операцій для ТП здійснюється за критеріями часу та вартості виконання:

– мінімізації витрат часу на виконання етапів Q_i :

$$\bar{t} = \min_{p \in Q} \sum_{p=1}^{p'} t_{ip} \bar{Y}_{ip}, \forall i = \overline{1, i'}; \quad (7)$$

– мінімізації вартості виконання етапів Q_i :

$$\bar{C} = \min_{p \in Q} \sum_{p=1}^{p'} C_{ip} \bar{Y}_{ip}, \forall i = \overline{1, i'}; \quad (8)$$

де t_{ip}, C_{ip} – час та вартість виконання p -ї ТО на i -му етапі Q_i виготовлення; $\bar{Y}_{ip} = \{0;1\}$ – дискретна змінна; якщо вибрана p -а операція на i -ому етапі $\bar{Y}_{ip}=1$, в іншому випадку $\bar{Y}_{ip}=0$.

За обмеженнями на час та вартість виконання всіх етапів Q_i :

– час виконання всіх етапів Q_i має бути не більшим за допустиме значення t_{ip}^* :

$$\sum_{i=1}^{i'} \sum_{p=1}^{p'} t_{ip} \bar{Y}_{ip} \leq t_{ip}^*; \quad (9)$$

– вартість виконання всіх етапів Q_i має бути не більшою за допустиме значення C_{ip}^* :

$$\sum_{i=1}^{i'} \sum_{p=1}^{p'} C_{ip} \bar{Y}_{ip} \leq C_{ip}^*. \quad (10)$$

За необхідністю проводити вибір технологічного обладнання. Для цієї задачі відома множина p -их операцій O_{ip} на i -му етапі Q_i та множина обладнання W , де $w = \overline{1, w'}$, яке може виконувати ці операції або групу операцій. Для кожної p -ої операції O_{ip} на i -ому етапі Q_i необхідно визначити кращий варіант w -го обладнання $w^o \in W$.

Вибір w -ого обладнання p -ої операції i -ого етапу здійснюється за частковими чотирма частковими критеріями:

$$\left\{ \begin{array}{l} EP = \max_{w \in W} \sum_{p=1}^{p'} \sum_{w=1}^{w'} EP_{ipw} \bar{Y}_{ipw}, \forall i = \overline{1, i'}; \\ PS = \min_{w \in W} \sum_{p=1}^{p'} \sum_{w=1}^{w'} PS_{ipw} \bar{Y}_{ipw}, \forall i = \overline{1, i'}; \\ F = \min_{w \in W} \sum_{p=1}^{p'} \sum_{w=1}^{w'} F_{ipw} \bar{Y}_{ipw}, \forall i = \overline{1, i'}; \\ SL = \max_{w \in W} \sum_{p=1}^{p'} \sum_{w=1}^{w'} SL_{ipw} \bar{Y}_{ipw}, \forall i = \overline{1, i'}; \end{array} \right. \quad (11)$$

де $EP_{ipw}, PS_{ipw}, F_{ipw}, SL_{ipw}$ – продуктивність, вартість, енерговитрати, термін служби відповідного w -го обладнання для кожної p -ої операції на i -ому етапі; $\bar{Y}_{ipw} = \{0;1\}$ – дискретна змінна; якщо вибрано w -е обладнання для p -ої операції i -ого етапу $\bar{Y}_{ipw} = 1$, в іншому випадку $\bar{Y}_{ipw} = 0$.

Сформульовані обмеження за продуктивністю, вартістю, енерговитратами, терміном служби w -го обладнання та часом і вартістю виконання p -ої операції на i -ому етапі w -им обладнанням:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{p=1}^{p'} \sum_{w=1}^{w'} EP_{ipw} \bar{Y}_{ipw} \geq EP_3, \forall i = \overline{1, i'}; \\ \sum_{p=1}^{p'} \sum_{w=1}^{w'} PS_{ipw} \bar{Y}_{ipw} \leq PS_3, \forall i = \overline{1, i'}; \\ \sum_{p=1}^{p'} \sum_{w=1}^{w'} F_{ipw} \bar{Y}_{ipw} \leq F_3, \forall i = \overline{1, i'}; \\ \sum_{p=1}^{p'} \sum_{w=1}^{w'} SL_{ipw} \bar{Y}_{ipw} \geq SL_3, \forall i = \overline{1, i'}; \\ \sum_{p=1}^{p'} \sum_{w=1}^{w'} TE_{ipw} \bar{Y}_{ipw} \leq t_{ip}, \forall i = \overline{1, i'}; \\ \sum_{p=1}^{p'} \sum_{w=1}^{w'} CE_{ipw} \bar{Y}_{ipw} \leq C_{ip}, \forall i = \overline{1, i'}, \end{array} \right. \quad (12)$$

де EP_3 – задане значення продуктивності обладнання; PS_3 – задане значення вартості обладнання; F_3 – задане значення енерговитрати обладнання; SL_3 – задане значення терміну служби обладнання; CE_{ipw} – час виконання p -ої операції на w -ому обладнанні; CE_{ipw} – вартість виконання p -ої операції на w -ому обладнанні.

Для оцінки ТП виготовлення МЕМС акселерометрів розроблено його імітаційну модель.

Основні результати розділу опубліковано у роботах [6, 8, 15-16, 20].

В четвертому розділі розроблено узагальнений метод автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів (рис. 2) та удосконалено метод вибору типового ТП виготовлення МЕМС акселерометрів.

На відміну від відомих, узагальнений метод автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів заснований на двох часткових методах: вибору типового ТП і пошуку аналогів окремих елементів. Вхідні дані для автоматизованого проектування отримують з технічного завдання на розробку МЕМС акселерометра із зазначеними функціонально-конструктивними обмеженнями, якими характеризується виріб. Базовий методу пошуку типових ТП удосконалено за рахунок використання методів ієрархічної кластеризації та інтелектуального аналізу даних, що дозволяє визначити взаємозв'язки між функціонально-конструктивними показниками МЕМС акселерометра-аналога і ТП.

За результатами застосування удосконаленого методу вибору типових ТП отримується множина типових ТП (табл. 1), з якої здійснюється вибір типового ТП.

У таблиці 1: n – кількість сформованих кластерів; i, j, l, k, p, v – номери МЕМС акселерометрів, які потрапили в той чи інший кластер (кількість акселерометрів у різних кластерах відрізняється та залежить від значення дальності акселерометрів один від одного); xx – відсоткове співвідношення ТП у кластері; T_x – ТП, який має найбільше відсоткове співвідношення використання у кластері.

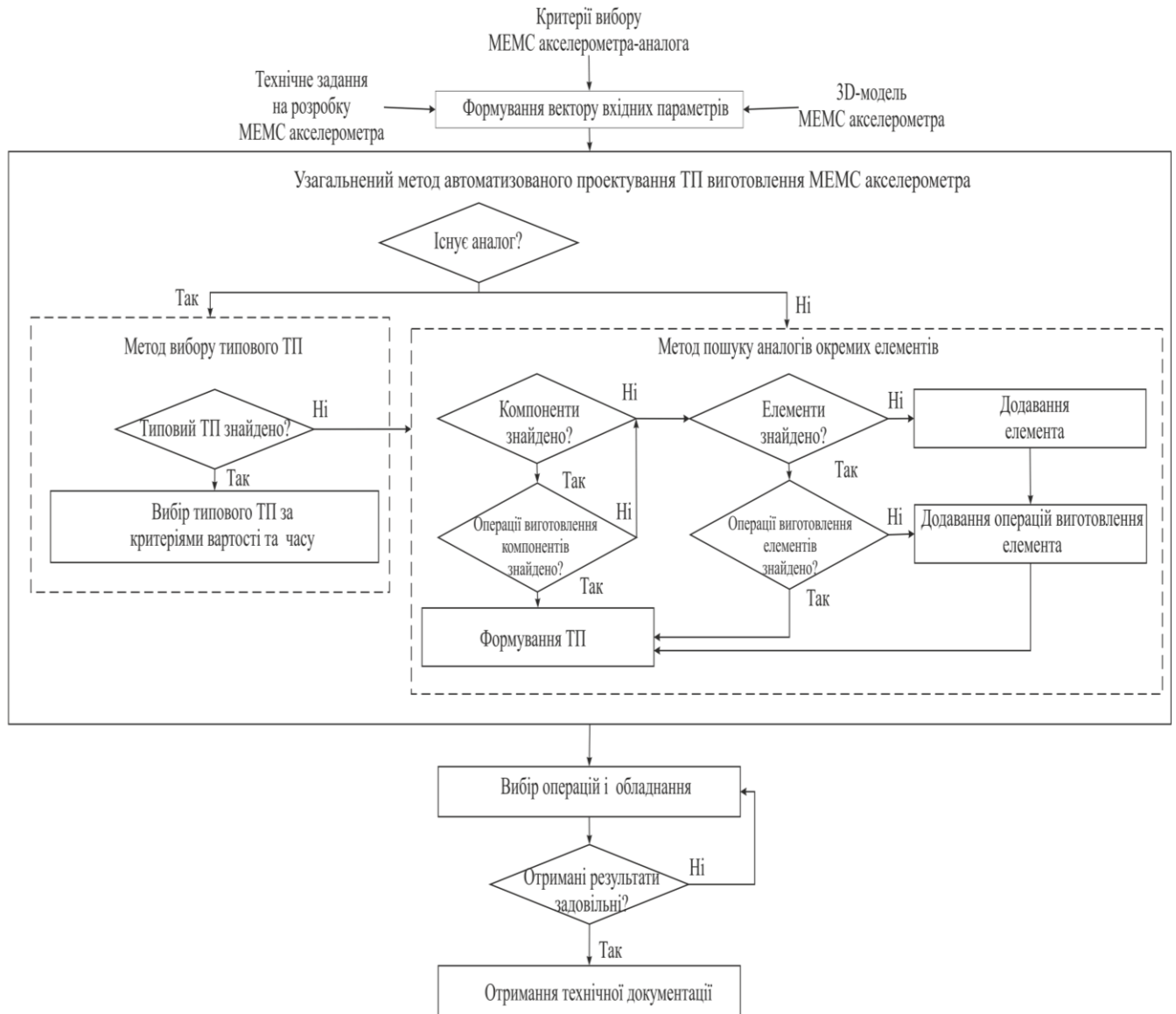


Рисунок 2 – Структурна модель узагальненого методу автоматизованого проектування ТП виготовлення MEMC акселерометра

Проведено дослідження методу вибору типового ТП виготовлення MEMC акселерометрів, за результатами якого встановлено, що найбільш повно враховує особливості розглянутих об'єктів метод Варда. Для підвищення ефективності роботи удосконаленого методу використано машинне навчання.

Проведено аналіз ефективності удосконалення методу вибору типових ТП виготовлення MEMC акселерометрів із різною кількістю MEMC акселерометрів (50, 100, 150, 200 та 250 акселерометрів) і, відповідно, різною кількістю можливих варіантів ТП. У ході експерименту розв'язувалась задача вибору типового ТП за показником вартості.

Проведений порівняльний аналіз показав, що час розв'язання задач за удосконаленим методом в 1,3 рази менше, порівняно з методом перебору, та в 2,53 рази менше, порівняно з методом Монте-Карло.

Таблиця 1 – Приклад подання результатів роботи методу

Кластер	Номер акселерометра	Технологічні процеси	\bar{t}	\bar{C}
1	i, j, \dots	$T_1 - xx\%$	\bar{t}_1	\bar{C}_1
		$\dots \Rightarrow$ <i>рекомендується типовий ТП</i> $T_x \rightarrow \max\%$	\dots	\dots
		$T_n - xx\%$	\bar{t}_n	\bar{C}_n
...				
n	p, v, \dots	$T_1 - xx\%$	\bar{t}_1	\bar{C}_1
		$\dots - xx\% \Rightarrow$ <i>рекомендується типовий ТП</i> $T_x \rightarrow \max\%$	\dots	\dots
		$T_r - xx\%$	\bar{t}_r	\bar{C}_r

Основні результати розділу опубліковано у роботах [5, 7, 9, 17-21].

П'ятий розділ присвячений програмній реалізації розроблених та удосконалених математичних моделей і методів автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів.

Програмний модуль (ПМ) «AcSAM» призначений для проектування й аналізу ТП виготовлення МЕМС акселерометрів. Наведені приклади розв'язання задач автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів, які підтверджують працездатність і ефективність розроблених та удосконалених математичних моделей, методів і програмного модуля.

Використання розроблених і удосконалених моделей та методів автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів дозволило зменшити наведені витрати на 45,42 % порівняно з базовим ТП (табл. 2) та зменшити час вирішення завдання проектування ТП на 16,3% (порівняно з існуючими системами), отримати технічну документацію у вигляді маршрутної карти.

Таблиця 2 – Порівняльний аналіз розробленого ТП і базового

Види затрат	Розроблений ТП	Базовий ТП	Виграш	
			Абсолютне значення	%
Програма випуску акселерометрів, шт.	10000			
Заданий час виконання ТП, хв.	2942			
Розрахований час виконання ТП, хв.	2919	2942	23	0,78
Кількість змін	10			
Оптова ціна обладнання, тис. грн	18137	18656	519	2,78
Кількість всього обладнання, шт.	21	37	16	43,24
Середній термін служби обладнання, років	15	12	3	25
Витрати на сировину і напівфабрикати, тис. грн	282			
Витрати на електроенергію, тис. грн	187	2475	2288	92,44
Наведені затрати, тис. грн	17970	20758	2788	13,43

Основні результати п'ятого розділу опубліковано у роботах [4, 28, 29].

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримано результати, які у відповідності до мети дослідження дозволяють підвищити ефективність автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення МЕМС акселерометрів зниження вартості і часу їх проектування та виготовлення, за рахунок розробки й удосконалення моделей, методів і програмного забезпечення. Дослідження, які проведені, дозволили зробити такі висновки.

1. У роботі виконано аналіз сучасного стану проблеми автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів, у результаті якого встановлено: МЕМС акселерометр як об'єкт проектування є складним об'єктом, конструкція якого залежить від фізичних ефектів, функціональних параметрів (чутливість, діапазон вимірювання, роздільна здатність, частотний діапазон, резонансна частота, температурний діапазон, матеріал ЧЕ, тип електричного з'єднання, матеріал корпусу, розмір, кріплення та інші) і вибору технологій виготовлення. ТП виготовлення МЕМС акселерометрів можуть складатися більше ніж з двохсот операцій, які мають бути узгоджені за часом для уникнення появи бракованого виробу та простою обладнання. Для вирішення завдання автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів необхідна розробка нових математичних моделей і методів, які б дозволили врахувати особливості об'єкту проектування.

2. На основі проведеної систематизації та класифікації параметрів розроблено математичну модель визначення МЕМС акселерометра-аналога за функціонально-конструктивними обмеженнями. Для цього виконано формалізацію за частковими критеріями вартості та часу виготовлення, маси, об'єму МЕМС акселерометра, що дозволило сформулювати задачі вибору за одним чи декількома частковими критеріями та розробити моделі для розв'язання окремих задач. Це дало можливість приймати проектні рішення за вибраними критеріями, залежно від ступеня визначеності вхідної інформації. На практиці отримані результати дозволяють визначити найкращий варіант МЕМС акселерометра-аналога для здійснення вибору типового технологічного процесу.

3. Удосконалена модель структурно-параметричного синтезу ТП виготовлення МЕМС акселерометра шляхом вибору найкращого варіанту типового ТП, що дозволяє отримати структуру ТП на рівні етапів, операцій і маршрутів, враховуючи особливості побудови, паралельні ТО, вхідні та вихідні параметри. Крім того, запропоновано систему обмежень, які накладаються на ТО, що дозволяє прискорити процес проектування за рахунок виключення неефективних маршрутів з дерева можливих рішень побудови ТП. Синтез структури ТП здійснюється за рахунок вибору типового ТП, операцій та обладнання. Вибір операцій ТП здійснюється за критеріями вартості та часу виконання операцій на етапах, а обладнання – за критеріями продуктивності, енерговитрат, вартості та терміну служби.

4. На основі моделі структурно-параметричного синтезу ТП виготовлення МЕМС акселерометрів розроблено імітаційну модель. За результатами імітаційного моделювання ТП виготовлення МЕМС акселерометрів проводяться оцінка отриманої структури ТП та надаються рекомендації щодо підвищення ефективності.

5. Розроблено узагальнений метод автоматизованого проектування ТП, в основу якого покладено два часткових методи: вибору типових ТП і пошуку аналогів окремих елементів. Таке комплексне використання двох методів дозволяє покращити функціонально-економічні показники.

6. Удосконалено метод вибору типових ТП виготовлення МЕМС акселерометрів за рахунок використання методів ієрархічної кластеризації та інтелектуального аналізу даних. Завдяки цьому можливо визначити взаємозв'язок між функціонально-конструктивними показниками МЕМС акселерометра-аналога і типовим технологічним процесом та знизити вартість і час на проектування.

7. Проведено експериментальне дослідження удосконаленого методу вибору типових ТП виготовлення МЕМС акселерометрів, результати якого довели працездатність і ефективність удосконаленого методу. Для того, щоб оцінити якість проведеного експерименту, використано такі критерії: кореляція, приналежність МЕМС акселерометра до певного кластеру, дерево рішень і графік силуетів кластерів. Проведений аналіз показав, що метод Варда найбільш повно враховує особливості розглянутих об'єктів. Для підвищення ефективності запропоновано використовувати методи інтелектуального аналізу даних, що дозволить автоматично приймати рішення про приналежність МЕМС акселерометра, ТП якого проектується, для визначених класів, забезпечити високу швидкість і якість обробки даних.

8. Розроблені математичні моделі та методи реалізовані в програмному модулі та дозволяють вирішувати завдання автоматизації проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів. Вони апробовані та показали свою працездатність на прикладі автоматизації проектування ТП для трьох МЕМС акселерометрів із різною кількістю 3D-елементів, типом і параметрами.

9. Проведене експериментальне дослідження отриманих теоретичних результатів довело ефективність розроблених та удосконалених математичних моделей і методів автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів. Порівняльний аналіз показав, що у результаті застосування ПМ зменшено час проектування в середньому в 1,9 рази у порівнянні з іншими системами проектування та витрати на 45,42 % порівняно з базовим ТП. Економічний ефект використання даної розробки підтверджується актами впровадження.

10. Розроблені та й удосконалені математичні моделі та методи дозволили отримати математичне, інформаційне та програмне забезпечення САПР, які реалізовано в ПМ «АсСАМ» для вирішення завдання автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів, як складової частини системи автоматизованого проектування ТП.

11. Проведені дослідження визначили ряд нових задач у галузі автоматизації проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів, зокрема пов'язаних з інтеграцією моделей, методів та програмного модуля до програмного забезпечення САПР ТП мікроелектромеханічних систем, врахуванням показників якості технологічного обладнання та їх комбінування за показником продуктивності.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Стаття в іноземних виданнях

1. Невлюдов И.Ш., Хрусталеv К.Л., Бортникова В.О. Обобщенный метод автоматизированного проектирования технологических процессов изготовления микроэлектромеханических акселерометров // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Минск, Республика Беларусь, 2018. № 3 (113). С. 94-99. (Включено до бази РІНЦ та бази Google Scholar).

Статті у наукових фахових виданнях

2. Невлюдов И.Ш., Евсеев В.В., Замирец Я.О., Бортникова В.О. Анализ современных средств автоматизированного проектирования микроэлектромеханических систем // Технология приборостроения, научно-технический журнал. Харьков, 2014. №1. С. 3-8.

3. Невлюдов И.Ш., Евсеев В.В., Замирец Я.О., Бортникова В.О. Разработка параметрической модели акселерометра на основе микроэлектромеханических систем // Технология приборостроения, научно-технический журнал. Харьков, 2014. № 2. С. 3-6.

4. Nevludov I., Yevsieiev V., Miliutina S., Bortnikova V. Accelerometer parameters decomposition model for technological process design automation // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Комп'ютерні системи проектування теорія і практика. Львів, 2015. № 828. С. 11-15.

5. Невлюдов И.Ш., Евсеев В.В., Бортникова В.О. Разработка программного модуля для автоматизированного проектирования технологического процесса микроэлектромеханических акселерометров // Системы управління, навігації та зв'язку. Полтава, 2015. № 3(35). С. 107-112. (Включено до міжнародної науково-метричної бази Google Scholar).

6. Невлюдов И. Ш., Пономарева А.В., Бортникова В.О. Модель принятия решения на этапе проектирования технологического процесса изготовления МЭМС акселерометров // Вісник Національного технічного університету «Харківського політехнічного інституту». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. Харків, 2016. № 4(1176). С.63-67. (Включено до міжнародних науково-метричних баз ResearchBib, WorldCat та бази OAJI).

7. Невлюдов И.Ш., Бортникова В.О. Структурно-параметрическая модель технологического процесса изготовления МЭМС акселерометра // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка

та автоматизація». Покровськ, 2017. № 1(30)'2017. С. 6-16. (Включено до міжнародної науково-метричної бази РІНЦ).

8. Невлюдов І.Ш., Бортнікова В.О. Методи автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення МЕМС акселерометрів // Технологія приборостроєння, науко-технічний журнал. Харків, 2018. №1. С. 8-10.

9. Невлюдов І.Ш., Пономарьова Г.В., Бортнікова В.О. Імітаційна модель технологічного процесу виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Київ, 2018. № 1, Т. 29 (68), Ч. 1. С. 210-216.

Міжнародні науково-технічні та науково-практичні конференції

10. Бортнікова В.О. Основные особенности автоматизации проектирования устройств на основе МЭМС // 18-ый Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь XXI века», 14-16 апреля 2014 г., Харьков, 2014. С. 115-116.

11. Невлюдов И.Ш., Бортникова В.О. Разработка графа классификации микроэлектромеханических систем // 24-ая Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии, 7-13 сентября 2014 г., Севастополь, 2014. С. 746-747.

12. Бортникова В.О. Математическая модель акселерометра для разработки модуля САПР ТП // 19-ый Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь XXI века», 20-22 апреля 2015 г., Харьков, 2015. С. 119-120.

13. Евсеев В.В., Бортникова В.О. Математическая модель климатических факторов внешней среды для решения задач автоматизации технологии производства акселерометров на основе микроэлектромеханических систем // 25-ая Международная конференция «Новые технологии и машиностроение», 3-8 сентября 2015 г., Коблево-Харьков, 2015. С. 40.

14. Невлюдов І.Ш., Євсєєв В.В., Бортнікова В.О. Аналіз існуючих технологій виготовлення акселерометрів на основі технологій мікроелектромеханічних систем // XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів», Кременчук, 6-8 листопада 2015 р., Кременчук, 2015. С. 30-31.

15. Бортникова В.О. Формализация входных и выходных параметров для автоматизации проектирования технологических процессов изготовления акселерометров // 20-ий ювілейний Міжнародний молодіжний форум «Радиоелектроніка та молодь у XXI столітті», 19-21 квітня 2016 р., Харків, 2016. С. 107-108.

16. Nevludov I., Yevsieiev V., Miliutina S., Bortnikova V. Accelerometers production technological process decomposition parameters model // XII International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS, 20-24 April 2016, Lviv-Polyana, Ukraine. PP. 1-5. (Включено до міжнародної наукометричної бази «Scopus»).

17. Nevludov I., Yevsieiev V., Miliutina S., Bortnikova V. Technological Process Identification Method for Accelerometers MEMS // XXIV International Ukrainian-Polish Conference CAD in Machinery Design. Implementation and Educational Issues, 21-22 October, 2016, Lviv, Ukraine. PP. 23-24.

18. Nevludov I., Yevsieiev V., Miliutina S., Bortnikova V. MEMS Accelerometers Production Technological Route Selection // 14th International Conference CAD Systems in Microelectronics, 21-25 February, 2017, Polyana, Ukraine. PP. 424-427. *(Включено до міжнародної наукометричної бази «Scopus»)*.

19. Nevludov I., Ponomaryova G., Miliutina S., Bortnikova V. MEMS accelerometers classification using machine-learning methods // XII International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, 20-23 April 2017, Lviv-Polyana, Ukraine. PP. 51-55. *(Включено до міжнародної наукометричної бази «Scopus»)*.

Всеукраїнські та міжрегіональні конференції й інші видання

20. Невлюдов І.Ш., Бортникова В.О. Повышение эффективности автоматизированного проектирования технологических процессов изготовления МЭМС акселерометров // IV Міжнародна науково-технічна Internet-конференція «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 22 листопада 2017 р. [Електронний ресурс]. Київ, С. 23-25, Режим доступу: <http://nuft.edu.ua/page/view/konferentsii>.

21. Бортникова В.О. Математическая модель метода загрузки на чувствительный элемент акселерометра // Всеукраїнська науково-практична Internet-конференція «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку», 16-20 березня 2015 р., Черкаси, 2015. С. 98-99.

22. Бортникова В.О., Резниченко Д.Ю. Математическая модель диапазона измеряемых ускорений акселерометра для разработки модуля САПР МЭМС // Всеукраїнська студентська наукова конференція «Наукова Україна», 25 травня 2015 р., Дніпропетровськ, 2015. С. 364-366.

23. Бортникова В.О. Математическая модель чувствительности акселерометра для разработки модуля САПР // Дні науки в Донецькому національному технічному університеті, 25-29 травня 2015 р., Красноармійськ, 2015. С. 380-382.

24. Невлюдов І.Ш., Бортникова В.О. Модель методу кріплення акселерометра для вирішення задачі автоматизації проектування технологічних процесів // Міжрегіональна науково-практична конференція молодих вчених «ТАК: телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології», 16-17 листопада 2015 р., Красноармійськ, 2015. С. 184-186.

25. Бортникова В.О. Поверхностные технологии изготовления микроэлектромеханических акселерометров // Всеукраїнська науково-практична Internet-конференція «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у

виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку», 14-20 березня 2016 р., Черкаси, 2016. С. 128-130.

26. Невлюдов И.Ш., Бортникова В.О. Технологический процесс изготовления микромеханического акселерометра как объект проектирования // Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених «ТАК: телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології», 29-30 листопада 2016 р., Покровськ, 2016. С. 212-214.

27. Бортникова В.О. Методы автоматизированного проектирования технологических процессов изготовления МЭМС-акселерометров // Всеукраїнська науково-практична Internet-конференція «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку», 13-19 березня 2017 р., Черкаси, 2017. С. 159-161.

28. Невлюдов И.Ш., Бортникова В.О. Определение весовых коэффициентов параметров МЭМС акселерометра // Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених «ТАК: телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології», 29-30 листопада 2017 р., Покровськ, 2017. С. 222-224.

Авторське свідоцтво

29. Комп'ютерна програма «Автоматизована система проектування технологічного процесу виготовлення акселерометрів «AcSAM» («AcSAM»): свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 65348 / В.О. Бортнікова, В.В. Євсєєв, І.Ш. Невлюдов; дата реєстрації: 16.05.16 р.

АНОТАЦІЯ

Бортнікова В.О. Моделі та методи автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2019.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-технічної задачі підвищення ефективності автоматизованого проектування технологічних процесів (ТП) виготовлення мікроелектромеханічних (МЕМС) акселерометрів шляхом розробки математичних моделей, методів і програмного забезпечення.

Вперше розроблено математичну модель визначення МЕМС акселерометра-аналога, для якої формалізовано критерії часу і вартості виготовлення, маси та площі МЕМС акселерометра та враховано функціонально-конструктивні обмеження, що дозволяє визначити найкращий варіант МЕМС акселерометра-аналога для здійснення вибору типового технологічного процесу. Удосконалено модель структурно-параметричного синтезу технологічного процесу виготовлення

МЕМС акселерометрів, яка, на відміну від відомих, шляхом вибору типового технологічного процесу, операцій і обладнання, дозволяє отримати структуру технологічного процесу і у випадку необхідності обрати більш ефективне технологічне обладнання. На основі моделі структурно-параметричного синтезу ТП виготовлення МЕМС акселерометрів розроблено імітаційну модель.

На основі цих моделей вперше розроблено узагальнений метод автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення МЕМС акселерометрів, який базується на двох часткових методах: вибору типових ТП і пошуку аналогів окремих елементів технологічного процесу, що дозволяє отримати ефективний технологічний процес за рахунок зниження вартості та часу виготовлення. Проведено удосконалення методу вибору типових ТП виготовлення МЕМС акселерометрів.

Розроблені й удосконалені математичні моделі та методи дозволили отримати математичне, інформаційне та програмне забезпечення систем автоматизованого проектування, яке реалізовано в програмному модулі «AcSAM».

Ключові слова: мікроелектромеханічні системи (МЕМС), акселерометр, технологічний процес, автоматизація проектування, метод.

АННОТАЦІЯ

Бортникова В.О. Модели и методы автоматизированного проектирования технологических процессов изготовления микроэлектромеханических акселерометров. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.12 – системы автоматизации проектных работ. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2019.

Диссертация посвящена решению научно-технической задачи повышения эффективности автоматизированного проектирования технологических процессов (ТП) изготовления микроэлектромеханических (МЭМС) акселерометров путем разработки математических моделей, методов и программного обеспечения.

Впервые разработана математическая модель определения МЭМС акселерометра-аналога, для которой формализованы критерии времени и стоимости изготовления, массы и площади МЭМС акселерометра и учтены функционально-конструктивные ограничения, что позволяет определить лучший вариант МЭМС акселерометра-аналога для осуществления выбора типового технологического процесса. Усовершенствована модель структурно-параметрического синтеза ТП изготовления МЭМС акселерометров, которая, в отличие от известных, путем выбора типового ТП, операций и оборудования, позволяет получить структуру ТП и в случае необходимости выбрать более эффективное технологическое оборудование. На основе модели структурно-параметрического синтеза ТП

изготовления МЭМС акселерометров разработана имитационная модель.

На основе этих моделей впервые разработан обобщенный метод автоматизированного проектирования ТП изготовления МЭМС акселерометров, основанный на двух частных методах: выбора типовых ТП и поиска аналогов отдельных элементов ТП, что позволяет получить эффективной ТП за счет снижения стоимости и времени изготовления. Проведено усовершенствование метода выбора типовых ТП изготовления МЭМС акселерометров.

Разработанные и усовершенствованные математические модели и методы позволили получить математическое, информационное и программное обеспечение систем автоматизированного проектирования, которое реализовано в программном модуле «AcSAM».

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы (МЭМС), акселерометр, технологический процесс, автоматизация проектирования, метод.

ABSTRACT

Bortnikova V.O. Models and methods for automated design of technological processes for the production of MEMS accelerometers. – Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences (PhD) in a speciality 05.13.12 – Aided design systems. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2019.

An important role in Industry 4.0 technology is played by modern technical means of automation (sensors, actuators, regulators, etc.), which must provide required level of accuracy, operation speed parameters, small weight-size characteristics, high functionality, low power consumption and cost. According to this, wide-ranging applications have been made by sensors using microelectromechanical systems (MEMS) technology. Today, MEMS sensors are represented by a large variety of types, but the most intensively and dynamically developing are MEMS accelerometers, which are widely applied in different industries.

The development of new MEMS accelerometers and their production technology is associated with a complex scientific and technical task of providing geometric and functional parameters that affect manufacturing technology. The technology of manufacturing MEMS accelerometers combines a variety of modern technological techniques of microelectronics. Their totality forms a set of variants of technological process and their sequences, which cannot be implemented without the use of Aided design systems (CADx).

As a results of analysis the problem of technological process design automation for MEMS accelerometers production it has been determined that the MEMS accelerometer designs depend on the principle of their operation (capacitive, piezoelectric, etc.); the type and structure of the MEMS accelerometer, the technological process structure changes, the number and sequence of stages, technological operations, transitions and equipment;

existing systems of technological process automated designing for MEMS accelerometers production use stochastic methods of decision this problem, which leads to an increase of the technological process design time.

Based on the systematization and classification of parameters, for the first time mathematical model for determining of the MEMS accelerometers analog by functional and structural constraints have been developed. This will allow the formalization and structuring the technological process of MEMS accelerometers production. For this task the MEMS accelerometer parameters formalization according to the criteria of cost and manufacturing time, mass and volume of the MEMS accelerometer was performed.

The model of structural-parametric synthesis of the technological process of MEMS accelerometers production is improved by choosing the best variant of a typical technological process, which allows to obtain the preliminary technological process structure at the different level stages, operations and routes.

The synthesis of the technological process structure is by the selection of typical technological process, operations and equipment. The choice of a typical technological process is based on the criterion of cost, and the choice of operations according to the criteria of cost and execution time. In case of need, more efficient technological equipment can be selected based on the criteria of productivity, energy consumption, cost and service life.

Based on the model of structural-parametric synthesis of technological process for the MEMS accelerometer production the simulation model was developed. The obtained model allows to evaluate the adequacy of the obtained technological process structure and to develop options for improving the efficiency of technological process for each decision.

For the first time a generalized method of aided design of technological process was developed, based on two particular methods: the choice of typical technological process and the search for analogues of technological process individual elements. Such an integrated use of two methods can increase the efficiency of design work at the expense of cost and time.

The method of selecting typical technological process for MEMS accelerometers production by cost and time figures and based on hierarchical clustering method and data mining methods has been improved, which allowed increasing the efficiency of making project decisions.

The developed and improved mathematical models and methods allowed obtaining the aided design systems mathematical, informational support and software, which were implemented in the program module «AcCAM» to solve the problem of technological process automated design for the MEMS accelerometers production.

The practical significance of the results of the scientific work is that on the basis of the proposed mathematical models and methods, the program module «AcCAM» was developed the technological process design automation for MEMS accelerometers production as an integral part of the technological process automated design system.

Key words: microelectromechanical systems (MEMS), accelerometer, technological process, automated design, method.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 0,9. Тир. 100 прим. Зам. № 086-19.
Підписано до друку 18.12.2018. папір офсетний.

Надруковано з макету замовника у ФОП Бровін О.В.
61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корп.1, к.19. Т.(057) 758-01-08, (066) 822-71-30
Свідоцтво про внесення суб'єкта до державного реєстру
Видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.