

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

**БОРТНІКОВА ВІКТОРІЯ ОЛЕГІВНА**

УДК 658.512

**ДИСЕРТАЦІЯ**

МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ  
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ  
МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ

05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт  
технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Підпис В.О. Бортнікова

Науковий керівник

Невлюдов Ігор Шакирович, доктор технічних наук, професор

Цей примірник дисертаційної роботи ідентичний за змістом з іншими, поданими до спеціалізованої вченої ради Д64.052.02.

Вчений секретар спецради Д64.052.02

Підпис  
Печатка

Л.В. Колесник

Харків – 2018

## 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, 2018.

Сучасні тенденції виробництва ґрунтуються на впровадженні нових рішень та технологій Industry 4.0, Internet of Things (IoT), хмарних сервісів, тощо. Застосування таких підходів на підприємстві обумовлено тим, що вони є гнучкими, дозволяють використовувати великі обчислювальні ресурси та їх швидке нарощування. Важливу роль в технології Industry 4.0 відіграють сучасні технічні засоби автоматизації (давачі, виконавчі пристрої, регулятори тощо), які повинні характеризуватися необхідним рівнем точності, параметрами швидкодії, малими масогабаритними характеристиками, високою функціональністю, низькими енергоспоживанням та вартістю. У зв'язку з цим широке застосування знайшли давачі, які виготовлені з використання технологій мікроелектромеханічних систем (MEMS). Сьогодні MEMS класи давачів представлені великою різноманітністю, проте найбільш інтенсивно і динамічно розвиваються MEMS акселерометри, які знайшли своє застосування в різних галузях промисловості.

Розробка нових MEMS акселерометрів і їх технологія виробництва пов'язана зі складною науково-технічною задачею забезпечення геометричних і функціональних параметрів, які впливають на технологію виготовлення, що об'єднує в собі різноманітні сучасні технологічні прийоми мікроелектроніки. Їх сукупність утворює множину варіантів технологічних процесів (ТП) і послідовностей, які неможливо реалізувати без використання систем

автоматизованого проектування (САПР).

За результатами виконання аналізу проблеми автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів визначено, що конструкції МЕМС акселерометрів залежать від принципу їх дії (ємнісні, п'єзоелектричні і ін.); в залежності від типу та структури МЕМС акселерометра змінюється структура ТП, кількість і послідовність етапів, операцій, переходів, обладнання; існуючі системи автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів використовують стохастичні методи вирішення задачі проектування ТП, що призводить до збільшення часу проектування ТП.

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.

Удосконалена модель структурно-параметричного синтезу ТП виготовлення МЕМС акселерометра шляхом вибору найкращого варіанту типового 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.

На основі моделі структурно-параметричного синтезу ТП виготовлення МЕМС акселерометрів розроблено імітаційну модель. Отримана модель дозволяє проводити оцінку структури ТП та надаються рекомендації щодо підвищення ефективності.

Вперше 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. Проведено удосконалення

методу вибору типових ТП виготовлення MEMC акселерометрів за рахунок використання методів ієрархічної кластеризації та інтелектуального аналізу даних. методу вибору типових ТП виготовлення MEMC акселерометрів на основі використання методів ієрархічної кластеризації та методів інтелектуального аналізу даних, що дозволяє знизити вартість і час на проектування

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

*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 MEMC акселерометра-аналога, для якої формалізовано критерії часу і вартості виготовлення, маси та площі MEMC акселерометра та враховано функціонально-конструктивні обмеження, що дозволяє визначити найкращий варіант MEMC акселерометра-аналога для здійснення вибору типового технологічного процесу;

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

*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.

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

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

*Матеріали дисертації* достатньо повно викладено у 29 роботах: з них 8 статей у виданнях, які внесено в переліку фахових видань України з технічних наук, 1 стаття у закордонному науковому виданні, матеріали 19 тез доповідей апробовано на наукових конференціях (3 включені до наукометричної бази SCOPUS) та 1 авторське свідоцтво.

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

#### *Список публікацій здобувача*

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. Невлюдов И.Ш., Евсеев В.В., Бортникова В.О. Разработка программного модуля для автоматизированного проектирования технологического процесса микроэлектромеханических акселерометров // Системи управління, навігації та зв'язку. Полтава, 2015. № 3(35). С. 107-112.

5. 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.

6. 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.

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

8. 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.

9. 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.

10. Бортникова 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. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. Невлюдов И.Ш., Евсеев В.В., Бортникова 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.

18. Невлюдов І.Ш., Бортнікова 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.

19. 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.

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

21. 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.

22. 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.

23. Невлюдов І.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.

24. 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.

25. Бортникова В.О. Методи автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення МЭМС-акселерометрів // 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.

26. 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.

27. Невлюдов И.Ш., Бортникова В.О. Повышение эффективности автоматизованного 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>.

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.

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.

## 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.

Modern production trends are based on the implementation of new solutions and technologies of Industry 4.0, IoT, cloud services, and more. The application of such approaches in the enterprise is because they allow the use of large computing resources, flexibility, rapid buildup of resources and their increase, if necessary. 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.

*Scientific novelty of the obtained results.* The theoretical and experimental researches, given in the dissertation, allowed to solve an important scientific task of automated design efficiency increasing technological processes microelectromechanical accelerometers production.

The new results obtained personally by the author include the following results:

- for the first time a mathematical model for determining of the MEMS accelerometer-analogs was developed, for which the criteria of time and cost of manufacturing, mass and area of the MEMS accelerometer were formalized, and the functional-constructive constraints were taken into account, which allows to determine the best version of the MEMS accelerometer-analogue for the choice of a typical technological process;

- for the first time a generalized method of automated design of manufacturing processes of MEMS accelerometers has been developed, which is based on two partial methods: the choice of typical technological processes and the search for analogues of individual elements of the technological process, which allows obtaining an efficient technological process by reducing the cost and production time;

- the model of structural-parametric synthesis of the technological process of MEMS accelerometers production is improved, which, unlike the known ones, by choosing a typical technological process operations and equipment, allows obtaining the structure of the technological process and, if necessary, to choose more efficient

technological equipment;

– the method of selecting typical technological process for MEMS accelerometers production is improved, which is different from existing the fact that, based on methods of hierarchical clustering and data mining methods, which allows to determine the relationship between functional and constructive indicators MEMS accelerometer-analogue and a typical technological process and to reduce the cost and time for designing.

*Association of the thesis work with scientific research programs, curriculums, topics.* Dissertation work was carried out at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics of the Kharkov National University of Radio Electronics in the period from 2013 till 2016 within the framework of research works: state budget issue No. 277 «Creation of experimental samples components of microsystem technology for industries with intellectual properties and their implementation» (No. 0113U0003582); state budget issue No. 300 «Creation of microminiature components of electromechanical intelligent technological equipment of industrial equipment and robotics» (No. 0115U002433), which executed in accordance with the orders of the Ministry of Education and Science of Ukraine. In the framework of these topics the applicant, as an executor, developed mathematical models, methods and software for solving the problem of increasing the efficiency of designing technological processes for the production of microelectromechanical accelerometers.

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

All mathematical models and methods implemented in the program module «AcCAM», tested and proved their efficiency on the example of solving the test tasks of technological process design automation for MEMS accelerometers production.

The practical use of the obtained results allows, based on the proposed generalized method of technological process design automation for MEMS

accelerometers production to get a technological process and obtain technological documentation in the form of a route map.

The practical significance of the results obtained and the developed automated design module is confirmed by the acts of introduction to production of OOO «Oven», implementation of the Kharkiv National University of Radio Electronics, Zaporozhye National Technical University, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, as well as the author's certificate No. 65348 dated 16.05.16.

*The materials of the thesis* are sufficiently detailed in 29 works: 8 of them are in the publications listed in the list of professional editions of Ukraine on technical sciences, 1 article in foreign scientific journals, 19 theses of reports at scientific conferences (3 are included in SCOPUS science base) and 1 author's certificate.

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

#### *List of publications of the applicant*

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

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

8. 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.

9. 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.

10. Бортникова 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. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. Невлюдов І.Ш., Бортнікова 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.

19. 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.

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

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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.

25. 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.

26. 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.

27. Невлюдов И.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>.

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.

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.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	23
Вступ.....	24
Розділ 1 Огляд і аналіз сучасного стану проблеми автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів.....	30
1.1 Технологічний процес виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів як об'єкт проектування.....	30
1.2 Математичні моделі та методи автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів.....	38
1.3 Огляд систем автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів .....	48
1.4 Постановка мети і задач дослідження.....	52
1.5 Висновки до розділу 1 .....	55
Розділ 2 Математична модель визначення мікроелектромеханічного акселерометра-аналога за функціонально-конструктивними показниками.....	57
2.1 Моделі багатокритеріальної оцінки для прийняття рішень про визначення мікроелектромеханічного акселерометра-аналога.....	57
2.2 Математична модель визначення мікроелектромеханічного акселерометра-аналога .....	59
2.3 Формалізація функціонально-конструктивних показників мікроелектромеханічного акселерометра.....	65
2.4 Висновки до розділу 2.....	86
Розділ 3 Структурно-параметричний синтез технологічного процесу виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів.....	88

3.1 Структурно-параметрична модель технологічного процесу виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів.....	88
3.2 Модель вибору типового технологічного процесу виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів.....	105
3.3 Математична модель вибору операцій.....	107
3.4 Математична модель вибору обладнання.....	108
3.5 Імітаційна модель технологічного процесу виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів.....	112
3.6 Висновки до розділу 3.....	116
Розділ 4 Методи автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів.....	117
4.1 Узагальнений метод автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів.....	117
4.2 Удосконалення методу вибору типового технологічного процесу виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів.....	121
4.3 Дослідження удосконаленого методу вибору типового технологічного процесу виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів.....	127
4.4 Використання методів штучного інтелекту для підвищення ефективності роботи методу вибору типового технологічного процесу.....	137
4.5 Аналіз ефективності удосконаленого методу вибору типового технологічного процесу.....	147
4.6 Висновки до розділу 4.....	149
Розділ 5 Програмний модуль автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів .....	152

5.1 Структура програмного модулю системи автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів .....	152
5.2 Експериментальні дослідження.....	156
5.3 Висновки до розділу 5.....	167
Висновки.....	169
Список використаних джерел.....	172
Додаток А Аналіз значних підходів і технологій, які розроблені провідними фірмами-виробниками мікроелектромеханічних акселерометрів.....	191
Додаток Б Вихідні дані матриці параметрів мікроелектромеханічних акселерометрів.....	194
Додаток В Результати експериментальних досліджень удосконаленого методу вибору типових технологічних процесів .....	203
Додаток Г Результати експериментальних досліджень, які отримані у модулі «AcSAM».....	234
Додаток Д Акти впровадження.....	237
Додаток Е Список опублікованих праць за темою дисертаційної роботи...	247

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- БД – база даних.
- ІМС – інтегральні мікросхеми.
- ІС – інтегральна схема.
- МЕМС – мікроелектромеханічні системи.
- МЕМС акселерометр – мікроелектромеханічний акселерометр.
- МК – маршрутна карта.
- ПМ – програмний модуль.
- САПР (CAD/CAM/CAE) – системи автоматизації проектних робіт.
- СМО – система масового обслуговування.
- СУБД – системи управління базами даних.
- ТЗ – технічне завдання.
- ТО – технологічна операція.
- ТП – технологічний процес.
- ЧЕ – чутливий елемент.
- Bulk micromachining – об'ємна мікрообробка.
- DRIE (Deep Reactive Ion Etching) – глибоке реактивно-іонне травлення.
- Dry etch – сухе травлення.
- IoT (Internet of Things) – інтернет-речей.
- Micromachining – мікрообробка.
- Packaging, assembly – мікрозбірка.
- SOIC (SO) – small-outline integrated circuit.
- SSOP (Shrink small-outline package) – зменшений малогабаритний корпус.
- Surface micromachining – поверхнева мікрообробка.
- THELMA (Thick Epi-Poly Layer for Microactuators and Accelerometers STMicroelectronics и thick silane based deposition) – товсті полікремнієві процеси epi-poly.
- TSOP (Thin Small-Outline Package) – тонкий малогабаритний корпус.

## ВСТУП

*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 роботи і завдання досліджень.* 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 MEMS акселерометрів.

*Методи дослідження.* Проведення досліджень базується на методах математичного та комп'ютерного моделювання, класифікації, обчислювального інтелекту – для розробки узагальненого методу автоматизованого проектування ТП виготовлення MEMS акселерометрів та їх часткових методів; дискретного програмування, оптимізації – для розробки математичної моделі визначення MEMS акселерометра-аналога, вибору технологічних операцій та обладнання; математичної логіки, теорії множин – для формалізації функціонально-конструктивних обмежень параметрів MEMS акселерометрів; теорії графів, математичної логіки, чисельних методах – для розробки структурно-параметричної моделі ТП виготовлення MEMS акселерометрів; методах імітаційного моделювання – для розробки імітаційної моделі ТП виготовлення MEMS 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 MEMS акселерометра-аналога, для якої формалізовано критерії часу і вартості виготовлення, маси та площі MEMS акселерометра та враховано функціонально-конструктивні обмеження, що дозволяє визначити найкращий варіант MEMS акселерометра-аналога для здійснення вибору типового технологічного процесу;

– вперше розроблено узагальнений метод автоматизованого проектування

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

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

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

Практичне значення дисертаційної роботи полягає у тому, що отримані результати можуть бути використані для автоматизованого проектування ТП виготовлення MEMS 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 [2]-[3], [12]-[16], [18], [21], [27], [28] – математична модель визначення МЕМС акселерометра-аналога за функціонально-конструктивними обмеженнями; у [9] – удосконалена модель вибору обладнання; у [4], [22]-[26] – удосконалений метод вибору типових ТП виготовлення МЕМС акселерометрів завдяки використанню методів ієрархічної кластеризації та інтелектуального аналізу даних; у [5], [15], [20] – удосконалена модель структурно-параметричного синтезу ТП виготовлення МЕМС акселерометрів; у [6], [7], [26] – 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 «Радіоелектроніка 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 [1-8] опубліковано в спеціалізованих фахових виданнях України; 1 стаття [9] – у закордонному науковому виданні, 19 тез доповідей на наукових конференціях [10-28] та 1 авторське свідоцтво [29]. Публікації [21], [24], [26] 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.

# РОЗДІЛ 1

## ОГЛЯД І АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ

### 1.1 Технологічний процес виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів як об'єкт проектування

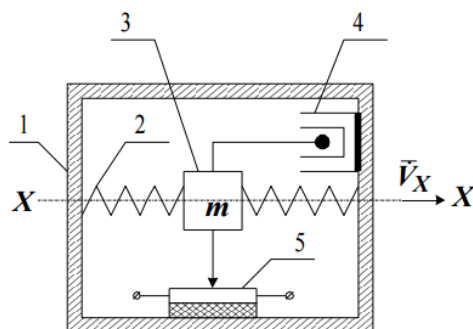
Важливу роль в сучасних технологіях відіграють сучасні технічні засоби автоматизації (сенсори, виконавчі пристрої, регулятори тощо), які повинні забезпечувати необхідний рівень точності, параметри швидкодії, малі масогабаритні характеристики, високу функціональність, низьке енергоспоживання та вартість. У зв'язку з цим широке застосування знайшли давачі, які виготовлені з використання технологій МЕМС [30]-[33].

МЕМС акселерометри є складовою частиною багатьох засобів автоматизації та вирішують широкий спектр задач. Акселерометр – це електромеханічний пристрій, що використовується для вимірювання сил (статичні, динамічні) [34]. У загальному випадку акселерометр являє собою чутливу масу, закріплену в пружному підвісі. Відхилення маси від її початкового положення при наявності уявного прискорення несе інформацію про величину цього прискорення [35]-[36]. На функціональному рівні МЕМС акселерометри вимірюють значення прискорення, вібрації та удару.

Структурно конструкцію акселерометра можна представити за допомогою фізичної моделі: як масу, підвішену на пружині, з'єднаною з основою (рис. 1.1).

Відповідно до визначення основні робочі характеристики МЕМС акселерометра [37]-[42]: максимальний діапазон прискорень; динамічний діапазон амплітуди; чутливість; зміщення нуля; дрейф чутливості; дрейф зміщення; нелінійність; робочий частотний діапазон; резонансна частота;

роздільна здатність; число вимірювальних осей; поперечна осьова чутливість; маса; робочий температурний діапазон; коефіцієнт демпфірування та інші.



1 – корпус; 2 – пружини підвісу; 3 – чутливий елемент (сейсмічна маса); 4 – повітряний демпфер; 5 – потенціометричний перетворювач

Рисунок 1.1 – Структурна схема MEMS акселерометра [35]

До складу всіх MEMS акселерометрів входить спеціальний елемент, що називається інерційною масою або чутливим елементом (ЧЕ) [43]. Незалежно від конструкції MEMS акселерометра його основна функція полягає в детектуванні переміщення маси щодо корпусу пристрою і перетворенні його в пропорційний електричний сигнал. Класифікацію MEMS акселерометрів проводять за способом отримання електричного сигналу при детектуванні руху інерційної маси [44]: ємнісні, п'єзоелектричні, п'єзорезистивні, що використовують ефект Холла, магніторезистивні, теплові, оптичні, тунельні. На рис. 1.2-1.7 представлено деякі з конструкцій MEMS акселерометрів в залежності від способу отримання електричного сигналу при детектуванні руху інерційної маси.

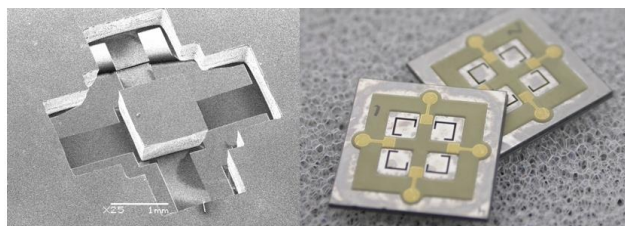


Рисунок 1.2 – Мікрофотографія (зліва) і фотографія (зправа) акселерометрів, розроблених в Датському технічному університеті [45]

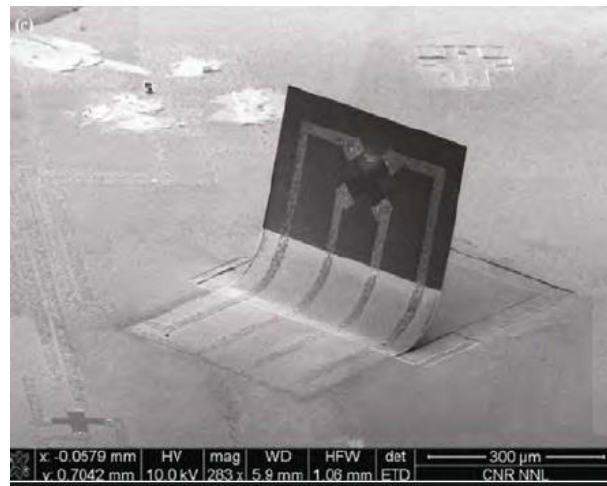


Рисунок 1.3 – MEMС сенсор на ефекті Холлу, розроблений Todaro et al [46]

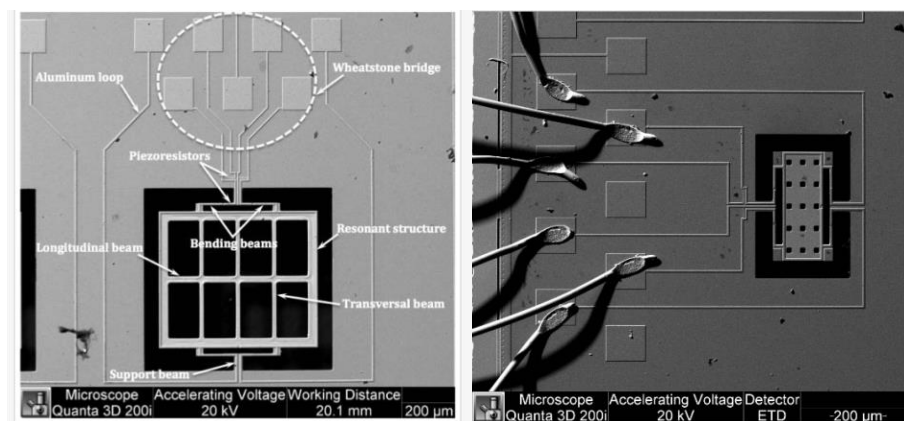


Рисунок 1.4 – ЧЕ MEMС акселерометра, розроблений групою вчених [47]

П'єзоелектричні акселерометри мають широкий частотний діапазон вимірювання (від кількох Гц до 30 кГц) та діапазон чутливості, а також випускаються в різних розмірах та формах. Вихідний сигнал п'єзоелектричних акселерометрів може бути зарядовим (Кл) чи по напрузі. Давачі можуть використовуватися для вимірів, як удару, так і вібрації. П'єзоелектричний акселерометр, в залежності від типу вихідного сигналу, розділяють на: з зарядовим виходом та з вбудованим перетворювачем сигналу з виходом по напрузі [44].

П'єзорезистивні акселерометри мають малий діапазон чутливості, тому вони більш підходять для детектування ударів та випробування на безпеку при зіткненні, менш для визначення вібрації. В більшості своїй п'єзорезистивні



акселерометри відрізняються широким діапазоном частот (від кількох сотень Гц до 130 кГц та більше), при цьому частотна характеристика може сягати 0 Гц (давачі постійного струму) чи залишатися незмінною, що дозволяє вимірювати сигнали великої тривалості [45].

Ємнісні акселерометри відрізняються високою чутливістю, вузькою смугою пропускання (від 15 до 3000 Гц) та температурною стабільністю. Похибка чутливості в повному температурному діапазоні до 180°C не перевищує 1,5 %. Акселерометри на змінних конденсаторах використовуються для вимірювань низькочастотної вібрації, руху та фіксованого прискорення [44]-[45].

Таким чином, з точки зору конструкції можливо представити MEMS акселерометр як складну систему, яка складається з компонентів (наприклад, пружина, інерційний елемент), які в свою чергу складаються з елементів (наприклад, балка, пластина, анкер). На рис. 1.5 представлено структурну модель MEMS акселерометра як складної системи. Найбільш поширеними типами MEMS акселерометрів є п'єзоелектричний, п'єзорезистивний, ємнісний.

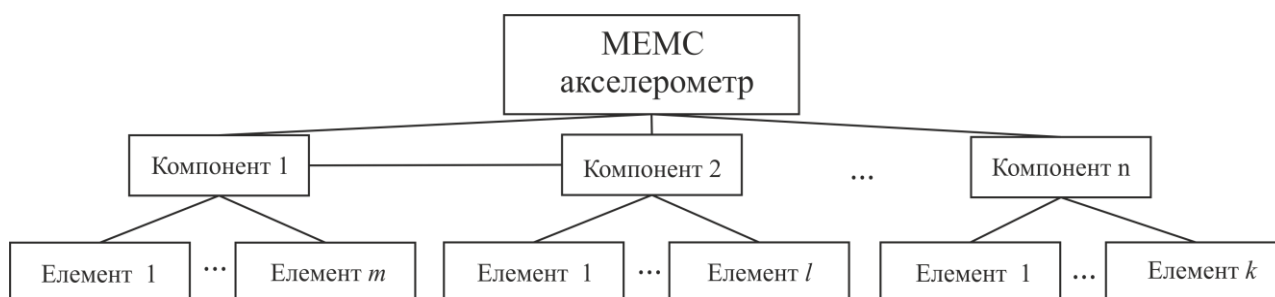


Рисунок 1.5 – Структурна модель MEMS акселерометра

MEMS акселерометри мають порівняно малі розміри, витрати на матеріали, виробничі витрати, але незважаючи на це накладаються особливі вимоги на чистоту матеріалів. Виробниче обладнання повинно відповідати високої точності (похибка не більш 0,000001 мк), обслуговування та контролю технологічних операцій (керування виробничим процесом, контроль над нанесенням покриття).

Аналізуючи ТП виготовлення MEMS акселерометрів, визначено, що їх

можливо представити у вигляді послідовності окремих етапів, деякі з яких можуть повторюватися багато разів. Схема виготовлення MEMC акселерометра представлена на рис. 1.6.

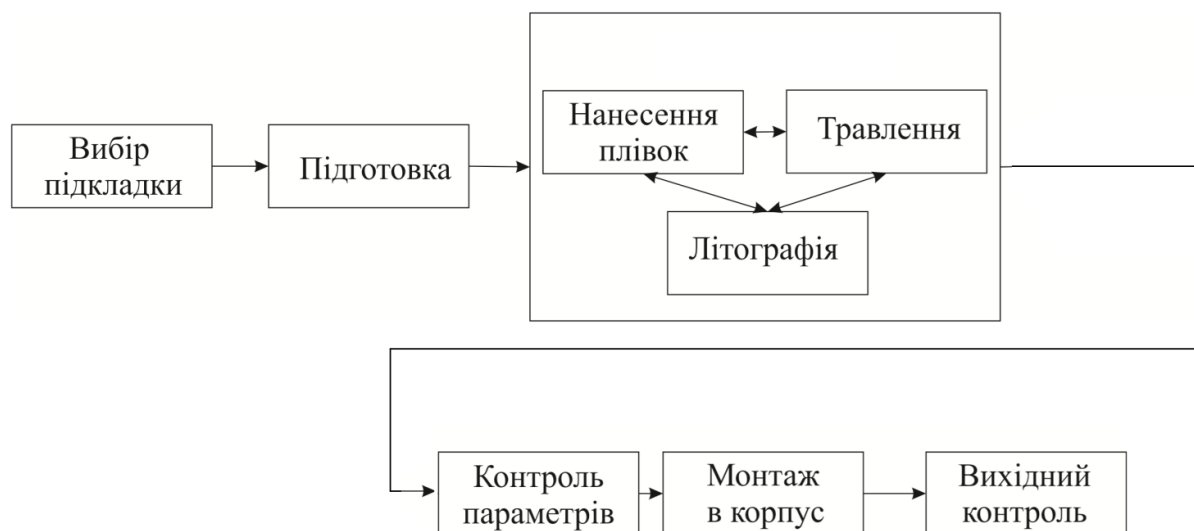


Рисунок 1.6 – Схема етапів ТП виготовлення MEMC акселерометрів

На основі проведеного аналізу патентів фірм, що спеціалізуються на виготовленні MEMC акселерометрів, таких як: Freescale semiconductor, Inc. [48]; Analog Devices, Inc. [49]; Motorola Inc. [50]; Bosch Sensortec GmbH [51]; Kionix, Inc. [52]; STMicroelectronics [53]; Delphi Corporation [54]; PCB Piezotronics, Inc. [55]; Silicon Designs [56]; Memsc [57] тощо, виділено ряд особливостей, значущих підходів і технологій (додатку А у табл. А.1).

Можна зробити висновок, що існує багато технологій для виготовлення MEMC акселерометрів, а при реалізації ТП необхідно оперувати більшими масивами даних (параметрами операцій, переходів тощо).

ТП виготовлення MEMC акселерометра є об'єктом відповідного проектного рішення, призначеного для наступної реалізації у виробництві.

Слід враховувати, що ТП виготовлення MEMC акселерометрів є досить складним та може містити більш 250 технологічних операцій (ТО). З урахуванням того, що вибір технології залежить від багатьох параметрів та факторів, процес проектування ТП виготовлення MEMC акселерометрів можна

представити у вигляді «сірої» скрині, яка має вектор вхідних параметрів  $a_1, a_2, \dots, a_n$  та вектор вихідних параметрів  $b_1, b_2, \dots, b_m$  (рис. 1.7).

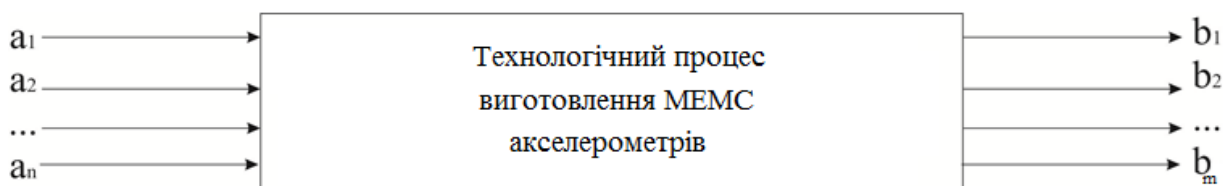


Рисунок 1.7 – ТП виготовлення МЕМС акселерометрів

Обмеження, які накладаються на параметри ТП виготовлення МЕМС акселерометра:

$$[A]_{\min}^n < a_n < [A]_{\max}^n,$$

$$[B]_{\min}^n < b_m < [B]_{\max}^n,$$

де  $a_n, b_m$  – параметри, які обмежують;

$[A]_{\min}^n, [A]_{\max}^n, [B]_{\min}^n, [B]_{\max}^n$  – граничні значення обмежень параметрів.

До вектора вхідних параметрів ТП (характеристики заготовки) виготовлення МЕМС акселерометрів відноситься повний набір документів, необхідний та достатній для реалізації ТП.

До вектора вихідних параметрів ТП (характеристика МЕМС акселерометра) відносяться значення параметрів, які є результатом виконання тієї чи іншої ТО ТП виготовлення МЕМС акселерометра, тобто є параметрами-показниками, що характеризують успішність, ефективність, а також за необхідності сигналізують про зміни в умовах протікання ТП для успішного усунення невідповідностей на ранніх стадіях їх виявлення. Значення векторів в вихідних параметрів повинно відповідати заданим параметрам у технічному завданні (ТЗ) на розробку МЕМС акселерометра.

Однак вектор вихідних параметрів  $B$  значно перевищує вектор вхідних параметрів  $A$ , бо в процесі проектування ТП генерується нова інформація.

Проведемо аналіз етапу отримання ЧЕ МЕМС акселерометра як один з найскладніших та працемістких, на прикладі отримання ЧЕ п'єзоелектричного МЕМС акселерометра. Вхідною інформацією для проектування етапу отримання ЧЕ є 3D-модель ЧЕ МЕМС акселерометра (рис. 1.8).

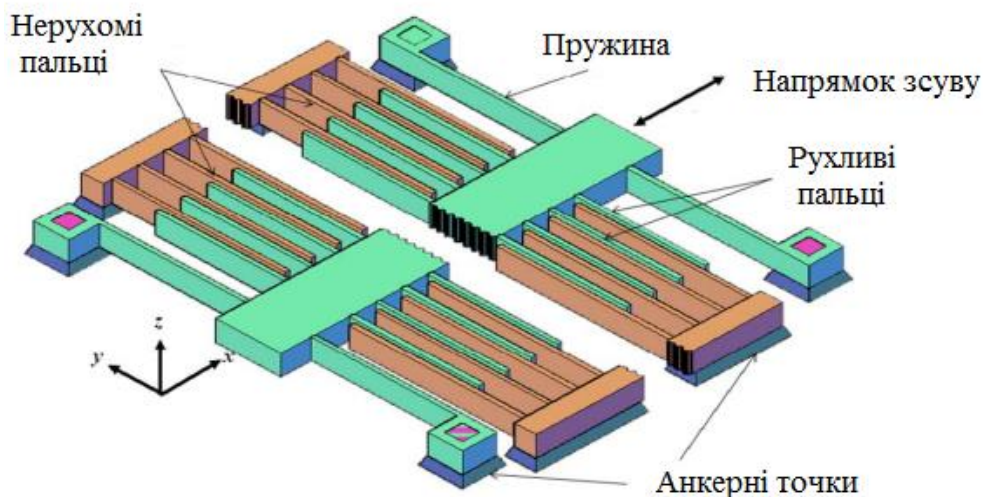


Рисунок 1.8 – 3D-модель ЧЕ МЕМС акселерометра, розроблена групою вчених [58]

Всі ТО мають проводитися паралельно, щоб на виході можна було скласти ЧЕ (рис. 1.9). Таким чином, етап отримання ЧЕ складається з декількох паралельних операцій отримання різних елементів ЧЕ. Кількість операцій залежить від типу ЧЕ та його складності, а також компонентів, які входять до нього.

Для того, щоб визначити вхідні та вихідні параметри всередині етапу отримання ЧЕ, розглянемо ТО, що відносяться до отримання чутливої маси ЧЕ МЕМС акселерометра. Для отримання чутливої маси ЧЕ МЕМС акселерометра можна виділити основні 12 ТО, які представлені на рис. 1.10.

Тоді для кожної ТО можна визначити обладнання та параметри, які необхідні для її виконання. Обладнання може бути використане для кількох операцій. Наприклад, для ТО термічного окислення кремнію (Si), необхідно провести окислення Si в дифузійній печі при температурі близькій 950°C. Таким

чином, необхідно підібрати таку дифузійну піч, що здатна забезпечити температуру 950°C.

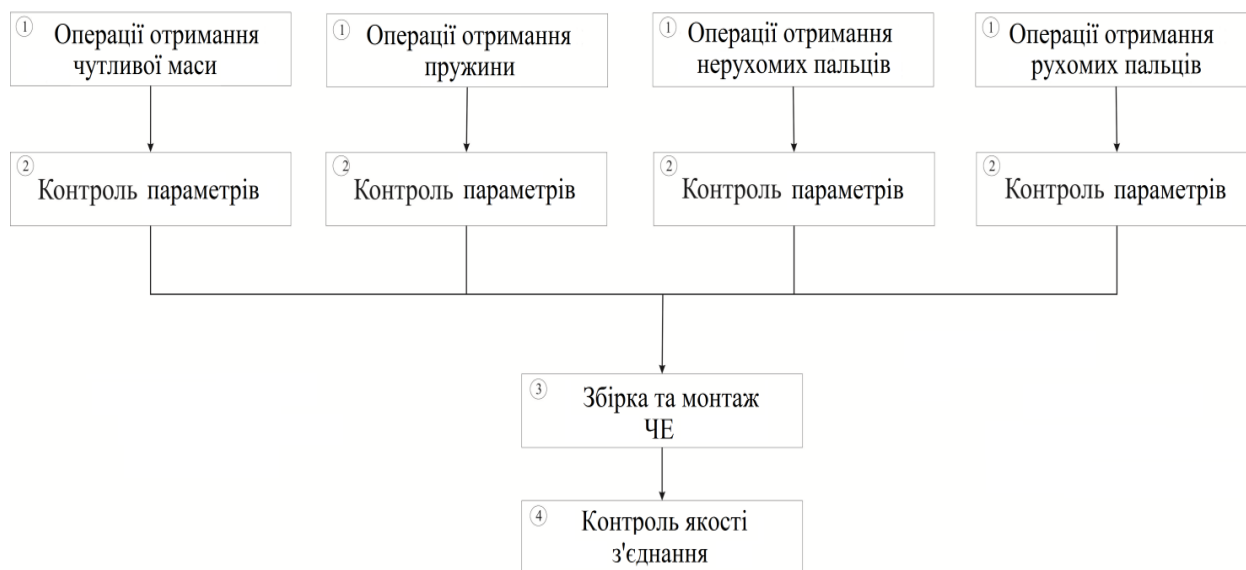
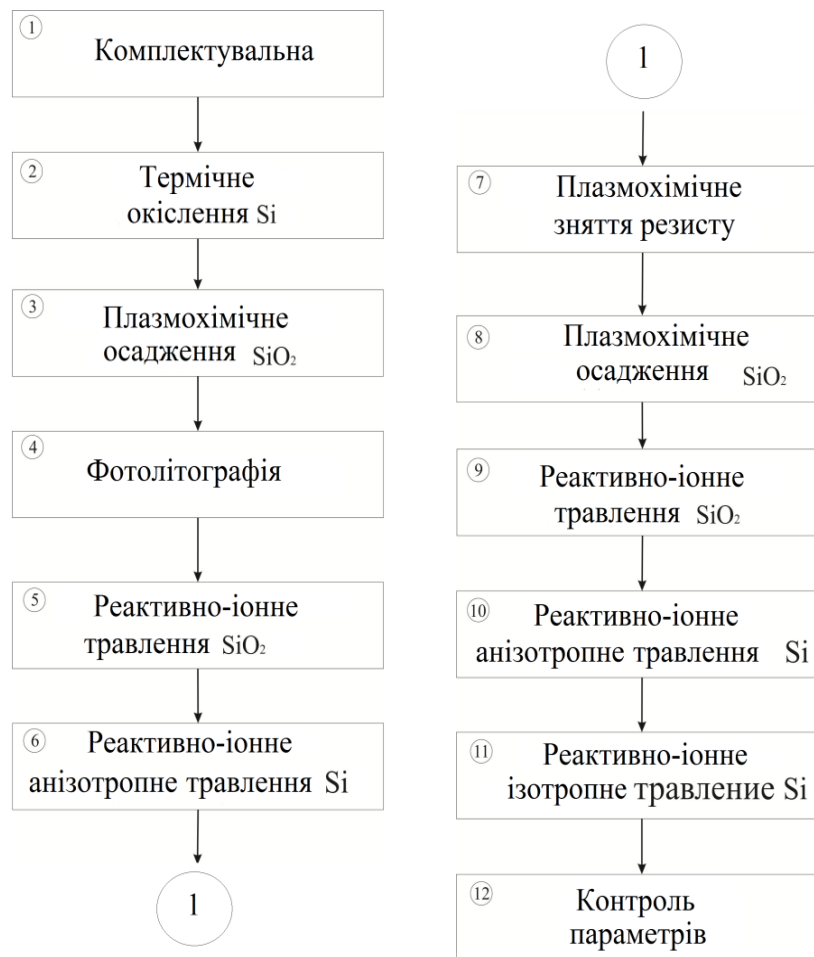


Рисунок 1.9 – Етап отримання ЧЕ МЕМС акселерометра

Таким чином, сучасні дослідження направлено на моделювання та розробку нових конструкцій МЕМС акселерометрів для ефективного використання їх фізичних властивостей, що пов'язано як з особливостями конструкції ЧЕ, так і конструкції готового давачу. Розробка нових МЕМС акселерометрів і їх технологія виробництва пов'язані зі складною науково-технічною задачею розробки ТП виготовлення з урахуванням вимог забезпечення геометричних і функціональних параметрів.

Одним з альтернативних варіантів розробки ТП є розробка нового математичного, інформаційного та програмного забезпечення, для автоматизованого проектування.

Для вдосконалення існуючих та розробки нових методів і математичних моделей, необхідно провести огляд і аналіз математичних моделей та методів автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів, що використовуються на практиці.



Рисунку 1.10 – ТО отримання чутливої маси ЧЕ п'єзoeлектричного MEMC акселерометра

## 1.2 Математичні моделі та методи автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів

В ході проведеного аналізу літератури [43], [59]-[109] визначено, що у розвиток методології розробки САПР в різних галузях внесли: Горанський Г.К., Цветков В.Д., Норенков І.П., Капустін Н.М., Аверченков В.І., Митрофанов С.П., Петренко А.І.

Рішенням задач системного проектування присвячені роботи таких вчених: Безкорвайного В.В., Петрова Е.Г., Нефьодова Л.І., Тимченка А.А., Семенця В.В., Стояна Ю.Г. та ін.

Внесок у розробки САПР MEMC внесли вітчизняні та зарубіжні наукові

школи під керівництвом: Schwarz P., Du H., Gupta K., Bracewell R., Xu C.X., Chakrabarti A., Zha X.F., Невлюдов І.Ш., Лобур М.В. – методології та програмне забезпечення для МЕМС; Wang C., Olsson A., Stemme G., Lee C., Gupta A., Liu C., Лучинін В.В., Лисенко І.Е., Таїров Ю.М., Корляков А.М., Клімов Д.М. – конструкції елементів МЕМС та їх математичні моделі; Bechtold T., Feng L., Rudnyi E.B., Korvink J.G., Dewey A., Петренко А.І., Ладогубяць В.В. – розробка методів зменшення розмірності та засобів побудови макромоделей; Peterson K., Bustillo J., Muller R., Ikuta K. – технології мікротоворення.

Науково-технічні розробки в цій галузі здійснюються в США, Німеччині, Японії, Росії, Польщі, Україні та в інших країнах.

При автоматизованому проектуванні ТП виготовлення МЕМС акселерометрів повинна вирішуватися задача проектування структури ТП. Враховуючи, що ТП є складним об'єктом проектування, то для його розробки може бути використано багаторівневе проектування «знизу догори», «згори донизу», паралельне їх поєднання, наскрізне тощо. Враховуючи специфіку конструкції МЕМС акселерометрів частіше всього використовують змішаний варіант проектування.

Для виготовлення МЕМС акселерометра можуть бути спроектовані різноманітні ТП, що відрізняються техніко-економічними показниками, витратами на виготовлення і продуктивністю. Отже, проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів можна розглядати як багатоваріантне завдання.

Послідовність проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів можна представити у вигляді вертикальних рівнів – етапів проектування, упорядкованих умовою співвідпорядкованості, а на кожному з таких рівнів виділити взаємопов'язані підсистеми, що описують різні сторони процесу проектування. Багаторівневий процес проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів представлено на рис. 1.11.

Тобто, задача проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометра відноситься до задач системного проектування [73]. Для вирішення поставленої

задачі використовуються математичні моделі, в яких відображено деякі специфічні властивості ТП, що можуть бути представлені у вигляді змінних, множин, графів, матриць тощо. Математичні моделі можуть бути структурно-логічними та функціональними, які найбільш повно описані в таких роботах вчених: Горанського Г.К [74], [75]; Цветкова В.Д. [76], [77]; Норенкова І.П. [73], [78]; Капустіна Н.М. [79]; Аверченкова В.І. [80]. Ці моделі можливо розділити на типові моделі (мережеві, перестановки) і спеціальні моделі (мережі Петрі, штучні нейронні мережі, граф-дерева і тощо.).

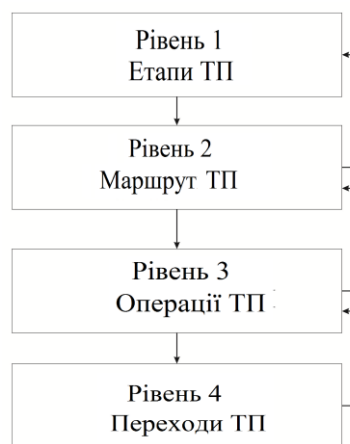


Рисунок 1.11 – Рівні проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів

Методи автоматизованого проектування можна поділити на методи синтезу (сходячого, низходячого), прямого проектування та методи адресації (на основі одиничних ТП, на основі уніфікованих ТП).

Для автоматизованого проектування технологічних процесів може бути використано один з класичних методів:

- метод повторного використання одиничних ТП (найбільш детально описаний Цветковим В.Д.) [76]-[77];

- метод уніфікованого технологічного процесу (найбільш повно викладено в роботах Горанського Г.К., Капустіна Н.М., Митрофанова С.П.) [74]-[77], [81]-[82];

- метод синтезу ТП (Цветков В.Д.) [76]-[77].

Задача автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС



акселерометрів відноситься до задач структурно-параметричного синтезу. В результаті структурно-параметричного синтезу повністю і однозначно визначаються структура ТП і значення параметрів, що описують їх властивості [83]. Структура ТП  $S$  є множиною елементів (етапів, операцій, переходів) і зв'язків між ними [84], [117]:

$$S = \langle A, R \rangle, \quad (1.1)$$

де  $A$  – множина елементів;

$R$  – множина зв'язків між елементами з  $A$ .

Структура ТП є ієрархічною, тобто розкладеною на окремі елементи або рівні (рис. 1.11). На одному рівні елемент представляється неподільним, а на нижчих рівнях він може бути розкладений на окремі елементи. Справедливо і зворотне, коли певний елемент, який має структуру на більш високих ієрархічних рівнях, виступає як неподільний елемент [85].

У загальному вигляді задача структурного синтезу полягає у визначенні певного виду структури ТП. Для вибору варіанта необхідно мати правило, яке служить для порівняльної оцінки якості варіантів – критерій. Отриманий варіант структури ТП характеризується деяким вихідним параметром або їх сукупністю; відповідно розрізняють частковий і узагальнений критерії.

Структура ТП може бути представлена за допомогою теорії графів [86]:

$$G = (E, R), \quad (1.2)$$

де  $E = (e_1, e_2, e_3, \dots, e_t)$  – множина елементів структури ТП;

$t$  – кількість елементів структури ТП;

$R = (r_1, r_2, r_3, \dots, r_s)$  – множина зв'язків між елементами структури (ребрами);

$s$  – кількість зв'язків між елементами структури.

Зв'язки між елементами структури описують за допомогою матриці інцидентності або матриці суміжності [87].

Для вирішення задачі вибору варіанту ТП з множини відомих за заданими критеріями використовують такі методи [88]-[90]:

- методи дискретної оптимізації;
- метод структурної оптимізації на мережевих графах;
- мережевий метод;
- методи кластерного аналізу;
- методи структурної оптимізації технологічних процесів за допомогою методів штучного інтелекту;
- методи вибору Парето-оптимальних рішень і структурної оптимізації технологічних процесів за допомогою каскадних нейронних мереж.

Методи дискретної оптимізації застосовуються для вирішення завдання вибору структури ТП і зв'язків між його елементами [88]-[89]. Завданням дискретної оптимізації є завдання дискретного програмування з булевими змінними [90]:

$$D_j = \{0;1\}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (1.3)$$

Метод структурної оптимізації на мережевих графах дозволяє вибирати оптимальний або найбільш раціональний варіант ТП з представленого кортежу [91], [92]. Тобто рекомендується варіант ТП максимально наближений до оптимального за заданим критерієм.

Мережевий метод, вважається з точки зору часу використання ЕОМ швидкодіючим, разом з тим залишається працезатратним в умовах наявності великої кількості критеріїв оптимізації для складних мережевих технологічних графів, де потрібно здійснювати багатокритеріальну оптимізацію [93].

Методи кластерного аналізу можливо використовувати для групування МЕМС акселерометрів з типовими ТП. Кластерний аналіз дозволяє здійснити автоматичне розбиття МЕМС акселерометрів на групи (кластери) за принципом схожості ТП. Методи кластерного аналізу, які можливо використовувати для класифікації і групування МЕМС акселерометрів на класи, види, групи або типи.

Узагальнена схема роботи методів кластерного аналізу [94]:

- підготовка даних;
- вибір міри схожості об'єктів (метрики відстаней);
- вибір методу кластерного аналізу, який буде використано для отримання розбиття на кластери;
- реалізація методу і побудова моделі даних у вигляді кластерного рішення;
- інтерпретації даних.

За результатами роботи методів отримуються необхідні знання і правила для подальшої роботи з новими об'єктами. На основі цих знань і правил, можливо визначати належність об'єктів до певного кластеру.

Всі методи кластерного аналізу діляться на ієрархічні і неієрархічні [95]. Ієрархічні методи поділяються на алгомеративні, дивізійні та концептуальні. Неієрархічні методи поділяються на інтерактивні, густинні, модальні, мережеві. Для класифікації MEMS акселерометрів зі схожими ТП доцільніше використовувати методи ієрархічної кластеризації.

У алгомеративних методах [96] кожен об'єкт спочатку заноситься в окремий кластер, по мірі виконання алгоритму кластери об'єднуються, поки не виходить єдиний кластер, який включає в себе всі вихідні об'єкти. Прикладами даних методів є метод найближчого сусіда, метод одиночного зв'язку, метод Ward, метод CURE [94], [97]-[99].

У дивізійних методах на початковому етапі всі розглянуті об'єкти визначаються в один єдиний кластер [100]. Після цього виконується поділ кластера на підставі обраної міри схожості. Поділ триває до тих пір, поки кожен об'єкт не буде визначено в окремий кластер. Прикладом даних методів є мінімальні костікові дерева (Minimum Spanning Trees), метод BIRCH [97], [101]-[102].

У концептуальних методах кожен кластер представляється у вигляді концепту, а на виході формується ієрархічне дерево [103]. Прикладами даних методів є метод COBWEB, метод UNIMEM, метод ITERATE [96], [104]-[105].

Результат роботи ієрархічного методу можна представити у вигляді

класифікаційного дерева або дендрограми (рис. 1.12). Дендограма показує, в якому напрямку відбувається кластеризація об'єктів [96].

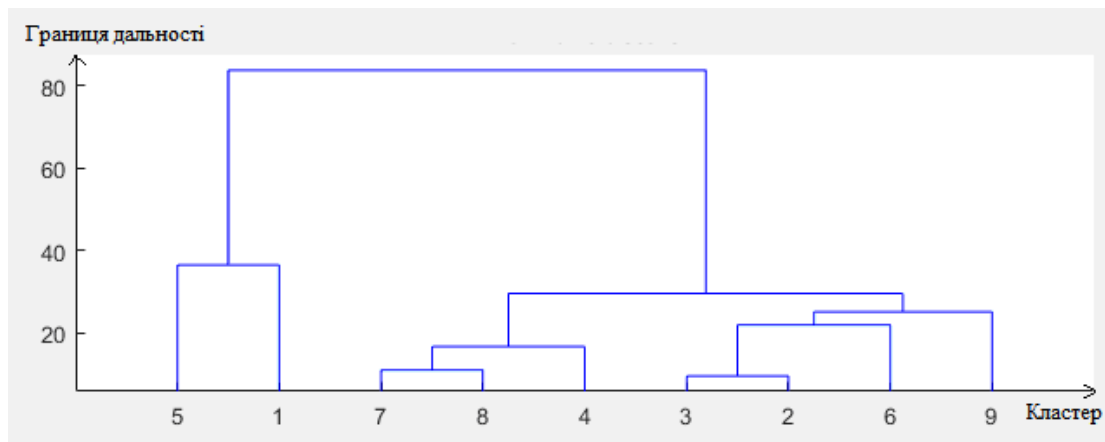


Рисунок 1.12 – Дендограма

Для кожного методу розбиття на кластери використовуються різні методи розрахунку відстаней між об'єктами усередині них, такі як [94]: Евклідова, нормалізована, Махаланобіса, Манхеттенська, Мінковського, косинусна, кореляційна відстань, Хеммінга та Жаккара.

Методи штучного інтелекту також можливо використовувати для структурної оптимізації ТП. Найчастіше застосовують рекурентні нейронні мережі Хопфілда, Елмана, Жордана, а також методи нечіткої логіки і генетичні алгоритми та методи машинного навчання (Machine Learning) [106]. Використовувались такі методи: дерево рішень (Complex Tree) [107]-[108]; різні методи опорних векторів (SVM – support vector machine) [109]-[110]; метод  $k$ -найближчих сусідів (KNN – k-nearest neighbors algorithm) і його різновиди: середній (Medium KNN), зважений (Weighted KNN), площинний/просторовий (Subspace KNN) [111]-[113], комбіновані методи («бустинг» (Boosted Trees) [114]-[115], «беггинг» (Bagged Trees) [115], модифікація «бустингу» (RUS Boosted Trees) [111]), площинний/просторовий дискримінант (Subspace Discriminant) [116].

Формально постановка задачі класифікації методами машинного навчання: нехай  $X$  – множина даних (MEMС акселерометрів), а  $Y$  – кінцева множина класів

(МЕМС акселерометри, що класифіковані за схожими ТП). Існує невідома цільова залежність – відображення  $y^*: X \rightarrow Y$ , значення якої відомі тільки на кінцевій навчальній вибірці  $X_m = \{(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)\}$ . Потрібно побудувати алгоритм  $a: X \rightarrow Y$ , де  $x \in X$ .

Головною перевагою використання методів машинного навчання є можливість навчання. В процесі навчання визначають складні залежності між вхідними даними і вихідними, а також виконується їх узагальнення. Це означає, що в разі успішного навчання модель зможе видавати вірний результат на підставі даних, які були відсутні в навчальній вибірці.

У загальному випадку задача класифікації за допомогою методів машинного навчання складається з 4 кроків.

1. Отримання і обробка даних.
2. Вибір методу і метрик для класифікації.
3. Оцінка точності і ефективності навченої моделі.
4. Тестування моделі на нових даних.

Застосування методів багатокритеріальної оптимізації дозволяють визначити найліпші варіанти ТП за різними показниками (критеріями). Найчастіше критеріями виступають штучно-калькуляційний час  $T$  і загальні витрати  $C$  на виконання операцій (рис. 1.13).

Оцінку цінності рішення за кожним критерієм слід проводити за допомогою функції корисності виду [117]-[122]:

$$\zeta(x) = \left( \frac{k_j(x) - k_j^-}{k_j^+ - k_j^-} \right)^{\alpha_j}, \quad (1.4)$$

де  $k_j(x)$  – поточне значення  $j$ -го часткового критерію;

$k_j^-$  – найгірше значення  $j$ -го часткового критерію;

$k_j^+$  – найліпше значення  $j$ -го часткового критерію;

$\alpha_j$  – показник нелінійності, (при  $\alpha_j = 1$  лінійна залежність, при  $0 < \alpha_j < 1$  – опукла залежність, при  $\alpha_j > 1$  – увігнута залежність).

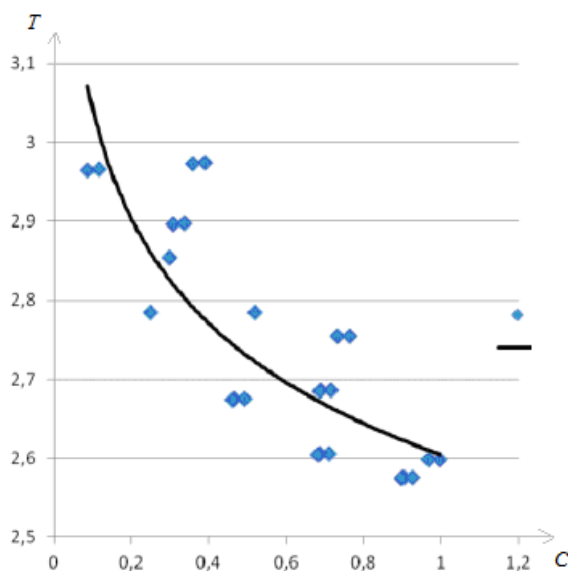


Рисунок 1.13 – Залежність сумарного часу і приведених витрат виконання ТП [92]

При відомому значенні вагових коефіцієнтів, вибір найкращого рішення за частковими критеріями виконується за максимальною адитивною корисністю [117]-[118]:

$$W(x^o) = \max \sum_{j=1}^{j'} \lambda_j \zeta_j(x),$$

де  $\lambda_j$  – відносна важливість критеріїв, виражена вектором вагових коефіцієнтів  $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_j\}$ .

Коли відомо ранжування за важливістю часткових критеріїв собівартості та часу виконання операцій:

$$k_1(x) \succ k_2(x) \succ \dots \succ k_n(x),$$

тоді вибір найліпшого варіанту виконується послідовно [117]:

$$W^*(x^0) = \max \zeta_j(x).$$

При відсутності інформації про важливість часткових критеріїв вибір найкращого рішення проводиться за максимінною або мінімаксною схемою компромісу [117].

Але слід зауважити, що в роботі [123] запропоновано модифіковану функцію корисності часткових критеріїв побудованих на основі поліному Колмогорова-Габора:

$$\zeta(x) = \begin{cases} \bar{a} \cdot (b_1 + 1) \cdot \left( 1 - \left( b_1 / \left( b_1 + \frac{\bar{k}(x)}{\bar{k}_a} \right) \right) \right), & 0 \leq \bar{k}(x) \leq \bar{k}_a \\ \bar{a} + (1 - \bar{a})(b_2 + 1) \cdot \left( 1 - \left( b_2 / \left( b_2 + \frac{\bar{k}(x) - \bar{k}_a}{1 - \bar{k}_a} \right) \right) \right), & \bar{k}_a < \bar{k}(x) \leq 1, \end{cases} \quad (1.5)$$

де  $b_1, b_2$ , – коефіцієнти, які визначають форму залежності від початкового та кінцевого сегментів функції.

Ця функція порівняно з відомими має ряд переваг: потребує менше часу для розрахунку значень та вищу точність. Таким чином, можна виконати постановку задачі: відома множина допустимих рішень  $X$  (ТП), яка може бути задана або отримана (типові ТП).  $X$  – це математична модель проєктованого ТП, що представляє собою формальний опис множини варіантів структури ТП на даному рівні деталізації (етапах, операцій, переходів).

Визначимо дві основні проблеми, які необхідно вирішувати при формалізації задач структурного синтезу ТП:

- визначення типу та структури МЕМС акселерометра-аналога (для вирішення задачі класифікації за схожими ТП);
- отримання математичної моделі ТП;

- конструювання цільової функції і формування обмежень;
- вирішення задачі визначення структури ТП.

Для практичної реалізації математичних моделей та методів автоматизованого проектування ТП виготовлення MEMC акселерометрів необхідно провести аналіз САПР.

### **1.3 Огляд систем автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів**

Важливою складовою розробки MEMC акселерометрів є САПР. Ці системи забезпечують ефективність розробки, яка залежить від правильності вибору матеріалу конструкції, розробки 3D-моделі конструкції, підбору та оптимізації параметрів окремих елементів, проектування, вибору технології та організації виробництва MEMC. Через складності технологічних процесів, багатофакторних умов конструкції, параметрів обладнання та великого обсягу їх значень – розробка САПР MEMC акселерометрів є складною та працезатратною задачею, яка потребує унікальних та специфічних рішень для цієї галузі виробництва.

Сучасні САПР для MEMC акселерометрів, представлені широким різноманіттям для вирішення задачі моделювання та розрахунків. Використовуються CAD/CAE, а для автоматизованої підготовки виробництва – CAM, в тому числі для автоматизації технологічних процесів виготовлення MEMC.

Серед CAD/CAE для MEMC акселерометрів можна виділити:

- системи універсального кінцево-елементарного моделювання: ANSYS [124], COMSOL [125], FlexPDE [126], ALGOR [127], ABAQUS [128], MEMCAD [129], які вирішують задачі, пов'язані з моделюванням та аналізом різних параметрів: механічних, теплових, електромагнітних, гідродинамічних (аеродинамічних), а також міждисциплінарний аналіз та аналіз руйнування матеріалів;

- для моделювання елементів MEMC акселерометрів методом вузлового аналізу MATLAB/SUGAR [130]-[131];

- для проведення інженерних розрахунків, інтегрована з CAD SolidWorks –



COSMOSWorks [132], зі спеціалізованим інструментом для MEMC пакетом «MICROSYS».

Разом з тим універсальні CAD/CAE, призначені для рішення науково-дослідницьких та інженерних задач, не охоплюють увесь спектр проблем, пов'язаних з розробкою MEMC акселерометрів. В повній мірі вирішення задач з об'єднання етапів моделювання та проектування у єдиний цикл, оптимізації параметрів, врахування особливостей технології мають лише деякі спеціалізовані пакети.

Невід'ємною частиною розробки MEMC акселерометрів є формування ТП виготовлення через використання спеціалізованих програмних пакетів. На сьогоднішній день розроблено ряд спеціалізованих програмних комплексів та засобів проектування ТП з різними функціональними можливостями, системними вимогами та вартістю:

- спеціалізований програмний пакет MEMS Pro [133]. Функціональні можливості MEMS Pro: схемний редактор, схемне моделювання, бібліотека компонентів для схемного редактора, зв'язок електричної схеми та топології, топологічний редактор, робота з шарами масок, робота з шарами матеріалів, що наносяться, бібліотека шарів, бібліотека процесів, візуалізація 3D-моделі, покроковий перегляд результатів технологічного процесу на 3D-моделі, створення перетинів 3D-моделі, вбудована функція збереження зображення 3D-моделі;

- спеціалізований програмний засіб пакет CoventorWare [124]. Функціональні можливості CoventorWare: чіткий порядок проектування, схемний редактор, схемне моделювання, бібліотека компонентів для схемного редактора, зв'язок електричної схеми та топології, топологічний редактор, робота з шарами масок, бібліотека процесів, перегляд повного технологічного процесу (таблиця), редактор 3D-моделі, візуалізація 3D-моделі, створення перетинів 3D-моделі, бібліотека матеріалів, задання матеріалів для кожного шару в технологічному процесі, побудування сітки, моделювання фізичних процесів; також має окремий пакет MEMS+, який являє собою спеціалізований програмний продукт, призначений для розробки MEMC в тісній інтеграції з потоком проектування інтегральних

мікросхем компанії Cadence [135];

- програмний комплекс IntelliSuite [136] призначено для розробки, моделювання та оптимізації MEMC пристроїв;

- система «ПроМІС-MEMC» [68] призначена для аналізу технологічних маршрутів, процесів та операцій виготовлення MEMC, а також моделювання та дослідження ТО іонного травлення та іонної імплантації за допомогою метода Монте-Карло, моделювання ТО осадження, аналіз та дослідження фізичних процесів в технологічному обладнанні, розроблена в «Львівській політехніці» Теслюком В.М.

Пакет MEMC Pro належить до спеціалізованих програмних засобів, призначених для розробки MEMC. Цей пакет дозволяє повністю охопити весь цикл проектування пристроїв MEMC від формування початкової концепції до створення топології та моделювання технологічного процесу.

Перевагою цього програмного забезпечення, з точки зору розробника MEMC, є його спрямованість на проблемну галузь. Однак функціональні можливості MEMS Pro в значній мірі визначаються набором покладених в його основу інструментальних засобів компанії Tanner EDA [137], призначених для проектування інтегральних мікросхем. Одним з наслідків цього є необхідність використання зовнішніх пакетів чисельного моделювання для дослідження фізичних процесів в розроблених за допомогою MEMS Pro. В базовому варіанті таким пакетом є ANSYS.

Пакет CoventorWare охоплює весь процес проектування MEMC – від первинної концепції аналізу до розробки параметрів корпусування та екстракції поведінкових моделей для моделювання системи. CoventorWare є проблемно-орієнтованою системою, що надає розробнику широкий спектр інтегрованих засобів проектування MEMC – від аналізу загальної концепції до розробки технології виготовлення, визначення параметрів корпусування та екстракції поведінкових моделей.

До складу CoventorWare входять наступні програми: середовище розробки проектів MEMC на основі поведінкових моделей; інструмент топологічного

проектування; набір модулів фізичного моделювання. Одним з компонентів CoventorWare дозволяє здійснювати створення та експорт макромоделей для системного моделювання. Використання макромоделей дозволяє вести розробку MEMC на системному рівні за допомогою систем аналізу високого рівню Synopsys Saber та Cadence Virtuoso.

Комплекс IntelliSuite містить широкий набір інструментальних засобів для розробки MEMC широкого призначення. Він дозволяє проводити проектування термомеханічних систем, п'єзодавачів, електромагнітних та рентгенівських перетворювачів, біо-MEMC та мікроканалних пристроїв. Спектр задач, вирішуваних комплексом, охоплює основні етапи проектування та підготовки виробництва пристроїв MEMC.

Результати аналізу САПР, які використовуються у автоматизованому проектуванні MEMC акселерометрів представлено в табл. 1.1 [68], [124]-[137].

Таблиця 1.1 – Огляд САПР для MEMC акселерометрів

САПР Функції	MEMS Pro	CoventorWare	IntelliSuite	ПроMIC-MEMC
Методи	Стохастичні			
Певний порядок проектування	–	+	+	+
Бібліотека типових ТП	+	+	+	+
ТП MEMC акселерометра	–	–	+	–
ТП ЧЕ	+	+	+	+
Документація	–	–	–	–
3D-моделювання	+	+	+	+

Позначення в табл. 1.1: «–» – функція відсутня; «+» – функція доступна.

Виходячи з проведеного аналізу сучасних САПР, які використовуються для автоматизації проектування ТП виготовлення MEMC акселерометрів, можна зробити висновок, що більшість з них призначена тільки для отримання ТП етапу

виготовлення ЧЕ, жодна з них не дає змогу отримувати конструкторську документацію та проводити підвищення ефективності проектних робіт, усі системи використовують для оптимізації отриманого ТП стохастичні методи, що впливає на збільшення часу проектування ТП. Враховуючи це, необхідно проводити вдосконалення існуючих моделей та методів, які покладено в основу систем автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів.

#### **1.4 Постановка мети і задач дослідження**

МЕМС акселерометр представляє собою складний об'єкт, а розробка нових МЕМС акселерометрів і технологій їх виробництва пов'язана зі складною науково-технічною задачею розробки ТП з урахуванням вимог забезпечення геометричних і функціональних параметрів. Ці параметри залежать від типу МЕМС і структури акселерометру, який виготовляється.

Одним із ефективних варіантів проектування ТП є використання типових ТП для яких необхідно здійснити пошук МЕМС акселерометрів-аналогів. В залежності від типу та структури МЕМС акселерометра-аналога змінюється структура ТП кількість і послідовність етапів, операцій, переходів, обладнання. Таким чином, необхідно визначити МЕМС акселерометра-аналога за функціонально-конструктивними обмеженнями.

Враховуючи, що МЕМС акселерометр представляє собою складний об'єкт, необхідно розробити модель, яка враховує його структурні елементи та можливість їх представлення на різних рівнях. Це дасть змогу здійснювати пошук операцій виготовлення окремих структурних елементів МЕМС акселерометра.

Якщо розглянути задачу визначення МЕМС акселерометра-аналога, то відома множина типів МЕМС акселерометрів та множина структур МЕМС акселерометрів, кожна з яких характеризується функціональними та конструктивними параметрами. Необхідно здійснити вибір МЕМС акселерометра-аналога згідно з заданими параметрами. На базі вибраного МЕМС акселерометра-аналога здійснюється вибір структури ТП (вибір етапів і операцій) та спосіб удосконалення за рахунок вибору

більш ефективних операцій та обладнання. Після здійснення синтезу структури ТП проводиться оцінка за часовими та економічними показниками варіанту ТП. Якщо пошук МЕМС акселерометра-аналога нічого не дав, то здійснюється формування ТП завдяки пошуку аналогів окремих елементів ТП.

Для того щоб визначити структуру та параметри шуканого ТП необхідно здійснити його структурно-параметричний синтез. Для цього необхідно здійснити удосконалення структурно-параметричної моделі ТП, що дасть змогу попередньо визначити структуру ТП. Для можливості покращення ТП необхідно розробити моделі вибору операцій, обладнання та їх критерії. Щоб оцінити отриманий ТП необхідно розробити його імітаційну модель.

Для реалізації вище сказаного необхідно розробити узагальнений метод, який базуватиметься на двох часткових методах: вибору типових ТП та пошуку окремих аналогів елементів ТП.

Для усунення недоліків базового методу вибору типових ТП (відсутність необхідних класифікаторів, трудомісткість кодування та створення бази даних аналогів і т.д.) необхідно провести його удосконалення.

За результатами роботи необхідно програмно реалізувати математичні моделі та методи автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів та отримати технічну документацію у вигляді маршрутної карти (МК). Процес автоматизації проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів можливо представити у вигляді ієрархічної структури (рис. 1.14).

Таким чином, 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.

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.

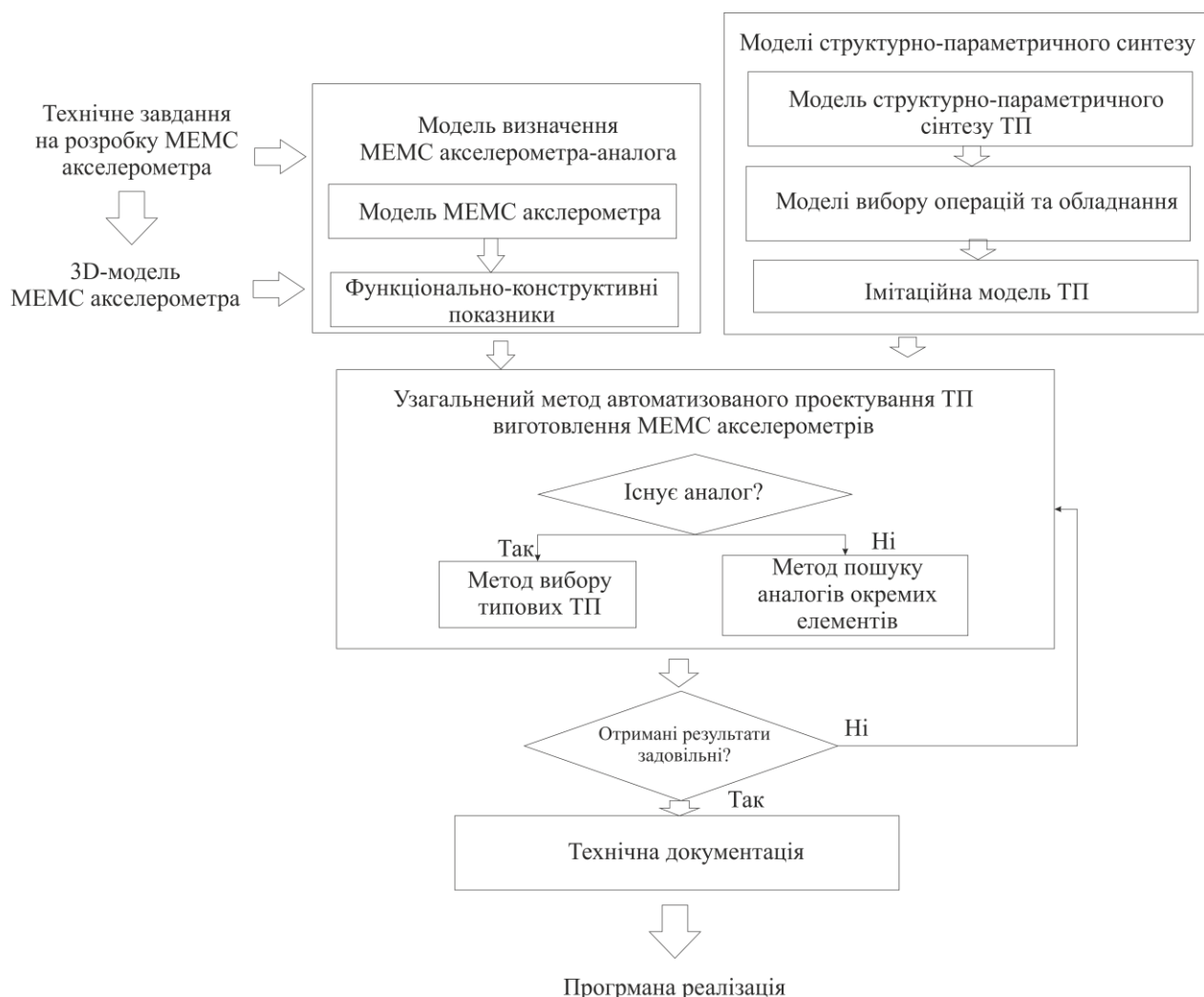


Рисунок 1.14 – Ієрархічна структура вирішення задачі автоматизованого проектування ТП виготовлення MEMS акселерометрів

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз сучасного стану проблеми автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення MEMS акселерометрів;
- розробити математичну модель визначення MEMS акселерометра-аналога за його функціонально-конструктивними показниками;
- удосконалити модель структурно-параметричного синтезу технологічного процесу виготовлення MEMS 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.

### **1.5 Висновки до розділу 1**

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 з конструкцією готового датчика. Розробка нових МЕМС акселерометрів і технології їх виробництва пов'язані зі складною науково-технічною задачею проектування ТП 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 множину варіантів ТП і їх послідовностей. У ситуації, що склалася, необхідні нові підходи для створення САПР, які б задовольняли зростаючі потреби синтезу оптимальних та ефективних ТП.

Проведений аналіз сучасного стану проблеми автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення МЕМС акселерометрів показав: 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 MEMC акселерометрів можуть складатися більше ніж з двохсот операцій, які мають бути узгоджені за часом для уникнення появи бракованого виробу та простою обладнання.

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

Враховуючи це необхідно проводити удосконалення існуючих моделей і методів, які покладено в основу систем автоматизованого проектування ТП виготовлення MEMC 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 MEMC акселерометрів шляхом зниження вартості та часу проектування і виготовлення.

Основні результати першого розділу опубліковано у роботах [1]-[2], [10]-[11], [17], [19], [23], [25].

У першому розділі використано інформацію з джерел [30]-[137].



## РОЗДІЛ 2

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА-АНАЛОГА ЗА ФУНКЦІОНАЛЬНО-КОНСТРУКТИВНИМИ ПОКАЗНИКАМИ

#### 2.1 Моделі багатокритеріальної оцінки для прийняття рішень про визначення мікроелектромеханічного акселерометра-аналога

В загальній постановці задачі: існує множина МЕМС акселерометрів  $Ak$  з якої необхідно визначити найкращий варіант МЕМС акселерометра-аналога  $a^o \in Ak$  (де  $Ak$  – множина варіантів) з урахуванням заданих обмежень на вартість, час виготовлення, масу, площу та функціонально-конструктивні обмеження. Для визначення кількісної оцінки кожного варіанту  $a \in Ak$  МЕМС акселерометра-аналога використовують часткові критерії (часу виготовлення, вартість, маса та площа МЕМС акселерометра), які утворюють множину оцінок:

$$K(a) = \{k_1(a), k_2(a), k_3(a), k_4(a)\}. \quad (2.1)$$

Кожен частковий критерії має свою вагу, яка визначає його важливість  $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4\}$ , а сума  $\sum_{i=1}^4 \lambda_i = 1$ .

Для вирішення задачі вибору варіанту МЕМС акселерометра можливо скористатися згорткою часткових критеріїв, використовуючи функції корисності  $P(a)$ , згідно з якими існує деяка узагальнена оцінка цінності або корисності будь-якого варіанту [117]-[118]. Моделі багатокритеріального оцінювання та вибору синтезуються на основі адитивних, мультиплікативних або змішаних функції корисності. Багато моделей в практичній реалізації побудовано з використанням функції корисності, яка використовує принципи максимальної адитивної

корисності часткових критеріїв, тобто можливості компенсації значень одних часткових критеріїв значеннями інших:

$$P(a) = \sum_{i=1}^4 \lambda_i \zeta_i(a), \quad (2.2)$$

де  $\zeta_i(a)$  – функція корисності для кожного часткового критерію (2.1).

В якості функції корисності часткових критеріїв пропонується використовувати модифіковану функцію (1.5).

На практиці існує декілька варіантів вирішення задачі вибору найкращого варіанту МЕМС акселерометра-аналога:

– коли відомі значення коефіцієнтів важливості критеріїв  $\lambda_i$  та значення усіх функцій корисності часткових критеріїв  $\zeta_i(a)$ , то оцінка варіантів  $a \in Ak$  та вибір найкращого  $a^o$  за максимальною адитивною корисністю:

$$a^o = \arg \max_{a \in Ak} P(a) = \max_{a \in Ak} \sum_{i=1}^4 \lambda_i \zeta_i(a); \quad (2.3)$$

– коли відомо впорядкованість часткових критеріїв за важливістю  $k_1(a) \succ k_2(a) \succ k_3(a) \succ k_4(a)$ , то вибір варіанту здійснюється за послідовним застосуванням часткових критеріїв, згідно їх важливості:

$$a^o = \max_{a \in Ak} \zeta_i(a), \quad \zeta_i(a) = \zeta_i^+(a), \quad (2.4)$$

де  $\zeta_i^+(a)$  – найкраще значення функції корисності  $i$ -ого часткового критерію;

– коли відомо впорядкованість часткових критеріїв за важливістю  $k_1(a) \succ k_2(a) \succ k_3(a) \succ k_4(a)$ , та при першій ітерації (2.4) знайдено єдиний варіант за першим частковим критерієм, тоді необхідно враховувати допустимий рівень

значення корисності цього часткового критерію  $\zeta'_i(a)$  тобто:

$$a^o = \max_{a \in Ak} \zeta_i(a), \quad \zeta_i(a) \geq \zeta_i^+(a) - \zeta'_i(a), \quad (2.4)$$

– за відсутністю важливості часткових критеріїв використовують максимуму або мінімаксу схему:

$$a^o = \min_{a \in Ak} \max_{i=1,4} \zeta_i(a), \quad (2.5)$$

$$a^o = \max_{a \in Ak} \min_{i=1,4} \zeta_i(a). \quad (2.6)$$

Отримані моделі дозволять здійснити вибір найкращого варіанту МЕМС акселерометра-аналога в залежності від ступеня відомої інформації (переваг часткових критеріїв, коефіцієнтів важливості, тощо).

При проектуванні ТП виготовлення МЕМС акселерометрів може виникнути ситуація, коли знайти МЕМС акселерометр-аналог не вдалося, тоді необхідно здійснювати синтез структури МЕМС акселерометра, який складається з елементів, компонентів та їх взаємозв'язків, при цьому на різних рівнях необхідно враховувати критерії та обмеження з минулих рівнів. Одним із варіантів є використання методу аналізу ієрархій, який має можливості структурованого взаємозв'язку між рівнями [138]-[140].

## **2.2 Математична модель визначення мікроелектромеханічного акселерометра-аналога**

На рівні системи (МЕМС акселерометра) необхідно вирішити задачу синтезу структури та визначення основних її параметрів. Для вирішення цієї задачі необхідно розробити математичну модель визначення типу та структури

MEMС акселерометра-аналога за функціонально-конструктивними показниками.

Для розв'язання задачі структурного синтезу на рівні системи представимо структурно MEMС акселерометра-аналога (згідно з рис. 1.5) у вигляді 3 рівнів:

- рівень структури (MEMС акселерометра);
- рівень компонентів (інерційна маса, корпус тощо);
- рівень елементів (балка, пружина, пластина тощо).

Представимо MEMС акселерометра у вигляді ієрархічної структури, де  $S^1$  – це рівень структури MEMС акселерометра. Структура  $S^1$  складається з множини 2 рівня компонентів –  $S_n^2$  де  $n = \overline{1, n'}$  – кількість компонентів, а компоненти в свою чергу складаються з множини 3-ого рівня елементів –  $S_e^3$  де  $e = \overline{1, m' + l' + k'}$  – кількість елементів.

Тоді, структуру MEMС акселерометра, з урахуванням рівнів, можливо представити у вигляді неорієнтованого графу, де вершинами ( $S^1$ ,  $S_n^2$ ,  $S_e^3$ ) є рівні структури, а ребрами є взаємозв'язок між елементами різних рівнів (рис. 2.1).

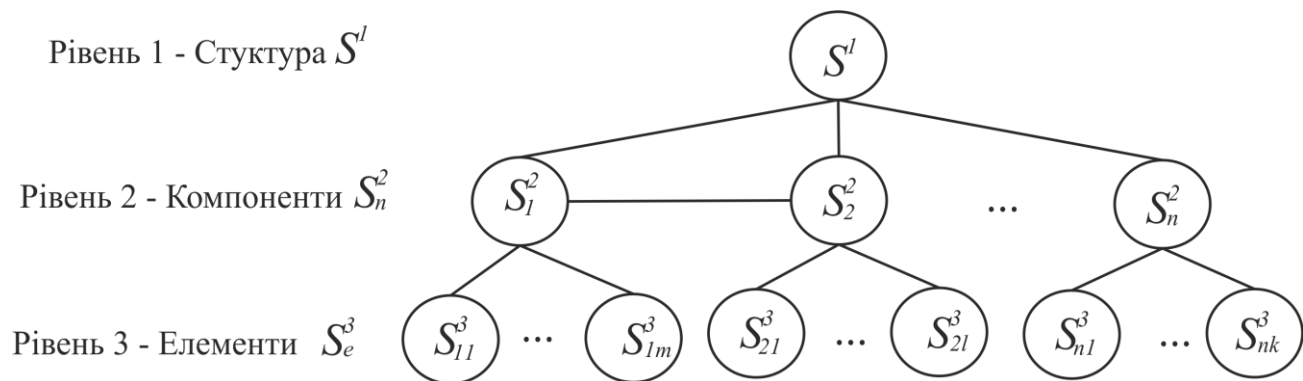


Рисунок 2.1 – Граф ієрархічної структури MEMС акселерометра

Важливим є завдання зв'язків, які відображають взаємозв'язок між елементами рівнів всередині структури MEMС акселерометра. Для цього запишемо матрицю суміжності у вигляді табл. 2.1, де 0 – якщо між елементами структури MEMС акселерометра (вершинами графа) зв'язок відсутній; 1 – якщо між елементами структури MEMС акселерометра є зв'язок.

Введемо змінну  $Z_n = \{0;1\}$ , якщо  $Z_n = 1$ , то між 1-им рівнем  $S^1$  та  $n$ -им

елементом 2-ого рівня  $S_n^2$  є зв'язок, інакше  $Z_n = 0$ . Введемо змінну  $\bar{Z}_{nm} = \{0;1\}$ , якщо  $\bar{Z}_{nm} = 1$ , то між  $n$ -им компонентом 2-ого рівня  $S_n^2$  та  $e$ -им елементом 3-ого рівня  $S_e^3$  є зв'язок, інакше  $\bar{Z}_{ne} = 0$ .

Таблиця 2.1 – Матриця суміжності

	$S^1$	$S_1^2$	$S_2^2$	...	$S_n^2$	$S_{11}^3$	...	$S_{1m}^3$	$S_{21}^3$	...	$S_{2l}^3$	$S_{n1}^3$	...	$S_{nk}^3$
$S^1$	0	1	1	...	1	0	...	0	0	...	0	0	...	0
$S_1^2$	1	0	1	...	0	1	...	1	0	...	0	0	...	0
$S_2^2$	1	1	0	...	1	0	...	0	1	...	1	0	...	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$S_n^2$	1	0	1	...	0	0	...	0	0	...	0	1	...	1
$S_{11}^3$	0	1	0	...	0	0	...	0	0	...	0	0	...	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$S_{1m}^3$	0	1	0	...	0	0	...	0	0	...	0	0	...	0
$S_{21}^3$	0	0	1	...	0	0	...	0	0	...	0	0	...	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$S_{2l}^3$	0	0	1	...	0	0	...	0	0	...	0	0	...	0
$S_{n1}^3$	0	0	0	...	1	0	...	0	0	...	0	0	...	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$S_{nk}^3$	0	0	0	...	1	0	...	0	0	...	0	0	...	0

Розглянемо випадок, коли визначено структуру МЕМС акселерометра-аналога (1 рівень), тоді відомо:

– множина типів призначення  $Ak = \{Ak^a\}$ , кожний тип МЕМС акселерометра задано множиною структур  $Ak^a = \{Ak^{as}\}$ , кожна з яких характеризується множиною функціонально-конструктивних показників  $Ak^{as} = \{Ak^{asp}\}$ ;

– вартість кожного МЕМС акселерометра  $a$ -го типу з  $s$ -ою структурою  $p$ -ми функціонально-конструктивними показниками  $C_{asp}$ ;

– час виготовлення кожного МЕМС акселерометра  $a$ -го типу з  $s$ -ою структурою  $p$ -ми функціонально-конструктивними показниками  $T_{asp}$ ;

– маса кожного МЕМС акселерометра  $a$ -го типу з  $s$ -ою структурою  $p$ -ми

функціонально-конструктивними показниками  $M_{asp}$ ;

– площа кожного МЕМС акселерометра  $a$ -го типу з  $s$ -ою структурою  $p$ -ми функціонально-конструктивними показниками  $G_{asp}$ .

Необхідно обрати МЕМС акселерометр-аналог за функціонально-конструктивними показниками. Для вирішення цієї задачі застосуємо методи дискретної оптимізації [89].

Тоді введемо змінну  $X_{asp} = \{0;1\}$ , де  $X_{asp}=1$ , якщо обраний  $w$ -ий тип з  $s$ -ою та  $p$ -ми показниками, інакше  $X_{asp}=0$ .

Вибір здійснюється за функціонально-конструктивними показниками та критеріями вартості, часу виготовлення, масою та площею МЕМС акселерометра:

– мінімізація часу виготовлення МЕМС акселерометра:

$$T = \min_{a \in Ak} \sum_{a=1}^{a'} \sum_{s=1}^{s'} \sum_{p=1}^{p'} T_{asp} X_{asp}; \quad (2.7)$$

– мінімізація вартості МЕМС акселерометра:

$$C = \min_{a \in Ak} \sum_{a=1}^{a'} \sum_{s=1}^{s'} \sum_{p=1}^{p'} C_{asp} X_{asp}; \quad (2.8)$$

– мінімізація маси МЕМС акселерометра:

$$M = \min_{a \in Ak} \sum_{a=1}^{a'} \sum_{s=1}^{s'} \sum_{p=1}^{p'} M_{asp} X_{asp}; \quad (2.9)$$

– мінімізація площі МЕМС акселерометра:

$$G = \min_{a \in Ak} \sum_{a=1}^{a'} \sum_{s=1}^{s'} \sum_{p=1}^{p'} G_{asp} X_{asp}. \quad (2.10)$$

Обмеження:

– значення часу виготовлення MEMC акселерометра повинно бути не більше допустимого значення  $T_3$ :

$$\sum_{a=1}^{a'} \sum_{s=1}^{s'} \sum_{p=1}^{p'} T_{asp} X_{asp} \leq T_3; \quad (2.11)$$

– значення вартості MEMC акселерометра повинно бути не більше допустимого значення  $C_3$ :

$$\sum_{a=1}^{a'} \sum_{s=1}^{s'} \sum_{p=1}^{p'} C_{asp} X_{asp} \leq C_3; \quad (2.12)$$

– значення маси MEMC акселерометра повинно бути не більше заданого значення  $M_3$ :

$$\sum_{a=1}^{a'} \sum_{s=1}^{s'} \sum_{p=1}^{p'} M_{asp} X_{asp} \leq M_3; \quad (2.13)$$

– значення площі MEMC акселерометра повинно бути не більше заданого значення  $G_3$ :

$$\sum_{a=1}^{a'} \sum_{s=1}^{s'} \sum_{p=1}^{p'} G_{asp} X_{asp} \leq G_3; \quad (2.14)$$

– значення функціонально-конструктивних показників MEMC акселерометра повинно бути не більше заданих значень  $P^*$ :

$$\sum_{s=1}^{s'} \sum_{p=1}^{p'} P_{asp} X_{asp} \leq P^*, \forall a = \overline{1, a'}; \quad (2.15)$$

– для кожного  $a$ -ого типу MEMC акселерометра, який характеризується  $p$ -ми функціонально-конструктивними показниками, що реалізовані  $s$ -ою структурою можливо вибрати тільки один MEMC акселерометр:

$$\sum_{s=1}^{s'} \sum_{p=1}^{p'} X_{asp} = 1, \forall a = \overline{1, a'}. \quad (2.16)$$

Окремими випадками є необхідність визначити аналог на компонентному рівні  $S_n^2$  та рівні елементів  $S_e^3$ . Ці задачі мають аналогічні критерії та методи вирішення.

Параметри конструкції MEMC акселерометрів (ширина, довжина, висота, профіль кристала, параметри балки, товщина перетинки, довжина електрода та інш.) достатньо повно описані математичними моделями в роботах [141]-[142].

На базі математичної моделі можливо сформувані класифікатор для здійснення визначення MEMC акселерометра-аналога за функціонально-конструктивними показниками з подібними елементами конструкції та ТП.

Для рішення задачі визначення MEMC акселерометра-аналога проведено формалізацію критеріїв часу і вартості виготовлення, маси та площі MEMC акселерометра. Надалі необхідно врахувати функціонально-конструктивні обмеження для визначення найкращого варіанту MEMC акселерометра-аналога для здійснення вибору типового технологічного процесу. Далі проведемо формалізацію функціонально-конструктивні показники MEMC акселерометра.



## 2.3 Формалізація функціонально-конструктивних показників мікроелектромеханічного акселерометра

Для формалізації функціонально-конструктивних показників MEMS акселерометрів проведено аналіз існуючих акселерометрів відомих фірм та компаній-виробників, таких як: Analog Devices, Motorola, Freescale Semiconductor, Bosh, Kionix, STMicroelectronics, Delphi. Визначено, що до функціонально-конструктивних показників відносять 34 показники, які описують тип та структуру MEMS акселерометра (матеріал чутливого елемента; тип навантаження на чутливий елемент; кількість чутливих осей; робочі характеристики; параметри контролю; фізичні параметри та інш.).

Пропонується подати показники, що мають чисельне значення в такому формальному вигляді:

$$P^* = \begin{cases} P_1, \text{ якщо } P_{\min} \leq P_{asp} \leq [\text{значення}_1]; \\ P_2, \text{ якщо } [\text{значення}_1] < P_{asp} \leq [\text{значення}_2]; \\ \dots \\ P_p, \text{ якщо } [\text{значення}_p] < P_{asp} \leq P_{\max}. \end{cases}$$

А показники, що мають лінгвістичний опис значень в такому формальному вигляді:

$$P^* = \begin{cases} P_1, \text{ якщо } P_{asp} = [\text{слово}_1]; \\ P_2, \text{ якщо } P_{asp} = [\text{слово}_2]; \\ \dots \\ P_p, \text{ якщо } P_{asp} = [\text{слово}_p], \end{cases}$$

де  $P_{asp}$  – значення  $p$ -ого показника для  $w$ -го типу з  $s$ -ю структурою;

$P_1, P_2, \dots, P_p$  – ідентифікатори діапазонів значень показників;

$[\text{значення}_p]$  – визначені порогові значення показників діапазону;

[слово<sub>p</sub>] – лінгвістичне значення показників;

$P_{\min}$ ,  $P_{\max}$  – мінімальне та максимальне значення показників.

Кортеж функціонально-конструктивних показників параметрів МЕМС акселерометра подамо у вигляді:

$$P_{asp} = \langle Se, Sg, T, Pe, K, Ph \rangle, \quad (2.17)$$

де  $Se$  – матеріал чутливого елемента (арсенід галію, фосфід галію, нітрид галію, індій-галій –  $Se$ , кварц чи діоксид кремнію –  $Qu$ , нітрид та карбід кремнію –  $Ni$ , кремній –  $Sl$ );

$Sg$  – тип навантаження на чутливий елемент (стиснення ( $Com$ ), зсув ( $Sh$ ), вигин ( $Fl$ ));

$T$  – кількість осей (одноосеві ( $\alpha_o$ ), двоосеві ( $\alpha_t$ ), трьохосеві ( $\alpha_{th}$ ));

$Pe$  – 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 ( $Cr$ )).

Параметр, що впливає на характеристики МЕМС акселерометра та побудову ТП є ЧЕ (первинний чутливий перетворювач) – конструктивний елемент або прилад, що сприймає вимірювану фізичну величину [143]. ЧЕ є первинним вимірювальним перетворювачем у вимірювальному колі та здійснює перетворення вхідного сигналу (вимірюваної величини) у величину, зручну для наступної інформаційної обробки [144].

Грунтуючись на аналізі технічної документації різних фірм-виробників матеріалами ЧЕ є:

$$Se = \begin{cases} Se_1, \text{ якщо } Se = "Ce"; \\ Se_2, \text{ якщо } Se = "Qu"; \\ Se_3, \text{ якщо } Se = "Ni"; \\ Se_4, \text{ якщо } Se = "Sl", \end{cases} \quad (2.18)$$

де *Ce* – арсенід галію (GaAs), фосфід галію (GaP), нітрид галію (GaN), індій-галій арсенід (InGaAs);

*Qu* – кварц чи діоксид кремнію (SiO<sub>2</sub>);

*Ni* – нітрид (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) та карбід кремнію (SiC);

*Sl* – кремній (Si).

Можна визначити три основних типа навантаження на кристал, які дозволяють згенерувати електричний сигнал: зсув, стиснення, вигин [145].

Для акселерометрів кожний тип навантаження на ЧЕ має визначені характеристики. Тоді параметр типа навантаження на чутливий елемент (*Sg*) в цьому дослідженні можна подати в такому вигляді:

$$Sg = \begin{cases} Sg_1, \text{ якщо } Sg = "Com"; \\ Sg_2, \text{ якщо } Sg = "Sh"; \\ Sg_3, \text{ якщо } Sg = "Fl", \end{cases} \quad (2.19)$$

де *Com* – стиснення;

*Sh* – зсув;

*Fl* – вигин.

До кількості осей МЕМС акселерометра можна віднести одноосеві, двоосеві та трьохосеві, тоді:

$$T = \begin{cases} T_1, \text{ якщо } T = "α_o"; \\ T_2, \text{ якщо } T = "α_t"; \\ T_3, \text{ якщо } T = "α_{th}", \end{cases} \quad (2.20)$$

де  $\alpha_0$  – одноосевий, ось  $X$  об'єкта завжди знаходиться в площині дії сили гравітації;

$\alpha_t$  – двоосевий, введена додаткова чутлива ось  $Y$ , ортогональної ось  $X$  об'єкта та знаходиться в площині дії сили гравітації;

$\alpha_{th}$  – трьохосевий, введена ще одна додаткова ось чутливості, яка дозволить виміряти всі кути нахилу акселерометра в просторі.

Для визначення кута нахилу МЕМС акселерометра використовуються вирази з [144]-[146]. Чутливість  $S_{x_i}$  по одній осі зменшується, а по другій осі збільшується. Двокомпонентний акселерометр може вимірювати кути в діапазоні  $0^\circ$ - $360^\circ$ . Це досягається завдяки зміні знака в залежності від приналежності кута до того чи іншого квадранта (рис. 2.2). В початковій позиції, коли сила гравітації діє тільки на ось  $Z$ , всі значення кутів дорівнюють  $0$ .

$X > 0; Y < 0$	$90^\circ$	$X > 0; Y > 0$	$0^\circ$
$X < 0; Y < 0$	$270^\circ$	$X < 0; Y > 0$	$360^\circ$

Рисунок 2.2 – Приналежність кута до квадрантів

В ході проведеного аналізу різних МЕМС акселерометрів визначено, що до робочих показників відносяться: чутливість, діапазон значень прискорень, частотний діапазон, роздільна здатність, резонансна частота, нелінійність, поперечна осева чутливість, коефіцієнт затухання. Таким чином, до показників робочих характеристик ( $Pe$ ) віднесемо:

$$Pe = \langle Sx, f, Ry, St, Dr, Rm, nL \rangle, \quad (2.21)$$

де  $Sx$  – чутливість (номінальна), мВ/(м/с<sup>2</sup>);

$f$  – роздільна здатність (середньоквадратичне значення), м/с<sup>2</sup>;

$Ry$  – частотний діапазон, Гц;

$St$  – поперечна осьова чутливість, %;

$Dr$  – коефіцієнт затування (демпфірування), %;

$Rm$  – діапазон прискорень (піковий),  $m/s^2$ ;

$nL$  – нелінійність, %.

Чутливість ( $Sx$ ) є відношенням зміни вихідного сигналу акселерометра  $\Delta Y$  до зміни приросту вхідного сигналу (прискорення)  $\Delta X$ . Чутливість МЕМС акселерометрів можна подати за допомогою такого виразу:

$$5 \cdot 10^{-3} \leq Sx \leq 25 \cdot 10^{-2},$$

Враховуючи, що для акселерометрів, які застосовуються за різним призначення, діапазони чутливості  $Sx$  істотно відрізняються:

$$Sx = \begin{cases} Sx_1, \text{ якщо } Sx_{\min} \leq Sx < 5 \cdot 10^{-3}; \\ Sx_2, \text{ якщо } 5 \cdot 10^{-3} \leq Sx \leq 25 \cdot 10^{-2}; \\ Sx_3, \text{ якщо } 25 \cdot 10^{-2} < Sx \leq 5 \cdot 10^{-1}; \\ Sx_4, \text{ якщо } 5 \cdot 10^{-1} < Sx \leq 1; \\ Sx_5, \text{ якщо } 1 < Sx < 2; \\ Sx_6, \text{ якщо } 2 \leq Sx \leq 68 \cdot 10^{-1}; \\ Sx_7, \text{ якщо } 68 \cdot 10^{-1} < Sx \leq 10; \\ Sx_8, \text{ якщо } 10 < Sx \leq 20; \\ Sx_9, \text{ якщо } 20 < Sx \leq 51; \\ Sx_{10}, \text{ якщо } 51 < Sx \leq 102; \\ Sx_{11}, \text{ якщо } 102 < Sx \leq 1019; \\ Sx_{12}, \text{ якщо } 1019 < Sx \leq Sx_{\max}. \end{cases} \quad (2.22)$$

Чутливість описує коефіцієнт підсилення давача та може бути визначена із застосуванням  $1g$  прискорення до нього. Різні діапазони чутливості можуть мати різну похибку  $\pm 5\%$  та  $\pm 50\%$ .

Роздільна здатність ( $f$ ) – середньоквадратичне значення найменшого прискорення, яке може бути виміряне. Цей параметр базується на рівні власних шумів акселерометра. Значення параметру роздільної здатності  $f$  знаходиться в таких інтервалах:

$$f = \begin{cases} f_1, \text{ якщо } f_{\min} \leq f \leq 25 \cdot 10^{-4}; \\ f_2, \text{ якщо } 25 \cdot 10^{-4} < f \leq 21 \cdot 10^{-2}; \\ f_3, \text{ якщо } 21 \cdot 10^{-2} < f \leq f_{\max}. \end{cases}$$

Коефіцієнт згасання ( $Dr$ ) – значення зниження або подавлення коливань в акселерометрі. Для коливального вихідного сигналу коефіцієнт згасання  $Dr$  визначається абсолютним значенням відношення більшої амплітуди до меншої пари послідовно взятих напівхвиль коливань відносно сталого значення. Отже, параметр для коефіцієнта згасання  $Dr$  має вигляд:

$$Dr = \begin{cases} Dr_1, \text{ якщо } Dr_{\min} \leq Dr \leq 7 \cdot 10^{-1}; \\ Dr_2, \text{ якщо } 7 \cdot 10^{-1} < Dr \leq 5; \\ Dr_2, \text{ якщо } 5 < Dr \leq Dr_{\max}. \end{cases} \quad (2.23)$$

Поперечна осьова чутливість ( $St$ ) – відношення вихідного сигналу до вхідного сигналу акселерометра, ось якого орієнтована перпендикулярно напрямку вхідного сигналу. Аналіз сучасних акселерометрів показав, що поперечна осьова чутливість становить % від  $Sx$ , тоді значення параметру осьова чутливість  $St$  знаходиться в таких інтервалах:

$$St = \begin{cases} St_1, \text{ якщо } St \leq 2; \\ St_2, \text{ якщо } St \leq 3; \\ St_3, \text{ якщо } St \leq 5; \\ St_4, \text{ якщо } St \leq 7. \end{cases} \quad (2.24)$$

Параметр  $St$  являє собою параметр контролю, який дозволяє оцінити значення чутливості  $Sx$  готового акселерометра.

Частотний діапазон ( $Ry$ ) – частоти, які випромінюються джерелом. Частотний діапазон визначається серією експериментів та вказується в специфікації. Цей параметр вказується з точністю  $\pm 5\%$  від опорної частоти (зазвичай 100 Гц). Частотний діапазон  $Ry$  має мінімальне та максимальне допустиме значення, тому цей параметр має два окремих діапазони – максимальний частотний діапазон  $Rx$  та мінімальний частотний діапазон  $Ry$ . Для максимального частотного діапазону:

$$Rx = \begin{cases} Rx_1, \text{ якщо } Ry_{\min} \leq Rx < 250; \\ Rx_2, \text{ якщо } 250 \leq Rx < 450; \\ Rx_3, \text{ якщо } 450 \leq Rx < 850; \\ Rx_4, \text{ якщо } 850 \leq Rx < 1000; \\ Rx_5, \text{ якщо } 1000 \leq Rx < 2000; \\ Rx_6, \text{ якщо } 2000 \leq Rx < 3000; \\ Rx_7, \text{ якщо } 3000 \leq Rx < 4000; \\ Rx_8, \text{ якщо } 4000 \leq Rx < 5000; \\ Rx_9, \text{ якщо } 5000 \leq Rx < 6000; \\ Rx_{10}, \text{ якщо } 6000 \leq Rx < 7000; \\ Rx_{11}, \text{ якщо } 7000 \leq Rx < 8000; \\ Rx_{12}, \text{ якщо } 8000 \leq Rx < 9000; \\ Rx_{13}, \text{ якщо } 9000 \leq Rx < 10000; \\ Rx_{14}, \text{ якщо } 10000 \leq Rx < 12000; \\ Rx_{15}, \text{ якщо } 12000 \leq Rx < 14000; \\ Rx_{16}, \text{ якщо } 14000 \leq Rx < 17000; \\ Rx_{17}, \text{ якщо } 17000 \leq Rx < 18000; \\ Rx_{18}, \text{ якщо } 18000 \leq Rx < 19000; \\ Rx_{19}, \text{ якщо } 19000 \leq Rx < 20000; \\ Rx_{20}, \text{ якщо } 20000 \leq Rx < 30000; \\ Rx_{21}, \text{ якщо } 30000 \leq Rx < 40000; \\ Rx_{22}, \text{ якщо } 40000 < Rx < Rx_{\max}. \end{cases} \quad (2.25)$$

Для максимального частотного діапазону похибка становить 5%, а для

мінімального частотного діапазону – 10%. Мінімальний частотний діапазон визначається:

$$Ry = \begin{cases} Ry_1, \text{ якщо } 0 \leq Ry < 0,025; \\ Ry_2, \text{ якщо } 0,025 \leq Ry < 0,06; \\ Ry_3, \text{ якщо } 0,06 \leq Ry < 0,1; \\ Ry_4, \text{ якщо } 0,1 \leq Ry < 0,15; \\ Ry_5, \text{ якщо } 0,15 \leq Ry < 0,2; \\ Ry_6, \text{ якщо } 0,2 \leq Ry < 0,27; \\ Ry_7, \text{ якщо } 0,27 \leq Ry < 0,4; \\ Ry_8, \text{ якщо } 0,4 \leq Ry < 0,5; \\ Ry_9, \text{ якщо } 0,5 \leq Ry < 0,58; \\ Ry_{10}, \text{ якщо } 0,58 \leq Ry < 0,8; \\ Ry_{11}, \text{ якщо } 0,8 \leq Ry < 1; \\ Ry_{12}, \text{ якщо } 1 \leq Ry < 2; \\ Ry_{13}, \text{ якщо } 2 \leq Ry < 2,4; \\ Ry_{14}, \text{ якщо } 2,4 \leq Ry < 3,4; \\ Ry_{15}, \text{ якщо } 3,4 \leq Ry < 4,7; \\ Ry_{16}, \text{ якщо } 4,7 \leq Ry < 5; \\ Ry_{17}, \text{ якщо } 5 \leq Ry < Ry_{\max}. \end{cases} \quad (2.26)$$

Діапазон вимірюваних прискорень ( $Rm$ ) – динамічний діапазон зовнішніх впливів, який акселерометр може сприйняти. Ця величина показує максимально можливе значення вхідного сигналу, яке акселерометр може перетворити в електричний сигнал, не виходячи за межі допустимих похибок (рис. 2.3) [147].

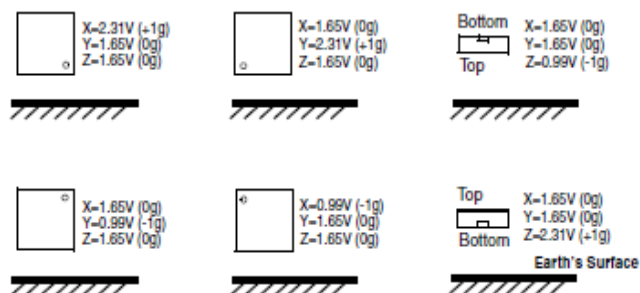


Рисунок 2.3 – Діапазон вимірюваних прискорень акселерометра в залежності від положення до поверхні землі



Врахувавши, що для акселерометрів, які застосовуються за різним призначенням, діапазони вимірюваних прискорень ( $Rm$ ) істотно відрізняються:

$$Rm = \begin{cases} Rm_1, \text{ якщо } Rm_{\min} \leq |Rm| \leq 49; \\ Rm_2, \text{ якщо } 49 < |Rm| \leq 98; \\ Rm_3, \text{ якщо } 98 < |Rm| < 174; \\ Rm_4, \text{ якщо } 174 \leq |Rm| \leq 294; \\ Rm_5, \text{ якщо } 294 < |Rm| \leq 490; \\ Rm_6, \text{ якщо } 490 < |Rm| < 588; \\ Rm_7, \text{ якщо } 588 \leq |Rm| \leq 2943; \\ Rm_8, \text{ якщо } 2943 < |Rm| \leq 4905; \\ Rm_9, \text{ якщо } 4905 < |Rm| \leq 9810; \\ Rm_{10}, \text{ якщо } 9810 < |Rm| \leq 19620; \\ Rm_{11}, \text{ якщо } 19620 \leq |Rm| \leq 49050; \\ Rm_{12}, \text{ якщо } 49050 < |Rm| \leq 98100; \\ Rm_{13}, \text{ якщо } 98100 < |Rm| \leq Rm_{\max}. \end{cases} \quad (2.27)$$

Нелінійність ( $nL$ ) – максимальне відхилення виходу акселерометра на усьому температурному діапазоні від лінійної характеристики найкращого наближення. Визначає максимальне відхилення показників акселерометра від ідеальної характеристики, виражене у відсотках від повної шкали. В ідеальному випадку, співвідношення між напругою та прискоренням є лінійним та описується чутливістю пристрою. Нелінійність акселерометрів є досить низькою та найчастіше може мати такі значення [148]:

$$nL = \begin{cases} nL_1, \text{ якщо } nL \leq 0,5; \\ nL_2, \text{ якщо } nL \leq 1; \\ nL_3, \text{ якщо } nL \leq 2; \\ nL_4, \text{ якщо } nL \leq 2,5. \end{cases} \quad (2.28)$$

Показниками контролю MEMS акселерометра є: межа навантаження, температурний діапазон, температурний коефіцієнт чутливості, температурний

коефіцієнт нульового прискорення, чутливість основи до деформації, чутливість до магнітних полів і електричні параметри:

$$K = \langle Tk, Ss, Sm, Tr, Ls \rangle, \quad (2.29)$$

де  $Tk$  – температурний коефіцієнт чутливості, %;

$Ss$  – чутливість основи до деформації,  $(\text{м/с}^2)/\mu\text{є}$ ;

$S_m$  – чутливість до магнітних полів,  $(\text{м/с}^2)/\text{Тл}$ ;

$Tr$  – температурний діапазон,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$Ls$  – межа навантаження (ударна),  $\text{м/с}^2$ .

Температурний коефіцієнт чутливості ( $Tk$ ) – максимальне відхилення чутливості при впливі температури. Характеризує зміну чутливості давача при зміні температури:

$$Tk = \begin{cases} Tk_1, \text{ якщо } |Tk| = 0,2; \\ Tk_2, \text{ якщо } |Tk| = 0,18; \\ Tk_3, \text{ якщо } |Tk| = 3. \end{cases} \quad (2.30)$$

Чутливість основи до деформації ( $Ss$ ) – помилковий сигнал, який генерується акселерометром, коли основа піддається впливу (згинання, обертаючого моменту, викривлення (деформації), механічного руху, термічного).

Таким чином, параметр чутливості основи до деформації  $Ss$ :

$$Ss = \begin{cases} Ss_1, \text{ якщо } Ss_{\min} \leq Ss \leq 1 \cdot 10^{-3}; \\ Ss_2, \text{ якщо } 1 \cdot 10^{-3} < Ss \leq 4 \cdot 10^{-2}; \\ Ss_3, \text{ якщо } 4 \cdot 10^{-2} < Ss \leq 294 \cdot 10^{-2}; \\ Ss_4, \text{ якщо } 294 \cdot 10^{-2} < Ss \leq Ss_{\max}. \end{cases} \quad (2.31)$$

Необхідно враховувати, що на значення чутливості основи до деформації

впливає гранична деформація ( $\mu\epsilon$ ), тобто це деформація, що відповідає межі міцності матеріалу [149].

Чутливість до магнітних полів ( $Sm$ ) – відношення зміни вихідного сигналу акселерометра до впливу магнітного поля:

$$Sm = \begin{cases} Sm_1, \text{ якщо } Sm_{\min} \leq Sm \leq 1 \cdot 10^{-3}; \\ Sm_2, \text{ якщо } 1 \cdot 10^{-3} < Sm \leq 4 \cdot 10^{-2}; \\ Sm_3, \text{ якщо } 4 \cdot 10^{-2} < Sm \leq 294 \cdot 10^{-2}; \\ Sm_4, \text{ якщо } 294 \cdot 10^{-2} < Sm \leq Sm_{\max}. \end{cases} \quad (2.33)$$

Температурний діапазон ( $Tr$ ) – максимальна робоча температура заряду давача, обмежена властивостями матеріалу.

Вище певної температури елемент давача почне деполяризацію, що призводить до постійної втрати чутливості. Зазначена максимальна робоча температура є межею, при якій постійна зміна чутливості становить 3%. Інші компоненти також можуть обмежувати робочу температуру. Типовими діапазонами температур є: від  $-35^\circ\text{C}$  до  $150^\circ\text{C}$  та від  $-10^\circ\text{C}$  до  $80^\circ\text{C}$ . На сьогоднішній день, максимальне значення високотемпературного діапазону досягає  $650^\circ\text{C}$ .

Розіб'ємо параметр температурного діапазону на 3 складових:

$$Tr = \begin{cases} Tr_1, \text{ якщо } T_R = "n"; \\ Tr_2, \text{ якщо } T_R = "m"; \\ Tr_3, \text{ якщо } T_R = "h", \end{cases} \quad (2.32)$$

де  $n$  – діапазон низьких температур;

$m$  – діапазон середніх температур;

$h$  – діапазон високих температур.

Опишемо кожен з діапазонів формулами (2.33)-(2.35). Запишемо модель для діапазону низьких температур  $n$ :

$$n = \begin{cases} n_1, \text{ якщо } (n_{\min} \leq n \leq -196); \\ n_2, \text{ якщо } (-196 < n \leq -151); \\ n_3, \text{ якщо } (-151 < n \leq -73); \\ n_4, \text{ якщо } (-73 < n \leq -65); \\ n_5, \text{ якщо } (-65 < n \leq -54); \\ n_6, \text{ якщо } (-54 < n \leq -18); \\ n_7, \text{ якщо } (-18 < n \leq -10); \\ n_8, \text{ якщо } (-10 < n < 50). \end{cases} \quad (2.33)$$

Запишемо модель для діапазону середніх температур  $t$ :

$$t = \begin{cases} t_1, \text{ якщо } 50 \leq t < 65; \\ t_2, \text{ якщо } 65 \leq t \leq 77; \\ t_3, \text{ якщо } 77 < t \leq 83; \\ t_4, \text{ якщо } 83 < t \leq 95; \\ t_5, \text{ якщо } 95 < t \leq 121. \end{cases} \quad (2.34)$$

Запишемо модель для діапазону високих температур  $h$ :

$$h = \begin{cases} h_1, \text{ якщо } 121 < h \leq 143; \\ h_2, \text{ якщо } 143 < h \leq 177; \\ h_3, \text{ якщо } 177 < h \leq 260; \\ h_4, \text{ якщо } 260 < h \leq 355; \\ h_5, \text{ якщо } 355 < h \leq 482; \\ h_6, \text{ якщо } 482 < h \leq 650; \\ h_7, \text{ якщо } 650 < h \leq h_{\max}. \end{cases} \quad (2.35)$$

Межа навантаження ( $L_s$ ) – ударне навантаження, що є одним з видів динамічних навантажень, яке прикладається в дуже короткий проміжок часу.

Межу навантаження ( $L_s$ ) можна подати в такому вигляді:

$$Ls = \begin{cases}
Ls_1, \text{ якщо } Ls_{\min} \leq |Ls| < 392; \\
Ls_2, \text{ якщо } 392 \leq |Ls| < 800; \\
Ls_3, \text{ якщо } 800 \leq |Ls| < 980; \\
Ls_4, \text{ якщо } 980 \leq |Ls| < 1000; \\
Ls_5, \text{ якщо } 1000 \leq |Ls| < 4000; \\
Ls_6, \text{ якщо } 4000 \leq |Ls| < 5000; \\
Ls_7, \text{ якщо } 5000 \leq |Ls| < 7000; \\
Ls_8, \text{ якщо } 7000 \leq |Ls| < 9800; \\
Ls_9, \text{ якщо } 9800 \leq |Ls| < 10000; \\
Ls_{10}, \text{ якщо } 10000 \leq |Ls| < 19620; \\
Ls_{11}, \text{ якщо } 19620 \leq |Ls| < 24525; \\
Ls_{12}, \text{ якщо } 24525 \leq |Ls| < 29400; \\
Ls_{13}, \text{ якщо } 29420 \leq |Ls| < 34300; \\
Ls_{14}, \text{ якщо } 34300 \leq |Ls| < 39200; \\
Ls_{15}, \text{ якщо } 39200 \leq |Ls| < 49050; \\
Ls_{16}, \text{ якщо } 49050 \leq |Ls| < 58000; \\
Ls_{17}, \text{ якщо } 58800 \leq |Ls| < 98010; \\
Ls_{18}, \text{ якщо } 98010 \leq |Ls| < 147000; \\
Ls_{19}, \text{ якщо } 147000 \leq |Ls| < 205800; \\
Ls_{20}, \text{ якщо } 205800 \leq |Ls| < 294000; \\
Ls_{21}, \text{ якщо } 294000 \leq |Ls| < 490504; \\
Ls_{22}, \text{ якщо } 490504 \leq |Ls| < 980000; \\
Ls_{23}, \text{ якщо } 980000 \leq |Ls| < 1176000; \\
Ls_{24}, \text{ якщо } 1176000 \leq |Ls| < 1471500; \\
Ls_{25}, \text{ якщо } 1471500 \leq |Ls| < 1960000; \\
Ls_{26}, \text{ якщо } 1960000 \leq |Ls| < 15000000; \\
Ls_{27}, \text{ якщо } 15000000 \leq |Ls| < Ls_{\min}.
\end{cases}
\tag{2.36}$$

В ході проведеного аналізу МЕМС акселерометрів, виявлено необхідність віднести до фізичних показників ( $Ph$ ) такі складові як параметри корпусу, ізоляцію, тип кабелю, кріплення:

$$Ph = \langle H, El, I, C, Cr \rangle, \quad (2.37)$$

де  $H$  – параметри корпусу;

$El$  – положення електричного з'єднувача;

$I$  – ізоляція;

$C$  – тип кабелю;

$Cr$  – кріплення.

Параметр корпусу МЕМС акселерометра необхідно розглядати, з одного боку як тип корпусу, а з іншого – матеріал корпусу. Тоді параметр корпусу ( $H$ ):

$$H = \langle ht, hm, z \rangle, \quad (2.38)$$

де  $ht$  – тип корпусу;

$hm$  – матеріал корпусу;

$z$  – розмір корпусу.

Тип корпусу ( $ht$ ) включає в себе такі варіанти корпусування для МЕМС акселерометрів як:

$$ht = \begin{cases} ht_1, & \text{якщо } ht = "outh"; \\ ht_2, & \text{якщо } ht = "int", \end{cases} \quad (2.39)$$

де  $outh$  – зовнішній, як чіп (тоді габаритний розмір  $z$  стандартний і може бути визначений відповідно до заданого типу корпусу);

$int$  – внутрішній, як складова частина пристрою.

Провівши аналіз зовнішніх типів корпусів МЕМС акселерометрів визначено, що найбільш поширеними типами є корпусу SOIC або просто SO (small-outline integrated circuit), тип корпусу QFN (Quad Flat No-lead) або MLF (Micro Lead Frame), тип корпусу LGA (Land Grid Array), являє собою корпус PGA (Pin Grid Array) та їх модифікації.

Для зовнішнього типу корпусів МЕМС акселерометрів  $outh$  визначемо:

$$outh = \begin{cases} outh_1, \text{ якщо } outh = "pS"; \\ outh_2, \text{ якщо } outh = "pQ"; \\ outh_3, \text{ якщо } outh = "pL", \end{cases} \quad (2.40)$$

де  $pS$  – тип корпусу SOIC, мініатюризований корпус для ІС з дворядним розташуванням виводів, має форму прямокутника, забезпечений виводами;

$pQ$  – тип корпусу QFN, плоский корпус з чотирма рядами контактів і представляє собою квадратний корпус з розташованими по краях контактами;

$pL$  – тип корпусу LGA, в якому штирєві контакти замінені на контактні площадки [150].

Для внутрішнього типу корпусів МЕМС акселерометрів  $int$  визначемо:

$$int = \begin{cases} int_1, \text{ якщо } int = "mn"; \\ int_2, \text{ якщо } int = "tv", \end{cases}$$

де  $mn$  – корпус, який має значення висоти, ширини і довжини і може бути визначений як багатогранник;

$tv$  – корпус, який має значення висоти і радіусу може бути визначений як тіло обертання.

Тоді, параметр для корпусу типу багатогранник  $mn$ :

$$mn = \begin{cases} mn_1, \text{ якщо } mn = "cube"; \\ mn_2, \text{ якщо } mn = "cuboid"; \\ mn_3, \text{ якщо } mn = "ccuboid"; \\ mn_4, \text{ якщо } mn = "other", \end{cases}$$

де  $cube$  – корпус, який має рівні між собою значення висоти, ширини і довжини

ою ( $a = b = c$ ) і має форму куба;

*cuboid* – корпус, який має різні значення висоти, довжини і ширини ( $a \neq b \neq c$ ) і має форму прямокутного паралелепіпеда;

*ccuboid* – корпус, який має однакові значення довжини і ширини, але різні значення висоти, ( $a = b \neq c$ ) і має форму прямокутного паралелепіпеду з основою квадрат;

*other* – корпус, який має різні значення висоти, довжини і ширини ( $a \neq b \neq c$ ) і має форму паралелепіпеда або будь-якого іншого багатогранника.

У табл. 2.2 представлені приклади корпусів, які описані вище.

Таблиця 2.2 – Приклади корпусів типу багатогранники MEMS акселерометра

Назва	Зображення	Параметри	Розмір, мм
<i>cube</i>		$a = b = c$	10,2x10,2x10,2
<i>cuboid</i>		$a \neq b \neq c$	24,4x25,4x12,7
<i>ccuboid</i>		$a = b \neq c$	21,6x21,6x11,4
<i>other</i>		$a \neq b \neq c$	6,35x11,81x10,81

Тоді параметр для корпуса типу тіло обертання *tv* матиме вигляд:

$$tv = \begin{cases} tv_1, \text{ якщо } tv = \text{"cylinder"}; \\ tv_2, \text{ якщо } tv = \text{"tother"}; \end{cases}$$



де *cylinder* – корпус, який має значення висоти і радіусу ( $h, r$ ) і представляє собою тіло обертання, утворене обертанням прямокутника навколо однієї з його сторін;

*tother* – корпус, який має значення висоти і радіусу ( $h, r$ ) і представляє собою будь-яке тіло обертання.

У табл. 2.3 представлені приклади корпусів, які описані вище.

Таблиця 2.3 – Приклади корпусів типу тіло обертання МЕМС акселерометра

Назва	Зображення	Параметри	Реальний розмір
<i>cylinder</i>		$h, r$	6,1x8,1x0,7
<i>tother</i>		$h, r$	24,4x25,4x12,7

У проведеному аналізі різних типів акселерометрів (понад 237) встановлено, що в 58,7% випадків використовується титан, в 4,6% випадків алюміній, 32,9% випадків нержавіюча сталь, 2,1% – інконель, і в 1,7% випадків – поліпшена нержавіюча сталь (316L). Параметр матеріалу корпусу ( $hm$ ) відображає основні матеріали корпусу, модель можна подати в такому вигляді:

$$h_m = \begin{cases} hm_1, \text{ якщо } hm = "Th"; \\ hm_2, \text{ якщо } hm = "Al"; \\ hm_3, \text{ якщо } hm = "Z"; \\ hm_4, \text{ якщо } hm = "Or"; \\ hm_5, \text{ якщо } hm = "Pl"; \\ hm_6, \text{ якщо } hm = "Po"; \\ hm_7, \text{ якщо } hm = "In"; \\ hm_8, \text{ якщо } hm = "sT", \end{cases} \quad (2.41)$$

де *Th* – титан або сплави на основі титану з Al, V, Mo, Mn, Cr та ін., які мають високу механічну міцність при достатній пластичності і в'язкості, низьку теплопровідність, невеликий коефіцієнт лінійного розширення, високу корозійну стійкість до повітря (до 500 °C), стійкість до розведених розчинів багатьох кислот і лугів [151]-[153];

*Al* – анодований алюміній, він є стійким до механічних впливів, атмосферного впливу, легкий, має корозійну стійкість і високу теплопровідність [154];

*Z* – цинк або сплави на основі цинку з домішками – Al, Cu і Mg, мають погану корозійну стійкість в агресивних кислих і лужних середовищах (особливо у вологій атмосфері і при нагріванні), змінюють механічні властивості і розміри в результаті природного старіння [155];

*Or* – кераміка, характеризується порівняно високою механічною, термічною, хімічною і радіаційною стійкістю, має високий коефіцієнт пружності і низький коефіцієнт теплового розширення, характеризується високим електричним опором, високою діелектричною проникністю [155];

*Pl* – пластик, має високі волого-, масло-, кислото- і лугостійкість, стійкість до дії органічних розчинників;

*In* – інконель, сімейство аустенітних нікель-хромових жароміцних сплавів, які мають високу стійкість до окислення, а також характеризуються показниками міцності, при цьому зберігаючи високу міцність навіть при високих температурах (хімічний склад: 73% Ni, 15% Cr 7%) [156]-[157];

*sT* – нержавіюча сталь або легована сталь, стійка до корозії в атмосфері і агресивних середовищах.

Положення електричного з'єднувача MEMS акселерометра для більшості типів корпусів може бути 4 типів: інтегрального кабелю або знаходитись зверху, збоку чи знизу корпусу.

Подамо показник розміщення електричного з'єднувача MEMS акселерометра:

$$El = \begin{cases} El_1, \text{ якщо } El = "cab"; \\ El_2, \text{ якщо } El = "top"; \\ El_3, \text{ якщо } El = "side"; \\ El_4, \text{ якщо } El = "bottom", \end{cases}$$

де *cab* – електричний з'єднувач, що представлений у вигляді інтегрального кабелю;

*top* – електричний з'єднувач, що знаходиться зверху корпусу;

*side* – електричний з'єднувач, що знаходиться збоку корпусу;

*bottom* – електричний з'єднувач, що знаходиться знизу корпусу.

У табл. 2.4 представлено приклади положення електричного з'єднувача.

Таблиця 2.4 – Положення електричного з'єднувача МЕМС акселерометра

Положення електричного з'єднувача	Найменування параметру
	<i>side</i>
	<i>top</i>
	<i>bottom</i>
	<i>cab</i>

Враховуючи особливості застосування МЕМС акселерометрів необхідно визначити наявність ізоляції. Параметр ізоляції (*I*) можна подати таким чином:

$$I = \begin{cases} I_1, \text{ якщо } I = "Ep"; \\ I_2, \text{ якщо } I = "Ger", \end{cases} \quad (2.42)$$

де *Ep* – ізоляція епоксидною смолою, олігомери, що містять епоксидні групи і здатні під дією отверджувачів (поліамінів і ін.) утворювати зшиті полімери. Найбільш поширені епоксидні смоли: продукти поліконденсації епіхлоргідріна з фенолами, найчастіше – з бісфенолом А;

*Ger* – ізоляція герметиком, ізоляція пастоподібною або в'язкотекучою композицією на основі полімерів або олігомерів, яку наносять на болтові, заклепочні та інші сполуки з метою запобігання витоку робочого середовища через зазори конструкції і гідроізоляції; герметизуючий шар утворюється безпосередньо на сполучному шві в результаті затвердіння (вулканізації) полімерної основи або випаровування розчинника; існують також герметики, які після нанесення на поверхню, яка герметизується, ніяких змін не зазнають (невисихаючі замазки).

Електричний кабель є кабельним виробом, що містить одну або більше ізольованих жил (провідників), укладених в металеву або неметалеву оболонку [158]. Вибір електричного кабелю залежить не тільки від характеристики передачі даних, але і від кліматичних факторів зовнішнього середовища, тому:

$$C = \begin{cases} C_1, \text{ якщо } C = "Ch"; \\ C_2, \text{ якщо } C = "Vo"; \\ C_3, \text{ якщо } C = "De"; \\ C_4, \text{ якщо } C = "Kc"; \\ C_5, \text{ якщо } C = "Vc"; \\ C_6, \text{ якщо } C = "Pc", \end{cases} \quad (2.43)$$

де *Ch* – 4-ох жильний кабель;

*Vo* – 8-ми жильний кабель;

$Dc$  – 10-ти жильний кабель;

$Kc$  – коаксіальний кабель;

$Vc$  – інтегрований кабель;

$Pc$  – паяні штирі з прикріпленим кабелем.

Відповідно до діючого Державного стандарту України (ГОСТ ИСО 5348-2002 «Вибрация и удар. Механическое крепление акселерометров») [159] критерії, що визначають вибір способу кріплення базується на результатах практичних робіт (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 – Параметри визначення вибору методу кріплення MEMS акселерометрів

Кріплення	Резонансна частота	Температура	Маса акселерометра і жорсткість кріплення	Добротність на резонансі	Необхідність підготовки поверхні
Шпилька	1	1	1	1	1
Клей	1	1	1	1	2
Віск	2	3	2	1	1
Двостороння липка стрічка	3	2	3	3	1
Магніт	2	1	3	3	1
Пристрій швидкого кріплення	2	1	2	2	2
Вакуумне кріплення	2	1	1	2	2

В табл. 2.6: 1 – значення параметру високе; 2 – значення параметру середнє; 3 – значення параметру низьке.

З огляду на проведений аналіз, існуючі кріплення MEMS акселерометрів і діючого Державного стандарту України (ГОСТ ИСО 5348-2002 «Вибрация и удар. Механическое крепление акселерометров») модель кріплення ( $Cr$ ) подамо у вигляді:

$$Cr = \begin{cases} Cr_1, \text{ якщо } Cr = "gL"; \\ Cr_2, \text{ якщо } Cr = "Sh"; \\ Cr_3, \text{ якщо } Cr = "Re"; \\ Cr_4, \text{ якщо } Cr = "Me"; \\ Cr_5, \text{ якщо } Cr = "Ho", \end{cases} \quad (2.44)$$

де  $gL$  – кріплення на клею, клейовий монтаж акселерометрів часто виконується на поверхнях з невеликою площею і на друкованих платах;

$Sh$  – через отвір за допомогою штифту (або шпильки), який є циліндричним або конічним стрижнем (ГОСТ 3129-70) [160] і дозволяє точно зафіксувати взаємне положення деталей;

$Re$  – віск, для швидкого кріплення акселерометра (наприклад, при спостереженні за вібраціями в різних точках шляхом переміщення акселерометра) можна використовувати бджолиний віск для зручності монтажу і демонтажу. Оскільки при високих температурах бджолиний віск пом'якшується, цей метод обмежений температурою приблизно  $40\text{ }^\circ\text{C}$ ;

$Me$  – магніт, зручний метод монтажу акселерометра полягає у використанні постійного магніту, а установка на магніт самоклеючого диску забезпечить електричну ізоляцію між акселерометром і поверхнею, на якій він кріпиться;

$Ho$  – монтажні затискачі і шарнірні основи, в корпусах деяких акселерометрів є пази, які дозволяють використовувати монтажні затискачі для швидкої установки акселерометра на досліджуваний об'єкт.

Проведена формалізація функціонально-конструктивних показників МЕМС акселерометру дозволить вирішити задачу визначення акселерометра-аналогу за його функціонально-конструктивними показниками.

## 2.4 Висновки до розділу 2

Розроблено математичну модель для розв'язання задачі визначення МЕМС акселерометра-аналога за функціонально-конструктивними показниками, яка

дозволить визначити найкращий варіант МЕМС акселерометра-аналога для вибору типового технологічного процесу

Для цієї задачі виконано формалізацію часткових критеріїв вартості та часу виготовлення, маси, об'єму МЕМС акселерометра. Це дозволило сформулювати задачі вибору за одним чи декількома частковими критеріями та розробити моделі розв'язання окремих завдань, що дасть можливість приймати проектні рішення за багатьма критеріями, залежно від ступеню визначеності вихідної інформації (визначення переваг критеріїв або коефіцієнтів їх важливості).

Запропоновано формалізацію функціонально-конструктивних показників, проведено їх систематизацію та класифікацію, що дозволило розробити обмеження на функціонально-конструктивні параметри для визначення МЕМС акселерометра-аналога.

На практиці отримані результати дозволять визначити найкращий варіант МЕМС акселерометра-аналога для вибору типового технологічного процесу завдяки врахуванню обмежень за функціонально-конструктивними показниками.

Основні результати другого розділу опубліковано у роботах [3], [9], [12]-[16], [18], [28].

У другому розділі використано інформацію з джерел [89], [117]-[118], [138]-[160].

## РОЗДІЛ 3

# СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ

### **3.1 Структурно-параметрична модель технологічного процесу виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів**

Для того, щоб здійснити синтез структури ТП виготовлення МЕМС акселерометрів необхідно розробити структурно-параметричну модель, яка дозволить визначити структуру ТП та знайти її складові елементи. Для розробки математичної моделі можна скористатися теорією графів, математичною логікою та теорією множин [85]-[86], [161]-[164].

Згідно з рис. 1.11 структурно ТП виготовлення МЕМС акселерометрів можливо подати у вигляді 4 рівнів проектування. Розглянувши 1 рівень, визначено послідовність 14 загальних етапів виготовлення МЕМС акселерометрів (рис. 3.1).

Після проведеного аналізу визначено, що при розробці математичних моделей ТП виготовлення МЕМС акселерометрів найбільшу увагу приділяють етапу отримання ЧЕ МЕМС акселерометра, цей етап містить в собі операції, які необхідно виконувати паралельно.

Для того щоб підвищити ефективність автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів необхідно оптимізувати вибір ТП виготовлення МЕМС акселерометрів за певними критеріями. Для вирішення завдання оптимізації необхідно розробити математичну модель ТП виготовлення МЕМС акселерометрів як сукупність етапів і операцій, визначити основні параметри, що дозволяють давати оцінки окремим етапам, операціям і ТП в цілому. Також треба врахувати паралельність операцій отримання ЧЕ і корпусу МЕМС акселерометра, врахувати паралельність операцій на етапі отримання ЧЕ



MEMC акселерометра, а також відобразити взаємозв'язок етапів, операцій і обладнання. Необхідно вибирати критерії оптимізації і побудувати цільову функцію оптимізації, тоді завданням оптимізації є мінімізація (або максимізація) цільової функції при заданих обмеженнях.

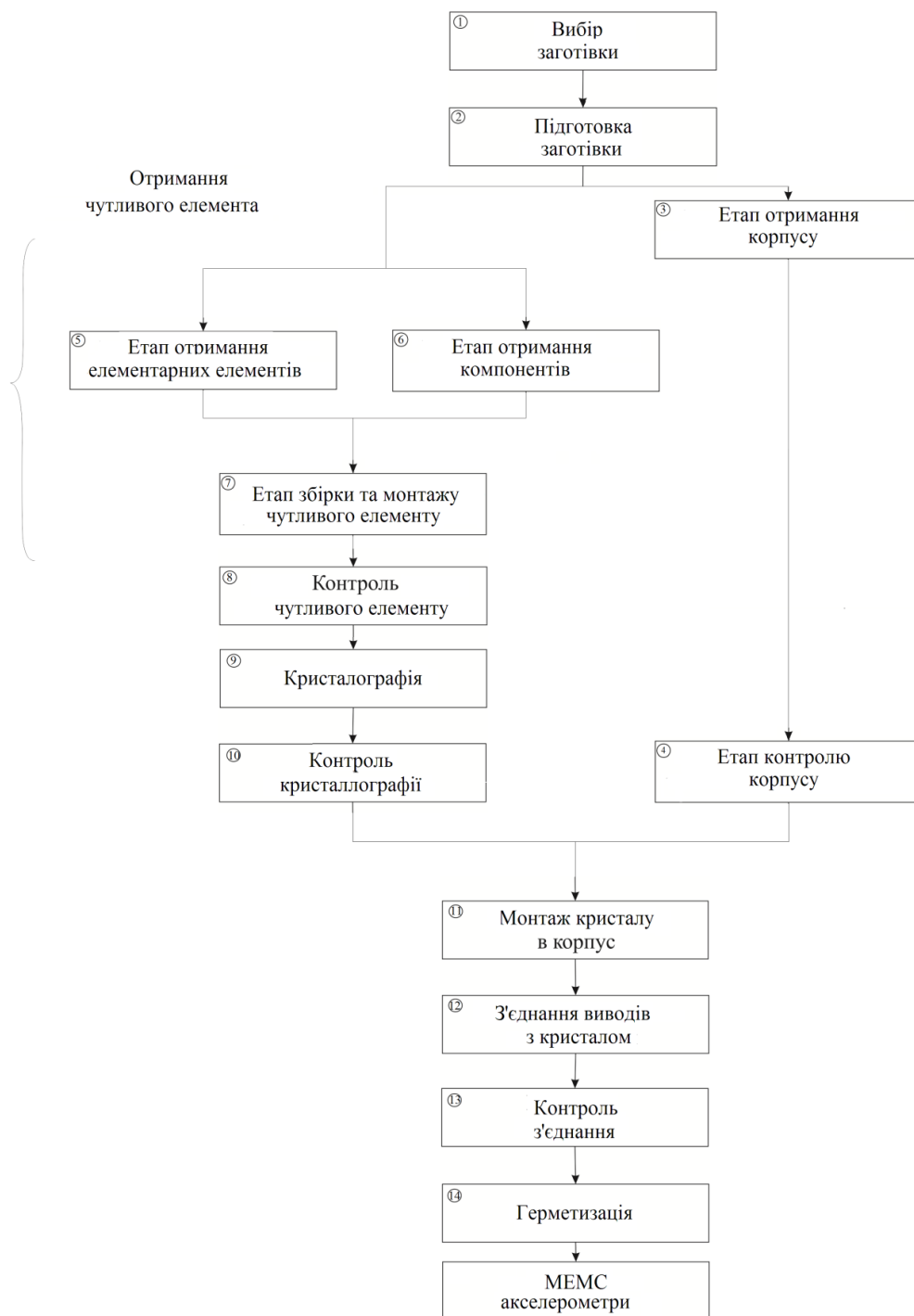


Рисунок 3.1 – Послідовність основних етапів виготовлення MEMC акселерометрів

Нехай  $\Psi$  – заготовки для виробництва акселерометра, що представляють собою підкладку, що включає в себе основні параметри (матеріал підкладки, товщина підкладки, кристалографічна орієнтація та інш.), а також заготовку для корпусу МЕМС акселерометра, тому що паралельно з виготовленням елементів ЧЕ МЕМС акселерометра йде виготовлення його корпусу. Таким чином, заготовка являє собою множину, яка відображає їх стан в процесі виготовлення МЕМС акселерометра:

$$\Psi = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_i\}, i = \overline{1, n}.$$

ТП виготовлення акселерометра можна розглядати як відокремлену частину виробничого процесу, пов'язану з іншими його частинами. ТП являє собою систему та формально може бути представлений як впорядкована множина елементів, кожен елемент якої виконує визначену функцію (роботу) та знаходиться у конструктивному, функціональному, інформаційному зв'язку з іншими елементами.

Тоді будь-який ТП виготовлення акселерометра можна розглядати як систему взаємозалежних дрібних ТП або як частину більш складного технологічного процесу. У структурі складного ТП можна виділити складові його частини (етапи, ТО).

Внаслідок чого, ґрунтуючись на принципах проектування ТП, його можна представити як послідовність, що включає в себе множину етапів виготовлення  $Q$  (вибір типу підкладки, підготовка підкладки та інш.), які є збільшеною частиною технологічного процесу: відносно самостійні, характеризуються логічною завершеністю, просторовою або часовою відокремленістю.

Якщо обмежити кількість етапів виготовлення МЕМС акселерометра 14 відомими етапами, які представлені на рис. 3.1, тоді:

$$Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_{14}\}. \quad (3.1)$$

Весь ТП виготовлення МЕМС акселерометрів може бути представлений як процес переходу зі стану заготовки  $\Psi$  у стан готового акселерометра  $\Theta$  за допомогою виконання сукупності деяких послідовностей етапів  $Q$ .

При реалізації ТП змінюються якісні та кількісні характеристики заготовок  $\Psi$  (наприклад, для підкладки змінюється товщина підкладки, розмір, шари, та інш.). Внаслідок цього в загальному випадку кожен етап  $Q$  можна представити як послідовність дій (травлення, окислення, літографія, та інш.) над  $\Psi$  для отримання кінцевого виробу  $\Theta$  (МЕМС акселерометра):

$$\Psi \xrightarrow{Q} \Theta. \quad (3.2)$$

Нехай,  $\Psi_0$  – задана множина заготовок. Тоді на рівні проектування етапів з урахуванням виразу (3.1) отримаємо:

$$\Psi_0 \xrightarrow{Q_1} \Psi_1 \xrightarrow{Q_2} \Psi_2 \xrightarrow{Q_3} \Psi_3 \xrightarrow{Q_4} \dots \xrightarrow{Q_{13}} \Psi_{13} \xrightarrow{Q_{14}} \Theta. \quad (3.3)$$

Множина заготовок  $\Psi$  зазнає послідовні  $i$ -ї зміни на кожному етапі. Тоді  $\Psi_i$  – заготовки, де  $i=1,2,\dots,14$  є ідентифікатором належності до  $i$ -го етапу  $Q_i$ .

Аналіз існуючих ТП, проведений в першому розділі, показав, що перший етап  $Q_1$  ТП виготовлення МЕМС акселерометрів завжди являє собою «вибір заготовок», а останній етап завжди є етапом «вихідного контролю». Обидва ці етапи не впливають на зміну геометричних розмірів заготовок. Тоді, можна ввести поняття етапу  $Q'_1$ , етапу який не впливає на зміну геометричних та фізичних властивостей заготовок  $\Psi_0$ , а заготовки, отримані після виконання етапу  $Q'_1$ , будуть мати ідентифікатор  $\Psi'_1$ :

$$\Psi_0 \xrightarrow{Q'_1} \Psi'_1, \quad (3.4)$$

де  $Q'_1$  – перший етап ТП виготовлення акселерометра – «вибір заготовки»;

$\Psi_0$  – задана множина заготовок;

$\Psi'_1$  – заготовки після виконання етапу  $Q'_1$ ,

Заготовки  $\Psi'_1$  мають ті ж геометричні та фізичні властивості, що й заготовки  $\Psi_0$ , так як етап  $Q'_1$  не змінює їх геометричні та фізичні властивості, звідки випливає, що вони рівні:  $\Psi_0 = \Psi'_1 = \Psi_0$ . Отже, заготовка  $\Psi'_i$  після виконання етапу  $Q'_i$  має ідентифікатор  $\Psi'_i$ , що свідчить про те, що їх геометричні та фізичні властивості не змінилися.

Тоді, послідовність ТП на етапі 1-2 (рис. 3.1) можна вважати такою, яка у визначеному порядку застосування етапів  $Q'_1$  і  $Q_2$  дозволяє отримати заготовки  $\Psi_2$ , причому етап  $Q'_1$  є етапом, який не змінює геометричні та фізичні властивості заготовок  $\Psi'_1$ , тоді:

$$\Psi_0 \xrightarrow{Q'_1} \Psi'_1 \xrightarrow{Q_2} \Psi_2. \quad (3.5)$$

Необхідно врахувати, що на етапах  $Q_i$ , які змінюють геометричні та фізичні властивості заготовок,  $\Psi_0 \neq \Psi_1$ . Звідси можна зробити висновок, що ТП являє собою упорядковану послідовність етапів  $Q_i$  і  $Q'_i$  перетворень, над заданою множиною заготовок  $\Psi_0$  для отримання готового акселерометра  $\Theta$ . На базі запропонованого виразу (3.5), можна обґрунтувати включення етапу  $Q'_i$  у гілку побудови ТП. Етап  $Q'_i$  не впливає на геометричні та фізичні параметри  $\Psi'_i$ , однак при цьому є невід'ємною частиною технологічного процесу.

Таким чином, при побудові ТП існують етапи  $Q'_i$ , які не змінюють геометричні параметри заготовок  $\Psi'_i$ , такі як етапи «вибору підкладки» та «контролю», що пов'язані з проведенням контролю після певного етапу (контроль отриманого ЧЕ, контроль кристалографії, контроль з'єднань, вихідний контроль). Тоді етапи  $Q_i$  – основні етапи, після виконання яких змінюється геометричні та

фізичні властивості заготовок  $\Psi_i$ . Етапи  $Q'_i$  – допоміжні етапи, які забезпечують безперебійне виконання основних етапів  $Q_i$  та після яких не змінюються геометричні та фізичні властивості заготовок  $\Psi_i$

З огляду на те, що існує 2 типу етапів:  $Q_i$ , які впливають на зміну геометричних параметрів та фізико-хімічних властивостей заготовок, та етапи  $Q'_i$ , які не впливають на них, тоді:

$$\Psi_0 \xrightarrow{Q'_1} \Psi'_1 \xrightarrow{Q_2} \Psi_2 \xrightarrow{Q_3} \dots \xrightarrow{Q'_{13}} \Psi'_{13} \xrightarrow{Q'_{14}} \Theta. \quad (3.6)$$

Врахувавши вираз (3.6) можна зробити висновок: якщо етапом є  $Q'_i$ , то  $\Psi_{i-1} = \Psi'_i$ , та навпаки якщо  $Q_i$ , то  $\Psi_{i-1} = \Psi_i$ .

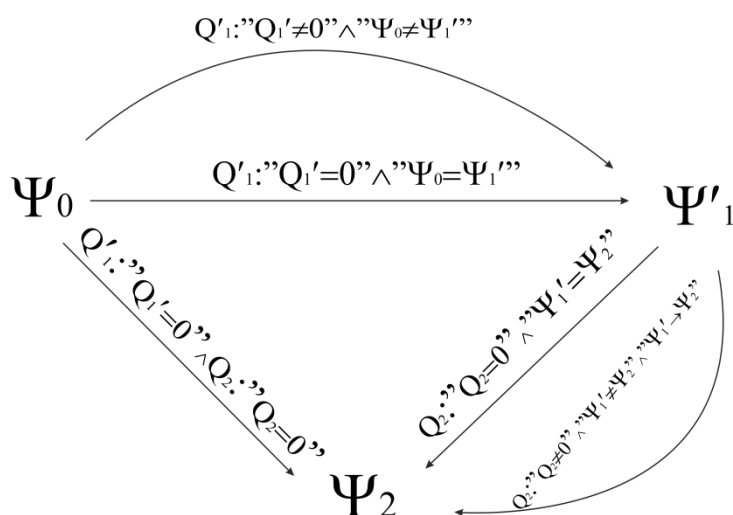
ТП виготовлення МЕМС акселерометра можна представити у вигляді графа, де вершинами є заготовки  $\Psi_i$ , а ребрами є впорядковані послідовності етапів  $Q_i$  і  $Q'_i$ . Дану послідовність доцільно представити як граф, який має замкнутий цикл варіантів для кожного етапу  $Q_i$ .

Графова модель на прикладі етапів  $Q'_1$  і  $Q_2$  та варіанти, можливі на цих етапах:

- якщо необхідно зробити вибір заготовок, то на етапі  $Q'_1$  відбувається вибір необхідних заготовок  $\Psi'_1$ ;
- якщо немає необхідності робити вибір заготовок, то етап  $Q'_1 = 0$ ;
- якщо параметри заготовок  $\Psi'_1 = \Psi_2$ , тоді немає необхідності виконувати етап підготовки заготовок  $Q_2$ , тоді етап  $Q_2 = 0$ ;
- якщо параметри обраних заготовок  $\Psi'_1 \neq \Psi_2$ , тоді виникає необхідність виконати етап  $Q_2$  (наприклад, необхідно провести ТО шліфування поверхні підкладки);
- якщо немає необхідності виконати етапи  $Q'_1$  і  $Q_2$ , то етапи  $Q'_1$  і  $Q_2$  рівні нулю.

В результаті виконання етапу  $Q_2$  заготовки  $\Psi_1'$  повинні відповідати заданим параметрам  $\Psi_2$ , тоді заготовки  $\Psi_1' \rightarrow \Psi_2$  і етап  $Q_2$  виконується досі доки  $\Psi_1' = \Psi_2$ .

На рис. 3.2 наведено графову модель, яка відображає етапи  $Q_1'$  і  $Q_2$  та їх взаємозв'язок зі станом заготовки  $\Psi_i$  після кожного етапу, наведено умову, яка може бути виконана для переходу до наступного етапу  $Q_{n+1}$ .



Етап: «значення умови».

Рисунок 3.2 – Графова модель ТП виготовлення MEMS акселерометра на етапах  $Q_1'$  і  $Q_2$

Якщо немає необхідності виконання будь-якої ТО  $Q_i$ , довжина дуги буде дорівнювати нулю, тому, час, що витрачається на виконання такого ТП, буде менше. Довжина дуги графа в тих випадках, коли необхідно виконати ТО  $Q_1'$  і  $Q_2$ , залежить від часу, який необхідно витратити на виконання тієї чи іншої ТО.

З урахуванням того, що етапи  $Q_5$  (етап отримання елементів) і  $Q_6$  (етап отримання компонентів) виконуються паралельно між собою, а етапи отримання чутливого елементу (ЧЕ) MEMS акселерометрів  $Q_5 - Q_{10}$  паралельно з етапом виготовлення корпусу  $Q_3 - Q_4$ , то можна подати ТП виготовлення MEMS акселерометрів у вигляді графової моделі (рис. 3.3).

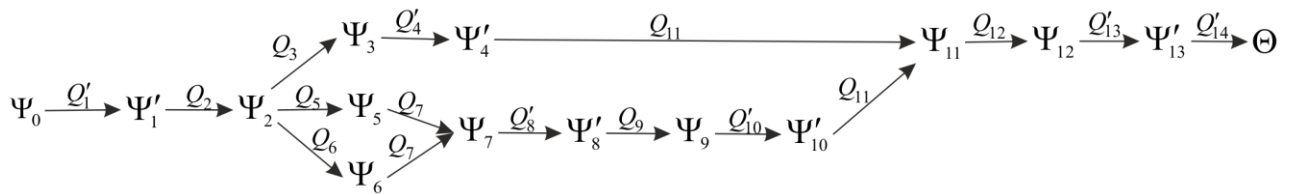


Рисунок 3.3 – Графова модель ТП виготовлення MEMS акселерометрів на рівні етапів

Якщо розглядати 3-й рівень проектування – проектування операцій, то кожен етап  $Q_i$  можна подати як ряд ТО  $O_p$ , які являють собою закінчену частину ТП, що виконується на одному робочому місці.

Залежно від типу MEMS акселерометра  $\Theta$ , який необхідно виготовити, кількість та склад операцій  $O_p$  в кожному етапі ТП  $Q_i$  може відрізнитися. На вибір операцій  $O_p$  також впливають параметри, якими повинен характеризуватися готовий акселерометр  $\Theta$  (фізичні параметри, матеріал ЧЕ, метод навантаження на ЧЕ, конструкція ЧЕ в залежності від способу фізичного впливу, тип конструкції механізму, тип корпусу, матеріал корпусу, положення електричного з'єднувача, форма корпусу, тип кріплення та інші).

Введемо поняття  $\Rightarrow$  як послідовне виконання етапів  $Q_i$ . Отже, можна надати  $Q_i$  у вигляді множини взаємопов'язаних послідовностей операцій  $O_{ip}$ , де  $i=1,2,\dots,14$  є ідентифікатором приналежності операцій до певного етапу, а  $p=\overline{1,n}$  – порядковим номером ТО  $O_{ip}$  на етапі  $Q_i$ , причому кількість операцій на кожному етапі може відрізнитися. Множина  $O_{ip}$  є послідовністю операцій, які необхідно та достатньо виконати для переходу на наступний етап  $Q_{i+1}$ .

Виходячи з вище зазначеного, ТП виготовлення MEMS акселерометра, представлений математичним записом (3.1), можна подати в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \Psi_0 &\Rightarrow (\{O_{11} \rightarrow O_{12} \rightarrow \dots \rightarrow O_{1p}\} \in Q'_1) \Rightarrow (\{O_{21} \rightarrow O_{21} \rightarrow \dots \rightarrow O_{2p}\} \in Q_2) \Rightarrow \dots \\ &\Rightarrow (\{O_{141} \rightarrow O_{142} \rightarrow \dots \rightarrow O_{14p}\} \in Q'_{14}) \Rightarrow \Theta. \end{aligned} \quad (3.7)$$

де  $\Rightarrow$  – порядок послідовності виконання кожного етапу  $Q_i$ ;

$O_{1p}, O_{2p}, O_{14p}$  – впорядкована послідовність операцій;

$p = \overline{1, n}$  – порядковий номер ТО  $O_{1p}, O_{2p}, O_{14p}$  у відповідних етапах  $Q_1, Q_2, Q_{14}$ .

В результаті виконання  $O_{ip} \in Q_i$ , змінюються геометричні та фізичні властивості заготовок  $\Psi_i$ , а в результаті виконання  $O'_{ip} \in Q'_i$ , не змінюються геометричні та фізичні властивості заготовок  $\Psi'_i$ . Отже, ТП, поданий в (3.7), можна записати так:

$$\begin{aligned}
 \Psi_0 &\Rightarrow (\{O'_{11} \rightarrow O'_{12} \rightarrow \dots \rightarrow O'_{1p}\} \in Q'_1) \Rightarrow (\{O_{21} \rightarrow O_{22} \rightarrow \dots \rightarrow O_{2p}\} \in Q_2) \Rightarrow \\
 &\Rightarrow (\{O_{31} \rightarrow O_{32} \rightarrow \dots \rightarrow O_{3p}\} \in Q_3) \Rightarrow (\{O'_{41} \rightarrow O'_{42} \rightarrow \dots \rightarrow O'_{4p}\} \in Q'_4) \wedge \\
 &\wedge (\{O_{51} \rightarrow O_{52} \rightarrow \dots \rightarrow O_{5p}\} \in Q_5) \wedge (\{O_{61} \rightarrow O_{62} \rightarrow \dots \rightarrow O_{6p}\} \in Q_6) \Rightarrow \\
 &\Rightarrow (\{O_{71} \rightarrow O_{72} \rightarrow \dots \rightarrow O_{7p}\} \in Q_7) \Rightarrow (\{O'_{81} \rightarrow O'_{82} \rightarrow \dots \rightarrow O'_{8p}\} \in Q'_8) \Rightarrow \\
 &\Rightarrow (\{O_{91} \rightarrow O_{92} \rightarrow \dots \rightarrow O_{9p}\} \in Q_9) \Rightarrow (\{O'_{101} \rightarrow O'_{102} \rightarrow \dots \rightarrow O'_{10p}\} \in Q'_{10}) \Rightarrow \\
 &\Rightarrow (\{O_{111} \rightarrow O_{112} \rightarrow \dots \rightarrow O_{11p}\} \in Q_{11}) \Rightarrow (\{O_{121} \rightarrow O_{122} \rightarrow \dots \rightarrow O_{12p}\} \in Q_{12}) \Rightarrow \\
 &(\{O'_{131} \rightarrow O'_{132} \rightarrow \dots \rightarrow O'_{13p}\} \in Q'_{13}) \Rightarrow (\{O'_{141} \rightarrow O'_{142} \rightarrow \dots \rightarrow O'_{14p}\} \in Q'_{14}) \Rightarrow \Theta, \quad (3.8)
 \end{aligned}$$

Розглядаючи 4 рівень проектування – рівень переходів, урахувуються переходи, які є частиною ТО  $O_{ip}$ . Під переходом слід розуміти, що для будь-якої  $O_{ip}$  існує перехід  $\Omega$ , який представляє собою закінчену частину  $O_{ip}$ , що виконується над однією або декількома поверхнями заготовок  $\Psi_i$ , одночасно одним або декількома інструментами, що працюють без зміни, або при автоматичній зміні режимів роботи обладнання. Кожна операція  $O_{ip}$  включає в себе різну кількість переходів  $\Omega$ .

Для кожної  $O_{ip}$  існує основний перехід  $\Omega$ , який є закінченою частиною  $O_{ip}$  та допоміжний перехід  $\Omega'$  – перехід, який не впливає на зміну геометричних та фізичних властивостей заготовок  $\Psi'_i$ , проте є невід'ємним та необхідним для виконання  $\Omega$ . Таким чином, зміни геометричних та фізичних властивостей заготовок  $\Psi_i$  відбуваються в процесі виконання основних  $O_{ip}$  і допоміжних операцій  $O'_{ip}$ , з відповідними їм основними  $\Omega$  і допоміжними переходами  $\Omega'$ .



Визначимо параметри  $O_{ip}$  як  $V_i$  (вхідні параметри, якими характеризуються задані заготовки  $\Psi_0$ , а також параметри заготовок  $\Psi_{i-1}$ , до виконання  $i$ -ої операції), вихідні  $P_i$  (параметри заготовок  $\Psi_i$  після виконання  $i$ -ої  $O_{ip}$ ) і  $N_i$  змінні параметри основного  $\Omega$  та допоміжного переходу  $\Omega'$  для виконання  $i$ -ої  $O_{ip}$  і  $O'_{ip}$  відповідно.

Параметри  $V_i$ ,  $P_i$ ,  $N_i$  визначають параметри взаємодії для будь-якої  $O_{ip}$  і  $O'_{ip}$ , взаємопов'язані та обумовлені між собою складними зв'язками, що об'єднані у множини. Можна представити будь-яку операцію  $O_{ip}$  і  $O'_{ip}$  як систему взаємодії вхідних  $V_i$ ,  $P_i$  вихідними та  $N_i$  параметрами переходу. Схематично наведено розглянуту взаємодію на рис. 3.4.

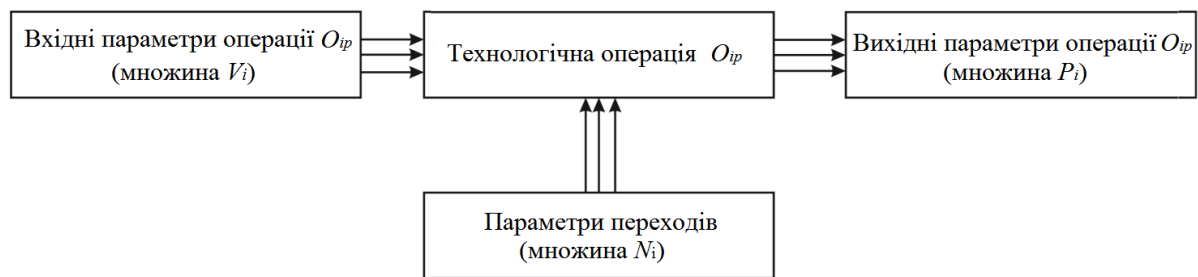


Рисунок 3.4 – Схема взаємодії параметрів  $V_i$ ,  $P_i$ ,  $N_i$  для  $O_{ip}$

Значення кожного параметра знаходиться у певному інтервалі, що задається фізичною природою даного параметра або вимогами до ТП. Звідси випливає, що група обмежень, пов'язаних з діапазоном варіювання параметрів, може бути представлена у вигляді нерівностей:

$$\begin{aligned}
 V_{i\min} &\leq V_i \leq V_{i\max}, \\
 P_{i\min} &\leq P_i \leq P_{i\max}, \\
 N_{i\min} &\leq N_i \leq N_{i\max},
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

де  $i$  – значення  $i$ -го параметра;

$V_{i\min}, P_{i\min}, N_{i\min}$  – мінімальні значення  $i$ -го параметра;

$V_{i\max}, P_{i\max}, N_{i\max}$  – максимальні значення  $i$ -го параметра.

Параметри  $V_i, P_i, N_i$  представляють собою множину їхніх значень, а кожна з множин параметрів  $V_i, P_i, N_i$  характеризується сукупністю допустимих значень цих параметрів. Кожен елемент множин  $V_i, P_i, N_i$  позначимо як  $v_{ip}, p_{ip}, n_{ip}$  та запишемо ці множини вигляді:

$$\begin{aligned} V_i &= \{v_{ip} \mid v_{ip\min} \leq v_{ip} \leq v_{ip\max}\} \\ P_i &= \{p_{ip} \mid p_{ip\min} \leq p_{ip} \leq p_{ip\max}\} \\ N_i &= \{n_{ip} \mid n_{ip\min} \leq n_{ip} \leq n_{ip\max}\} \end{aligned} \quad (3.10)$$

де  $p$  – індекс номера ТО, до якої відноситься параметр, а  $i = \overline{1, np}$ .

Вираз (3.10) доводить, що кожен елемент множин  $V_i, P_i, N_i$  являє собою підмножину  $v_{ip}, p_{ip}, n_{ip}$  елементи якої є множиною граничних значень (min і max) в межах області даного параметра.

Вхідними параметрами  $V_i$  для  $O_{ip}$  є параметри, які отримують після будь-якої ТО  $O_{ip-1}$ , а вихідними параметрами  $P_i$  є параметри, які отримують після виконання  $O_{ip}$  та необхідні для того, щоб виконати операцію  $O_{ip+1}$ . Кожна  $O_{ip}$  складається з послідовності переходів  $\Omega_i$ , а переходи  $\Omega_i$  містять в собі змінні параметри –  $N_i$ . Тоді взаємозв'язок параметрів  $V_i, P_i, N_i$  і переходів  $\Omega_i$  для ТО  $O_p^i$ :

$$O_{ip-1} \xrightarrow{V_{ip}} \underbrace{[\Omega_1 \rightarrow \Omega_2 \rightarrow \dots \rightarrow \Omega_i]}_{O_{ip}} \xrightarrow{P_{ip}} O_{ip+1}$$

Визначимо, що вхідні  $V_i$  і вихідні параметри  $P_i$ , які характеризують не тільки операції  $O_{ip}$ , але й так само етапи  $Q_i$ . Зазначені параметри

ідентифікуються за номером етапу і необхідні для оцінки й перевірки відповідні параметри заготовок  $\Psi_i$  після кожного етапу  $Q_i$ .

Для того, щоб ТП виготовлення МЕМС акселерометрів виконувався, врахуємо сировину  $S$  (реагенти, окислювачі, фотошаблони, затискачі, промивні ванни та ін.), яка необхідна для виконання тих чи інших операцій  $O_{ip}$ :

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_i\}, i = \overline{1, n}. \quad (3.7)$$

Вираз (3.7) являє собою множину необхідної сировини для виконання етапів ТП. Початковою множиною сировини є  $S_0$  – множина необхідної сировини, що надходить перед ТП, а для кожної ТО множина сировини ідентифікується відповідним номером етапу.

Враховуючи (3.6)-(3.7) та рис. 3.5 і 3.6, модель структурно-параметричного синтезу ТП виготовлення МЕМС акселерометра наведено у вигляді:

$$\begin{aligned} & \Psi_0, S_0 \xrightarrow[V_1]{P_{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} \quad V_{i2}} \Psi'_1 \Rightarrow (\{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} \quad V_{i3}} \Psi_2 \Rightarrow (\{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} \quad V_{i4}} \Psi_3 \Rightarrow (\{N_{i1}\} \in \Omega'_{i1}) \in O'_{41} \xrightarrow{P_{i1} = v_{i2}} \{N_{i2}\} \in \Omega'_{i2} \in \\ & \in O'_{42} \xrightarrow{P_{i2} = v_{i3}} \dots \xrightarrow{P_{ip-1} = v_{ip}} \{N_{ip}\} \in \Omega'_{ip} \in O'_{4p} \in Q'_4 \wedge (\{N_{i1}\} \in \Omega_{i1}) \in O_{51} \xrightarrow{P_{i1} = v_{i2}} \\ & \xrightarrow{P_{i1} = v_{i2}} \{N_{i2}\} \in \Omega_{i2} \in O_{52} \xrightarrow{P_{i2} = v_{i3}} \dots \xrightarrow{P_{ip-1} = v_{ip}} \{N_{ij}\} \in \Omega_{ij} \in O_{5p} \in Q_5 \wedge (\{N_{i1}\} \in \Omega_{i1}) \in \\ & \in O_{61} \xrightarrow{P_{i1} = v_{i2}} \{N_{i2}\} \in \Omega_{i2} \in O_{62} \xrightarrow{P_{i2} = v_{i3}} \dots \xrightarrow{P_{ip-1} = v_{ip}} \{N_{ij}\} \in \Omega_{ij} \in O_{6p} \in Q_6 \xRightarrow{P_{i5}, P_{i6}} \\ & \xRightarrow[S_7]{P_{i5}, P_{i6}} \Psi_5, \Psi_6 \Rightarrow (\{N_{i1}\} \in \Omega_{i1}) \in O_{71} \xrightarrow{P_{i1} = v_{i2}} \{N_{i2}\} \in \Omega_{i2} \in O_{72} \xrightarrow{P_{i2} = v_{i3}} \dots \xrightarrow{P_{ip-1} = v_{ip}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \xrightarrow{P_{ip-1} = v_{ip}} \{ \{ N_{ij} \} \in \Omega_{ij} \} \xrightarrow{P_{ip-1} = v_{ip}} \{ \{ N_{ij} \} \in \Omega_{ij} \} \in O_{7p} \in Q_7 \Rightarrow \Psi_7 \xrightarrow{V_{i8}} \{ \{ N_{i1} \} \in \Omega'_{i1} \} \in \\
& \in O'_{81} \xrightarrow{P_{i1} = v_{i2}} \{ \{ N_{i2} \} \in \Omega'_{i2} \} \in O'_{82} \xrightarrow{P_{i2} = v_{i3}} \dots \xrightarrow{P_{ip-1} = v_{ip}} \{ \{ N_{ip} \} \in \Omega'_{ip} \} \in O'_{8p} \in Q'_8 \Rightarrow \\
& \xrightarrow{P_{i8}} \Psi'_8 \xrightarrow{V_{i9}} \{ \{ N_{i1} \} \in \Omega_{i1} \} \in O_{91} \xrightarrow{P_{i1} = v_{i2}} \{ \{ N_{i2} \} \in \Omega_{i2} \} \in O_{92} \xrightarrow{P_{i2} = v_{i3}} \dots \xrightarrow{P_{ip-1} = v_{ip}} \{ \{ N_{ij} \} \in \\
& \in \Omega_{ij} \} \in O_{9p} \in Q_9 \Rightarrow \Psi_9 \xrightarrow{V_{i10}} \{ \{ N_{i1} \} \in \Omega'_{i1} \} \in O'_{10} \xrightarrow{P_{i1} = v_{i2}} \{ \{ N_{i2} \} \in \Omega'_{i2} \} \in O'_{102} \xrightarrow{P_{i2} = v_{i3}} \rightarrow \\
& \xrightarrow{P_{i2} = v_{i3}} \dots \xrightarrow{P_{ip-1} = v_{ip}} \{ \{ N_{ip} \} \in \Omega'_{ip} \} \in O'_{10p} \in Q'_{10} \Rightarrow \Psi'_4, \Psi'_{10} \xrightarrow{V_{i11}} \{ \{ N_{i1} \} \in \Omega_{i1} \} \in \\
& O_{111} \xrightarrow{P_{i1} = v_{i2}} \{ \{ N_{i2} \} \in \Omega_{i2} \} \in O_{112} \xrightarrow{P_{i2} = v_{i3}} \dots \xrightarrow{P_{ip-1} = v_{ip}} \{ \{ N_{ij} \} \in \Omega_{ij} \} \in O_{11p} \in Q_{11} \Rightarrow \\
& \xrightarrow{P_{i11}} \Psi_{11} \xrightarrow{V_{i12}} \{ \{ N_{i1} \} \in \Omega_{i1} \} \in O_{121} \xrightarrow{P_{i1} = v_{i2}} \{ \{ N_{i2} \} \in \Omega_{i2} \} \in O_{122} \xrightarrow{P_{i2} = v_{i3}} \dots \xrightarrow{P_{ip-1} = v_{ip}} \rightarrow \\
& \xrightarrow{P_{ip-1} = v_{ip}} \{ \{ N_{ij} \} \in \Omega_{ij} \} \in O_{12p} \in Q_{12} \Rightarrow \Psi_{12} \xrightarrow{V_{i12}} \{ \{ N_{i1} \} \in \Omega'_{i1} \} \in O'_{131} \xrightarrow{P_{i1} = v_{i2}} \{ \{ N_{i2} \} \in \Omega'_{i2} \} \in \\
& \in O'_{132} \xrightarrow{P_{i2} = v_{i3}} \dots \xrightarrow{P_{ip-1} = v_{ip}} \{ \{ N_{ip} \} \in \Omega'_{ip} \} \in O'_{13p} \in Q'_{13} \Rightarrow \Psi'_{13} \xrightarrow{V_{i14}} \{ \{ N_{i1} \} \in \Omega_{i1} \} \in \\
& \in O_{141} \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 \\
& \in Q'_{14} \Rightarrow \Theta.
\end{aligned} \tag{3.8}$$

У (3.8) множина параметрів  $V_{i1}$  являє собою задані параметри заготовок  $\Psi_0$ . Вихідні параметри  $p_{ip-1}$  після операцій  $O_{ip-1}$ , повинні відповідати заданим діапазнам значень вхідних параметрів  $v_{ip}$  для ТО  $O_{ip}$ .

Математична модель відображає ідеалізований ТП виготовлення МЕМС акселерометрів, при цьому вихідні  $P_{ip-1}$  і вхідні  $V_{ip}$  параметри відповідатимуть заданим допустимим діапазнам їх значень.

При накладанні системи обмежень на ТП виготовлення МЕМС акселерометрів, можливі три випадки, які наведено нижче.

Розглянемо перший випадок, коли вихідні параметри  $P_{ip-1}$ , отримані після ТО  $O_{ip-1}$ , відповідають вхідним параметрам  $V_{ip}$  для наступної ТО  $O_{ip}$ :

$$(P_{ip-1\min} \leq P_{ip-1} \leq P_{ip-1\max}) \Leftrightarrow P_{ip-1} = V_{ip} \rightarrow O_{ip}.$$

Тоді можна переходити до виконання наступної ТО  $O_{ip}$ .

Другий випадок, коли вихідні параметри  $P_{ip-1}$ , отримані після ТО  $O_{ip-1}$ , менше мінімально допустимого значення  $P_{ip-1\min}$ :

$$(P_{ip-1} < P_{ip-1\min}) \Leftrightarrow P_{ip-1} \neq V_{ip} \rightarrow O_{ip-1}.$$

В цьому випадку необхідне повернення заготовки  $\Psi_i$  на попередню операцію  $O_{ip-1}$  для доопрацювання досі доки вихідні параметри  $P_{ip-1}$  не відповідатимуть показникам, зазначеним у першому випадку.

Третій випадок, коли вихідні параметри  $P_{ip-1}$ , отримані після ТО  $O_{ip-1}$ , більше максимально допустимого значення  $P_{ip-1\max}$ :

$$(P_{ip-1} > P_{ip-1\max}) \Leftrightarrow P_{ip-1} \neq V_{ip} \rightarrow (\text{брак}).$$

В цьому випадку заготовки  $\Psi_i$ , не повертаються на попередню  $O_{ip-1}$ , і являють собою бракований виріб. Однак, ці заготовки  $\Psi_i$  можливо використовувати в іншому ТП, де вони відповідатимуть заданим параметрам (перший випадок).

Випадки 2 і 3 мають право на існування, тому що не завжди вихідні  $P_{ip-1}$  параметри відповідають вхідним  $V_{ip}$ . Наприклад, якщо після ТО травлення підкладка «недотравлена», то її можна «дотравити» на попередній ТО (випадок два), а якщо підкладка перетравлена, то це – бракована заготовка (випадок три).

Для того, щоб уникнути відбракування заготовок  $\Psi_i$  на етапах контролю  $Q'_i$ , в ТП враховується перевірка параметрів після кожної  $O_{ip}$  і після кожного етапу  $Q_i$ . На рис. 3.5 зображена графова модель взаємозв'язку допустимих значень

параметрів і 3 можливі випадки.

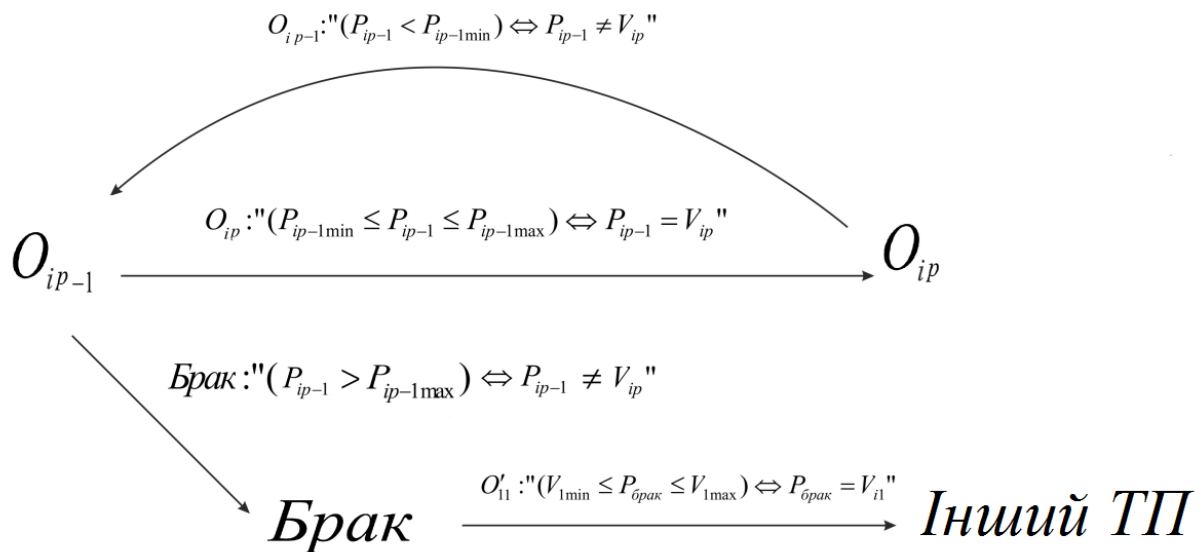


Рисунок 3.5 – Графова модель взаємозв'язку допустимих значень параметрів

Отримана структурно-параметрична модель (3.8) дозволяє визначити структуру ТП виготовлення МЕМС акселерометрів і врахувати допустимі значення параметрів, паралельність етапів і операцій, зокрема  $Q_5$  (етапу отримання елементів) і  $Q_6$  (етапу отримання компонентів), у результаті паралельності котрих отримують необхідні заготівки для складання і монтажу ЧЕ. Етапи  $Q_5$ - $Q_{10}$  повинні виконуватися паралельно з етапами  $Q_3$ - $Q_4$ , щоб на етапі  $Q_{11}$  провести монтаж кристала у виготовлений корпус. Якщо у виробництві корпусу немає необхідності, то гілка з етапами  $Q_3$ - $Q_4$  буде дорівнювати нулю і, відповідно, відсутня. Надалі необхідно визначити критерії вибору операцій та обладнання для їх виконання, щоб вирішити задачу синтезу ТП виготовлення МЕМС акселерометра. Це дасть змогу проводити оптимізацію структури ТП та визначати відповідний варіант ТП.

Типова структура ТП виготовлення МЕМС акселерометрів, яка отримана з використанням розробленої математичної моделі, представлена на рис. 3.6. Отримана структура містить всі основні етапи та деякі варіанти операцій, що їм належать. Етапи 5-8 – об'єднані до етапу виготовлення ЧЕ, а етапи 9-14 об'єднані

в етап збірки та монтажу. Необхідно врахувати, що отримана типова структура ТП містить тільки основні етапи та операції і не враховує особливості реалізації на технологічному обладнанні.

Кожний рівень проектування ТП виготовлення MEMS акселерометрів можливо охарактеризувати як багат шарову ієрархію прийняття рішень. Функціональна ієрархія виникає у зв'язку з основними аспектами проблеми прийняття рішення: вибором стратегії для реалізації процесу прийняття рішення, пошуком кращого або допустимого способу дій, що задовольняє заданим обмеженням [166].

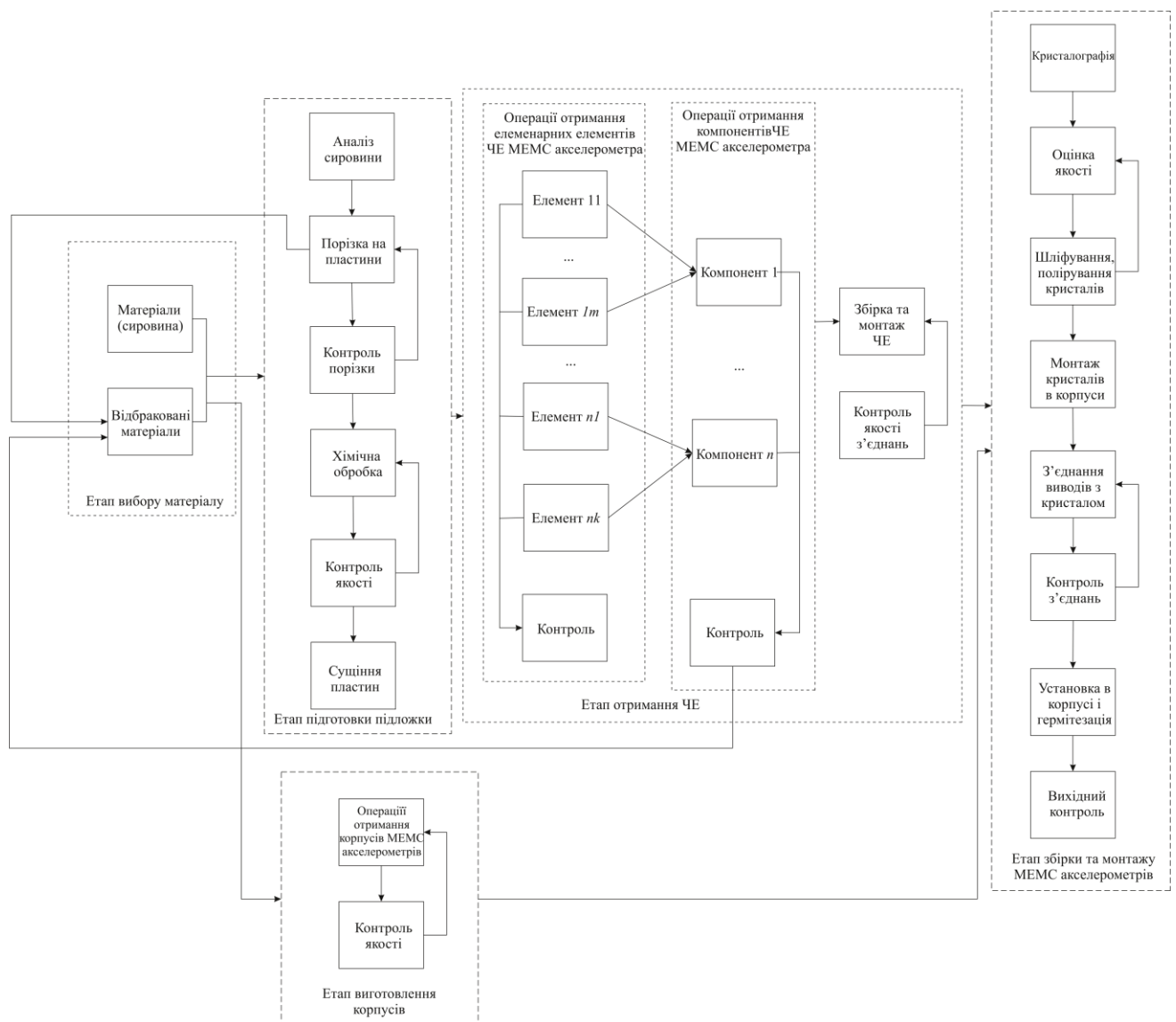


Рисунок 3.6 – Типова структура ТП виготовлення MEMS акселерометрів

Якщо розглянути функціональну ієрархію, то в даному випадку маємо трьох рівняву ієрархію, яка враховує ТЗ, взаємодію з ним, підготовку ТП, вибір ефективного обладнання та реалізацію отриманого ТП виготовлення MEMS акселерометрів.

Схема розподілу завдань функціональної багат шарової ієрархії прийняття рішень проектування ТП виготовлення MEMS акселерометрів можна представити у вигляді схеми (рис. 3.7).

Схема складається з трьох шарів:

- зовнішні фактори (ТЗ, сировина);
- обробка інформації і підготовка виробництва MEMS акселерометрів (визначення параметрів MEMS акселерометра з ТЗ для якого необхідно провести проектування ефективного ТП та вибір обладнання для його реалізації);
- виробництво (передача МК ТП виготовлення MEMS акселерометрів в якому є інформація про етапи, операції та обладнання).

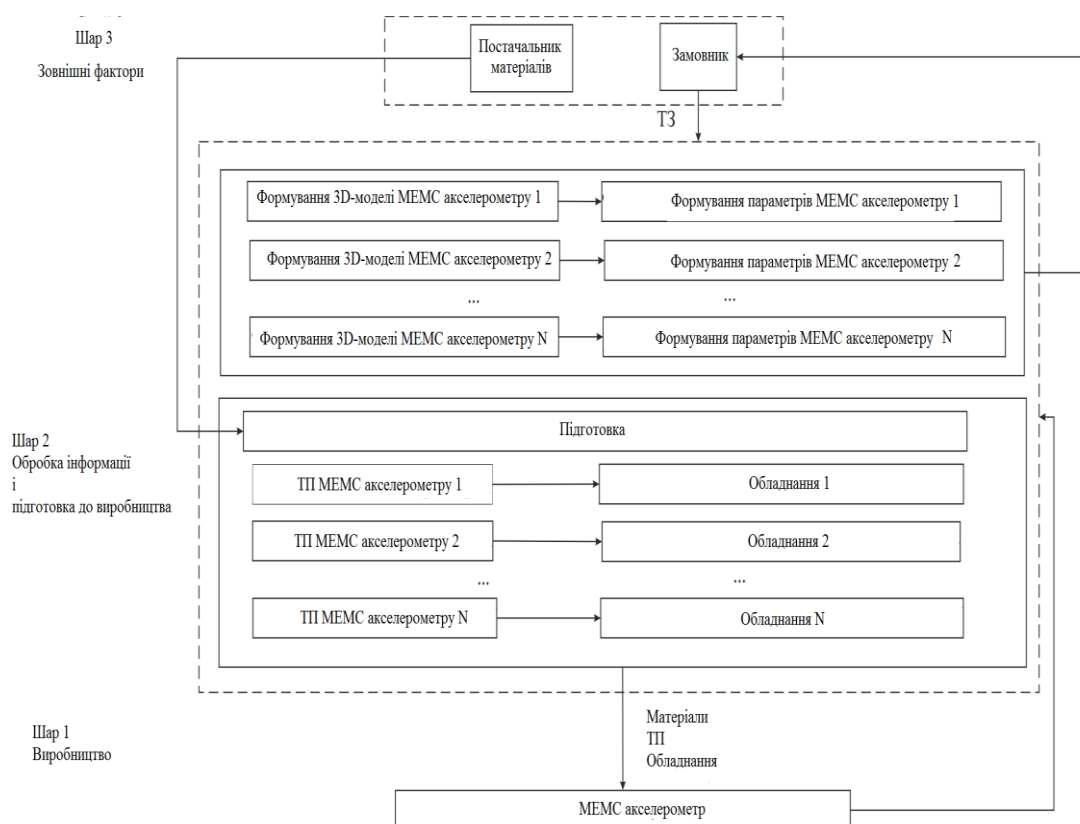


Рисунок 3.7 – Схема розподілу завдань функціональної багат шарової ієрархії прийняття рішень



### 3.2 Модель вибору типового технологічного процесу виготовлення мікромеханічних акселерометрів

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.

Введемо змінну  $Y_\tau = \{0;1\}$ , де  $Y_\tau = 1$ , якщо вибрано  $\tau$ -ий типовий ТП – інакше  $Y_\tau = 0$ . Завдання вибору з множини типових ТП виготовлення МЕМС акселерометрів є багатокритеріальним, тому для оцінки якості ТП виготовлення МЕМС акселерометрів повинна використовуватися сукупність таких параметрів як  $\bar{t}$  і  $\bar{C}$  [117]-[118], [165], тоді компромісним рішенням завдання вибору типового ТП формально визначається системою двох критеріїв:

– мінімізація часу виконання типового ТП:

$$\bar{t} = \min_{\tau \in TP} \sum_{\tau=1}^{\tau'} \bar{t}_\tau Y_\tau .$$

– мінімізація вартості типового ТП:

$$\bar{C} = \min_{\tau \in TP} \sum_{\tau=1}^{\tau'} \bar{C}_\tau Y_\tau ;$$

Обмеження:

– значення часу виконання типового ТП повинно бути не більше допустимого значення  $t^*$ :

$$\sum_{\tau=1}^{\tau'} \bar{t}_{\tau} Y_{\tau} \leq t^* ;$$

– значення вартості виконання типового ТП повинно бути не більше допустимого значення  $C^*$ :

$$\sum_{\tau=1}^{\tau'} \bar{C}_{\tau} Y_{\tau} \leq C^* .$$

Необхідно визначити найкращий варіант ТП, враховуючи, що пріоритети параметрів можуть змінюватися, виходячи з поточних потреб, і їх необхідно оперативно змінювати. Для здійснення вибору типового ТП на основі 2 критеріїв рішення повинно бути компромісним одночасно для 2 функцій. Обґрунтування вибору того чи іншого параметра є відповідальним і далеко не завжди очевидним завданням. Оскільки труднощі розв'язання задачі пов'язані з тим, що різні критерії є суперечливими при виборі за одним параметром, це може привести до погіршення якості іншого параметра. Щоб вирішити завдання, що виникло, пропонується звести його до однокритеріальної задачі такого виду:

$$\begin{cases} \bar{C} = \min_{\tau \in TP} \sum_{\tau=1}^{\tau} \bar{C}_{\tau} Y_{\tau}, \\ \sum_{\tau=1}^{\tau} \bar{t}_{\tau} Y_{\tau} \leq t^* . \end{cases} \quad (3.9)$$

Рішення задачі вибору кращого варіанту типового ТП здійснюється аналогічно моделям (2.2)-(2.6). З урахуванням цього, модель (3.9) дозволить здійснити обґрунтований вибір кращого варіанту типового ТП за критерієм вартості та обмеженням за часом. Після визначення типового ТП необхідно вибрати операції на кожному етапі.

### 3.3 Математична модель вибору операцій

Кожен типовий ТП виготовлення МЕМС акселерометрів різний за часом виконання  $\bar{t}$  і вартістю  $\bar{C}$ . Виходячи з цього, метою є вибір ТО  $O_{ip}$  на етапі  $Q_i$ , що забезпечує найменші витрати часу  $\bar{t}$  і найменшу собівартість виконання етапу  $\bar{C}$ . Згідно зі структурою МЕМС акселерометра (підпункт 2.1), він має 3 рівні для яких необхідно проводити вибір операцій.

Тоді, якщо розглядати МЕМС акселерометр на рівні виготовлення компонентів то згідно з моделлю (3.8) відома множина операцій  $O_{ip}$  на кожному  $i$ -му етапі, кожна з яких виконується для отримання  $n$ -го компоненту  $S_n^2$  для якого відомо час  $\bar{t}$  та вартість виконання  $\bar{C}$ .

Якщо розглядати задачу вибору на рівні структури (тобто МЕМС акселерометр-аналог), то згідно з моделлю (3.8) відома множина операцій  $O_{ip}$  на кожному  $i$ -му етапі, кожна з яких виконується для отримання  $e$ -го елементу  $S_e^3$  та  $n$ -го компоненту  $S_n^2$  для яких відомо час  $\bar{t}$  та вартість 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.

Введемо змінну  $\bar{Y}_{ip} = \{0;1\}$ , де  $\bar{Y}_{ip}=1$ , якщо вибрана  $p$ -а операція на  $i$ -му етапу, інакше  $\bar{Y}_{ip}=0$ ; змінну  $\bar{Y}_{ipn} = \{0;1\}$ , де  $\bar{Y}_{ipn}=1$ , якщо вибрана  $p$ -а операція на  $i$ -му етапу виготовлення  $n$ -го компоненту, інакше  $\bar{Y}_{ipn}=0$ ; змінну  $\bar{Y}_{ipne} = \{0,1\}$ , де  $\bar{Y}_{ipne}=1$ , якщо вибрана  $p$ -а операція на  $i$ -му етапу виготовлення  $e$ -го елементу  $n$ -го компоненту, інакше  $\bar{Y}_{ipne}=0$ .

Критеріями мінімізації витрат часу на виконання етапів  $Q_i$  є:

$$\bar{t} = \min_{p \in Q} \sum_{p=1}^{p'} t_{ip} \bar{Y}_{ip}, \forall i = \overline{1, i'}, \quad (3.10)$$

де  $t_{ip}$  – час виконання  $p$ -ї ТО на  $i$ -му етапі  $Q_i$ .

Критерієм мінімізації вартості виконання етапів  $Q_i$  є:

$$\bar{C} = \min_{p \in Q} \sum_{p=1}^{p'} C_{ip} \bar{Y}_{ip}, \forall i = \overline{1, i'}, \quad (3.11)$$

де  $C_{ip}$  – вартість виконання  $p$ -ї ТО на  $i$ -му етапі  $Q_i$  виготовлення.

Сформуємо обмеження:

– час виконання всіх етапів  $Q_i$  повинен бути не більше допустимого значення  $t_{ip}^*$  :

$$\sum_{i=1}^{i'} \sum_{p=1}^{p'} t_{ip} \bar{Y}_{ip} \leq t_{ip}^*. \quad (3.12)$$

– вартості виконання всіх етапів  $Q_i$  повинні бути не більше допустимого значення  $C_{ip}^*$  :

$$\sum_{i=1}^{i'} \sum_{p=1}^{p'} C_{ip} \bar{Y}_{ip} \leq C_{ip}^*. \quad (3.13)$$

Вирішення задачі вибору кращого варіанту послідовності операцій ТП здійснюється аналогічно моделям (2.2)-(2.6). Запропоновані моделі (3.10)-(3.11) дозволять вирішити завдання визначення операцій на кожному етапі. Це завдання належить до завдань лінійного багатокритеріального дискретного програмування з булевими змінними, для якого задані значення обмежень за вартістю та часом виконання.

Після вибору операцій на етапах за необхідністю можливо проводити вибір технологічного обладнання.

### 3.4 Математична модель вибору обладнання

Для задачі вибору технологічного обладнання 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  $O_{ip}$  операцій на  $i$ -му етапі  $Q_i$  необхідно визначити кращий варіант  $w$ -го обладнання  $w^o \in W$ .

Кожне обладнання  $E_w$  характеризується рядом показників: продуктивністю, вартістю, енергозатратністю та терміном служби. Тоді  $EP_{ipw}, PS_{ipw}, F_{ipw}, SL_{ipw}$  – продуктивність, вартість, енерговитрати, термін служби відповідного  $w$ -го обладнання для кожної  $p$ -ої операції на  $i$ -ому етапі. Також відомий час виконання  $p$ -ої операції  $O_{ip}$  на  $w$ -му обладнанні ( $TE_{pw}$ ) та вартість виконання  $p$ -ої операції  $O_{ip}$  на  $w$ -му обладнанні ( $CE_{pw}$ ).

Введемо змінну  $\overline{Y}_{ipw} = \{0;1\}$ , де  $\overline{Y}_{ipw}=1$ , якщо вибрано  $w$ -е обладнання для  $p$ -ої операції на  $i$ -му етапі, інакше  $\overline{Y}_{ipw}=0$ .

Вибір  $w$ -го обладнання  $p$ -ої операції на  $i$ -му етапі здійснюється за частковими критеріями:

– максимізацією продуктивності обладнання:

$$EP = \max_{w \in W} \sum_{p=1}^{p'} \sum_{w=1}^{w'} EP_{ipw} \overline{Y}_{ipw}, \forall i = \overline{1, i'}; \quad (3.14)$$

– мінімізацією вартості обладнання:

$$PS = \min_{w \in W} \sum_{p=1}^{p'} \sum_{w=1}^{w'} PS_{ipw} \overline{Y}_{ipw}, \forall i = \overline{1, i'}; \quad (3.15)$$

– мінімізацією енерговитрат обладнання:

$$F = \min_{w \in W} \sum_{p=1}^{p'} \sum_{w=1}^{w'} F_{ipw} \bar{Y}_{ipw}, \forall i = \overline{1, i'}; \quad (3.16)$$

– максимізацією терміну служби обладнання:

$$SL = \max_{w \in W} \sum_{p=1}^{p'} \sum_{w=1}^{w'} SL_{ipw} \bar{Y}_{ipw}, \forall i = \overline{1, i'}. \quad (3.17)$$

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:

– продуктивність обладнання повинна бути не менше заданого значення  $EP_3$ :

$$\sum_{p=1}^{p'} \sum_{w=1}^{w'} EP_{ipw} \bar{Y}_{ipw} \geq EP_3; \forall i = \overline{1, i'}; \quad (3.18)$$

– вартість обладнання повинна бути не більше заданого значення  $PS_3$ :

$$\sum_{p=1}^{p'} \sum_{w=1}^{w'} PS_{ipw} \bar{Y}_{ipw} \leq PS_3; \forall i = \overline{1, i'}; \quad (3.19)$$

– енерговитрати обладнання повинні бути не більше заданого значення  $F_3$ :

$$\sum_{p=1}^{p'} \sum_{w=1}^{w'} F_{ipw} \bar{Y}_{ipw} \leq F_3; \forall i = \overline{1, i'}; \quad (3.20)$$

– термін служби обладнання повинний бути не менше заданого

значення  $SL_3$ :

$$\sum_{p=1}^{p'} \sum_{w=1}^{w'} SL_{ipw} \bar{Y}_{ipw} \geq SL_3; \forall i = \overline{1, i'}; \quad (3.21)$$

– час виконання  $p$ -ої операції на  $w$ -ому обладнанні не повинен бути більше виконання операції  $t_{ip}$ :

$$\sum_{p=1}^{p'} \sum_{w=1}^{w'} TE_{ipw} \bar{Y}_{ipw} \leq t_{ip}; \forall i = \overline{1, i'}; \quad (3.22)$$

– вартість виконання  $p$ -ої операції на  $w$ -ому обладнанні не повинна бути більше вартості операції  $C_{ip}$ :

$$\sum_{p=1}^{p'} \sum_{w=1}^{w'} CE_{ipw} \bar{Y}_{ipw} \leq C_{ip}; \forall i = \overline{1, i'}; \quad (3.23)$$

– для кожної  $p$ -ої операції на  $i$ -му етапу можна вибрати тільки одне обладнання:

$$\sum_{v=1}^{w'} \dot{Y}_{ipw} = 1; \forall p = \overline{1, p'}; \forall i = \overline{1, i'}. \quad (3.24)$$

Вирішення задачі вибору кращого варіанту обладнання для операцій або груп операцій здійснюється аналогічно моделям (2.2)-(2.6), а моделі (3.14)-(3.17) за обмеженнями (3.18)-(3.24) відносяться до завдань лінійного багатокритеріального дискретного програмування з булевими змінними.

### 3.5 Імітаційна модель технологічного процесу виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів

Для узгодження операцій  $O_{ip}$  з урахуванням послідовності виконання операцій виготовлення МЕМС акселерометрів, їх необхідно синхронізувати таким чином, щоб узгодити початок наступної ТО  $O_{ip}$  і кінець попередньої  $O_{ip-1}$  без простою обладнання.

У процесі проектування нового ТП може виникнути розбіжність у часі виконання етапів. Це призводить до простою обладнання і, як наслідок, до економічних втрат. Для оцінки отриманого ТП необхідно провести його моделювання. Для цього скористаємося методами імітаційного моделювання. ТП виготовлення МЕМС акселерометрів може бути представлений як багатоканальна система масового обслуговування (СМО) [166], що дозволить аналізувати ефективність отриманого маршруту ТП та продуктивність потоків.

Головною задачею імітаційного моделювання ТП є оцінка кількісних характеристик процесу виготовлення з урахуванням характеристик обладнання та параметрів ТП. Імітаційна модель може бути базою для постановки завдання та вирішення оптимізаційних задач щодо визначення необхідної кількості оснастки, робочих місць, кількості обладнання, режимів роботи обладнання тощо.

Формалізуємо ТП виготовлення МЕМС акселерометрів за допомогою  $Q$ -схеми і побудуємо її структуру. При побудові структури СМО необхідно враховувати три основних елементи [166]:  $D$  – джерела;  $H$  – накопичувачі;  $K$  – канали обслуговування заявок. В якості джерел служать:  $D_1$  – заготівки підкладки (обрані пластини) та необхідна сировина для виконання етапів отримання ЧЕ;  $D_2$  – заготівки та необхідна сировина для виконання етапів отримання корпусу МЕМС акселерометрів, які надходять в систему з інтенсивністю  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  відповідно.

Як канали обслуговування  $K_i$ ,  $i = \overline{1,13}$  виступають етапи ТП виготовлення МЕМС акселерометрів. Відповідно до структурно-параметричної моделі виготовлення МЕМС акселерометрів (3.8):  $(Q_1-Q_2)$  об'єднані в канал  $K_1$ , етапи



( $Q_3-Q_4$ ) представлені як канали ( $K_2-K_3$ ), етапи ( $Q_5-Q_{14}$ ) представлені як канали ( $K_4-K_{13}$ ). Етапи  $Q_5-Q_6$  розташовані на  $Q$ -схемі послідовно, тому що комплекс операцій або операції, що виконуються на цих етапах можуть-бути реалізовані на одному обладнанні.

Для імітаційного моделювання ТП виготовлення МЕМС акселерометрів необхідно задати такі вихідні дані:

- $t_1$  – час, необхідний на виконання етапів вибору  $Q_1$  і підготовки підкладки  $Q_2$ ;
- $(t_2-t_n)$  час, необхідний на виконання операцій отримання елементів  $(1-n)$  на етапі  $Q_5$ ;
- $(t_{n+1}-t_{2n})$  – час, необхідний на виконання операцій контролю отриманих елементів  $(1-n)$  відповідно;
- $(t_{2n+1}-t_{2n+i})$  – час, необхідний на виконання операцій отримання компонентів  $(1-n)$  на етапі  $Q_6$ ;
- $t_{2n+i+1}$  – час, необхідний на виконання операцій збірки ЧЕ на етапі  $Q_7$ ;
- $(t_{2n+i+2})$  – час, необхідний на виконання операцій контролю, отриманих ЧЕ на етапі  $Q_8$ , а також етапів ( $Q_9-Q_{10}$ );
- $(t_{2n+i+3})$  – час, необхідний на виконання операцій виготовлення корпусів МЕМС акселерометрів на етапах ( $Q_3-Q_4$ );
- $(t_{2n+i+4})$  – час, необхідний на виконання операцій збірки і монтажу МЕМС акселерометрів на етапах ( $Q_{11}-Q_{14}$ ).

На рис. 3.8 представлена узагальнена  $Q$ -схема ТП виготовлення МЕМС акселерометрів на рівні етапів.

Для рівня операцій на кожному етапі також розроблені структурні схеми імітаційних моделей, що дозволяє визначити показники для окремих ТО якщо в цьому буде потреба. Фрагмент отриманої імітаційної моделі однієї гілки етапу  $Q_5$  (отримання балки) представлено на рис. 3.9. Модель дає можливість провести імітаційне моделювання процесу за різні проміжки часу та провести аналіз кількісних характеристик.

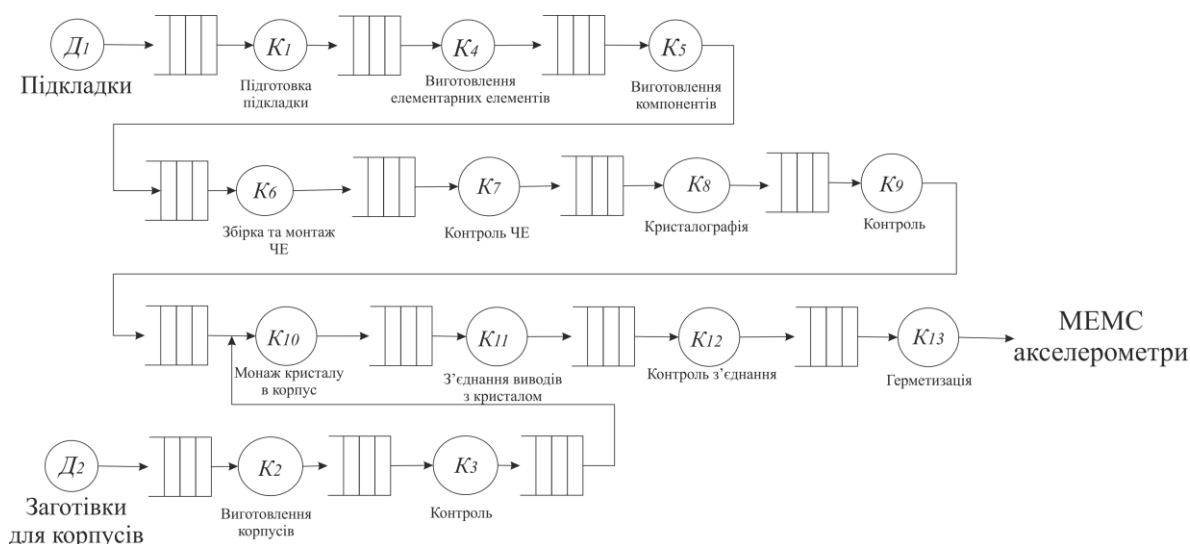


Рисунок 3.8 – Q-схема ТП виготовлення MEMS акселерометрів

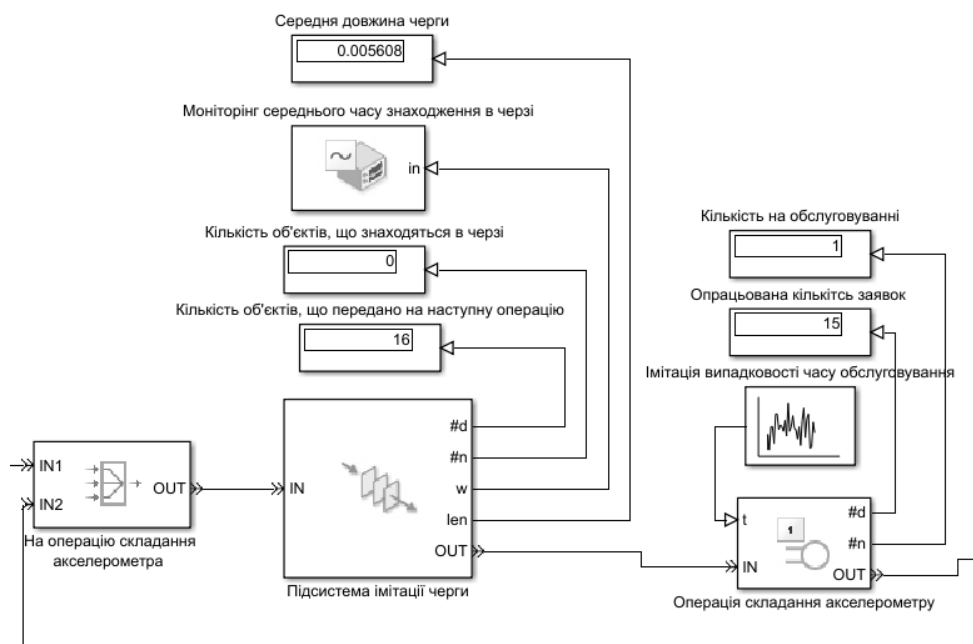


Рисунок 3.9 – Фрагмент структурної схеми імітаційної моделі ТО складання MEMS акселерометру

Реальні розподілення та характеристики ТО оцінюються безпосередньо на конкретному виробництві та пов'язані з реальним обладнанням. Ці дані змінюються впродовж виробництва та їх моніторинг є обов'язковою складовою виробничого процесу. Імітація процесу виконується з урахуванням характеру розподілу випадкової величини виконання ТО, яка коригується впродовж реального ТП за результатами кількісної оцінки роботи обладнання.

В результаті імітаційного моделювання ТП виготовлення МЕМС акселерометрів генерується інформація (табл. 3.1).

В таблиці 3.1:

- коефіцієнт використання обладнання ( $k_i$ , коефіцієнт використання каналів ( $K_1 - K_{13}$ )), причому для кожної операції визначається власне значення;
- час ( $t_i$ ), що витрачається на виконання етапів ( $Q_1 - Q_{14}$ ) ТП виготовлення МЕМС акселерометрів;
- довжину черги ( $l_i$ ) заготовок  $\Psi_i$  на виконання операцій  $O_{ip}$  на етапах ( $Q_1 - Q_{14}$ ) ТП виготовлення МЕМС акселерометрів;
- час перебування ( $t_{ci}$ ) заготовок  $\Psi_i$  у черзі виконання операцій  $O_{ip}$  на етапах  $Q_1 - Q_{14}$  ТП виготовлення МЕМС акселерометрів.

Таблиця 3.1 – Отримані характеристики ТП

Етап ТП	Коефіцієнт використання обладнання на етапі	Час виконання етапів	Довжина черги	Час перебування заготовок в черзі
$Q_1 - Q_2$	$k_1$	$t_1$	$l_1$	$tc_1$
$Q_3$	$k_2$	$t_2$	$l_2$	$tc_2$
$Q_4$	$k_3$	$t_3$	$l_3$	$tc_3$
$Q_5$	$k_4$	$t_4$	$l_4$	$tc_4$
$Q_6$	$k_5$	$t_5$	$l_5$	$tc_5$
$Q_7$	$k_6$	$t_6$	$l_6$	$tc_6$
$Q_8$	$k_7$	$t_7$	$l_7$	$tc_7$
$Q_9$	$k_8$	$t_8$	$l_8$	$tc_8$
$Q_{10}$	$k_9$	$t_9$	$l_9$	$tc_9$
$Q_{11}$	$k_{10}$	$t_{10}$	$l_{10}$	$tc_{10}$
$Q_{12}$	$k_{11}$	$t_{11}$	$l_{11}$	$tc_{11}$
$Q_{13}$	$k_{12}$	$t_{12}$	$l_{12}$	$tc_{12}$
$Q_{14}$	$k_{13}$	$t_{13}$	$l_{13}$	$tc_{13}$
$\Sigma$	$\sum_{i=1}^{13} k_i$	$\sum_{i=1}^{13} t_i$	$\sum_{i=1}^{13} l_i$	$\sum_{i=1}^{13} t_{ci}$
Середнє значення	$\frac{\sum_{i=1}^{13} k_i}{13}$	$\frac{\sum_{i=1}^{13} t_i}{13}$	$\frac{\sum_{i=1}^{13} l_i}{13}$	$\frac{\sum_{i=1}^{13} t_{ci}}{13}$

Окрема інформація для зручності може відображатися, наприклад, у вигляді часової діаграми. Для підвищення точності і забезпечення достовірності

результатів доцільно виконати багаторазове імітаційне моделювання з різними початковими умовами.

### 3.6 Висновки до розділу 3

Удосконалена модель структурно-параметричного синтезу ТП виготовлення МЕМС акселерометрів дозволяє здійснити вибор типового ТП, операцій та обладнання та отримати структуру ТП на рівні етапів, операцій і маршрутів. Для виключення неефективних маршрутів з дерева можливих рішень побудови ТП проектування запропоновано систему обмежень, які накладаються на ТО, прискорити процес що дозволяє за рахунок.

Вибір операцій здійснюється критеріями вартості та обмеженням на час виконання операцій на етапах. Вибір операцій можливо здійснювати на різних рівнях структури МЕМС акселерометра.

Для реалізації вибору обладнання запропонована математична модель на основі чотирьох часткових критеріїв: продуктивність, енерговитрати, вартість обладнання, термін служби. Її використання дозволить у випадку необхідності обрати більш ефективне технологічне обладнання за рахунок врахування функціонально-вартісних характеристик і обмежень при виборі обладнання.

На основі структурно-параметричної моделі синтезу ТП виготовлення МЕМС акселерометрів розроблено імітаційну модель. Ця модель дозволить проводити оцінки ТП виготовлення МЕМС акселерометрів. Результати дослідження ТП за допомогою розробленої імітаційної моделі можна використовувати в якості рекомендацій при автоматизованому проектуванні ТП виготовлення МЕМС акселерометрів.

Основні результати третього розділу опубліковано у роботах [6], [8], [20]-[21], [27].

У третьому розділі використано інформацію з джерел [85]-[86], [161]-[166].

## РОЗДІЛ 4

# МЕТОДИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ

### 4.1 Узагальнений метод автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів

Виготовлення MEMS акселерометрів реалізується з використанням часткових технологій, що базуються на різних методах обробки заготовок [61]. Внаслідок чого виникає завдання формування ТП і його синтезу. Вирішення цього завдання має ітераційний характер, тобто здійснюється в кілька послідовних етапів, з поступовим уточненням змісту ТП виготовлення MEMS акселерометрів.

Запропонований узагальнений метод автоматизованого проектування ТП виготовлення MEMS акселерометрів. На відміну від відомих, він заснований на двох методах: вибору типового ТП і пошуку аналогів окремих елементів ТП. Вхідні дані для автоматизованого проектування отримують з ТЗ на розробку MEMS акселерометра акселерометра із зазначеними функціонально-конструктивними обмеженнями, якими характеризується виріб. Після обробки даних відбувається визначення MEMS акселерометра-аналога на основі запропонованих математичних моделей (у розділі 2) за заданими критеріями та обмеженнями.

Якщо пошук проведено успішно виконується перехід до методу вибору типового ТП, в якому необхідно задати критерії вибору, інакше – до методу пошуку аналогів окремих елементів ТП за яким відбувається пошук по компонентам MEMS акселерометрів. При успішному пошуку компонентів здійснюється пошук операцій їх виготовлення і формування ТП. В іншому випадку здійснюється пошук операцій на більш низькому рівні – рівні елементів,

потім відбувається формування ТП.

Запропонований узагальнений метод представлено у вигляді структурної моделі (рис. 4.1).

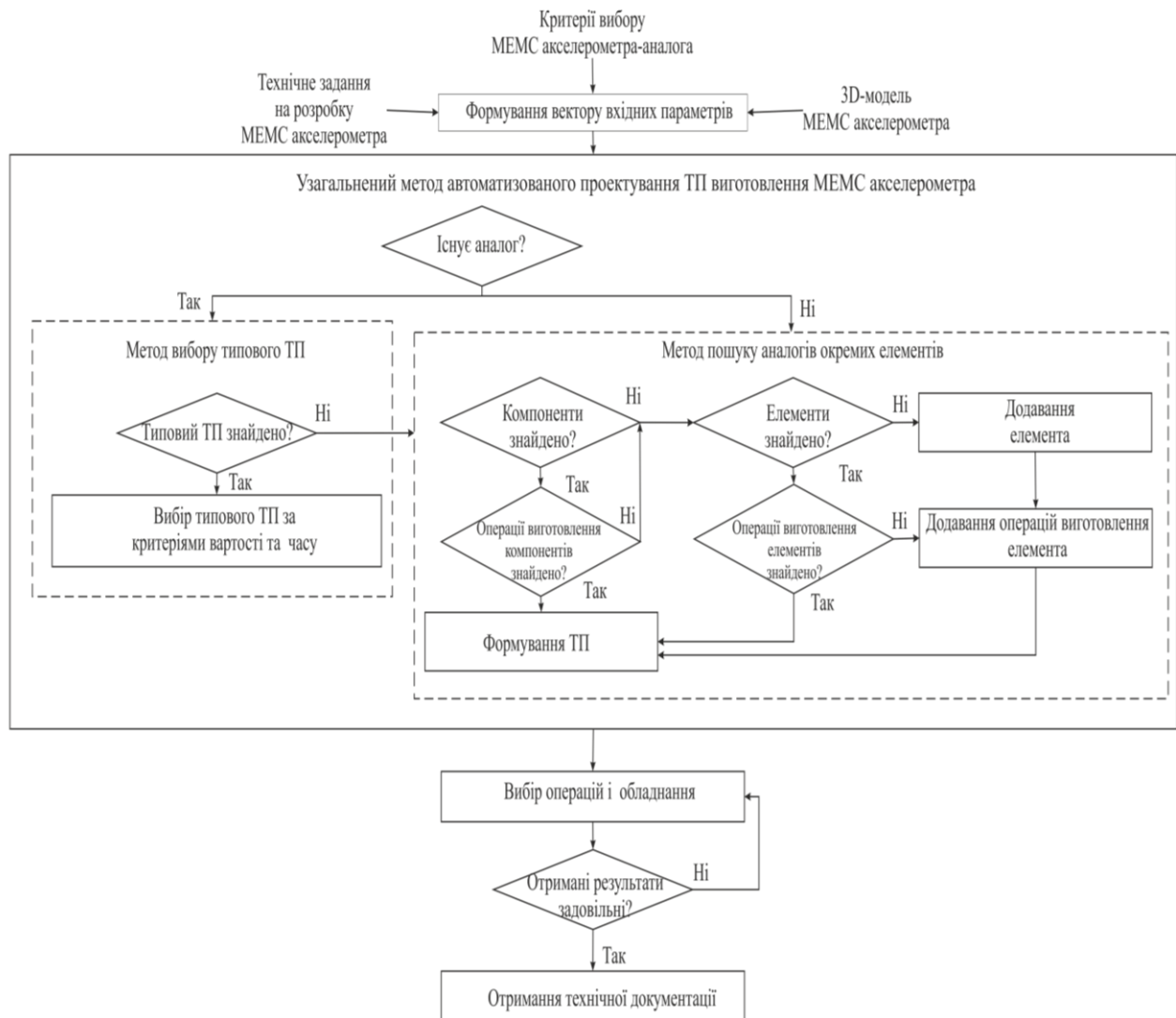


Рисунок 4.1 – Структурна модель узагальненого методу автоматизованого проектування ТП виготовлення MEMС акселерометра

Формування ТП відбувається на базі удосконаленої моделі структурно-параметричного синтезу ТП (підрозділ 3.1), де здійснюється вибір типового ТП (підрозділ 3.2), вибір операцій та обладнання за вартісними і часовим критерієм (підрозділи 3.3-3.4) за результатами якого проводиться перевірка отриманої моделі (підрозділ 3.5). Якщо перевірку проведено успішно, то відбувається формування технічної документації (МК ТП), інакше – проводиться повторний

вибір операцій і обладнання до тих пір, – поки вони не задовольняють умови пошуку.

Узагальнений метод автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометра приведено нижче.

*Крок 1.* Задання вхідних даних з ТЗ та критеріїв вибору.

*Крок 2.* Формування вектора функціонально-конструктивних показників МЕМС акселерометра  $A_k$  з ТЗ.  $P$  задається індексом, якщо  $P_{asp} = \{P_n \text{ якщо } x \leq P_{asp} \leq y\}$ , то до вектора показників записується значення обмежень  $P_{asp} = n$ . В іншому випадку, коли параметр відсутній або невідомий, до вектора параметрів записується нуль.

*Крок 3.* Введення значень критеріїв визначення МЕМС акселерометра-аналога.

*Крок 4.* Введення значень вагових коефіцієнтів або визначення переваг критеріїв.

*Крок 5.* Перерахунок матриці параметрів МЕМС акселерометрів з урахуванням вагових коефіцієнтів.

*Крок 6.* Формування вектора опису МЕМС акселерометрів.

*Крок 7.* Розрахунок матриці відстаней.

*Крок 8.* Формування ієрархічного дерева кластерів.

*Крок 9.* Побудова дендрограми.

*Крок 10.* Пошук МЕМС акселерометра-аналога. При результаті, що задовольняє умовам, виконується перехід до *Кроку 12*, інакше – до методу пошуку аналогів окремих елементів (*Крок 11а*).

*Крок 11.* Пошук МЕМС акселерометра-аналога. При результаті, що задовольняє умовам, виконується перехід до *Кроку 12*, інакше – використовується метод пошуку аналогів окремих елементів.

*Крок 11а.* Пошук компонентів. Якщо знайдено – до *Кроку 11б*, інакше – до *Кроку 11в*.

*Крок 11б.* Вибір операцій виготовлення компонентів за часовими та вартісними критеріями. Якщо вибрано – виконується перехід до *Кроку 11ж*,

інакше – до *Кроку 11в*.

*Крок 11в*. Пошук елементів. Якщо знайдено – виконується перехід до *Кроку 11г*, інакше до *Кроку 11д*.

*Крок 11г*. Вибір операцій виготовлення елементів за часовими та вартісними критеріями. Якщо вибрано переходимо до *Кроку 11ж*, інакше до *Кроку 11е*.

*Крок 11д*. Додавання елементу. Перехід до *Кроку 11е*.

*Крок 11е*. Додавання операції. Перехід до *Кроку 11ж*.

*Крок 11ж*. Формування структури ТП.

*Крок 12*. Формування таблиці типових ТП.

*Крок 13*. Аналіз отриманих результатів.

*Крок 14*. Вибір типового ТП за вартісними і часовими критеріями. Якщо результати задовольняють умови пошуку – до *Кроку 15*, інакше – виконується перехід до методу пошуку аналогів окремих елементів.

*Крок 15*. Вибір операцій за критеріями часу та вартості.

*Крок 16*. Вибір обладнання за критеріями продуктивності, вартості, енергозатратності, терміну служби.

*Крок 17*. Оцінка отриманого ТП. При результаті, що задовольняє умовам – виконується перехід до *Кроку 18*, інакше – до *Кроку 15*.

*Крок 18*. Формування МК.

Розроблений узагальнений метод автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів дозволяє отримати ефективний ТП за рахунок зниження вартості та часу виготовлення.

Існуючий метод вибору типових ТП має ряд недоліків, що пов'язані з необхідністю наявності класифікатору акселерометрів-аналогів, які повинні мати найбільш повний опис характеристик (за якими здійснюється пошук). При наявності великого об'єму МЕМС акселерометрів-аналогів та їх ТП, зменшується швидкість пошуку типових ТП. Для усунення недоліків базового методу вибору типових ТП виготовлення МЕМС акселерометрів пропонується провести його удосконалення.



## 4.2 Удосконалення методу вибору типового технологічного процесу виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів

Типізація ТП ґрунтується на класифікації об'єктів виробництва і полягає в класифікації їх за конструктивними ознаками на окремі групи, для яких можлива розробка типових ТП або операцій.

Скориставшись математичними моделями, запропонованими в 2 розділі, можна визначити МЕМС акселерометр-аналог  $Ak^{asp}$ , залежно від типу призначення та за заданими критеріями (розділ 2). Кожна з груп акселерометрів  $Ak^{asp}$  є кластером, в якому відображені параметри і їх значення, що характеризують цей конкретний тип акселерометрів. Вектор функціонально-конструктивних показників  $P_{asp} = (p_n^1, p_n^2, \dots, p_n^p)$ , з значенням типу та структури є початковими даними для класифікації акселерометрів і формування окремих кластерів.

Необхідно на підставі параметрів МЕМС акселерометра, що містяться в матриці, розбити множину акселерометрів  $Ak^{asp}$  на  $m$  підмножину (кластери)  $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m$  так, щоб кожен акселерометр  $Ak^{asp}$  належав до однієї і тільки однієї підмножини розбиття. Необхідно виконувати умову коли МЕМС акселерометри, що належать різним підмножинам (кластерам), були різнорідними (конструктивно несхожими).

Таким чином, існує завдання класифікації МЕМС акселерометрів на класи  $\pi$  (кластери), що не перетинаються. Тоді постановку завдання класифікації МЕМС акселерометрів можна формалізувати за такими умовами:

$$\pi_1 \cup \pi_2 \dots \cup \pi_m = \{Ak_1, Ak_2, \dots, Ak_j\},$$

$$|\pi_1| + |\pi_2| + \dots + |\pi_m| = |\{Ak_1, Ak_2, \dots, Ak_j\}|, \forall l \in \{1, 2, \dots, m\} \pi_m \neq \emptyset.$$

Вирішенням поставленої задачі є відповідь на питання: до якого з кластерів  $\pi_m$  належить МЕМС акселерометр  $Ak^{asp}$ .

Пошук аналога-акселерометра зводиться до завдання класифікації MEMS акселерометрів на основі наявної інформації, яка була б отримана і описана за допомогою математичних моделей MEMS акселерометра.

Алгоритми кластерного аналізу дозволяють здійснити пошук кластерів і значень відстаней до середини кластера. Це дозволить, використовуючи алгоритм, знайти середину найбільш відповідного кластера і віднести до нього MEMS акселерометр, що необхідно виготовити. Знаючи, до якого кластера відноситься акселерометр, ТП якого проектується, можливо запропонувати варіанти побудови типового ТП, що можливо використати для виготовлення акселерометрів даного кластера.

Виходячи з вище сказаного, виникає необхідність визначення метрики оцінки відстаней, яка є логічним прийомом квантифікації властивості схожості об'єктів: чим ближче між собою об'єкти в цій метриці, тим вони більше схожі і навпаки [94].

Нехай задана множина акселерометрів  $Ak^{asp} = \{Ak_1, Ak_2, Ak_3, \dots, Ak_n\}$  існуючих MEMS акселерометрів, кожен з яких характеризується  $P$  показниками. Множина показників (ознак)  $P$  акселерометра  $Ak^{asp}$  може бути представлена як  $n$ -точок в  $p$ -мірному ознаковому просторі. Тоді,  $N$  показників акселерометра  $Ak_1, Ak_2, \dots, Ak_n$ , можна представити у вигляді матриці розмірністю  $p$  на  $n$ :

$$P_{p \times n} = \begin{bmatrix} p_1^1 & p_2^1 & \dots & p_n^1 \\ p_1^2 & p_2^2 & \dots & p_n^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_1^p & p_2^p & \dots & p_n^p \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

де кожен рядок матриці  $P_i = (p_i^1, p_i^2, \dots, p_i^p)$  – вектор показників  $i$ -го акселерометра, який є точкою в  $p$ -мірному ознаковому просторі.

Відповідно до [167] матриця (4.1) називається матрицею «об'єкт-властивість». Таким чином, для кожного  $Ak_n$  акселерометра існує вектор його показників  $P_n = (p_n^1, p_n^2, \dots, p_n^p)$ .

Нехай, до множини акселерометрів  $Ak$  належать деякі акселерометри  $Ak_j$  і  $Ak_i$ , які описані векторами показників  $P_j$  і  $P_i$ . Тоді для множини акселерометрів  $Ak$  буде задана метрика  $d_{ij}$ . Тоді для будь-якої пари акселерометрів, що належить множині  $Ak$ , визначено число  $d_{ij}$ , яке відповідно до [168] повинно задовольняти наступні умови:

- аксіома тотожності:  $d_{ij} = 0 \Leftrightarrow i \equiv j$ ;
- аксіома симетричності:  $d_{ij} = d_{ji} \forall i, j$ ;
- нерівність трикутника:  $\forall i, j, z \in Ak$  виконує нерівність:  $d_{iz} \leq d_{ij} + d_{zj}$ .

Тоді, відстань між елементами множини акселерометрів  $Ak_i$  і  $Ak_j$  ненегативним числом  $d_{ij}$ , яке б задовольняло вище описаним умовам. Отже, вектори відстаней між парами параметрів МЕМС акселерометрів  $d_{ij}$  можуть бути представлені у вигляді матриці відстаней.

Матриця відстаней  $\Delta$  між парами векторів МЕМС акселерометрів симетрична і задається в наступному вигляді:

$$\Delta = \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & \dots & d_{1j} \\ d_{21} & 0 & \dots & d_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

де  $d_{ij} = 0$  для  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Отже, отримавши матрицю відстаней  $\Delta$ , можливо побудувати дендрограму  $Dn(\Delta)$ , яка дозволить в графічному вигляді відобразити зв'язки між об'єктами із заданої множиною акселерометрів, у виді послідовності об'єднання (розділення) кластерів акселерометрів.

Причому врахуємо, що додаючи в базу даних МЕМС акселерометр  $Ak_{n+1}$  ТП якого проектується, з новим набором його показників  $(p_{(n+1)}^1, p_{(n+1)}^2, \dots, p_{(n+1)}^p)$  матриця (4.1) збільшуватиметься на один рядок з набором відповідних показників. Наступним етапом є перерахунок матриці відстаней (4.2) з

урахуванням доданого МЕМС акселерометра  $Ak_{n+1}$  і побудовою відповідної дендрограми  $Dn^*(\Delta^*)$ .

Для вирішення завдання класифікації МЕМС акселерометрів необхідно кількісно визначити поняття схожості і різнорідності. Це завдання вирішується наступним чином: коли МЕМС акселерометри  $Ak_j$  і  $Ak_i$ , що описуються векторами параметрів  $P_j$  і  $P_i$ , класифікуються до одного кластеру за функціонально-конструктивними показниками, то відстань між відповідними точками в  $p$ -мірному ознаковому просторі  $P_j$  і  $P_i$  досить мала. Якщо навпаки – відстань між точками  $P_j$  і  $P_i$  буде досить великою, то акселерометри  $Ak_j$  і  $Ak_i$  класифікуються в різні кластери. Відмінність між МЕМС акселерометрами визначається на основі поняття відстані (метрики)  $d_{ij}$  між точками  $P_j$  і  $P_i$ .

Одне розбиття на кластери буде вкладеним в інше, якщо будь-який кластер першого є підмножиною іншого кластера. Для зручності, при поділу на кластери вказуються тільки номери МЕМС акселерометрів. Так як для класифікації МЕМС акселерометрів використовується ієрархічна кластеризація, то отримується послідовність вкладеного розбиття на кластери. Таким чином, отримується послідовність кластеризацій, яка не тільки не суперечить одна одній, а й уточнює одна одну.

Запишемо удосконалений метод вибору типового ТП виготовлення МЕМС акселерометрів:

*Крок 1.* Задання вхідних даних з ТЗ та критеріїв вибору.

*Крок 2.* Формування вектора функціонально-конструктивних показників МЕМС акселерометра  $Ak$  з ТЗ.  $P$  задається індексом, якщо  $P_{asp} = \{P_n \text{ якщо } x \leq P_{asp} \leq y\}$ , то до вектора показників записується значення обмежень  $P_{asp} = n$ . В іншому випадку, коли параметр відсутній або невідомий, до вектора параметрів записується нуль.

*Крок 3.* Введення значень критеріїв визначення МЕМС акселерометра-аналога.

*Крок 4.* Введення значень вагових коефіцієнтів або визначення переваг

критеріїв.

*Крок 5.* Перерахунок матриці параметрів МЕМС акселерометрів з урахуванням вагових коефіцієнтів.

*Крок 6.* Формування вектора опису МЕМС акселерометрів.

*Крок 7.* Розрахунок матриці відстаней.

*Крок 8.* Формування ієрархічного дерева кластерів.

*Крок 9.* Побудова дендрограми.

*Крок 10.* Пошук МЕМС акселерометра-аналога. При результаті, що задовольняє умовам, виконується перехід до *Кроку 12*, інакше – до методу пошуку аналогів окремих елементів (*Крок 11а*).

*Крок 11.* Пошук МЕМС акселерометра-аналога. При результаті, що задовольняє умовам, виконується перехід до *Кроку 12*, інакше – використовується метод пошуку аналогів окремих елементів.

*Крок 12.* Формування таблиці типових ТП.

*Крок 13.* Аналіз отриманих результатів.

*Крок 14.* Вибір типового ТП за вартісними і часовими критеріями. Якщо результати задовольняють умови пошуку – до *Кроку 15*, інакше – виконується перехід до методу пошуку аналогів окремих елементів.

*Крок 15.* Вибір операцій за критеріями часу та вартості.

*Крок 16.* Вибір обладнання за критеріями продуктивності, вартості, енергозатратності, терміну служби.

*Крок 17.* Оцінка отриманого ТП. При результаті, що задовольняє умовам – виконується перехід до *Кроку 18*, інакше – до *Кроку 15*.

*Крок 18.* Формування МК.

Ґрунтуючись на отриманих результатах, можливо провести аналіз ТП (*Крок 13*), за результатами якого здійснюється вибір типового ТП (*Крок 14*), доопрацювання (*Крок 15* та *Крок 16*) і оцінка отриманого ТП (*Крок 17*). Якщо результати відповідають критеріям пошуку відбувається формування технічної документації у вигляді МК, інакше – до кроків (*Крок 15*), і виконується доти доки їх результати не будуть відповідати вимогам критеріїв пошуку.

Можна зробити припущення, що в один і той же кластер можуть класифікуватися МЕМС акселерометри з різними ТП. Тоді позначимо різні ТП, як вектор  $TP_1, TP_2, \dots, TP_n$ . У кожному кластері вони розташовані за показником ступеня близькості відстані між векторами параметрів МЕМС акселерометрів  $i$ , як наслідок, ТП. Це дасть можливість надати рекомендацію щодо вибору ТП таким чином, що б проектування нового ТП для акселерометрів, які потрапили в даний кластер, зводилось до задання значень вхідних і вихідних параметрів ТП, а також враховувались параметри переходів  $i$ , при необхідності, додавання нових операцій або видалення рекомендованих.

На основі запропонованого методу вибору типового ТП виготовлення МЕМС акселерометрів отримуються сформовані рекомендовані ТП, що представляють собою впорядковані за ступенем переваги (від кращих до гірших) множини ТП, виходячи із заданих критеріїв. У табл. 4.1 наведено приклад застосування удосконаленого методу вибору типових ТП за результатами якого отримується множина типових ТП.

Таблиця 4.1 – Приклад результатів роботи удосконаленого методу вибору типових ТП

Кластер	Номер акселерометра	Технологічні процеси	$\bar{t}$	$\bar{C}$
1	$i, j, \dots$	$TP_1 - xx\%$	$\bar{t}_1$	$\bar{C}_1$
		$TP_2 - xx\% \Rightarrow$ рекомендується типовий ТП $T_x \rightarrow \max\%$	$\bar{t}_2$	$\bar{C}_2$
		...	...	...
		$TP_n - xx\%$	$\bar{t}_n$	$\bar{C}_n$
2	$l, k, \dots$	$TP_1 - xx\%$	$\bar{t}_1$	$\bar{C}_1$
		$TP_2 - xx\% \Rightarrow$ рекомендується типовий ТП $T_x \rightarrow \max\%$	$\bar{t}_2$	$\bar{C}_2$
		...	...	...
		$TP_m - xx\%$	$\bar{t}_m$	$\bar{C}_m$
...				
$n$	$p, v, \dots$	$TP_1 - xx\%$	$\bar{t}_1$	$\bar{C}_1$
		$TP_2 - xx\% \Rightarrow$ рекомендується типовий ТП $T_x \rightarrow \max\%$	$\bar{t}_2$	$\bar{C}_2$
		...	...	...
		$TP_r - xx\%$	$\bar{t}_r$	$\bar{C}_r$

В табл. 4.1:  $n$  – кількість сформованих кластерів;  $i, j, l, k, p, v$  – номери

MEMC акселерометрів, які потрапили в той чи інший кластер (кількість акселерометрів у різних кластерах відрізняється та залежить від значення віддаленості акселерометрів у матриці (4.2) один від одного);  $xx$  – відсоткове співвідношення ТП у кластері;  $TP_x$  – ТП, який має найбільший відсоток співвідношення у кластері.

З множини (табл. 4.1) здійснюється вибір типового ТП за допомогою математичної моделі (3.9) (пошук типового ТП ведеться в межах реалізованих ТП, з урахуванням відомої інформації про час виконання ТП  $\bar{t}$  та вартість ТП  $\bar{C}$ ), а для вибору основних операції (3.10)-(3.13). Таким чином отримані дані можна представити у вигляді цільового дерева технологій, отримавши множини ТП  $T_i$ , яка є впорядкованим результатом на основі наявної інформації у вигляді множини класів, що не перетинаються.

Базовий методу пошуку типових ТП удосконалено за рахунок використання методів ієрархічної кластеризації, що дозволяє визначити взаємозв'язки між функціонально-конструктивними показниками MEMC акселерометра-аналога і ТП.

Для того, щоб обґрунтувати теоретичні положення удосконаленого методу необхідно провести експериментальне дослідження та визначити метод побудови ієрархічної кластеризації і метрику відстаней, що повинні враховувати особливості MEMC акселерометрів, що класифікуються.

### **4.3 Дослідження удосконаленого методу вибору типового технологічного процесу виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів**

Проведемо експериментальне дослідження удосконаленого базового методу, використовуючи у якості початкових даних існуючі моделі MEMC акселерометрів. Це дасть можливість визначити який з 5 ієрархічних методів кластерного аналізу задовольняє поставлене завдання [168]:

– метод поодинокого зв'язку, або метод «найближчого сусіда» (Single

linkage, Nearest neighbour);

– метод повних зв'язків, або метод «далекого сусіда» (Complete linkage, Furthest neighbour);

– метод незваженого попарного середнього (Unweighted pair-group average, Between-groups linkage);

– метод зваженого попарного середнього, або метод мінімального зв'язку (Weighted pair-group average, Within-groups linkage);

– незважений центроїдний метод (Unweighted pair-group centroid, Centroid clustering);

– метод медіан, або зважений центроїдний метод (Weighted pair-group centroid, Median clustering);

– покроковий або метод Варда (Ward's method).

Для кожного методу розбиття на кластери використовуються різні методи розрахунку відстаней між об'єктами, які розглянуті в 1 розділі.

Тоді візьмемо множину МЕМС акселерометрів з параметрами готового виробу, інформацію про яких взято з технічної документації одного з виробників МЕМС акселерометрів – РСВ Piezotronics Inc. Варіант документації, яка використовувалася для складання матриці, наведено на прикладі моделі акселерометра 3713B1150G (рис. 4.2) [169].

Ці дані є вхідною інформацією для формування матриці параметрів МЕМС акселерометра, і на основі цієї інформації складені параметри ТП.

Скориставшись вектором параметрів моделі МЕМС акселерометрів (розділ 2) прийmemo, що параметр, наприклад,  $nL$  заданий з індексом  $nL = \{nL_1, \text{якщо } nL \leq 0,5\}$  і запишемо в матрицю параметрів як  $nL = 1$ .

Таким чином, використання параметрів дозволить скоротити час обробки інформації і зменшити вірогідність внесення помилкового значення параметру.

За результатами проведеного аналізу різних моделей МЕМС акселерометрів сформована матриця параметрів 91 на 34, де 91 – розмір вибірки акселерометрів фірми РСВ Piezotronics Inc [170], 34 – значення параметрів МЕМС акселерометрів: тип призначення (A), кількість чутливих осей (T),



матеріал ЧЕ ( $Se$ ), тип навантаження на ЧЕ ( $Sg$ ), конструкція ЧЕ ( $S$ ), робочі характеристики ( $Pe$ ), фізичні параметри ( $Ph$ ), маса ( $M$ ), параметри конструкції ( $D$ ).

	English:	SI:
<b>PERFORMANCE</b>		
Sensitivity ( $\pm 5\%$ )	40 mV/g	4.1 mV/(m/s <sup>2</sup> )
Measurement Range	$\pm 50$ g pk	$\pm 490.5$ m/s <sup>2</sup> pk
Frequency Range ( $\pm 5\%$ )	0 to 1000 Hz	0 to 1000 Hz
Frequency Range ( $\pm 10\%$ )	0 to 1300 Hz	0 to 1300 Hz
Resonant Frequency	$\geq 5.1$ kHz	$\geq 5.1$ kHz
Phase Response (100 Hz)	$< 10^\circ$	$< 10^\circ$
Broadband Resolution (0.5 to 100 Hz)	6.0 mg rms	0.059 m/s <sup>2</sup> rms
Non-Linearity	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$
Transverse Sensitivity	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$
<b>ENVIRONMENTAL</b>		
Overload Limit (Shock)	$\pm 3000$ g pk	$\pm 29420$ m/s <sup>2</sup> pk
Temperature Range (Operating)	-65 to +250 °F	-54.0 to +121 °C
Temperature Range (Storage)	-65 to +250 °F	-54.0 to +121 °C
Temperature Coefficient of Sensitivity	$\pm 3\%$	$\pm 3\%$
Zero g Offset Temperature Coefficient	$\pm 2\%$ FSO	$\pm 2\%$ FSO
Base Strain Sensitivity	.001 g/ $\mu\epsilon$	.01 (m/s <sup>2</sup> )/ $\mu\epsilon$
Magnetic Sensitivity	40 $\mu\text{g/gauss}$	3.9 (m/s <sup>2</sup> )/Tesla

Рисунок 4.2 – Фрагмент документації МЕМС акселерометра фірм РСВ Piezotronics Inc. моделі 3713B1150G [170]

Фрагмент матриці параметрів представлений на рис. 4.3. У додатку В представлено повну матрицю параметрів і моделей МЕМС акселерометрів, які є початковими даними в дослідженнях.

Проведено дослідження 5-ти методів і 7 метрик розрахунку відстаней між об'єктами, в даному випадку між різними моделями МЕМС акселерометрів. У дослідженні не враховані метрики для нормалізованої відстані Евкліда (так як значення для розрахованої матриці відстаней повинно збільшуватися, і не бути NaN – особливий стан числа з плаваючою комою) і відстані Махаланобіса (коваріація для матриці метрики Махаланобіса має бути симетричною і позитивно визначеною).

Модель	Ak	Wa	Ps	Tc	Sel	ST	Sg	Sxi	Sxi*	rm	Rymin,ryi	Rymax,ryi	fr	nL	St	Dr	Lsh	
350821	Ak1		3	0	1	1	1	2	2	0	12	12	19	3	1	4	0	34
350C31	Ak2		3	0	1	1	1	2	2	0	12	12	21	3	1	4	0	32
350C02	Ak3		3	0	1	1	1	2	4	0	12	15	26	3	4	4	0	33
350823	Ak4		3	0	1	1	1	2	3	0	11	6	26	3	3	4	0	29
350824	Ak5		3	0	1	1	1	2	4	0	10	8	19	3	3	4	0	29
350803	Ak6		3	0	1	1	1	2	3	0	11	8	19	3	3	4	0	29
350804	Ak7		3	0	1	1	1	2	4	0	10	8	19	3	3	4	0	29
350B77	Ak8		3	0	1	2	1	2	6	0	10	12	19	3	2	3	0	24
350A13	Ak9		3	0	1	2	1	2	3	0	11	8	16	3	2	3	0	28
350A14	Ak10		3	0	1	2	1	2	4	0	10	8	16	2	2	3	0	28
3500850	Ak11		3	0	3	1	1	2	3	0	11	14	19	3	3	3	0	28
3501A1220KG	Ak12		3	0	1	1	2	0	1	0	12	1	19	0	2	2	0	28
3501A1260KG	Ak13		3	0	1	1	2	0	1	0	12	1	25	0	2	2	0	31
3503A1020KG	Ak14		3	0	3	1	2	0	1	0	12	1	19	0	2	2	0	28
333B	Ak15		5	0	1	1	1	2	8	0	4	15	5	1	2	3	0	18
333831	Ak16		5	0	1	1	1	2	8	0	4	15	5	1	2	3	0	20
333830	Ak17		5	0	1	1	1	2	8	0	4	9	10	1	2	3	0	20
333832	Ak18		5	0	1	1	1	2	8	0	4	9	10	1	2	3	0	20
333840	Ak19		5	0	1	1	1	2	9	0	2	9	10	1	2	3	0	20
333842	Ak20		5	0	1	1	1	2	9	0	2	9	10	1	2	3	0	20
333850	Ak21		5	0	1	1	1	2	10	0	1	9	10	1	2	3	0	19
333852	Ak22		5	0	1	1	1	2	10	0	1	9	10	1	2	3	0	19
393804	Ak23		6	0	1	1	1	1	10	0	1	3	3	1	2	3	0	5
393805	Ak24		6	0	1	1	1	1	12	0	1	10	3	1	2	3	0	5
393A03	Ak25		6	0	1	1	1	2	10	0	1	9	7	1	2	4	0	20
393812	Ak26		6	0	1	1	1	2	12	0	1	5	6	1	2	4	0	20
393831	Ak27		6	0	1	1	1	1	12	0	1	4	1	1	2	3	0	1
393832	Ak28		6	0	1	1	1	1	11	0	1	6	1	1	2	3	0	3
626A04	Ak29		6	0	1	1	1	1	12	0	1	4	1	3	2	3	0	1
37118112G	Ak30		2	0	1	3	3	0	10	0	1	1	2	1	2	2	0	16
371181110G	Ak31		2	0	1	3	3	0	8	0	2	1	6	2	2	2	0	16
371181130G	Ak32		2	0	1	3	3	0	6	0	3	1	6	2	2	2	0	16
371181150G	Ak33		2	0	1	3	3	0	6	0	4	1	6	2	2	2	0	16
.....	....		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Рисунок 4.3 – Фрагмент матриці параметрів MEMC акселерометра

Для того, щоб оцінити якість проведеної класифікації MEMC акселерометрів і вибрати відповідний метод з метрикою, проведено оцінку класифікації за такими критеріями як:

- коефіцієнт якості розбиття початкових даних на кластери (кофенетична кореляція)  $\zeta, \zeta \rightarrow 1$  [94];
- визначити до якого кластеру який MEMC акселерометр класифіковано;
- дерево рішень розбиття на кластери;
- графік силуетів кластерів, який показує як близько кожна точка в одному кластері близька до точок сусідніх кластерів.

Отримані результати дослідження представлені в Додатку Г.

Результати, отримані з використанням різних методів, графічно відображених у вигляді дендрограм, які відображають всі етапи групування MEMC акселерометрів на класи. В дослідженні дендрограмою є двійкове дерево в якому листя є елементами згрупованих MEMC акселерометрів. Внутрішній вузол дерева є підмножиною елементів в листі піддерева з коренем в цьому вузлі. Рівень вузла є відстанню між двома кластерами, що представлені нащадками цього вузла. Для листів рівень дорівнює нулю [170].

Структури спотворень, що вносяться різними методами, представляють графіки силуетів кластерів.

Провівши аналіз отриманих результатів дослідження виявлено, що всі методи, за якими проводилось класифікування MEMS акселерометрів, поділяють їх на 30 кластерів. При кластеризації центроїдним методом, незважаючи на високі показники кофенетичної кореляції (в середньому  $\zeta=0,84286$ ), гілки дендрограми перетинаються. При використанні ієрархічної кластеризації така побудова свідчить, що метод не ефективний для даних досліджень. Кластеризація методами дальнього сусіда та центрального, спотворює відстані між MEMS акселерометрами у більшу сторону, тоді як метод ближнього сусіда і метод середнього зв'язку – зменшує відстані, а метод Варда вносить спотворення, хоча вони не значні.

Проаналізувавши в комплексі значення коефіцієнта кореляції  $\zeta$ , таблиці розподілу MEMS акселерометрів у кластери, графіки силуетів, визначено, що найкращий результат отримано за методом Варда з кореляційною метрикою відстані такою, що найбільш повно описує специфіку даних об'єктів.

При виборі міри відстані для ознак кластеризації слід врахувати, що саме від вибору залежить міра схожості усередині кластерів, склад і кількість класів, що отримуються. Вибрано ієрархічний метод Варда, оскільки параметри MEMS акселерометра (за ознаками кластеризації) можуть бути близько розташованими об'єктами. Цей метод дозволяє формувати окремі кластери з найменшим внутрішньокласовим середньоквадратичним відхиленням на кожному кроці кластеризації. Це означає, що оптимізація проводиться на кожному кроці, а не в кінці розбиття, що є перевагою цього методу. На першому кроці кластеризації методом Варда кожен вектор параметрів MEMS акселерометра є окремим кластером, а на останньому кроці – усі об'єднуються в один кластер.

Процедура кластеризації складається з  $n-1$  кроків і в результаті будується дендрограма послідовного групування векторів параметрів MEMS акселерометрів в кластери, в якій вказуються усі елементи сукупності і міра схожості, при якій відбувається об'єднання. Дендрограма, побудована за

допомогою даного методу, представлена на рис. 4.4.

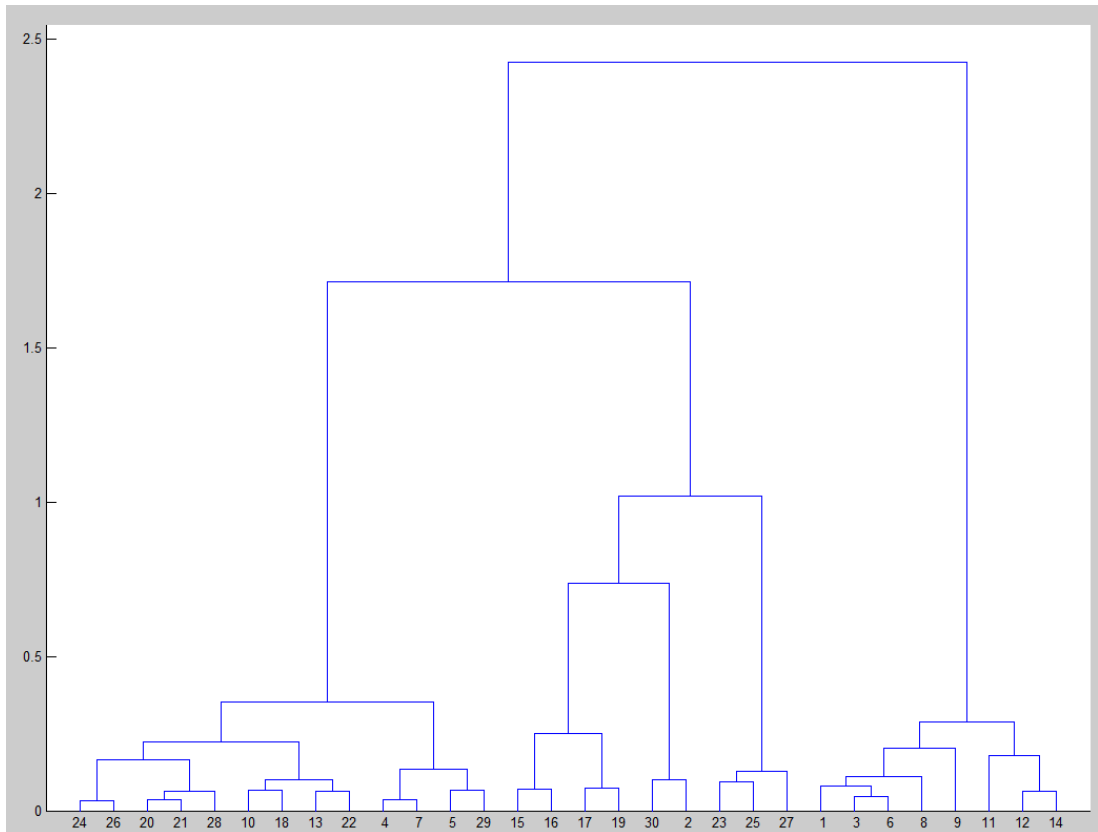


Рисунок 4.4 – Дендрограма отримана за методом Варда, з кореляційно метрикою відстані

На рис. 4.5 представлено графік силуетів кластерів, що отримані при застосуванні методу Варда. Графіки показують як близько розташована кожна точка в одному кластері та близька до точок сусідніх кластерів. Ця міра знаходиться в діапазоні від +1 (показує, що точка занадто віддалена від сусідніх кластерів) до -1 (означає, що точка, ймовірно, була приписана до даного кластеру випадково). Значення 0 означає, що точка даного кластера не відрізняється від точок інших кластерів. З аналізу графіка видно, що для більшості точок значення відстанні велике. Це свідчить про те, що в середньому точки ближче до інших членів свого кластера, ніж до членів сусіднього кластера. Так само є значення, які перебувають в діапазоні  $(0; -0,3)$ , що відповідає абсолютно не вірному визначенню мітки кластера, однак ці помилки можуть бути усунені.

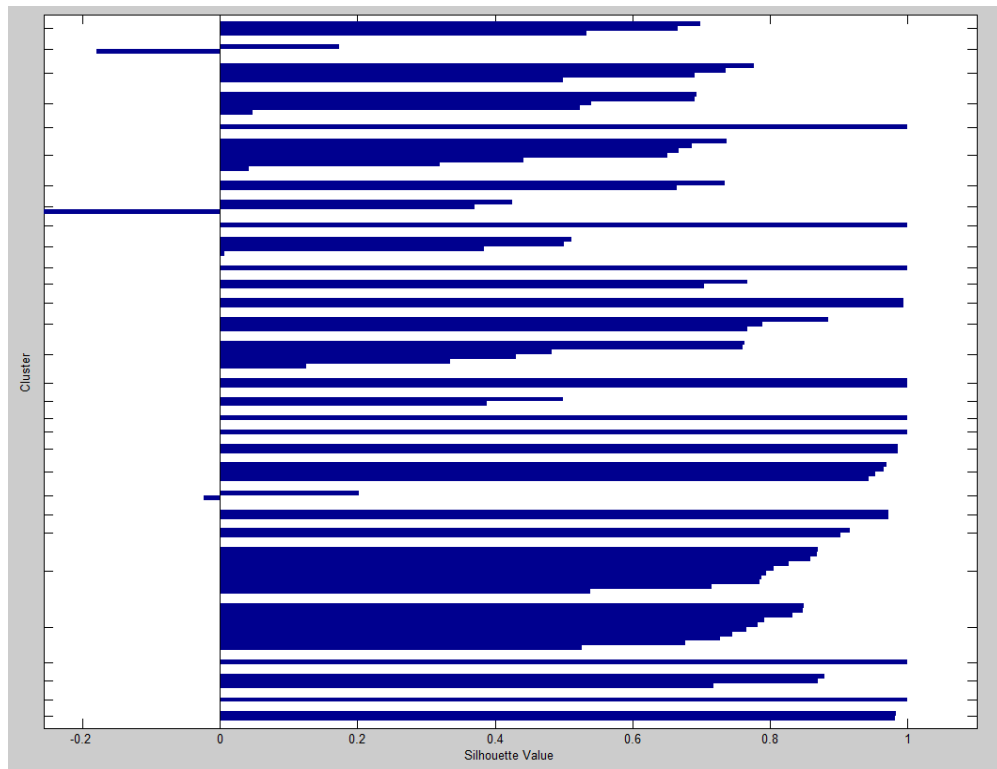


Рисунок 4.5 – Графік силуетів кластерів для методу Варда

Усунувши помилки, проведено аналіз розподілу на кластери МЕМС акселерометрів на першому кроці. Згруповано 30 кластерів для 91 МЕМС акселерометра, а результати записано до табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Розподіл МЕМС акселерометрів в кластери

Кластер	Номер акселерометра	Кластер	Номер акселерометра
1	83, 84, 85	16	90, 91
2	86, 87	17	54, 65
3	55, 56, 57, 58	18	15
4	50, 51, 52, 53, 59	19	16
5	71	20	17, 18
6	72, 76, 77, 78, 79, 80, 81	21	19, 20, 21, 22
7	6, 7	22	1, 2
8	3, 4, 5	23	25, 26
9	82	24	23, 24
10	64, 73, 74, 75	25	40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49
11	14	26	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39
12	12, 13	27	8
13	88, 89	28	27, 28, 29
14	68, 69, 70	29	11
15	60, 61, 62, 63, 66, 67	30	9, 10

Виділено 30 кластерів, в кожному з яких міститься різна кількість моделей МЕМС акселерометрів. Наприклад, у кластер №3 входять 55 (модель 357В11), 56 (модель 357В12), 57 (модель 357В14), 58 (модель 357В45), які мають схожі ознаки ТП – МЕМС акселерометри спеціального призначення і промислові високотемпературні МЕМС акселерометри.

Для того щоб визначити необхідну кількість кластерів для даного дослідження варіюватимемо межу дальності зв'язку, а результати запишемо до табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Аналіз результатів побудови дендрограми

Межа дальності зв'язку	Кількість кластерів	Кластери
[0;0,04]	30	((24), (26), (20), (21),(28), (10), (18), (13), (22), (4), (7), (5), (29), (15), (16), (17), (19), (30), (2), (23), (25), (27), (1), (3), (6), (8), (9),(11), (12), (14))
0,04	25	((24, 26),(20, 21), (28), (10), (18), (13), (22), (4, 7), (5), (29), (15), (16), (17), (19), (30), (2), (23), (25), (27), (1), (3, 6), (8), (9), (11), (12, 14))
0,06	18	((24, 26), (20, 21, 28), (10, 18), (13, 22), (4, 7), (5, 29), (15, 16), (17, 19),- (30), (2), (23), (25), (27), (1, 3, 6), (8), (9), (11), (12, 14))
0,11	16	((24, 26), (20, 21, 28), (10, 18), (13, 22), (4, 7), (5, 29), (15, 16), (17, 19), (2, 30), (23, 25), (27), (1, 3, 6), (8), (9), (11), (12, 14))
0,12	14	((24, 26),(20, 21, 28), (10, 13, 18, 22), (4, 7), (5, 29), (15, 16), (17, 19), (2, 30), (23, 25), (27), (1, 3, 6, 8), (9), (11), (12, 14))
0,125	12	((24, 26),(20, 21, 28), (10, 13, 18, 22), (4,5,7,29), (15, 16), (17, 19), (2, 30), (23, 25, 27), (1, 3, 6, 8), (9),(11), (12, 14))
[0,13;0,25]	10	((20, 21, 24, 26, 28), (10, 13, 18, 22), (4,5,7,29), (15, 16), (17, 19), (2, 30), (23, 25, 27), (1, 3, 6, 8), (9), (11, 12, 14))
(0,25;0,31]	7	((10, 13, 18, 20, 21, 22, 24, 26, 28), (4, 5, 7, 29), (15,16,17, 19), (2, 30), (23, 25, 27), (1, 3, 6, 8, 9), (11, 12, 14))
(0,31;0,375)	6	((10, 13, 18, 20, 21, 22, 24, 26, 28), (4, 5, 7,29), (15,16,17, 19), (2, 30), (23, 25, 27), (1, 3, 6, 8, 9, 11, 12, 14))
(0,375;0,76)	5	((4, 5, 7, 10, 13, 18, 20, 21, 22, 24, 26, 28, 29), (15,16,17, 19), (2, 30), (23, 25, 27), (1, 3, 6, 8, 9, 11, 12, 14))
[0,76;1)	4	((4, 5, 7, 10, 13, 18, 20, 21, 22, 24, 26, 28, 29), (2,15,16,17, 19, 30), 23, 25, 27), (1, 3, 6, 8, 9, 11, 12, 14))
[1;1,75)	3	((4, 5, 7, 10, 13, 18, 20, 21, 22, 24, 26, 28, 29), (2,15,16,17, 19, 23, 25, 27, 30), (1, 3, 6, 8, 9, 11, 12, 14))
[1,75;2,45]	2	((2, 4, 5, 7, 10, 13, 15,16,17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30), (1, 3, 6, 8, 9, 11, 12, 14))
2,45	1	(24, 26, 20, 21, 28, 10, 18, 13, 22, 4, 7, 5, 29, 15, 16, 17, 19, 30, 2, 23, 25, 27, 1, 3, 6, 8, 9, 11, 12, 14)

Після проведеного аналізу розбиття на кластери MEMC акселерометрів визначено, що кластери, які розташовані на відстані не більше 0,375 можливо розбиті на 5 кластерів. Кластером, який найбільше виділяється є 5 кластер, що знаходиться на відстані 2,5 до найближчого кластера, тобто є найбільш віддаленим об'єднанням. Якщо розглянути MEMC акселерометри, які увійшли в цей кластер, то можна зробити висновок, що потрапили всі моделі, які відносяться до групи спеціального призначення і мають специфічні параметри.

Відстань між кластером 2 і 3 становить 0,75, це свідчить, що в діапазоні межі дальності зв'язку  $[0,76; 1)$  кластери 2 і 3 можуть бути об'єднані в один кластер. На рівні  $[1; 1,75)$  кластер 2 і 3 об'єднуються в один кластер.

Таким чином, на основі проведеного аналізу дендрограми і табл. 4.3, пропонується використовувати для подальших досліджень граничну межу дальності зв'язку в діапазоні  $[1; 1,75)$  на якій можна виділити 3 кластера: кластер 1 (4, 5, 7, 10, 13, 18, 20, 21, 22, 24, 26, 28, 29), кластер 2 (2,15,16,17, 19, 23, 25, 27, 30), кластер 3 (1, 3, 6, 8, 9, 11, 12, 14).

Для розподілу MEMC акселерометрів на три кластери за функціонально-конструктивними показниками, можна побудувати дерево рішень (рис. 4.6) і скласти алгоритм розбиття.

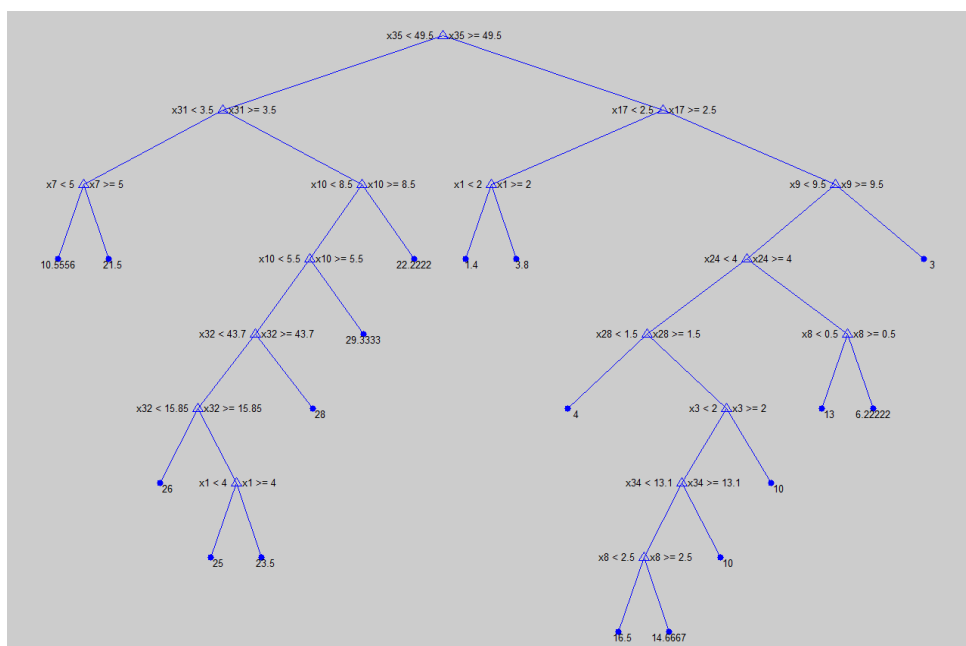


Рисунок 4.6 – Дерево рішень розподілу на кластери за методом Варда

Алгоритм прийняття рішень щодо розподілу нового МЕМС акселерометра до кластеру, на прикладі віднесення до одного з 3 кластерів, наведено нижче.

1. Якщо  $ak_{35} < 49,5$ , то вузол 2; інакше, якщо  $ak_{35} \geq 49,5$ , то вузол 3; інакше 15,8352.
2. Якщо  $ak^{31} < 3,5$ , то вузол 4; інакше, якщо  $ak^{31} \geq 3,5$ , то вузол 5; інакше 22,0816.
3. Якщо  $ak^{17} < 2,5$ , то вузол 6; інакше, якщо  $ak^{17} \geq 2,5$ , то вузол 7; інакше 8,54762.
4. Якщо  $ak^7 < 5$ , то вузол 8; інакше, якщо  $ak^7 \geq 5$ , то вузол 9; інакше 13,9231.
5. Якщо  $ak^{10} < 8,5$ , то вузол 10; інакше, якщо  $ak^{10} \geq 8,5$ , то вузол 11; інакше 25,0278.
6. Якщо  $ak^1 < 2$ , то вузол 12; інакше, якщо  $ak^1 \geq 2$ , то вузол 13; інакше 2,6.
7. Якщо  $ak^9 < 9,5$ , то вузол 14; інакше, якщо  $ak^9 \geq 9,5$ , то вузол 15; інакше 10,4063.
8. Відповідно дорівнює 10,5556.
9. Відповідно дорівнює 21,5.
10. Якщо  $ak^{10} < 5,5$ , то вузол 16; інакше, якщо  $ak^{10} \geq 5,5$ , то вузол 17; інакше 25,963.
11. Відповідно дорівнює 22,2222.
12. Відповідно дорівнює 1,4.
13. Відповідно дорівнює 3,8.
14. Якщо  $ak^{24} < 4$ , то вузол 18; інакше, якщо  $ak^{24} \geq 4$ , то вузол 19; інакше 11,1724.
15. Відповідає = 3.
16. Якщо  $ak^{32} < 43,7$ , то вузол 20; інакше, якщо  $ak^{32} \geq 43,7$ , то вузол 21; інакше 25,5417.
17. Відповідно дорівнює 29,3333.
18. Якщо  $ak^{28} < 1,5$ , то вузол 22; інакше, якщо  $ak^{28} \geq 1,5$ , то вузол 23; інакше 13,4444.
19. Якщо  $ak^8 < 0,5$ , то вузол 24; інакше, якщо  $ak^8 \geq 0,5$ , то вузол 25;



інакше 7,45455.

20. Якщо  $ak^{32} < 15,85$ , то вузол 26; інакше, якщо  $ak^{32} \geq 15,85$ , то вузол 27; інакше 25,3182.

21. Відповідно дорівнює 28.

22. Відповідно дорівнює 4.

23. Якщо  $ak^3 < 2$ , то вузол 28; інакше, якщо  $ak^3 \geq 2$ , то вузол 29; інакше 14.

24. Відповідно дорівнює 13.

25. Відповідно дорівнює 6,22222.

26. Відповідно дорівнює 26.

27. Якщо  $ak^1 < 4$ , то вузол 30; інакше, якщо  $ak^1 \geq 4$ , то вузол 31; інакше 24,75.

28. Якщо  $ak^{34} < 13,1$ , то вузол 32; інакше, якщо  $ak^{34} \geq 13,1$ , то вузол 33; інакше 14,8571.

29. Відповідно дорівнює 10.

30. Відповідно дорівнює 25.

31. Відповідно дорівнює 23,5.

32. Якщо  $ak^8 < 2,5$ , то вузол 34; інакше, якщо  $ak^8 \geq 2,5$ , то вузол 35; інакше 15,2308.

33. Відповідно дорівнює 10.

34. Відповідно дорівнює 16,5.

35. Відповідно дорівнює 14,6667.

В результаті проведення чисельного експерименту удосконаленого методу вибору типових ТП виготовлення МЕМС акселерометрів, в ході якого використані різні методики розрахунку матриць відстаней, експериментально доведено працездатність методу. Для підвищення ефективності його роботи пропонується використовувати методи штучного інтелекту.

#### **4.4 Використання методів штучного інтелекту для підвищення ефективності роботи методу вибору типового технологічного процесу**

Для того щоб удосконалений метод вибору типового ТП виготовлення

МЕМС акселерометрів був ефективний і враховував, на відмінну від існуючих, можливість обробки великих масивів даних, пропонується використовувати клас методів штучного інтелекту – машинне навчання (Machine Learning) [171]. Для реалізації процесу навчання за прецедентами (supervised learning), тобто вирішення задачі класифікації МЕМС акселерометрів на  $M$  кластерів, що не перетинаються, і відновлення функції залежності між МЕМС акселерометрами і кластером, до якого необхідно його віднести. Таким чином параметри нових МЕМС акселерометрів передаються в базу даних і їхній аналіз проводиться автоматично при кожному новому внесенні.

Використання принципів машинного навчання дозволить аналізувати і врахувати значну кількість різнотипних вхідних даних і досягти високої якості роботи алгоритмів, забезпечувати високу швидкість обробки даних. При автоматичному прийнятті рішення приналежності нового МЕМС акселерометра до існуючих класів необхідно враховувати особливості практичної реалізації, які можуть вплинути на процес: недостатній обсяг вибірки, можливі пропуски даних (це пов'язано з недосконалістю технічних засобів та інші), складності розробки формалізованих алгоритмів класифікації і вибору метрики, оцінки ймовірності моделі машинного навчання.

Нехай  $\epsilon$  матриця «об'єкт-ознака», представлена в (4.1), і множина відповідей –  $\pi$ , які в даному дослідженні є кластером, до якого необхідно віднести МЕМС акселерометр – існує цільова функція (target function):

$$\Pi^* : Ak \rightarrow \pi. \quad (4.4)$$

Значення цільової функції (3.4) відомі тільки на кінцевій підмножині значень МЕМС акселерометрів  $\{Ak_1, Ak_2, \dots, Ak_n\} \subset Ak$  і дорівнюють  $\pi_i = \Pi^*(Ak)$ .

Пари «МЕМС акселерометр-кластер»  $(Ak_i, \pi_i)$  називаються прецедентами. Тоді, навчальною вибіркою (training sample) називається сукупність пар

$$Ak^x = (Ak_i, \pi_i)_{i=1}^x.$$

Отже, необхідно знайти такий алгоритм, який би відповідав зазначеним вимогам:

–  $Alg(Ak)$  повинен відтворюватися для вибірки заданих відповідей для всіх MEMS акселерометрах:  $Alg = \pi_i, i=1,2,\dots,x$ ;

–  $Alg$  повинен достатньо точно наближатися до цільової функції  $Alg : Ak^x \rightarrow \pi$ .

Існує простір пошуку (search space)  $Pr$ , який є множиною допустимих значень параметрів  $pr = (pr_1, pr_2, \dots, pr_k)$ , тоді існує деяка фіксована функція  $f$ :

$$f : Ak \times Pr \rightarrow \pi. \quad (4.5)$$

де  $Pr = R^k$ , а  $R$  є множиною дійсних чисел.

Шуканий алгоритм  $Alg$  визначається за допомогою з моделі  $MA$  (predictive model):

$$MA = \{f(Ak, pr) | pr \in Pr\}. \quad (4.6)$$

Навчання алгоритму  $Alg$  відбувається у процесі підбору параметрів моделі навчальної вибірки, в результаті якого обирається такий єдиний алгоритм  $Alg \in MA$ , який найбільше наближає цільову залежність.

Модель алгоритму навчання (learning algorithm) є відображення довільної кінцевої вибірки  $Ak^x = (Ak_i, \pi_i)_{i=1}^x$ :

$$LA : (Ak \times \pi)^x \rightarrow MA. \quad (4.7)$$

Виразом (4.7) можливо будувати алгоритм  $Alg$  за вибіркою

$$Ak^x = (Ak_i, \pi_i)_{i=1}^x.$$

Процес машинного навчання складається з двох основних етапів: етап навчання (train) і етап тестування (test).

При навчанні LA (4.7) за вибіркою  $Ak^x = (Ak_i, \pi_i)_{i=1}^x$  отримується матриця:

$$\begin{pmatrix} p_1^1 & p_2^1 & \dots & p_n^1 \\ p_1^2 & p_2^2 & \dots & p_n^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_1^p & p_2^p & \dots & p_n^p \end{pmatrix} \xrightarrow{\pi} \begin{pmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \dots \\ \pi_x \end{pmatrix} \xrightarrow{LA} Alg.$$

На етапі тестування алгоритм  $Alg$  для нових MEMC акселерометрів  $Ak'$  з матрицею параметрів  $P'_{ik}$ , генерує відповіді  $Alg(Ak')$ :

$$\begin{pmatrix} p_1'^1 & p_2'^1 & \dots & p_l'^1 \\ p_1'^2 & p_2'^2 & \dots & p_l'^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_1'^k & p_2'^k & \dots & p_l'^k \end{pmatrix} \xrightarrow{Alg} \begin{pmatrix} Alg(Ak'_1) \\ Alg(Ak'_2) \\ \dots \\ Alg(Ak'_k) \end{pmatrix}.$$

Структурно процес навчання і тестування зображено на рис. 4.7 (процес навчання) та рис. 4.8 (процес тестування).



Рисунок 4.7 – Процес навчання моделі

Нижче наведено кроки, які необхідно виконати для тестування та навчання моделі.

1. Імпорт вхідних даних (параметрів МЕМС акселерометрів, значення критеріїв, вагові коефіцієнти або переваги критеріїв).
2. Обробка даних. Формування матриці параметрів МЕМС акселерометрів.
3. Перерахунок матриці параметрів МЕМС акселерометрів з урахуванням вагових коефіцієнтів.
4. Перетворення в таблицю.
5. Формування вектора відповідей  $\pi_i$ .
6. Використання нових характеристик для навчання.
7. Вибір методу і метрик для класифікації.
8. Оцінка точності і ефективності.
9. Вибір МЕМС акселерометру-аналогу за результатами класифікації.
10. Тестування моделі.
11. Використання методу вибору типового ТП виготовлення МЕМС акселерометрі.
12. Інтеграція навченої моделі в програмний модуль.

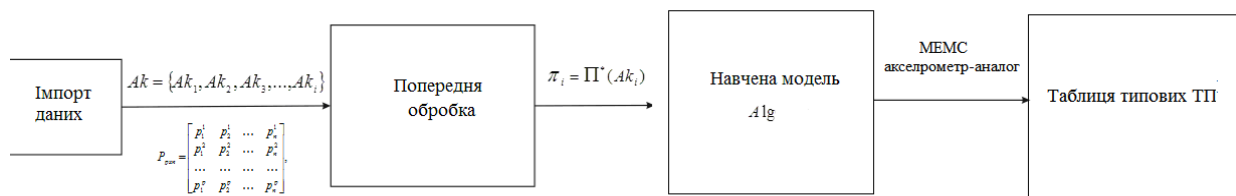


Рисунок 4.8 – Процес тестування моделі

Після процесу навчання моделі необхідно провести експериментальні дослідження навченої моделі.

В якості вхідних даних для навчання моделі використані вхідні дані, що були отримані в процесі тестування методу вибору типового ТП виготовлення МЕМС акселерометрів (Додаток В). За результатами тестування отримано дендрограму (рис. 4.4) і визначено 3 кластери. Для початкового тестування пропонується розбиття на 30 кластерів, а потім об'єднання до 3 кластерів.

Таким чином, пункти 1-6 реалізовані і залишається вирішити задачу вибору

методу і метрик для класифікації за допомогою методів машинного навчання.

Проведено чисельний експеримент за допомогою якого досліджено можливості різних методів машинного навчання для вирішення поставленого завдання класифікації. У дослідженні використано методи, які розглянуті у розділі 1 і алгоритм роботи яких описано в [92]-[102], та проведено варіацію різних метрик відстаней та їх ваги.

В експерименті використовувалася перехресна перевірка (cross-validation), яка є методом оцінки аналітичної моделі і її поведінки на незалежних даних [172]. Перехресна перевірка дозволяє отримати оцінку ефективності обраної моделі з найбільш рівномірним використанням даних.

Оцінка якості навченої моделі для 30 кластерів проводилася за такими параметрами [173]-[174]:

- матриця помилок (Confusion matrix);
- точність (Accuracy);
- швидкість передбачення (Prediction speed);
- час навчання (Training time);
- крива помилок (Receiver Operating Characteristic curve – ROC Curve).

На рис. 4.9 представлений результат роботи площинного методу  $k$ -найближчих сусідів, на графіку як «х» позначені невірні відповіді, а як «.» – вірні. З графіку видно, у яких класах за параметрами  $R_{ymin}$  і  $R_{ymax}$  зроблено помилки при визначенні МЕМС акселерометрів за цими параметрами.

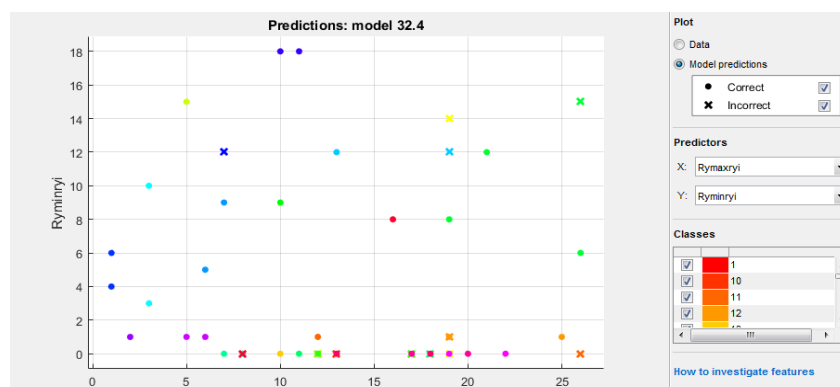


Рисунок 4.9 – Графік для параметрів  $R_{ymin}$  (мінімальна резонансна частота) і  $R_{ymax}$  (максимальна резонансна частота)

На рис. 4.10 представлено матрицю помилок (Confusion matrix), що сформована в результаті роботи площинного методу  $k$ -найближчих сусідів. Матриця помилок показує, скільки MEMC акселерометрів  $i$ -го кластера визначені як акселерометри класу  $j$ . Визначено, що для невеликої кількості класів існують значні помилки. На рис. 4.10 показані помилкові виконання класифікатора, під матрицею зеленим показано правильне передбачення в кожному класі, а помилкові значення показані червоним кольором.

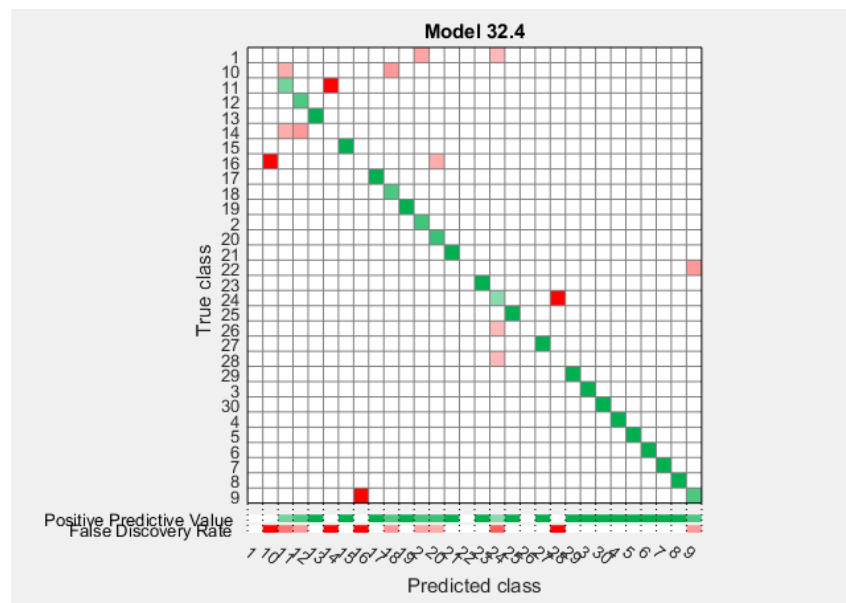


Рисунок 4.10 – Матриця помилок методу Subspace KNN

На рис. 4.11 представлено діаграму паралельних координат для методу опорних векторів, яка дозволяє візуалізувати багатовимірні дані на одному графіку. Цей графік допомагає зрозуміти взаємозв'язок між функціями і визначити корисні предиктори для розділення класів. Помилково класифіковані точки показані пунктирними лініями.

За діаграмою паралельних координат можливо визначити викиди, що дозволяє тестування, усунути шумову компоненту та згладити результати. Як видно з рис. 4.11, значні викиди мають параметри: *int* (параметр корпусу, який є складовою частиною пристрою) і *El* (положення електричного з'єднувача) у 1 кластері MEMC акселерометрів. Так само, можна відмітити незначні викиди для

параметра нелінійності  $nL$ . Викиди отримані за рахунок не типовості цих параметрів MEMC акселерометрів для усієї вибірки, вони є типовими наприклад для типу акселерометрів спеціального призначення. Метод працюватиме точніше за наявності більшої кількості даних. Тому отримані викиди не нормуються для проведення подальшого дослідження.

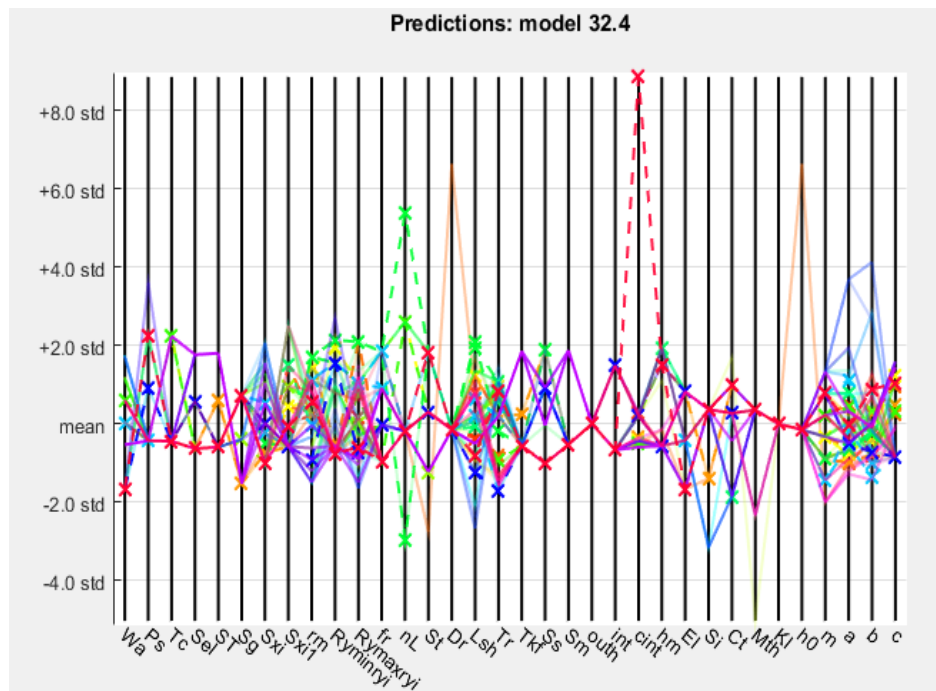


Рисунок 4.11 – Діаграма паралельних координат методу Subspace KNN

На рис. 4.12 представлений графік ROC Curve, який є графічною характеристикою якості проведеної класифікації. Крива є лінією від (0,0) до (1,1) в координатах True Positive Rate і False Positive Rate.

True Positive Rate показує, яку долю об'єктів позитивного класу (вірно передбачені об'єкти) з усіх об'єктів позитивного класу знайдено за алгоритмом, а False Positive Rate – яку долю з об'єктів класу Negative алгоритм передбачив невірно. Кожна точка на графіку відповідає вибору деякого порогу.

Кількісною оцінкою ROC Curve є AUC, яка є площею під кривою помилок. Площа під кривою в даному випадку показує якість алгоритму  $AUC=0,99$ , тобто отриманий класифікатор відповідає вимогам ( $AUC>0,5$ ) та метод класифікації обрано вірно. Також важливою характеристикою є крутизна самої кривої, яка



повинна наближатися до точки (0,1), що і видно з рис. 4.12.

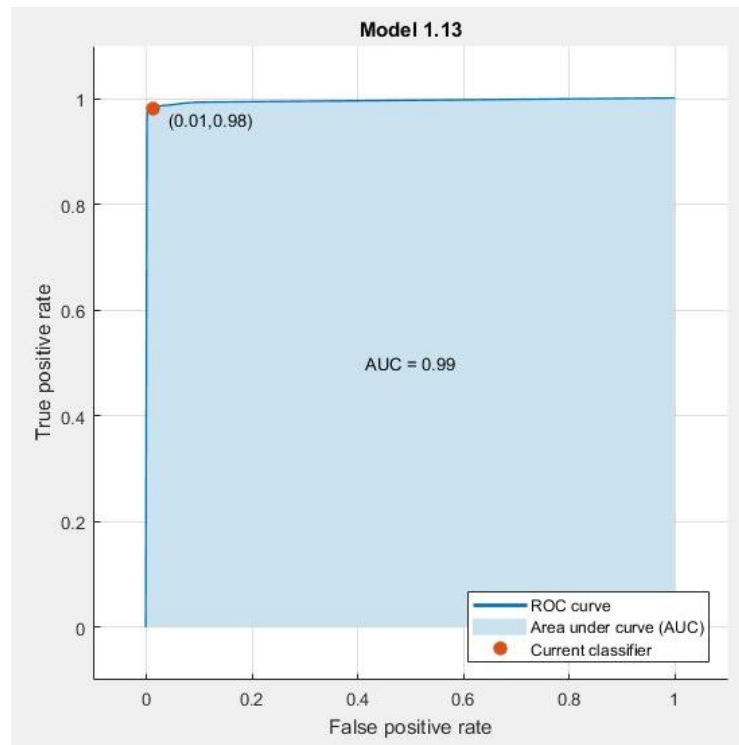


Рисунок 4.12 – ROC Curve

У табл. 4.4 представлені результати проведених досліджень з використанням різних методів, метрик і ваг відстаней. У таблиці не представлені методи, точність яких нижче 60 %. Основними показниками для оцінки отриманих моделей є: ядро або метрика, вага, точність, швидкість передбачень, час тренування.

Таблиця 4.4 – Результати дослідження

Метод	Ядро/метрика	Вага	Точність, %	Швидкість передбачень, пред./с	Час тренування, с
Boosted Trees	-	-	73,6	170	7,0658
KNN	Евкліда	Рівна	74,4	930	2,3663
KNN	Чебишева	Рівна	71,4	1500	2,2531
KNN	Мінковського	Рівна	72,5	1500	2,2413
KNN	Кореляційна	Рівна	73,6	1400	2,2459
KNN	Евкліда	Зворотній квадрат	71,4	1600	2,2623
KNN	Чебишева	Зворотній квадрат	71,4	1600	2,2578

Продовження таблиці 4.4

Метод	Ядро/метрика	Вага	Точність, %	Швидкість передбачень, пред./с	Час тренування, с
KNN	Мінковського	Зворотній квадрат	72,5	1400	2,2207
KNN	Кореляційне	Зворотній квадрат	73,6	1500	2,3025
Medium KNN	Евкліда	Зворотній квадрат	72,5	1600	2,3373
Medium KNN	Чебишева	Зворотній квадрат	64,8	1500	2,4029
Medium KNN	Кореляційне	Зворотній квадрат	73,6	1600	2,4042
Weighted KNN	Евкліда	Зворотній квадрат	72,5	1500	2,3956
Weighted KNN	Чебишева	Зворотній квадрат	64,8	1600	2,4816
Weighted KNN	Мінковського	Зворотній квадрат	71,4	1500	2,5129
Weighted KNN	Кореляційне	Зворотній квадрат	73,6	1400	2,5069
Bagged Trees	-	-	81,3	110	6,5271
Subspace Discriminant	-	-	79,1	130	3,9374
Subspace KNN	-	-	82,4	140	3,1862

Як видно з табл. 4.4, методи, за якими проводилось дослідження, в середньому забезпечують точність – 64,68%; швидкість передбачень – 1096,538 передб./с; час тренування – 4,544673 с. Найкращі результати за правильними відповідями показав метод Subspace KNN (82,45%) і Bagged Trees (81,3%), крім того ці методи також забезпечують високу швидкість передбачень. Проте, за часом тренування, метод Subspace KNN забезпечує 3,1862 с, що на 3,3409 с краще, ніж за методом Bagged Trees. Інші методи значно поступаються за швидкістю передбачень і не розглядаються.

Проведений чисельний експеримент вирішення задачі класифікації MEMC акселерометрів-аналогів та використання цих результатів для методу вибору типових ТП. Найкращі результати за параметром точність показав метод Subspace KNN – 82,45%, ці значення відповідають задовільному рівню.

Для підвищення якості моделі навчання системи проведено доопрацювання

моделі шляхом перегляду даних, виключивши шумові компоненти, заповнюючи пропущені значення і виключивши зайві дані, використовуючи статистичний аналіз кореляційної обробки даних.

Таким чином проведено удосконалення базового методу вибору типових ТП виготовлення МЕМС акселерометрів за рахунок використання методів ієрархічної кластеризації та інтелектуального аналізу даних, що дозволяє визначити взаємозв'язок між функціонально-конструктивними показниками МЕМС акселерометра-аналога і типовим.

#### **4.5 Аналіз ефективності удосконаленого методу вибору типового технологічного процесу**

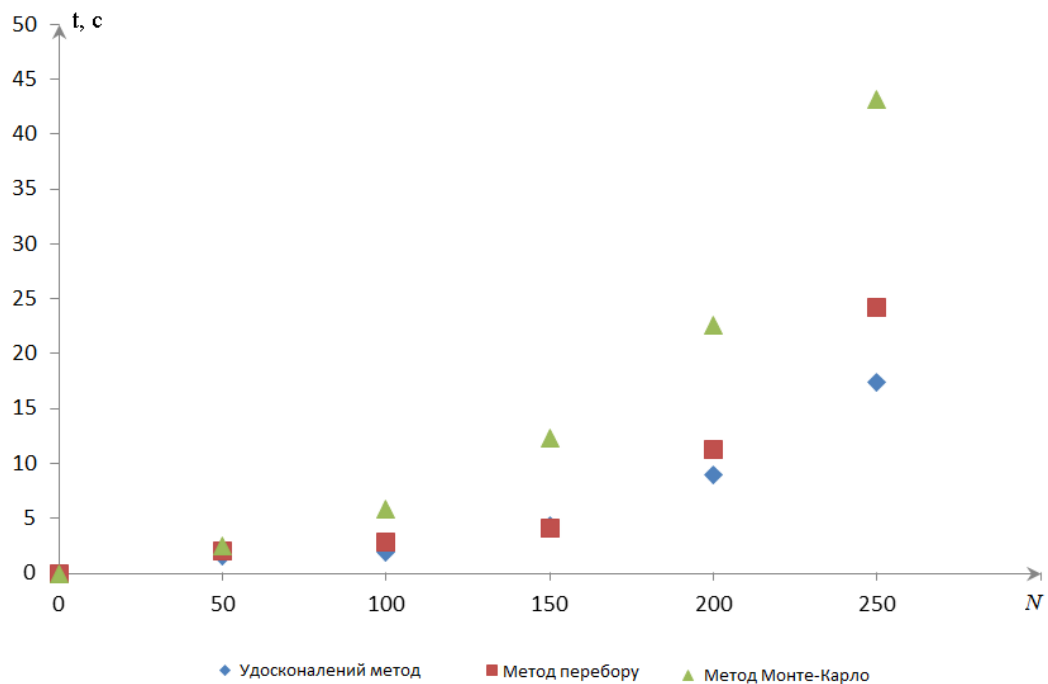
Необхідно провести аналіз ефективності удосконалення методу вибору типових ТП виготовлення МЕМС акселерометрів із різною кількістю МЕМС акселерометрів (50, 100, 150, 200 та 250 акселерометрів) і, відповідно, різною кількістю можливих варіантів ТП. У ході експерименту розв'язувалась задача вибору типового ТП за показником вартості (3.9). Данні щодо МЕМС акселерометрів та їх параметрів, взяті з технічної документації [148]. Експерименти проводилися на персональному комп'ютері з процесором Intel (R) Core (TM) i5-3230M (тактова частота 2.6 ГГц).

Порівняння проводилось з розв'язанням такої ж задачі методом перебору [175] та Монте-Карло [176]. Отримані результати за значенням часової складності наведено у табл. 4.5, де внесено значення розрахунків загального та середнього часу розв'язання задач, абсолютного значення між середнім часом розв'язання задачі методом, що удосконалено, та методами, з якими проводиться порівняння (тобто виграш часу).

У табл. 4.5  $N$  – кількість МЕМС акселерометрів серед яких проводиться пошук типового ТП за показником вартості. Суміщений графік отриманих функцій часової складності для удосконаленого методу, методів перебору та Монте-Карло представлено на рис. 4.13.

Таблиця 4.5 – Час розв’язання задачі різними методами

$N$	Час розв’язання задачі		
	за удосконаленим методом $t, c$	за методом перебору $t, c$	за методом Монте-Карло $t, c$
50	1,59	2,03	2,47
100	1,91	2,85	5,82
150	4,32	4,11	12,29
200	8,97	11,23	22,58
250	17,38	24,22	43,16
$\sum t, c$	34,17	44,44	86,32
Середнє значення, c	6,834	8,888	17,264
Виграш часу, c	-	2,054	10,43

Рисунок 4.13 – Графіки залежності часу виконання завдання ( $t$ ) від кількості об'єктів ( $N$ )

Отримані функції для кожного з методів апроксимовані з коефіцієнтом детермінації функцій  $R^2 > 0,96$ , що є показником адекватності та якості отриманої моделі функції.

Результати апроксимації для функції часової складності розв’язання задачі

за методом Монте-Карло з достовірністю  $R$ :

$$t(n) = 0,0008n^2 - 0,0319n, R^2 = 0,99.$$

Результати апроксимації для функції часової складності розв'язання задачі з використанням методу перебору з достовірністю  $R$ :

$$t(n) = 0,0005n^2 - 0,0363n, R^2 = 0,96.$$

Результати апроксимації для функції часової складності розв'язання задачі з використанням удосконаленого методу з достовірністю  $R$ :

$$t(n) = 0,0003n^2 - 0,0167n, R^2 = 0,98.$$

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.

#### **4.6 Висновки до розділу 4**

Розроблено узагальнений метод автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів, який базується на двох часткових методах: вибору типових ТП і пошуку аналогів окремих елементів ТП. Цей метод дозволяє отримати ефективний ТП за рахунок зниження вартості та часу виготовлення.

З огляду на те, що МЕМС акселерометр складається з різних блоків (компонентів і елементів), розроблен метод дозволяє використовуввати комплексний підхід автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів. Спочатку можливо здійснити пошук за обраним типом

акселерометра-аналога і знайти типовий ТП. При відсутності акселерометра-аналога скористатися пошуком компонентів і елементів МЕМС акселерометра. Таке рішення істотно зменшиться час, що витрачається на вибір заготовок, технологічного обладнання, розробки маршрутної і операційної технологій, підвищиться ефективність отримуваних проектних рішень.

Проведено удосконалення базового методу вибору типових. Для його експериментального дослідження використовувалися 34 параметри для 91 зразка МЕМС акселерометрів, що дозволив сформувати 30 кластерів за рахунок вибору граничного значення дальності зв'язку для об'єднання. Так для рівня дальності зв'язку  $[1;1,75)$  сформовано 3 кластери.

Для оцінки якості проведеної класифікації МЕМС акселерометрів використано кореляцію, графік силуетів кластерів, і дано оцінку розбиття на кластери.

За результатами дослідження удосконаленого методу вибору типового ТП виготовлення МЕМС акселерометрів встановлено, що найбільш повно враховує особливості розглянутих об'єктів метод Варда з кореляційною метрикою відстаней.

Для підвищення ефективності роботи удосконаленого методу вибору типового ТП запропоновано використовувати методи машинного навчання. Таке рішення дозволило підвищити ефективність роботи методу, за рахунок використання навчання за прецедентами, з точністю передбачень 82,4% і часом тренування 3,1862 с.

Проведений аналіз ефективності удосконаленого методу 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

Запропоновані методи дозволять автоматизувати проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів з, не лише його проектних конструктивних параметрів, але і з урахуванням фактично досягнутих значень цих параметрів, при попередніх реалізаціях типових ТП виготовлення схожих МЕМС акселерометрів.

На практиці узагальнений метод автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів дозволить підвищити ефективність проектування за рахунок зниження вартості та часу проектування і виготовлення, що дозволить отримати ефективний ТП.

Основні результати четвертого розділу опубліковано у роботах [5], [7], [9], [22], [24], [26], [27].

У четвертому розділі використано інформацію з джерел [92]-[102], [94], [117], [148], [167]-[176].

## РОЗДІЛ 5

### ПРОГРАМНИЙ МОДУЛЬ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ

#### **5.1 Структура програмного модулю системи автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів**

Розроблені математична модель визначення МЕМС акселерометра-аналога (розділ 2) та узагальнений метод автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів (розділ 3), модель структурно-параметричного синтезу ТП (розділ 4), реалізовані у програмному модулі (ПМ) «AcSAM».

ПМ «AcSAM» розроблено на крос-платформенному середовищі Embarcadero RAD Studio XE, яке дозволяє використовувати хмарні технології для налагодження та розгортання, створення САПР, а також має гнучку ліцензійну угоду [177]. При виборі середовища розробки враховувалось, що робота ПМ тісно пов'язана з обробкою великих масивів інформації, а отже, необхідна простота взаємодії з БД, можливість підключення додаткових компонентів і зручність реалізації завдань. Таким чином, програмне середовище повинно підтримувати реалізацію роботи з БД, мати простий метод підключення БД і бути зручним для створення інтерфейсу користувача. Це дозволяє істотно скоротити час на розробку ПМ, його реалізацію і трудомісткість розробки.

Перед початком проектування БД проведено аналіз вихідної інформації і ступеня залежності зв'язків між нею. В рамках даної роботи прийнято рішення розділити БД на структурні елементи, які дозволять спростити структури і зменшити ймовірність втрати або дублювання інформації всередині БД. Логічна структура БД поділяється на 2 підсистеми (накопичувальна та довідкова БД), які



відповідають за збереження окремих елементів інформації.

ПМ «AcSAM» призначений для проектування й аналізу ТП виготовлення MEMS акселерометрів, як складової частини САПР ТП. ПМ містить в собі структурні компоненти, які відповідають за збереження окремих елементів інформації і групуються відповідно до їх призначення і функцій. Структура ПМ представлена на рис. 5.1 і включає в себе наступні модулі: модуль введення/виведення даних, пошуку MEMS акселерометра-аналога, модуль проектування ТП, модуль оцінки ТП, модуль МК.

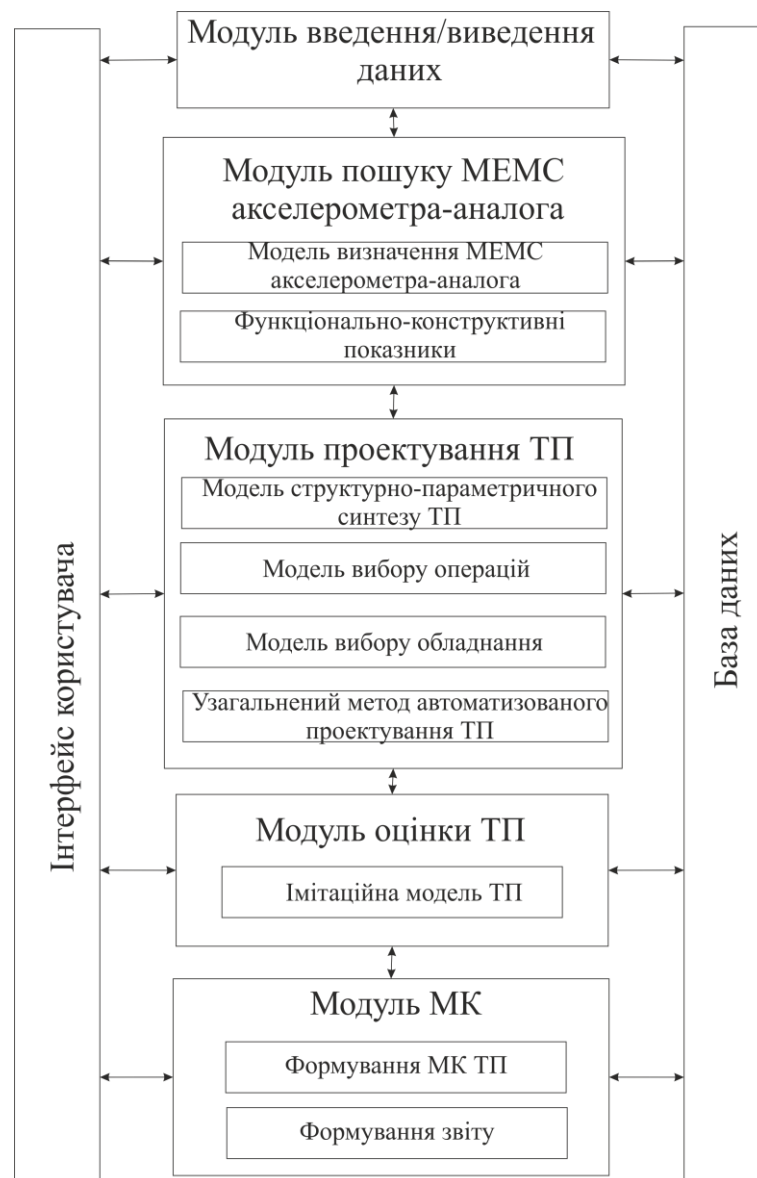


Рисунок 5.1 – Структура ПМ «AcSAM» проектування ТП виготовлення MEMS акселерометра

Модуль введення/виведення даних необхідний для: введення даних параметрів MEMC акселерометра та інших даних; взаємодії з 3D-моделлю і передачі параметрів конструкції MEMC акселерометра з CAD/CAE до ПМ на базі IP-функцій; відображення введених даних, результатів розрахунків, взаємозв'язку з БД для занесення інформації про створений проект і перегляду необхідної довідкової інформації.

В модулі пошуку MEMC акселерометра-аналога відбувається формування вектора параметрів MEMC акселерометра, критеріїв пошуку та їх вагових коефіцієнтів або переваг. На базі цієї інформації здійснюється визначення MEMC акселерометра-аналога за допомогою моделі з розділу 2.

Модуль проектування ТП реалізує вибір та формування ТП, для якого використовується узагальнений метод автоматизованого проектування ТП та моделі структурно-параметричного синтезу, вибору типового ТП, операцій та обладнання (розділ 3 та 4).

Для проектування ТП використовується два часткових методи узагальненого методу автоматизованого проектування ТП – удосконалений метод вибору типових ТП та пошуку аналогів окремих елементів:

- удосконалений метод вибору типових ТП здійснює формування множини типових ТП з якої обирається кращий за заданими критерієм вартості;
- пошук аналогів окремих елементів реалізує функцію розв'язання задачі формування ТП, дозволяє реалізувати створення нової структури ТП з наявних даних (коли MEMC акселерометра-аналог не знайдено) на рівні компонентів, елементів та операцій, що необхідні для їх отримання.

Зміна ТП (попередньо обраного) здійснюється за рахунок вибору операцій та за необхідністю обладнання за заданими значеннями часткових критеріїв (продуктивність, вартість, енерговитрати, термін служби обладнання і час та вартість виконання операцій).

Модуль оцінки ТП дозволяє провести імітаційне моделювання сформованого ТП та отримати характеристики: коефіцієнт використання обладнання на етапі, час виконання етапів, довжина черги та час перебування

заготовок в черзі. За результатами проведення імітаційного моделювання надається звіт та результати аналізу щодо наведених витрат базового та отриманого ТП.

Модуль формування МК ТП дозволяє за результатами роботи модулів сформувати технічну документацію у вигляді оформленої МК тако ж існує додаткова функція – формування звіту (окремі результати роботи попередніх модулів).

Інтерфейс головного вікна ПМ «AcSAM» представлено на рис. 5.2, де 1 – рядок меню; 2 – меню кнопочкого доступу; 3 – пошукова система; 4 – вікно результатів пошуку.

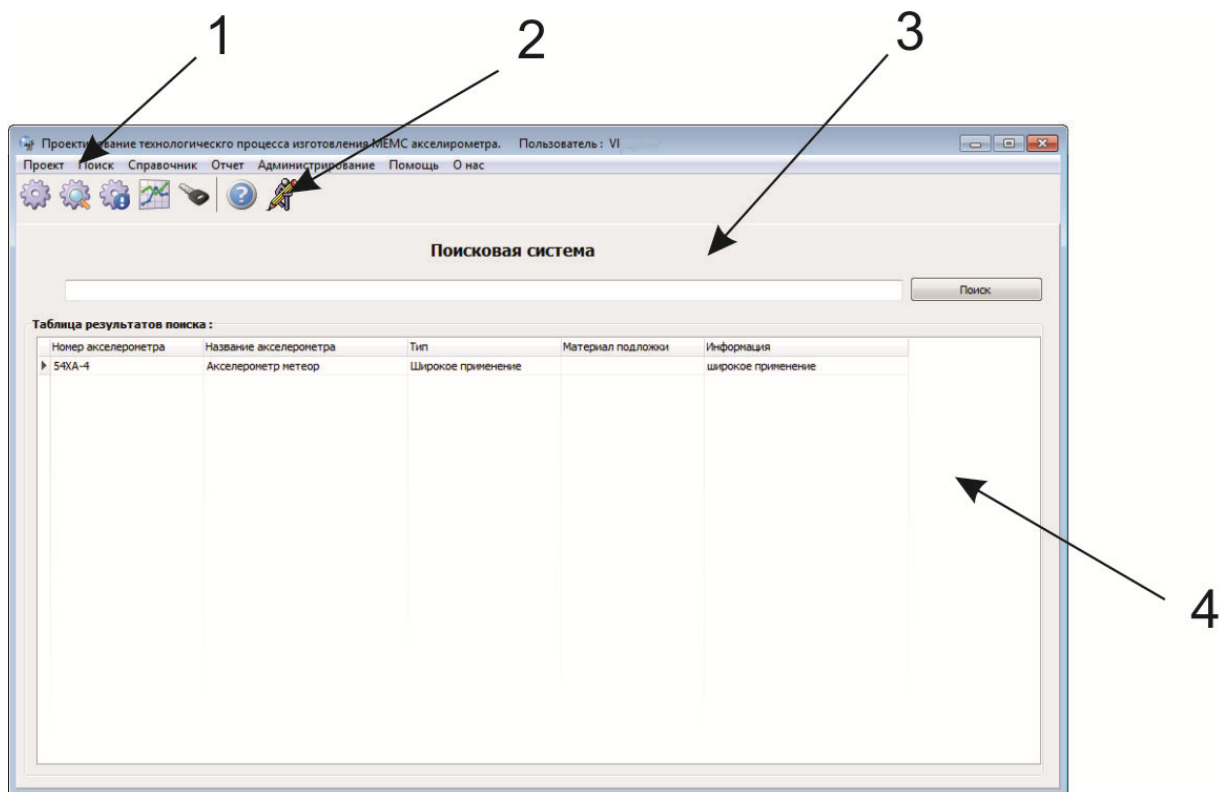


Рисунок 5.2 – Головне вікно ПМ «AcSAM» проектування ТП виготовлення MEMC акселерометрів

Схематично роботу ПМ «AcSAM» можна представити на рис. 5.3. До модулю завантажується 3D-модель MEMC акселерометра з будь-якої CAD-системи. Далі оператор вносить необхідні додаткові дані з ТЗ (чутливість,

нелінійність, герметизація, тип корпусу і т.д.), що необхідні для побудови ТП. За допомогою модулю пошуку MEMC акселерометра-аналога визначається MEMC акселерометр-аналог, на базі результатів якого здійснюється вибір типового ТП або пошук аналогів окремих елементів, зміна ТП (вибір операцій та обладнання).

Далі проводиться імітаційне моделювання отриманого рішення для оцінки ТП, якщо результати не задовільняють критеріям, то існує можливість повернення до зміни ТП. Модуль формування МК генерує МК.

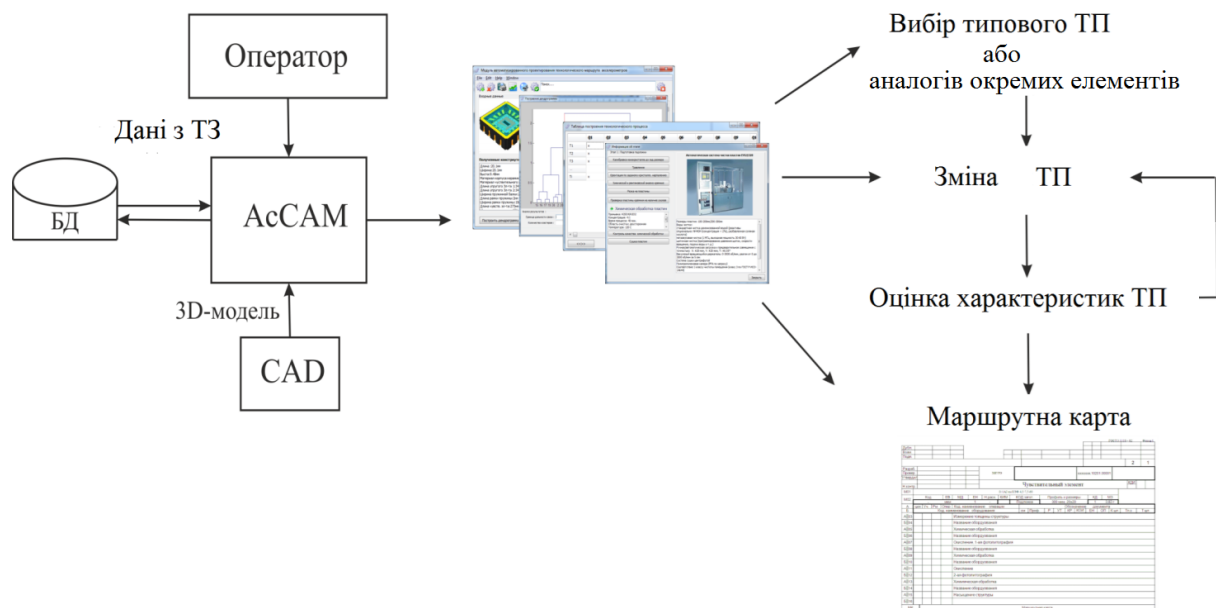


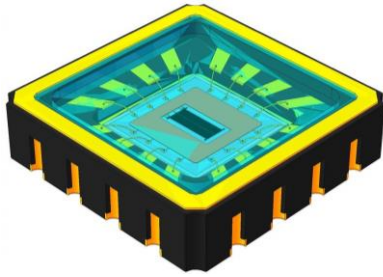
Рисунок 5.3 – Структурна схема роботи ПМ «AcSAM»

## 5.2 Експериментальні дослідження

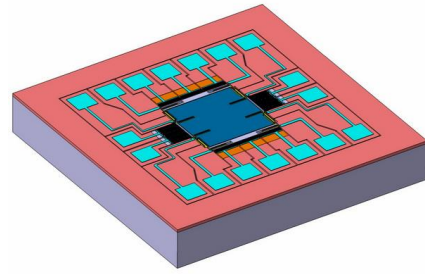
Для доказу працездатність і ефективність розроблених та удосконалених математичних моделей (розділ 2 та 3) і методів автоматизованого проектування ТП виготовлення MEMC акселерометрів (розділ 3), проведено ряд експериментальних досліджень на тестових зразках з різними типами акселерометрів і конструктивно-функціональними параметрами.

Експеримент проводився на трьох MEMC акселерометрах. В якості вхідної інформації взято три деталізовані збірки MEMC акселерометрів різного типу та з різними параметрами (кількість осей, матеріал та принцип дії). 3D-моделі яких

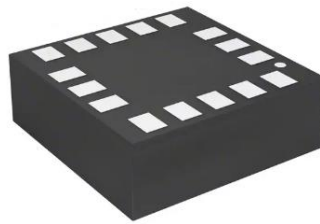
розроблені в різних CAD-системах (на рис. 5.4 наведено 3D-моделі).



а) тестовий зразок 1 [178]



б) тестовий зразок 2 [179]



в) тестовий зразок 3 [180]

Рисунок 5.4 – 3D-моделі тестових зразків MEMC акселерометрів для проведення експериментального дослідження

3D-модель тестового зразка 1 розроблена у Федеральній державній автономній освітній установі вищої освіти «Південно-Уральський державний університет (національний дослідницький університет)» (ФДАОУ ВО «ПУрДУ (НДУ)») за допомогою програмного середовища «КОМПАС-3D». Тестовий зразок 2 розроблено у науково-технічному центрі «Техноцентр» Південного Федерального університету (НТЦ «Техноцентр» ПФУ), а тестовий зразок 3 – в «SolidWorks».

Для розробки ТП виготовлення MEMC акселерометрів завантажено в розроблений ПМ «AcSAM» деталізовану 3D-модель збірки з початкового файлу. 3D-модель MEMC акселерометра завантажується за допомогою модулю введення даних, в ході якого отримані параметри конструкції акселерометра такі як: довжина пружного елемента 1; довжина пружного елемента 2, ширина пружинної балки, довжина рамки пружини, ширина рамки пружини, довжина ЧЕ, ширина ЧЕ, довжина пальця гребінки, ширина пальця гребінки, проміжок

між чутливими пальцями гребінки, проміжок між пальцями зворотного зв'язку, перекриття пальців, зміна величини проміжку за віссю X, кількість чутливих пальців гребінки, кількість пальців зворотного зв'язку, проміжок між ЧЕ, проміжок між пальцями зворотного зв'язку, зазор між чутливих пальців і пальців зворотного зв'язку, перекриття рухливих пальців нерухомими, довжина нерухомих пальців, діапазон напруг, довжина якоря, ширина якоря, довжина обмежувача, ширина обмежувача, довжина якорю пружини.

На наступному етапі задаються параметри МЕМС акселерометра, такі як: чутливість, кількість осей, нелінійність і т. д., які наведені у ТЗ. Параметри, які є невідомими можна пропустити.

В разі необхідності можна використати довідкову інформацію, наприклад на рис. 5.5 представлена конструкція ЧЕ МЕМС акселерометра для тестового зразка 1, де 1 – нерухома обкладка МЕМС акселерометра; 2 – маятник; 3 – пружний підвіс; 4 – обмежувач.

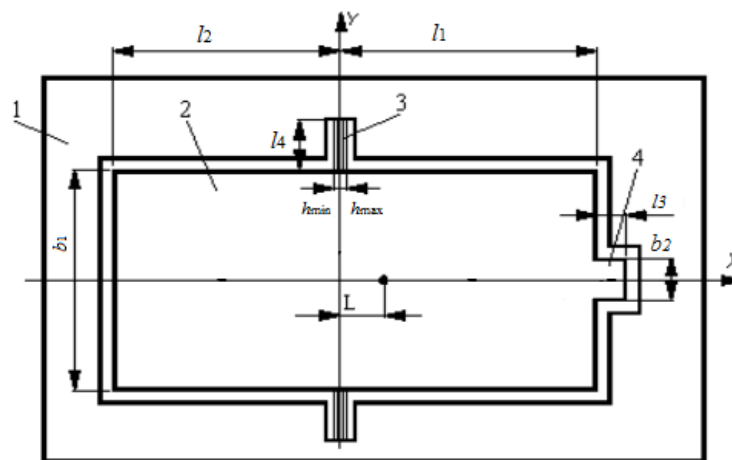


Рисунок 5.5 – Конструкція ЧЕ МЕМС акселерометра з довідника

Конструктивні параметри, які можуть бути отримані, зображені на рис. 5.5: довжина правої частини рамки маятника ( $l_1$ ); довжина лівої частини рамки маятника ( $l_2$ ); ширина рамки маятника ( $b_1$ ); довжина обмежувача маятника ( $l_3$ ); ширина обмежувача маятника ( $b_2$ ); товщина рамки маятника ( $h_1$ ); довжина пружного підвісу ( $l_4$ ); максимальна товщина пружного підвісу ( $h_{\max}$ ); мінімальна

товщина пружного підвісу ( $h_{min}$ ); проміжок маятника з кришкою ( $h_2$ ); відстань до центру мас маятника ( $L$ ).

Після цього існує можливість введення переваг ваговим коефіцієнтам та вказати ступінь їх важливості і проведення перерахунків коефіцієнтів згідно з новими значеннями, результати впорядкування параметрів МЕМС акселерометрів у напрямку зниження їх важливості:

$$A \succ Se \succ T \succ S \succ Sg \succ Sx \succ Rm \succ Ry \succ Rx \succ f \succ nL \succ St \succ Dr \succ Tk \succ Tr \succ Ls \succ Ss \succ Sm \succ H \succ El \succ F \succ I \succ C \succ Cr.$$

Інтерфейс ПМ із завантаженою 3D-моделлю тестового зразка 1 та параметрами з ТЗ представлено на рис. 5.6.

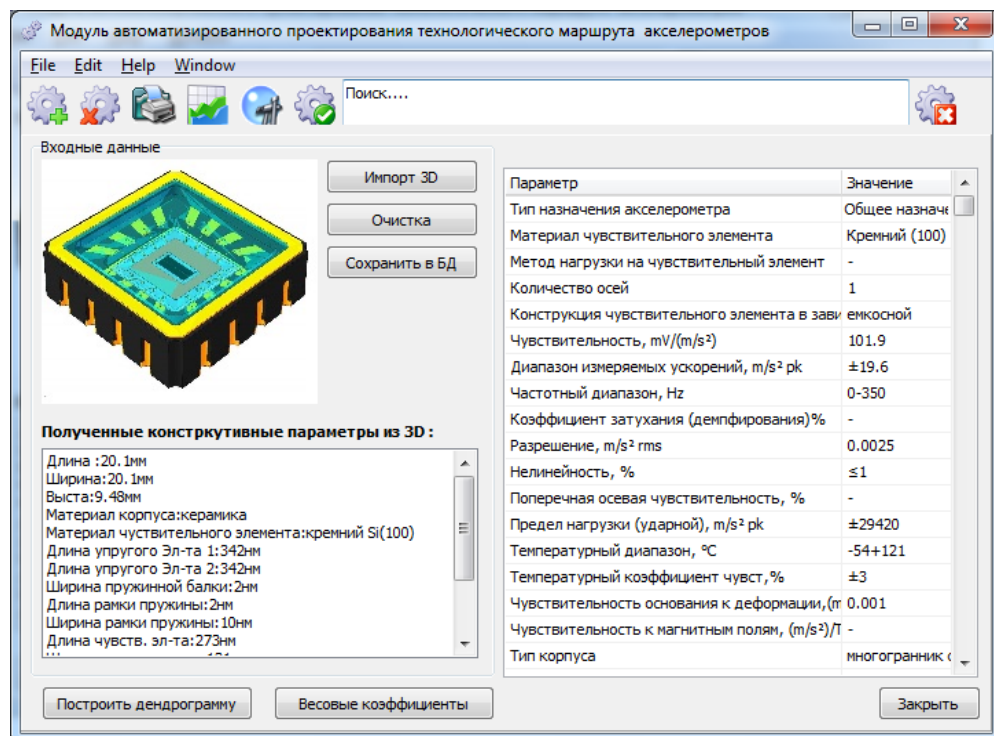


Рисунок 5.6 – Інтерфейс ПМ із завантаженою 3D-моделлю 1

Аналогічним чином завантажуюємо моделі для тестових зразків 2 та 3 і вводимо необхідні параметри (рис 5.7 та рис. 5.8).

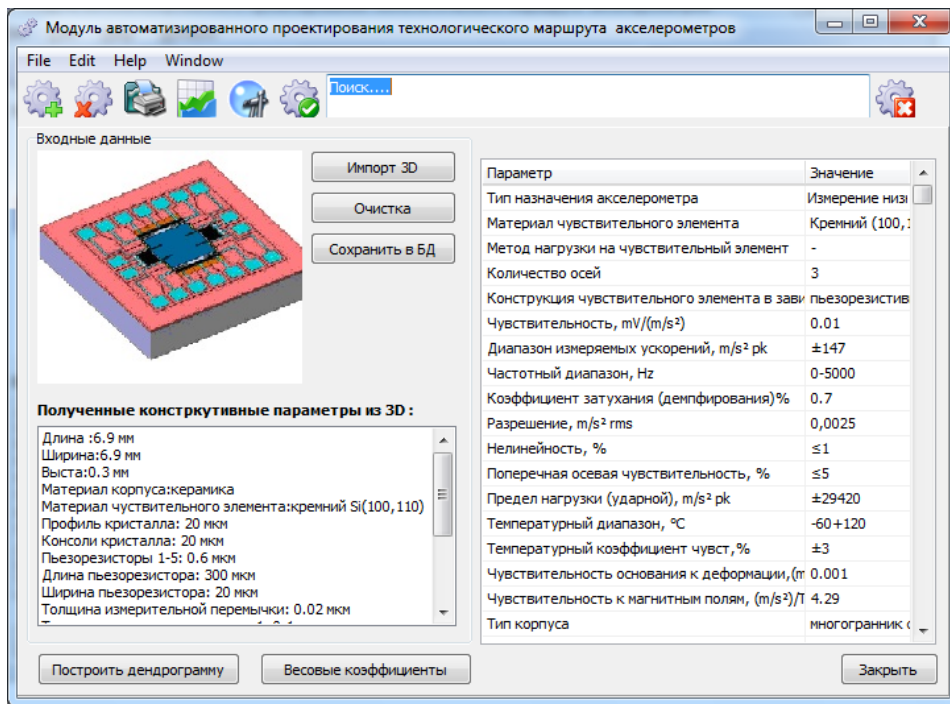


Рисунок 5.7 – Интерфейс ПМ із завантаженою 3D-моделлю 2

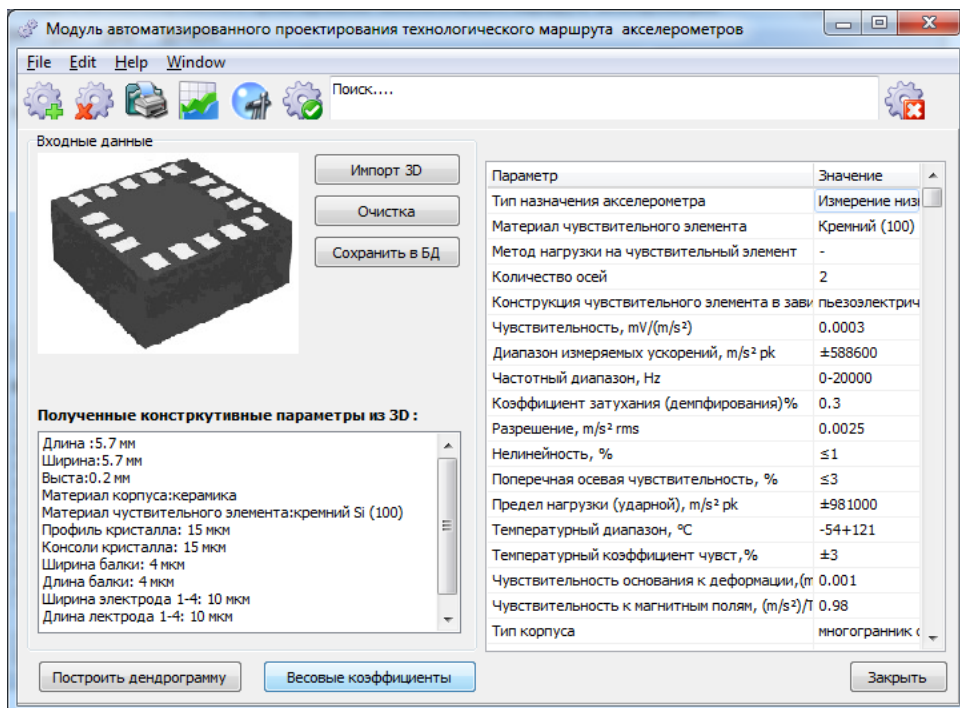


Рисунок 5.8 – Интерфейс ПМ із завантаженою 3D-моделлю 3

На наступному етапі здійснюється перехід до модулю вибору типового ТП, після перегляду результатів розбиття на кластери у вигляді дендрограми, в якій червоним позначається кластер, до якого належить новий акселерометр



(рис. 5.9-5.11). Для отриманої дендрограми можливо варіювати значення межі дальності зв'язку і кількість кластерів, а також провести автоматичний аналіз розбиття кластерів.

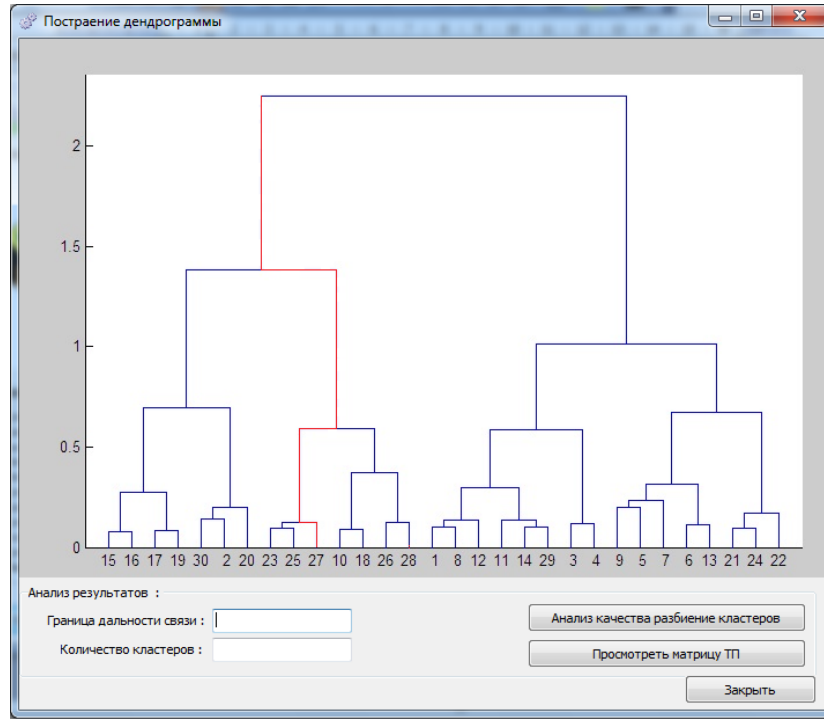


Рисунок 5.9 – Дендрограма для тестового зразка 1

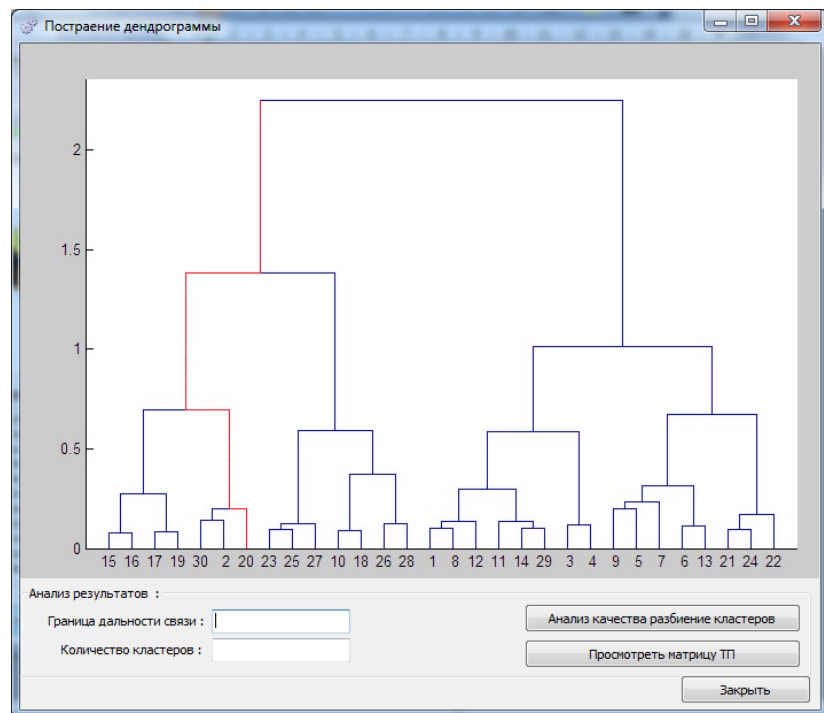


Рисунок 5.10 – Дендрограма для тестового зразка 2

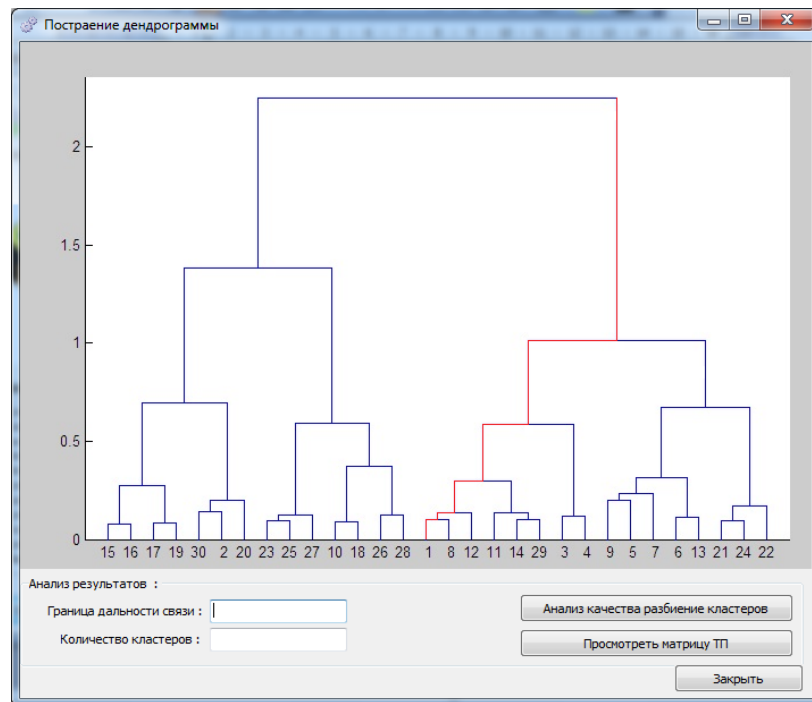


Рисунок 5.11 – Дендрограма для тестового зразка 3

Як видно з отриманих дендрограм, кожний тестовий зразок класифіковано в різні класи МЕМС акселерометрів-аналогів. За умови доцільного розбиття існує можливість перегляду матриці ТП для кластера, до якого належить новий акселерометр. Результати матриць для тестових зразків 1-3 представлено на рис. 5.12-5.14.

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10
T1	x(9)	x(1)	x(123)	x(6)	x(12)	x(3)	x(17)	x(3)	x(11)	x(4)
T2	x(11)	x(1)	x(73)	x(7)	x(5)	x(4)	x(19)	x(21)	x(7)	x(1)
T3	x(8)	x(1)	x(86)	x(5)	x(9)	x(2)	x(17)	x(13)	x(4)	x(8)

Рисунок 5.12 – Матриця ТП для тестового зразка 1

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10
T1	x(11)	x(1)	x(115)	x(8)	x(5)	x(3)	x(17)	x(14)	x(6)	x(8)
T2	x(6)	x(1)	x(98)	x(3)	x(5)	x(3)	x(23)	x(12)	x(6)	x(1)
T3	x(8)	x(4)	x(121)	x(5)	x(9)	x(1)	x(18)	x(16)	x(10)	x(9)
T4	x(11)	x(3)	x(103)	x(8)	x(5)	x(4)	x(16)	x(11)	x(8)	x(5)

Рисунок 5.13 – Матрица ТП для тестового зразка 2

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10
T1	x(7)	x(5)	x(123)	x(8)	x(9)	x(3)	x(17)	x(11)	x(11)	x(4)
T2	x(11)	x(1)	x(73)	x(7)	x(5)	x(4)	x(19)	x(21)	x(7)	x(1)
T3	x(4)	x(3)	x(96)	x(5)	x(9)	x(2)	x(14)	x(13)	x(4)	x(8)
T4	x(9)	x(0)	x(143)	x(5)	x(12)	x(2)	x(25)	x(13)	x(11)	x(1)
T7	x(11)	x(2)	x(128)	x(4)	x(11)	x(2)	x(17)	x(13)	x(4)	x(8)
T6	x(3)	x(0)	x(84)	x(5)	x(8)	x(1)	x(15)	x(13)	x(5)	x(9)

Рисунок 5.14 – Матрица ТП для тестового зразка 3

У матриці ТП  $x(n)$  позначено наявність етапів, де  $n$  – кількість операцій на етапі. У матриці представлені всі типові ТП для даного кластера, де першим розташований типовий ТП, якій найбільш повно задовольняє критерії пошуку, і по спадаючій.

Можливо переглянути кожен етап ТП, всередині якого відображено інформацію про послідовність операцій, обладнання, значення вартості та час виконання ТП. Для тестового зразка 1 інформація для етапу 1 «Підготовка підкладки» представлено на рис. 5.14. При натисканні кнопки «>>» відбувається пошук кращого варіанту типового ТП.

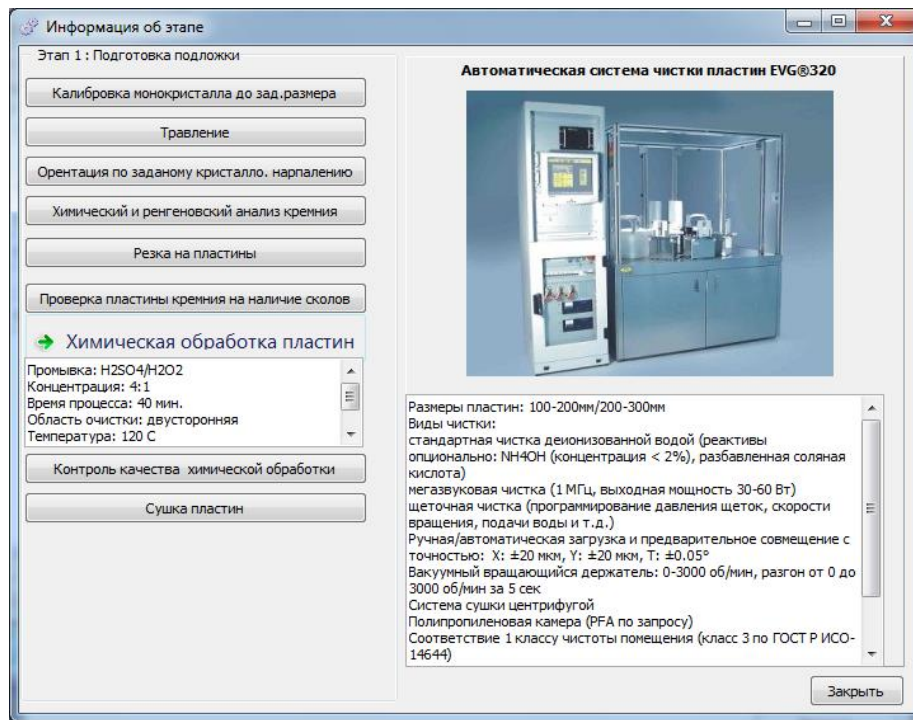


Рисунок 5.15 – Інформація про етап 1 та обладнання для тестового зразка 1

Рекомендації щодо вибору типового ТП подаються у вигляді таблиці для тестового зразка 1, який віднесено до першого кластера. Результати наведено в табл. 5.1, де червоним прямокутником виділено рішення, яке рекомендується.

Таблиця 5.1 – Рекомендації для вибору типового ТП тестового зразка 1

Кластер	Номер акселерометру	Технологічні процеси	$\bar{t}$	$\bar{C}$
1	1,2,3,4,5,6,7	$TP_1 - 57,14 \%$	$\bar{t}_1$	$\bar{C}_1$
		$TP_2 - 28,57 \% \Rightarrow$ рекомендується типовий ТП $T_1$	$\bar{t}_2$	$\bar{C}_2$
		$TP_3 - 14,29 \%$	$\bar{t}_3$	$\bar{C}_3$
2	50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,66,67	$TP_4 - 43,75 \%$	$\bar{t}_4$	$C_4$
		$TP_5 - 25 \% \Rightarrow$ рекомендується типовий ТП $T_4$	$\bar{t}_5$	$\bar{C}_5$
		$TP_6 - 31,25 \%$	$\bar{t}_6$	$\bar{C}_6$
3	54,65	$TP_7 \Rightarrow$ рекомендується типовий ТП $T_7$	$\bar{t}_7$	$\bar{C}_7$

Після отримання типового ТП – допрацьовується до необхідного шляхом вибору операцій та обладнання за заданими критеріям пошуку, та проведенням імітаційного моделювання для перевірки отриманих результатів.

Результатом проведених експериментів над тестовими зразками МЕМС

акселерометра є МК. Фрагмент МК для етапу ( $Q_3$ ) одержання ЧЕ тестового зразка 1 наведено на рис. 5.16. Фрагмент згенерованої МК для виконання етапу  $Q_3$  представлений в додатку Г.

ГОСТ 3.1118 – 82															Форма 1		
Дубл.																	
Взам.																	
Подп.																	
															8	1	
Разраб.	Пользователь			хнурэ			xxxxxxx.10201.00001										
Провер.	Гл.технолога																
Утвердил																	
Н.контр.	Чувствительный элемент															КДИ	
M01	Si 1A2 км КЭФ 4,5/7,5-60																
M02	Код	ЕВ	МД	ЕН	Н.расх.	КИМ	КОД загот.	Профиль и размеры			КД	МЗ					
	-			1	-			300 мкм, 20x20			1	3,82 г					
А	цех	Уч.	Рм	Опер.	Код, наименование операции			Обозначение документа									
Б	Код, наименование оборудования						см	Проф.	Р	УТ	КР	КОИ	ЕН	ОП	К шт.	Тп.з	Т шт.
А 03	xx	xx	-	0200	Входной контроль												
Б 04	АБВГ.хххххх.ххх			Спектральный эллипсомер Auto SE (Horiba)													
О 05	Измерение толщины структуры, h=																
А 06	xx	xx	-	0143	Очистка												
Б 07	АБВГ.хххххх.ххх			Установка чистки полупроводниковых пластин и подложек EVG 301													
О 08	Промывка в ванне со смесью H2SO4/H2O2, концентрация 4:1, t=120°C															40 мин.	
Т 09	АБВГ.хххххх.ххх неметаллическая ванна; АБВГ.хххххх.ххх тефлоновый зажим																
О 10	Промывка в ванне с HCl/ H2O2 (перекись) концентрация 1:1.5; , t=70°C															10 мин.	
Т 11	АБВГ.хххххх.ххх полиэтиленовый контейнер; АБВГ.хххххх.ххх тефлоновый зажим																
О 12	Промывка в раствор HF/H2O, концентрация HF/H2O - [1:50]															10 с.	
Т 13	АБВГ.хххххх.ххх керамическая промывочная ванна																
А 14	xx	xx	-	7143	Окисление												
Б 15	АБВГ.хххххх.ххх			Вакуумная печь с верхней загрузкой Unitemp VPO-1000-300													
О 16	1-ая фотолитография по формированию																
Т 17	АБВГ.хххххх.ххх фотошаблон 1; АБВГ.хххххх.ххх фотошаблон 2; ЗС с пл. и непл. ст. Ф/ш пл. ст. Э.ММА-01-1 Ф/ш непл. ст.																
МК	Маршрутная карта																

Рисунок 5.16 – Фрагмент МК етапу отримання ЧЕ

У табл. 5.2 представлений порівняльний аналіз за собівартістю розробленого ТП у ПМ «AcSAM» і базового.

Таблица 5.2 – 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

Продовження таблиці 5.2

Види затрат	Розроблений ТП	Базовий ТП	Виграш	
			Абсолютне значення	%
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

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. 5.2) та зменшити час розв'язання завдання проектування ТП на 16,3% порівняно з існуючими системами (в середньому в 1,9 рази) та отримати технічну документацію у вигляді маршрутної карти.

В рамках даних експериментальних досліджень проведемо порівняльний аналіз сумарного часу розв'язання задачі проектування ТП виготовлення тестового зразка 1. В табл. 5.3 наведено результати аналізу часу, що витрачається на розв'язання задачі автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометра для трьох САПР. Таблиця заповнюється з моменту початку проектування 3D-моделі (з ескізу) та до завершення проектування ТП виготовлення. 3D-модель МЕМС акселерометра не проектувалась за допомогою програмних продуктів (MEMS Pro, ConventorWar, IntellSuite), а час її проектування розраховувався, з розрахунком на те, що модель тестового зразка 1 складається з 1651 деталей.

Час проектування тестового зразка для кожної САД-системи розраховувався як час проектування однієї деталі моделі тестового зразка 1 на загальну кількість деталей:

$$\text{Час проектування} = \text{Час проектування 1 деталі} \cdot \text{кількість деталей.}$$

Таблиця 5.3 – Час розв’язання задачі

Показники		MEMS Pro	ConventorWare	IntellSuite	Розроблений ПМ
Проектування 3D-моделі, місяців		2,5	3	3,1	середнє 2,7
Передача 3D-моделі, хв.		16,3	20,1	17,6	середнє 18
Введення даних, хв.		19	21	26	15
Проектування ТП виготовлення ЧЕ, хв.		47	43	48	26
Час розв’язання задачі, хв.		108082,3	129684,1	139771,6	116681
Виграш	Абсолютне значення, хв.	8598,7	13003,1	23090,6	–
	Відносне значення, %	7,96	10,027	16,52	–
Проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометра, хв.			–	63	41
Повний час вирішення завдання, хв.			–	139834,6	116722
Виграш	Абсолютне значення, хв.		–	23112,6	–
	Відносне значення, %		–	16,53	–

З табл. 5.3 видно, що за допомогою розробленого ПМ «AcSAM» можливо здійснити вибір будь-який CAD або CAD/CAE для розробки 3D-моделі, що дозволить варіювати час розробки, в залежності від обраної системи проектування 3D-моделі, та зменшувати вартість, працюючи з існуючими безкоштовними ПМ.

Створений ПМ «AcSAM» дозволяє знизити витрати часу, а програмне об'єднання проектування всіх етапів виробництва дозволить зменшити собівартість розробки МЕМС акселерометрів. Таким чином, це дозволить проводити розробки конкурентоспроможних МЕМС акселерометрів, як на вітчизняному ринку, так і на зарубіжному.

Наведені приклади розв’язання задач автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів підтверджують працездатність і ефективність розроблених та удосконалених математичних моделей, методів і програмного модуля.

### 5.3 Висновки до розділу 5

Для підтвердження працездатність і ефективність розроблених та удосконалених математичних моделей і методів автоматизованого проектування

ТП виготовлення МЕМС акселерометрів здійснена програмна їх реалізація результатом якої є ПМ «AcSAM».

У ПМ «AcSAM» проведено ряд експериментальних досліджень в ході якого отримано структуру ТП, обрано обладнання, отримано характеристики ТП і згенеровано МК для тестових зразків МЕМС акселерометрів, які характеризуються різними конструктивно-функціональними параметрами.

На базі проведено експериментальні дослідження доведено працездатність запропонованих моделей і методів та програмного модуля. Підтверджено ефективність розроблених моделей та методів автоматизованого проектування ТП виготовлення МЕМС акселерометрів дозволило зменшити наведені витрати на 45,42 % порівняно з базовим ТП та зменшить час на розв'язання задачі проектування середньому в 1,9 рази у порівнянні з іншими системами проектування та отримати технологічну документацію у вигляді МК.

Практична значимість отриманих результатів і розробленого модуля автоматизованого проектування підтверджується актами впровадження та отриманим авторським свідоцтвом № 65348 від 16.05.16 р.

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

У п'ятому розділі використано інформацію з джерел [177]-[180].



## 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 принадлежність 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

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

8. 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.

9. Невлюдов І.Ш., Хрусталеv К.Л., Бортнікова 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.

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., Харків, 2014. С. 115-116.

11. Невлюдов І.Ш., Бортнікова 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. Бортнікова 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., Харків, 2015. С. 119-120.

13. Бортнікова 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. Невлюдов І.Ш., Бортнікова 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.

19. 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.

20. Бортникова В.О. Формализация входных и выходных параметров для автоматизации проектирования технологических процессов изготовления

акселерометров // 20-ий ювілейний Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті», 19-21 квітня 2016 р., Харків, 2016. С. 107-108.

21. 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.

22. 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.

23. Невлюдов І.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.

24. 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.

25. 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.

26. 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.

27. Невлюдов И.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>.

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.

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.

30. Muller R. S., Howe R. T., Senturia S. D. Microsensors. New York: IEEE Press, 1991. 472 p.

31. Trimmer W.S. Micromechanics and MEMS. New York: IEEE Press, 1990. 720 p.

32. An Introduction to MEMS. By PRIME Faraday Partnership Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering Loughborough University, Loughborough, 2002. URL: [http://www.lboro.ac.uk/microsites/mechman/research/ipmktn/pdf/Technology\\_review/an-introduction-to-mems.pdf](http://www.lboro.ac.uk/microsites/mechman/research/ipmktn/pdf/Technology_review/an-introduction-to-mems.pdf). (дата звернення: 04.10.2013).

33. Шурыгина В. Долгожданные МЭМС. Технология малых форм. ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. Москва, 2002. №4. С 8-13.

34. Словарь нанотехнологических и связанных с нанотехнологиями терминов / Под редакцией С.В. Калюжного. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 528 с.



35. Walter P. L. The History of the Accelerometer – Prologue and Epilogue, 2006. URL: <http://qringtech.com/wp-content/uploads/2014/01/HistoryOfTheAccelerometer.pdf>. (дата звернення: 08.10.2013).
36. Серридж М., Лихт Т.Р. Справочник по пьезоэлектрическим акселерометрам и предусилителям. Дания, 1987. 201 с.
37. Зинченко Л. А. САПР наносистем. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 224 с.
38. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. М.: НТ Пресс, 2007. 400 с.
39. Невлюдов И. Ш. Андрусевич А.А., Палагин В.А. Микроэлектромеханические системы и нанотехнологии. Харьков: Коллегиум, 2008. 264 с.
40. Семенець В.В. Невлюдов І.Ш. Палагін В.А. Введення в мікросистемну техніку та нанотехнології Харків: Компанія СМІТ, 2011. 416 с.
41. Невлюдов И. Ш. Андрусевич А.А. Палагин В.А. Микроэлектромеханические системы и нанотехнологии Харьков: Коллегиум, 2007. 268 с.
42. Фрайден Дж. Современные датчики: Справочник: Пер. с англ. / Пер. Заболотная Ю.А.; Ред. пер. Свинцов Е.Л.- М.: Техносфера, 2006. 588 с.
43. Лысенко И.Е. Проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники. Таганрог: Издательство ТРТУ, 2005. 103 с.
44. Howard Samue Single- and Dual-Axis Micromachined Accelerometers ADXL150 & ADXL250: New complete low-noise 50-g accelerometers. Analog Dialogue, 1996. Vol. 30. URL: <http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/single-and-dual-axis-micromachined-accelerometers.html>. (дата звернення: 14.11.2013).
45. Piezoelectric Tri-axial Accelerometer, 2013 URL: <http://www.nanotech.dtu.dk/Research-mega/Forskningsgrupper/MEMS-AppliedSensors/NewResearch/Mechanical-Sensors/Triaxial-Accelerometer>. (дата звернення: 14.11.2013).
46. Todaro M. T., Sileo L., De Vittorio M. Magnetic Sensors – Principles and Applications. Chapter 6. Magnetic Field Sensors Based on Microelectromechanical

Systems (MEMS) Technology. / edited by Kuang K. InTech, 2012. 160 p.

47. Tapia J., Herrera-May A. J García-Ramírez P., Martínez-Castillo J., Figueras E., Flores A., Manjarrez E. Sensing magnetic flux density of artificial neurons with a MEMS device. Biomedical microdevices, 2010. Vol. 13(2). pp. 303-313.

48. NXP Semiconductors, 2015. URL: [https://www.nxp.com/search?client=nxp\\_search\\_all\\_results&site=nxp\\_en&proxystylesheet=nxp\\_search\\_style\\_fe&sort=date%3AD%3AL%3Ad1&ud=1&output=xml\\_nlter=0&getfields=\\*%&baseUrl=%2F%2Fwww.nxp.com%2Fwebapp&SEARCH\\_OPERATOR=Contains&attempt=-1&rc=1&hl=en&dnavs=&q=MEMS%20accelerometers](https://www.nxp.com/search?client=nxp_search_all_results&site=nxp_en&proxystylesheet=nxp_search_style_fe&sort=date%3AD%3AL%3Ad1&ud=1&output=xml_nlter=0&getfields=*%&baseUrl=%2F%2Fwww.nxp.com%2Fwebapp&SEARCH_OPERATOR=Contains&attempt=-1&rc=1&hl=en&dnavs=&q=MEMS%20accelerometers). (дата звернення: 14.08.2015).

49. Analog Devices Accelerometers. 2015. URL: <http://www.analog.com/en/products/sensors/accelerometers.html>.

50. Chollet F., Liu H. A not so short Introduction to Micro Electromechanical Systems, 2013. 238 p. URL: [https://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-674-micro-nano-engineering-laboratory-spring-2016/readings/MIT2\\_674S16\\_IntroToMEMS.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-674-micro-nano-engineering-laboratory-spring-2016/readings/MIT2_674S16_IntroToMEMS.pdf). (дата звернення: 15.03.2014).

51. Bosch Sortotec: 10 years of MEMS sensors innovation, 2015. URL: <http://www.bosch-presse.de/pressportal/de/en/bosch-sortotec-10-years-of-mems-sensors-innovation-42968.html> (дата звернення: 05.03.2015).

52. Accelerometers, 2015. URL: <http://www.kionix.com/parametric/Accelerometers>. (дата звернення: 05.03.2015).

53. Accelerometers – MEMS and Sensors – STMicroelectronics, 2015. URL: <http://www.st.com/en/mems-and-sensors/accelerometers.html?querycriteria=productId=SC444>. (дата звернення: 05.03.2015).

54. Matej Andrejašič. Seminar MEMS ACCELEROMETERS University of Ljubljana Faculty for mathematics and physics Department of physics, 2008. URL: [http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2007\\_2008/MEMS\\_accelerometers-končna.pdf](http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2007_2008/MEMS_accelerometers-končna.pdf). (дата звернення: 05.03.2015).

55. Introduction to MEMS Accelerometers, 2015. URL: <http://www.pcb.com/Resources/Technical-Information/mems-accelerometers>. (дата звернення:

05.03.2015).

56. Silicon Designs MEMS DC Accelerometer, 2015. URL: <https://www.silicondesigns.com/?lightbox=cfd5>. (дата звернення: 05.03.2015).

57. Technology-Thermal MEMS Accelerometers, 2015. URL: <http://www.memsic.com/technology/thermal-mems.cfm>. (дата звернення: 05.03.2015).

58. PANT B.D., Dhakar L., George P.J., Ahmad S. Design of a MEMS Capacitive Comb-drive Micro-accelerometer with Sag Optimization. *Sensors & Transducers Journal*, 2009. Vol. 109. pp. 92-107.

59. Holovatyy Andriy, Teslyuk Vasyl, Lobur Mykhaylo. VHDL-AMS Model of Single-Axis Piezoresistive MEMS Accelerometer for Behavioral Design Level // IX International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, 22-24 June 2014, Lviv, Ukraine. PP. 51-52.

60. Beeby St., Ensel Gr., Kraft M. *MEMS Mechanical Sensors*. Artech House, 2004. 282 p.

61. Setter N. *Electroceramic-Based MEMS: Fabrication-Technology and Applications*. Springer Science & Business Media, 2005. 414 p.

62. Maluf N., Williams K. *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*. Norwood: Artech House, 2004. 303 p.

63. Tilli M. *Handbook of silicon based MEMS materials and technologies*. London, UK: William Andrew is an imprint of Elsevier, 2015. 787 p.

64. Pal P., Sato K. *Silicon Wet Bulk Micromachining for MEMS*. Pan Stanford, 2017. 424 p.

65. Inaltekin 53B. B. *Mems Accelerometer Modelling and Noise Analysis*. Lap Lambert Academic Publishing, 2011. 132 p.

66. Basic Bosch process patent application, 2015. URL: <http://www.freepatentsonline.com/5501893.html>.

67. Beaudry R. Deep reactive ion etching. EP 2105952 . Dalsa Semiconductor Inc., 2009. 14 p.

68. Теслюк В.М., Денисюк П.Ю. Автоматизация проектирования микроэлектромеханических систем на компонентном уровне. Монография. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. 192 с.
69. Варадан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их применение. М.: Техносфера, 2004. 528 с.
70. Curley R, Mc Cormack Th., Phipps M. Low-pressure CVD and Plasma-Enhanced CVD, 2016. URL: <http://www.ece.umd.edu/class/enee416/GroupActivities/LPCVD-PECVD.pdf>. (дата звернення: 24.04.2017).
71. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2007. 416 с.
72. Lindroos V., Motooka T., Franssila S., Paulasto-Krockel M., Tilli M., Airaksinen Vi. Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies (Second Edition). US: Elsevier, 2015. – 826 p.
73. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. М.: Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 336 с.
74. Горанский Г.К., Кочуров В.А. и др. Автоматизованные системы технологической подготовки производства в машиностроении. М.: Машиностроение, 1976. 354 с.
75. Горанский Г.К., Бендерова Э.И. Технологическое проектирование в комплексных автоматизованных системах подготовки производства. М.: Машиностроение, 1981. 455 с.
76. Цветков В.Д. Система автоматизации проектирования технологических процессов. М.: Машиностроение, 1972. 240 с.
77. Цветков В.Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов. Минск: Наука и техника, 1979. 264 с.
78. Норенков И.П., Кузьмик П.К. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS – технологии. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 320 с.
79. Капустин Н.М. Автоматизация машиностроения. М.: Высш. шк. 2003. 223 с.

80. Аверченков В.И., Казаков Ю.М. Автоматизация проектирования технологических процессов. Брянск: изд-во БГТУ, 2004. 228 с.
81. Митрофанов В. Г. Математическое обеспечение САПР технологической подготовки производства. М: Машиностроение, 1991. 52 с.
82. Митрофанов В. Г., Калачев О. Н., Схиртладзе А. Г. и др. САПР в технологии машиностроения. Ярославль: Яросл. Гос. Техн. ун-т, 1995. 298 с.
83. Янковская Т. А. О Задачах структурно-параметрического синтеза при проектировании сложных технических систем // Образовательные ресурсы и технологии. № 1(4)'2014'. С. 170-175.
84. Тимченко А.А. Основы системного проектирования та аналізу складних об'єктів: У 2-х кн. Кн. 1. Основы САПР та системного проектирования складних об'єктів. К.: Либідь, 2000. 272 с.
85. Петренко А. И., Семенов А.И. Основы построения систем автоматизированного проектирования. К.: Вища школа, 1984. 296 с.
86. Емеличев В.А. Мельников О.И., Сарванов В.И. и др Лекции по теории графов. М.: Наука, 1990. 384 с.
87. Домнин Л. Н. Элементы теории графов. Пенза: Пензский государственный университет, 2007. 144 с.
88. Нефёдов Л.И., Стопченко Е.Г., Стопченко Г.И., Золотова Н.М.. Принципы оптимальности методов многокритериальной оценки проектных решений при строительстве и реконструкции объектов городской системы. Коммунальное хозяйство городов. № 39. К.: Техніка, 2002. С. 24–26.
89. Сигал И.Х., Иванова А.П. Введение в прикладное дискретное программирование: модели и вычислительные алгоритмы. М.: Физматлит, 2007. 240 с.
90. Рихтер К. Динамические задачи дискретной оптимизации. М.: Радио и связь, 1985. 136 с.
91. Анферов М. А., Селиванов С. Г. Структурная оптимизация технологических процессов в машиностроении. Уфа: Гилем, 1998. 185 с

92. Селиванов С. Г., Гузаиров М. Б. Системотехника инновационной подготовки производства в машиностроении. М.: Машиностроение, 2012. 568 с.
93. Селиванов С. Г. Инновационное проектирование цифрового производства в машиностроении. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 264 с.
94. Ким Дж.-О. Факторний, дискримінант і кластерний аналіз пер. з англ. А.М. Хотинського і С.Б. Корольова, науч. ред. И.С. Енюкова. М.: Фінанси і статистика, 1989, 215 с.
95. Технологии анализа данных. BaseGroup Labs. URL: // <http://www.basegroup.ru/>
96. Fisher, D.H. Knowledge acquisition via incremental conceptual clustering / D.H. Fisher // Machine Learning 2, 1987. pp. 139-172.
97. Барсегян, А. А., Куприянов М. С., Степаненко В. В., Холод И. И. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 336 с.
98. Боровиков, В.П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. СПб.: Питер, 2003. 688 с.
99. Sudipto G., Rajeev R., Kyuseok S. CURE: An Efficient Clustering Algorithm for Large Databases // International conference on management of data proceedings. 1997.
100. Вятчинин, Д.А. Нечеткие методы автоматической классификации: Монография. Мн.: УП «Технопринт», 2004. 219 с.
101. Tian Z., Raghu R., Miron L. BIRCH: An Efficient Data Clustering Method for Very Large Databases, Proc. of ACM SIGMOD Int'l Conf. on Data Management, Canada, June 1996.
102. Ngai J., Kao B., Chui C., Cheng R., Chau M. and Yip K. Efficient Clustering of data with uncertainty. In IEEE Intl. Conf. on Data Mining (ICDM), 2006.
103. Кошелева, В.А. Федяев О.И. Классификация знаний на основе метода кластерного анализа // III международная научно-техническая конференция молодых учёных и студентов. Донецк, 2007.

104. Biswas G, Weinberg J., Li C. ITERATE: A Conceptual Clustering Method for Knowledge Discovery in Databases. 1995. 29 p.
105. Ruspini E. H. A new approach to clustering. *Information Control*. V.15(1). 1969. pp. 22-32.
106. Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome Friedman. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction* Издатель Springer Science & Business Media, 2013 536 p.
107. Rokach, Lior; Maimon, O. (2008). *Data mining with decision trees: theory and applications*. World Scientific Pub Co Inc.
108. Gareth, James; Witten, Daniela; Hastie, Trevor; Tibshirani, Robert (2015). *An Introduction to Statistical Learning*. New York: Springer. p. 315. ISBN 978-1-4614-7137-0.
109. Hsu, Chih-Wei; Chang, Chih-Chung & Lin, Chih-Jen (2003). *A Practical Guide to Support Vector Classification* (Technical report). Department of Computer Science and Information Engineering, National Taiwan University.
110. Chang and C.-J. Lin. LIBSVM: a library for support vector machines. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2(3):27:1–27:27, 2011. Software available at <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>. (дата звернення: 10.11.2015).
111. Fan, K.-W. Chang, C.-J. Hsieh, X.-R. Wang, and C.-J. Lin. LIBLINEAR: a library for large linear classification. *Journal of Machine Learning Research*, 9:1871–1874, 2008. URL <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/papers/liblinear.pdf>. (дата звернення: 10.11.2015).
112. Ron Kohavi and Pat Langley and Yeogirl Yun, *The Utility of Feature Weighting in Nearest-Neighbor Algorithms*. Proceedings of the Ninth European Conference on Machine Learning, 1997. p.85-92. Springer-Verlag.
113. Tom M. Mitchell (1997). *Machine Learning*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math. p. 432. ISBN: 0070428077.
114. Chen, Tianqi. “Introduction to Boosted Trees.” University of Washington Computer Science. University of Washington, 22 Oct. 2014. Web.

115. Trevor Hastie. Trees, Bagging, Random Forests and Boosting. Stanford University. URL [http:// http://jessica2.msri.org/attachments/10778/10778-boost.pdf](http://jessica2.msri.org/attachments/10778/10778-boost.pdf). (дата звернення: 10.11.2015).

116. Nikolaos Pitelis and Anastasios Tefas. Discriminant Subspace Learning Based on Support Vectors Machines. P. Perner (Ed.): MLDM 2012, LNAI 7376, pp. 198–212, 2012.

117. Оверзгельдыев А.О., Петров Э.Г., Петров К.Э. Синтез и идентификация моделей многофакторного оценивания и оптимизации. Киев: «Наукова думка». 2002. 163 с.

118. П. Фишберн, Теория полезности // Исследование операций: В 2 т. Т.1: Методологические основы и математические методы / Под ред. Дж. Моудера, С. Элмаграби: Пер. с англ. М.: Мир, 1981. С. 448-480.

119. Бескоровайный В. В. Синтез логической схемы системного проектирования территориально распределенных объектов // Радиоэлектроника и информатика. №. 3. 2002. С. 94 – 96.

120. Бескоровайный В. В., Соболева Е. В. Идентификация частной полезности многофакторных альтернатив с помощью S-образных функций, // Бионика интеллекта. №. 1(72) .2010. С. 50 – 54.

121. Петров Э. Г., Бескоровайный В.В., Писклакова В.П. Формирование функций полезности частных критериев в задачах многокритериального оценивания // Радиоэлектроника и информатика. №. 1. 1997. С. 71 –73.

122. Нефедов Л. И., Шевченко М. В., Кудырко О. Н. Модель структурно-топологического синтеза системы мониторинга качества добычи газа // Науковий журнал «ScienceRise». №2(2). 2014. С. 61– 67.

123. Beskorovainyi V., Berezovskyi G. Estimating the properties of technological systems based on fuzzy sets. Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2017. No. 1 (1). PP. 14-19.

124. Ansys. URL: <http://www.ansys.com/>. (дата звернення: 24.04.2015).

125. Comsol. URL: <https://www.comsol.com/>.(дата звернення: 24.04.2015).



126. PDE Solutions Ink., 2015. URL: <http://www.pdesolutions.com/>. (дата звернення: 29.06.2017).
127. Algor. URL: <http://www.algor.wbl.sk/>. (дата звернення: 24.04.2015).
128. Abaqus FEA. SIMULIA. URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/>. (дата звернення: 29.06.2015).
129. MEMCAD ver. 4.5. URL: <http://www.memcad.com/>. (дата звернення: 24.04.2015).
130. MathWorks - Makers of MATLAB and Simulin. URL: <http://www.mathworks.com/> (дата звернення: 29.06.2015).
131. A Simulation Tool for MEMS Devices. URL: <http://www-bsac.eecs.berkeley.edu/cadtools/sugar/>. (дата звернення: 29.06.2015).
132. 3D CAD Design Software. URL: <https://www.solidworks.com/>. (дата звернення: 29.06.2015).
133. Softmems. MEMS Pro v6.0. URL: [http://www.softmems.com/mems\\_pro.html](http://www.softmems.com/mems_pro.html). (дата звернення: 29.06.2015).
134. Coventor. A Lam Research company. URL: <https://www.coventor.com/>. (дата звернення: 29.06.2015).
135. Cadence: EDA Tools and IP for System Design Enablement, 2015. URL: <https://www.cadence.com/>. (дата звернення: 29.06.2015).
136. IntelliSuite v8.5 Official Release. URL: <https://intellisense.wordpress.com/2008/08/06/intellisuite-v85-official-release/>.
137. Tanner Research Inc. URL: <http://www.tanner.com/>. (дата звернення: 29.06.2015).
138. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
139. Тихоморова А.Н., Сидоренко Е.В. Модифицированный метод анализа иерархий Саати Т. для расчета весов критериев при оценке инновационных проектов// Современные проблемы науки и образования. 2012. № 2.
140. Саати Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: аналитические сети. М.: Книжный дом «Либроком», 2009. 360 с.

141. Волков В.Л. Обоснование требований к параметрам микромеханического акселерометра. Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева № 2(87), 2011, С. 288-295.

142. Головинский М.С., Оксина М.С., Шалимов А.С. Разработка МЭМС-емкостного чувствительного элемента акселерометра гребенчатого типа // Молодежный научный форум: Технические и математические науки: электр. сб. ст. по мат. XXVII междунар. студ. науч.-практ. конф. № 8(27). М.: 2015. С. 15 – 23. Режим доступа до інформації: [https://nauchforum.ru/archive/MNF\\_tech/8\(27\).pdf/](https://nauchforum.ru/archive/MNF_tech/8(27).pdf/) (дата звернення: 02.04.2016).

143. Лукінюк М.В. Технологічні вимірювання та прилади. К.: НТУУ «КПІ», 2007. 436 с.

144. Поліщук, Є.С. Метрологія та вимірювальна техніка. Львів : Політехніка, 2003. 544 с.

145. Basic Definitions – Accelerometers- PCB Piezotronics, Inc. official site. [Електронний ресурс]. Режим доступу до інформації: [http://www.pcb.com/TestMeasurement/Accelerometers/Basic\\_Definitions](http://www.pcb.com/TestMeasurement/Accelerometers/Basic_Definitions). (дата звернення: 23.05.2016).

144. Благітко Б., Мочульський Ю. Математичне моделювання процесу стабілізації квадрокоптера у польоті // Електроніка та інформ. технології, 2013. № 3. С. 96–107.

145. Huang H., Hoffmann G. M., Waslander S. L., Tomlin C. J. Aerodynamics and control of autonomous quadrotor helicopters in aggressive maneuvering // IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 2009. P. 3277–3282.

146. Nartin P. The True Role of Accelerometer Feedback in Quadrotor Control / Philip Nartin, Erwan Salaun // IEEE International Conference on Robotics and Automation, Anchorage, May 2010. P. 1623–1629.

147. MEMS inertial sensor high performance 3-axis  $\pm 2/\pm 6g$  ultracompact linear accelerometer/ ST. STMicroelectronics NV. [Електронний ресурс]. Режим доступу до інформації: <http://www.st.com/resource/en/datasheet/lis344alh.pdf/> . (дата звернення: 29.05.2016).

148. Accelerometer Specifications - Quick Definitions. Analog Devices/ official site. [Электронный ресурс]. Режим доступа до інформації: <http://www.analog.com/en/products/landing-pages/001/accelerometer-specifications-definitions.html> (дата звернення: 01.06.2016). Дата доступу:

149. Honeywell. Honeywell Sensing & Control. official site. [Электронный ресурс]. Режим доступа до інформації: <https://measurementsensors.honeywell.com/about/Pages/default.aspx>. (дата звернення: 10.06.2016).

150. Monitor. Статьи и справочники. Типы корпусов микросхем. [Электронный ресурс]. Режим доступа до інформації: <http://master-tv.com/article/chips/> (дата звернення: 30.09.2015).

151. Метотехника. Продукция. Метал Титан. [Электронный ресурс]. Режим доступа до інформації: <http://www.metotech.ru/titan-opisanie.htm>. (дата звернення: 24.01.2016).

152. Химик. Титана сплавы. Свойства сплавов титана. [Электронный ресурс]. Режим доступа до інформації: <http://www.ximuk.ru/encyklopedia/2/4483.html>. (дата звернення: 24.01.2016.)

153. Саушкин Б. П., Петров Ю. Н., Нистрян А. З., Маслов А. В. Электрохимическая обработка изделий из титановых сплавов. Кишинев: ШТИИНЦА, 1988. 197 с.

154. Федорова Е. А., Лысова Е. К., Хмелев А. В. Свойства поверхностных оксидных слоев на сплавах алюминия и титана после их микродуговой и электрохимической обработки // Химия и химическая технология, 2008. №3. Т.51. С.107-110.

155. Технология конструкционных материалов. Учебник для вузов. //Под редакцией Барона Ю.М. СПб.: ИД. Питер., 2015. 512 с.

156. Справочник химика 21 века. Инконель, конструкционный материал. [Электронный ресурс]. Режим доступа до інформації: <http://chem21.info/info/497379/>. (дата звернення: 30.09.2015).

157. Уникальный материал – Инконель. [Электронный ресурс]. Режим

доступу до інформації: <http://cable-plus.ru/articles/400-unikalniy-material-inkonel.html>. (дата звернення: 30.09.2015).

158. ГОСТ 15845-80 (СТ СЭВ 585-77). Изделия кабельные. Термины и определения Введен в действие. Постановлением Госстандарта СССР от 7 июля 1980 г. N 3425. Группа Е00. Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 7 июля 1980 г. N 3425 срок введения установлен с 01.07.1981. Взамен ГОСТ 15845-70. Переиздание. Декабрь 1985 Действующий, текст документа с изменен и дополненен , ноябрь 2014 года).

159. ГОСТ ИСО 5348-2002 - действующий. Вибрация и удар. Механическое крепление акселерометров (Vibration and shock. Mechanical mounting of accelerometers). Актуализация текста и описания: 27.10.2010. Введен в действие: 01.04.2008.

160. ГОСТ 3129-70 Штифты конические незакаленные. Технические условия. Действующий. (Taper pins. Construction and dimensions). Актуализация текста и описания: 27.10.2010 .Введен в действие: 01.07.1971.

161. Клини С. Математическая логика / Перевод с англ. Ю.А. Гастева, под редакцией Г.Е. Минца. М.: Мир, 1973, 480 с.

162. Шенфилд Дж. Математическая логика / Перевод с англ. И.А. Лаврова и И.А. Мальцева; под редакцией Ю.Л. Ершорва. М.:Наука, 1979, 528 с.

163. Беккенбах Э., Беллман Р. Введение в неравенства. М.: Мир, 1965. 168 с.

164. Куратовский К., Мостовский А. Теория множеств / Перевод с англ. М.И. Крапко под редакцией А.Д. Тайманова. М.: Мир, 1970, 416 с.

165. Петров Э.Г., Новожилова М.В., Гребенник И.В., Соколова Н.А. Методы и средства принятия решений в социально-экономических и технических системах. Херсон:ОЛДІ-плюс, 2003, 380 с.

166. Стеценко І.В. Моделювання систем. Черкаси, 2010, 399 с.

167. Айвазян С. А., Бухштабер В. М., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности: Справ. изд. М.: Финансы и статистика, 1989, 607 с.

168. Леончик Е. Ю. Кластерный анализ. Терминология, методы, задачи. ОНУ им. И.И. Мечникова, ИМЭМ. Одесса: Б.в., 2011, 67 с.

169. Accelerometer model: 3713B1150G. Model: 3713B1150G. URL:<http://www.pcb.com/Products.aspx?m=3713B1150G> (дата звернення: 12.12.2015).

170. Accelerometer. Specifications of products. URL: <http://www.pcb.com/products/productfinder.aspx?tx=14> (дата звернення: 12.12.2015).

171. Петер Флах. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных/ пер. с англ А.А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2015. 400 с.

172. Kohavi, Ron (1995). "A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection". Proceedings of the Fourteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann. 2 (12): 1137–1143. CiteSeerX 10.1.1.48.529.

173. Ronald Christensen. Thoughts on prediction and cross-validation., Department of Mathematics and Statistics University of New Mexico, May 21, 2015. URL: <http://www.math.unm.edu/~fletcher/Prediction.pdf> (дата звернення: 10.11.2015).

174. Метрики в задачах машинного обучения URL: <https://habrahabr.ru/company/ods/blog/328372/> (дата звернення: 12.12.2015).

175. Бескорвайный В. В. Модификация метода направленного перебора для оптимизации топологии систем с регулярным распределением элементов / В. В. Бескорвайный, Е. В. Соболева // Системи обробки інформації. – 2013. – № 1. – С. 12–16

176. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. Москва: Наука, 1973, 312 с.

177. Обзор RAD Studio URL:<https://www.embarcadero.com/ru/products/rad-studio> (дата звернення: 21.10.2015).

178. Микромеханический акселерометр URL:[http://edu.ascon.ru/main/competition/gallery/items/?bm\\_id=59132](http://edu.ascon.ru/main/competition/gallery/items/?bm_id=59132) (дата звернення: 04.08.2016).

179. Разработка МЭМС-датчики URL:<http://tcentr.sfedu.ru/ru/razrabotannye-mems-datchiki> (дата звернення: 04.08.2016).

180. ADIS16203CCCZ – Inclinometer LGA-16 – Analog Devices URL:<https://www.distrelec.de/en/inclinometer-lga-16-analog-devices-ccc/p/17321867> (дата звернення: 04.08.2016).

**ДОДАТОК А**

**Аналіз значних підходів і технологій, які розроблені провідними фірмами-виробниками мікроелектромеханічних акселерометрів**

Таблиця А.1 – Аналіз значних підходів і технологій, розроблених провідними фірмами-виробниками мікроелектромеханічних акселерометрів

Фірми	Технології та підходи
1	2
Freescale semiconductor, Inc.	<p>Ємнісні мікромеханічні структури – G-осередки, які формуються за допомогою стандартних технологій поверхневої мікрообробки – літографії, травлення, герметично ущільнюються на рівні підкладки або підкладки-ковпачка.</p> <p>Двокристальні акселерометри на основі поверхневих мікромеханічних структур.</p> <p>Інтелектуальні акселерометри.</p>
Analog Devices, Inc.	<p>Вперше запропоновано та досліджено метод поверхневого мікромеханічного процесу (surface micromachining) з товщиною полікремнію 2 мкм;</p> <p>Розроблено альтернативні методи:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– товсті полікремнієві процеси epi-poly (THELMA - Thick Epi-Poly Layer for Microactuators and Accelerometers, STMicroelectronics і thick silane based deposition);</li> <li>– процеси розчинення підкладки (dissolved wafer process);</li> <li>– процеси «кремній на ізоляторі» SOI (silicon-on-insulator).</li> </ul> <p>Вперше створили процес iMEMS (integrated MEMS) для методу корпусування елементів, інтегрувавши всі елементи та електроніку на одному кристалі (однокристальний метод).</p> <p>Вперше розробили побудову одно- і двовісних кремнієвих ємнісних акселерометрів, детектуючих прискорення в плані IC.</p>
Motorola Inc.	<p>Вперше розробили і впровадили двокристальний метод: поверхнева мікромеханіка використовується для формування сенсорної структури з провідними виводами, які підключаються до кристалу обробки сигналу.</p> <p>Розробили ємнісну структуру для детектування в напрямку осі Z IC</p>



## Продовження таблиці А.1

1	2
Silicon Designs	Розробили асиметричну ємнісну Z-структуру в поверхневому виконанні із застосуванням нікелю.
Kionix, Inc.	<p>Розробили разом з Корнельським університетом плазмові мікромеханічні процеси глибокого травлення.</p> <p>Сенсорний елемент виробляється з однокристалного кремнію за допомогою технології глибокого іонного травлення Deep Reactive Ion Etch (DRIE).</p> <p>Об'єднали DRIE зі стандартними методами виробництва ІС (ASIC).</p> <p>Сенсорний елемент захищається на рівні підкладки герметичною підкладкою-ковпачком.</p> <p>Технології корпусування open-cavity package - розміщення сенсорної підкладки в порожнистому пластмасовому корпусі типу DFN.</p> <p>Стандартні технології розміщення в корпусі SOIC.</p>

**ДОДАТОК Б****Вихідні дані матриці параметрів мікроелектромеханічних акселерометрів**

Таблиця Б.1 – Вхідні данні параметрів МЕМС акселерометрів: призначення, матеріал ЧЕ, його конструкція та тип навантаження, кількість осей, робочі характеристики та параметри контролю

Модель	$A_k$	$W_a$	$P_s$	$T_c$	$S_{el}$	$ST$	$S_g$	$S_{xi}$	$S_{xi}^*$	$r_m$	$R_{ymin}$	$R_{ymax}$	$fr$	$nL$	$St$	$Dr$	$L_{sh}$	$Tr$	$T_{kf}$	$S_s$	$S_m$
350B21	Ak1	3	0	1	1	1	2	2	0	12	12	19	3	1	4	0	34	13	0	3	0
350C31	Ak2	3	0	1	1	1	2	2	0	12	12	21	3	1	4	0	32	16	0	3	0
350C02	Ak3	3	0	1	1	1	2	4	0	12	15	26	3	4	4	0	33	23	0	0	0
350B23	Ak4	3	0	1	1	1	2	3	0	11	6	26	3	3	4	0	29	23	0	1	0
350B24	Ak5	3	0	1	1	1	2	4	0	10	8	19	3	3	4	0	29	23	0	2	0
350B03	Ak6	3	0	1	1	1	2	3	0	11	8	19	3	3	4	0	29	23	0	2	0
350B04	Ak7	3	0	1	1	1	2	4	0	10	8	19	3	3	4	0	29	23	0	2	0
350B 77	Ak8	3	0	1	2	1	2	6	0	10	12	19	3	2	3	0	24	16	0	2	0
350A13	Ak9	3	0	1	2	1	2	3	0	11	8	16	3	2	3	0	28	16	0	0	0
350A14	Ak10	3	0	1	2	1	2	4	0	10	8	16	2	2	3	0	28	16	0	0	0
3500B50	Ak11	3	0	3	1	1	2	3	0	11	14	19	3	3	3	0	28	16	0	0	0
3501A1220	Ak12	3	0	1	1	2	0	1	0	12	1	19	0	2	2	0	28	16	1	3	0
3501A1260	Ak13	3	0	1	1	2	0	1	0	12	1	25	0	2	2	0	31	16	1	3	0
3503A1020	Ak14	3	0	3	1	2	0	1	0	12	1	19	0	2	2	0	28	16	1	3	0
333B	Ak15	5	0	1	1	1	2	8	0	4	15	5	1	2	3	0	18	23	0	0	0
333B31	Ak16	5	0	1	1	1	2	8	0	4	15	5	1	2	3	0	20	23	0	2	0
333B30	Ak17	5	0	1	1	1	2	8	0	4	9	10	1	2	3	0	20	23	0	2	0
333B32	Ak18	5	0	1	1	1	2	8	0	4	9	10	1	2	3	0	20	23	0	2	0
333B40	Ak19	5	0	1	1	1	2	9	0	2	9	10	1	2	3	0	20	23	0	2	0
333B42	Ak20	5	0	1	1	1	2	9	0	2	9	10	1	2	3	0	20	23	0	2	0
333B50	Ak21	5	0	1	1	1	2	10	0	1	9	10	1	2	3	0	19	23	0	2	0
333B52	Ak22	5	0	1	1	1	2	10	0	1	9	10	1	2	3	0	19	23	0	2	0
393B04	Ak23	6	0	1	1	1	1	10	0	1	3	3	1	2	3	0	5	24	0	2	0
393B05	Ak24	6	0	1	1	1	1	12	0	1	10	3	1	2	3	0	5	24	0	2	0
393A03	Ak25	6	0	1	1	1	2	10	0	1	9	7	1	2	4	0	20	26	0	2	0
393B12	Ak26	6	0	1	1	1	2	12	0	1	5	6	1	2	4	0	20	24	0	2	0

Продовження таблиці Б.1

Модель	$A_k$	$W_a$	$P_s$	$T_c$	$S_{el}$	$ST$	$S_g$	$S_{xi}$	$S_{xi}^*$	$r_m$	$R_{ymin}$	$R_{ymax}$	$fr$	$nL$	$St$	$Dr$	$L_{sh}$	$Tr$	$T_{kf}$	$S_s$	$S_m$
393B31	Ak27	6	0	1	1	1	1	12	0	1	4	1	1	2	3	0	1	23	0	2	0
393B32	Ak28	6	0	1	1	1	1	11	0	1	6	1	1	2	3	0	3	23	0	2	0
626A04	Ak29	6	0	1	1	1	1	12	0	1	4	1	3	2	3	0	1	23	0	2	0
3711B112	Ak30	2	0	1	3	3	0	10	0	1	1	2	1	2	2	0	16	16	3	1	3
3711B1110	Ak31	2	0	1	3	3	0	8	0	2	1	6	2	2	2	0	16	16	3	1	3
3711B1130	Ak32	2	0	1	3	3	0	6	0	3	1	6	2	2	2	0	16	16	3	2	3
3711B1150	Ak33	2	0	1	3	3	0	6	0	4	1	6	2	2	2	0	16	16	3	1	3
3711B11200	Ak34	2	0	1	3	3	0	4	0	6	1	5	2	2	2	0	16	16	3	2	3
3711B122	Ak35	2	0	1	3	3	0	10	0	1	1	2	1	2	2	0	16	16	3	1	3
3711B1210	Ak36	2	0	1	3	3	0	8	0	2	1	6	2	2	2	0	16	16	3	1	3
3711B1230	Ak37	2	0	1	3	3	0	6	0	3	1	6	2	2	2	0	16	16	3	2	3
3711B1250	Ak38	2	0	1	3	3	0	6	0	4	1	6	2	2	2	0	16	16	3	1	3
3711B12200	Ak39	2	0	1	3	3	0	4	0	6	1	5	2	2	2	0	16	16	3	2	3
3713B112	Ak40	2	0	3	3	3	0	10	0	1	1	2	1	2	2	0	16	16	3	1	3
3713B1110	Ak41	2	0	3	3	3	0	8	0	2	1	6	2	2	2	0	16	16	3	1	3
3713B1130	Ak42	2	0	3	3	3	0	6	0	3	1	6	2	2	2	0	16	16	3	2	3
3713B1150	Ak43	2	0	3	3	3	0	6	0	4	1	6	2	2	2	0	16	16	3	1	3
3713B11200	Ak44	2	0	3	3	3	0	4	0	6	1	5	2	2	2	0	16	16	3	2	3
3713B122	Ak45	2	0	3	3	3	0	10	0	1	1	2	1	2	2	0	16	16	3	1	3
3713B1210	Ak46	2	0	3	3	3	0	8	0	2	1	6	2	2	2	0	16	16	3	1	3
3713B1230	Ak47	2	0	3	3	3	0	6	0	3	1	6	2	2	2	0	16	16	3	2	3
3713B1250	Ak48	2	0	3	3	3	0	6	0	4	1	6	2	2	2	0	16	16	3	1	3
3713B12200	Ak49	2	0	3	3	3	0	4	0	6	1	5	2	2	2	0	16	16	3	2	3
357F07	Ak50	4	0	1	1	1	2	0	1	9	0	22	0	2	3	0	25	3	0	0	0
357A08	Ak51	4	0	1	1	1	2	0	1	8	0	20	0	2	3	0	25	2	0	0	0
357A09	Ak52	4	0	1	1	1	2	0	1	9	0	19	0	2	3	0	25	2	0	0	0
357A19	Ak53	4	0	1	1	1	2	0	1	8	0	20	0	2	3	0	25	2	0	0	0
357B06	Ak54	4	0	1	1	1	2	0	2	7	0	26	0	2	3	0	25	19	0	0	0

Продовження таблиці Б.1

Модель	<i>Ak</i>	<i>Wa</i>	<i>Ps</i>	<i>Tc</i>	<i>Sel</i>	<i>ST</i>	<i>Sg</i>	<i>Sxi</i>	<i>Sxi*</i>	<i>rm</i>	<i>Rymin</i>	<i>Rymax</i>	<i>fr</i>	<i>nL</i>	<i>St</i>	<i>Dr</i>	<i>Lsh</i>	<i>Tr</i>	<i>Tkf</i>	<i>Ss</i>	<i>Sm</i>
357B11	Ak55	4	0	1	1	1	2	0	1	10	0	20	0	2	3	0	25	3	0	0	0
357B12	Ak56	4	0	1	1	1	2	0	1	10	0	20	0	2	3	0	25	3	0	0	0
357B14	Ak57	4	0	1	1	1	2	0	1	10	0	20	0	2	3	0	25	3	0	0	0
357B45	Ak58	4	0	1	1	1	2	0	1	10	0	17	0	2	3	0	25	2	0	0	0
357C10	Ak59	4	0	1	1	1	2	0	1	7	0	19	0	2	3	0	25	2	0	0	0
357B01	Ak60	4	0	1	1	1	2	0	4	9	0	18	0	2	3	0	26	4	0	0	0
357B02	Ak61	4	0	1	1	1	2	0	4	9	0	18	0	2	3	0	26	4	0	0	0
357B03	Ak62	4	0	1	1	1	2	0	3	9	0	18	0	2	3	0	27	4	0	0	0
357B04	Ak63	4	0	1	1	1	2	0	3	9	0	18	0	2	3	0	27	4	0	0	0
357A05	Ak64	4	0	1	1	1	2	0	4	7	0	19	0	2	3	0	21	8	0	0	0
357B40	Ak65	4	0	1	1	1	2	0	2	8	0	19	0	2	3	0	21	22	0	0	0
357B21	Ak66	4	0	1	1	1	2	0	6	9	0	13	0	2	3	0	22	3	0	0	0
357B22	Ak67	4	0	1	1	1	2	0	6	9	0	13	0	2	3	0	22	3	0	0	0
357B33	Ak68	4	0	1	1	1	2	0	6	6	0	10	0	2	3	0	13	3	0	0	0
357B53	Ak69	4	0	1	1	1	2	0	6	6	0	10	0	2	3	0	13	4	0	0	0
357B54	Ak70	4	0	1	1	1	2	0	6	6	0	10	0	2	3	0	13	4	0	0	0
357B61	Ak71	4	0	1	1	1	1	0	3	8	0	12	0	2	2	0	21	20	0	0	0
357B69	Ak72	4	0	1	1	1	1	0	1	7	0	13	0	2	3	0	17	20	0	0	0
340A50	Ak73	4	0	3	1	1	2	0	1	8	0	17	0	3	3	0	21	7	0	0	0
356A70	Ak74	4	0	3	1	1	2	0	1	7	0	12	0	2	3	0	21	6	0	0	0
356A71	Ak75	4	0	3	1	1	2	0	3	7	0	12	0	2	3	0	21	6	0	0	0
357B81	Ak76	0	2	1	1	1	2	0	4	6	0	18	0	2	3	0	19	19	0	0	0
357B82	Ak77	0	2	1	1	1	2	0	6	8	0	13	0	2	3	0	14	19	0	0	0
357B83	Ak78	0	2	1	1	1	2	0	6	7	0	13	0	2	3	0	11	19	0	0	0
357C71	Ak79	0	2	1	1	1	2	0	3	8	0	11	0	2	3	0	14	20	0	0	0
357C72	Ak80	0	2	1	1	1	2	0	6	7	0	8	0	2	3	0	14	20	0	0	0
357C73	Ak81	0	2	1	1	1	2	0	6	6	0	7	0	2	3	0	11	20	0	0	0
357D90	Ak82	0	2	1	1	1	2	0	1	8	0	8	0	2	4	0	14	21	0	0	0

Продовження таблиці Б.1

Модель	<i>Ak</i>	<i>Wa</i>	<i>Ps</i>	<i>Tc</i>	<i>Sel</i>	<i>ST</i>	<i>Sg</i>	<i>Sxi</i>	<i>Sxi*</i>	<i>rm</i>	<i>Rymin</i>	<i>Rymax</i>	<i>fr</i>	<i>nL</i>	<i>St</i>	<i>Dr</i>	<i>Lsh</i>	<i>Tr</i>	<i>Tkf</i>	<i>Ss</i>	<i>Sm</i>
351B03	Ak83	0	1	1	2	1	2	4	0	5	12	13	2	2	3	0	21	1	0	2	0
351B04	Ak84	0	1	1	2	1	2	4	0	5	12	13	2	2	3	0	21	1	0	2	0
351B11	Ak85	0	1	1	2	1	2	3	0	6	12	19	2	2	3	0	21	1	0	2	0
351B41	Ak86	0	1	1	2	1	2	4	0	3	12	7	1	2	3	0	11	1	0	2	0
351B42	Ak87	0	1	1	2	1	2	4	0	3	12	7	1	2	3	0	11	1	0	2	0
600B13	Ak88	0	3	1	1	1	1	4	0	5	18	10	0	2	3	0	11	20	0	2	0
3641A122	Ak90	0	2	1	1	2	0	2	0	7	1	12	0	2	1	1	25	23	0	0	0

Таблиця Б.2 – Вхідні данні параметрів МЕМС акселерометрів: фізичні характеристики та маса

Модель	$A_k$	$outh$	$int$	$cint$	$h_m$	$El$	$Si$	$Ct$	$M_{th}$	$Kl$	$h0$	$m$	$a$	$b$	$c$
350B21	Ak1	0	1	2,1	1	1	2	5	2	1	1	3	9,5	18,3	0
350C31	Ak2	0	1	2,1	7	2	2	4	2	1	1	5	14	27	0
350C02	Ak3	0	1	2,1	1	1	2	5	2	1	1	3	9,5	19,1	0
350B23	Ak4	0	1	2,1	1	1	2	5	2	1	1	3	9,5	19,1	0
350B24	Ak5	0	1	2,1	1	1	2	5	2	1	1	3	9,5	19,1	0
350B03	Ak6	0	1	2,1	7	2	2	4	2	1	1	3	9,5	25,8	0
350B04	Ak7	0	1	2,1	1	2	2	4	2	1	1	3	9,5	25,8	0
350B 77	Ak8	0	1	2,1	1	1	2	5	2	1	1	2	15	9,32	0
350A13	Ak9	0	1	2,1	7	2	2	4	2	1	1	5	12,7	36,8	0
350A14	Ak10	0	1	2,1	7	2	2	4	2	1	1	5	12,7	36,8	0
3500B50	Ak11	0	1	1,3	1	3	2	5	2	1	1	4	8,2	18,3	18,3
3501A1220	Ak12	0	1	2,2	1	3	1	5	2	1	1	3	3,8	12,7	0
3501A1260	Ak13	0	1	2,2	1	3	1	5	2	1	1	3	3,8	12,7	0
3503A1020	Ak14	0	1	1,4	1	3	1	5	2	1	1	3	6,35	11,8	11,8
333B	Ak15	0	1	2,1	5	1	2	6	0	1	1	4	12,2	24,4	0
333B31	Ak16	0	1	2,1	1	2	2	4	1	1	1	3	14,5	11,2	0
333B30	Ak17	0	1	1,3	1	3	2	4	2	1	1	3	10,2	16	10,2
333B32	Ak18	0	1	1,3	1	3	2	4	1	1	1	3	10,2	16	10,2
333B40	Ak19	0	1	1,3	1	3	2	4	2	1	1	4	17,3	11,4	17,3
333B42	Ak20	0	1	1,3	1	3	2	4	1	1	1	4	17,3	11,4	17,3
333B50	Ak21	0	1	1,3	1	3	2	4	2	1	1	4	17,3	11,4	17,3
333B52	Ak22	0	1	1,3	1	3	2	4	1	1	1	4	17,3	11,4	17,3
393B04	Ak23	0	1	2,1	1	2	0	4	2	1	1	6	25	31	0
393B05	Ak24	0	1	2,1	1	2	0	4	2	1	1	6	25	31	0
393A03	Ak25	0	1	2,2	7	2	0	1	2	1	1	7	30,2	55,6	0
393B12	Ak26	0	1	2,2	7	2	0	1	2	1	1	7	30,2	55,6	0
393B31	Ak27	0	1	2,1	7	2	0	1	2	1	1	7	57,2	71,1	0
393B32	Ak28	0	1	2,1	7	2	0	1	2	1	1	7	57,2	71,1	0

Продовження таблиці Б.2

Модель	<i>Ak</i>	<i>outh</i>	<i>int</i>	<i>cint</i>	<i>h<sub>m</sub></i>	<i>El</i>	<i>Si</i>	<i>Ct</i>	<i>M<sub>ih</sub></i>	<i>Kl</i>	<i>h0</i>	<i>m</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
626A04	Ak29	0	1	2,1	7	2	0	1	2	1	1	7	57,2	53,3	0
3711B112	Ak30	0	1	1,3	1	3	2	1	2	1	1	4	11,4	21,6	21,6
3711B1110	Ak31	0	1	1,3	1	3	2	1	2	1	1	4	11,4	21,6	21,6
3711B1130	Ak32	0	1	1,3	1	3	2	1	2	1	1	4	11,4	21,6	21,6
3711B1150	Ak33	0	1	1,3	1	3	2	1	2	1	1	4	11,4	21,6	21,6
3711B11200	Ak34	0	1	1,3	1	3	2	1	2	1	1	4	11,4	21,6	21,6
3711B122	Ak35	0	1	1,3	1	1	2	5	2	1	1	6	11,4	21,6	21,6
3711B1210	Ak36	0	1	1,3	1	1	2	5	2	1	1	6	11,4	21,6	21,6
3711B1230	Ak37	0	1	1,3	1	1	2	5	2	1	1	6	11,4	21,6	21,6
3711B1250	Ak38	0	1	1,3	1	1	2	5	2	1	1	6	11,4	21,6	21,6
3711B12200	Ak39	0	1	1,3	1	1	2	5	2	1	1	6	11,4	21,6	21,6
3713B112	Ak40	0	1	1,1	1	3	2	3	2	1	1	5	20,3	20,3	20,3
3713B1110	Ak41	0	1	1,1	1	3	2	3	2	1	1	5	20,3	20,3	20,3
3713B1130	Ak42	0	1	1,1	1	3	2	3	2	1	1	5	20,3	20,3	20,3
3713B1150	Ak43	0	1	1,1	1	3	2	3	2	1	1	5	20,3	20,3	20,3
3713B11200	Ak44	0	1	1,1	1	3	2	3	2	1	1	5	20,3	20,3	20,3
3713B122	Ak45	0	1	1,1	1	1	2	5	2	1	1	7	20,3	20,3	20,3
3713B1210	Ak46	0	1	1,1	1	1	2	5	2	1	1	7	20,3	20,3	20,3
3713B1230	Ak47	0	1	1,1	1	1	2	5	2	1	1	7	20,3	20,3	20,3
3713B1250	Ak48	0	1	1,1	1	1	2	5	2	1	1	7	20,3	20,3	20,3
3713B12200	Ak49	0	1	1,1	1	1	2	5	2	1	1	7	20,3	20,3	20,3
357F07	Ak50	0	1	1,4	1	3	2	4	1	1	1	1	4,9	10,7	6,4
357A08	Ak51	0	1	1,4	2	3	2	4	1	1	1	1	2,8	4,1	6,9
357A09	Ak52	0	1	1,4	1	3	2	4	1	1	1	1	3,6	11,4	6,4
357A19	Ak53	0	1	1,4	1	3	2	4	1	1	1	1	2,8	4,1	6,9
357B06	Ak54	0	1	1,4	1	3	2	4	2	1	1	3	5,8	16,4	9,6
357B11	Ak55	0	2	2,2	1	3	2	4	2	1	1	2	7,1	8,4	0
357B12	Ak56	0	2	2,1	1	2	2	4	2	1	1	2	7,1	14,7	0



Продовження таблиці Б.2

Модель	<i>Ak</i>	<i>outh</i>	<i>int</i>	<i>cint</i>	<i>hm</i>	<i>El</i>	<i>Si</i>	<i>Ct</i>	<i>Mth</i>	<i>Kl</i>	<i>h0</i>	<i>m</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
357B14	Ak57	0	2	2,1	1	2	2	4	2	1	1	2	7,1	16,3	0
357B45	Ak58	0	2	2,2	1	2	2	4	1	1	1	3	9,7	9,7	0
357C10	Ak59	0	1	1,4	2	3	2	4	1	1	1	1	3,6	11,4	6,4
357B01	Ak60	0	2	2,1	1	3	2	4	2	1	1	5	12,7	20,6	0
357B02	Ak61	0	2	2,1	1	2	2	4	2	1	1	5	12,7	30,2	0
357B03	Ak62	0	2	2,1	1	3	2	4	2	1	1	5	12,7	20,6	0
357B04	Ak63	0	2	2,1	1	2	2	4	2	1	1	5	12,7	30,2	0
357A05	Ak64	0	1	1,4	1	3	2	4	2	1	1	4	10,2	24,1	16
357B40	Ak65	0	1	1,3	1	3	2	4	2	1	1	3	10,2	16	10,2
357B21	Ak66	0	2	2,1	1	3	2	4	2	1	1	6	15,8	21,6	0
357B22	Ak67	0	2	2,1	1	2	2	4	2	1	1	6	15,8	29,3	0
357B33	Ak68	0	2	2,1	1	3	2	4	2	1	1	6	19	25,5	0
357B53	Ak69	0	2	2,1	1	3	2	4	2	1	1	6	19	28,7	0
357B54	Ak70	0	2	2,1	1	2	2	4	2	1	1	6	19	36,3	0
357B61	Ak71	0	2	2,1	6	3	2	4	2	1	1	6	15,9	25,4	0
357B69	Ak72	0	2	2,2	6	3	2	4	2	1	1	5	22,2	11,4	0
340A50	Ak73	0	1	1,2	1	3	2	4	2	1	1	5	21,6	12,7	10,2
356A70	Ak74	0	1	1,2	1	3	2	4	2	1	1	4	18,5	22,9	10,2
356A71	Ak75	0	1	1,2	1	3	2	4	2	1	1	6	24,4	25,4	12,7
357B81	Ak76	0	2	2,1	7	3	2	1	2	1	1	6	25,4	19	0
357B82	Ak77	0	2	2,1	7	3	2	1	2	1	1	6	25,4	19	0
357B83	Ak78	0	2	2,1	7	3	2	1	2	1	1	6	25,4	19	0
357C71	Ak79	0	2	2,1	7	3	2	1	2	1	1	6	25,4	19	0
357C72	Ak80	0	2	2,1	7	3	2	1	2	1	1	7	31,8	19	0
357C73	Ak81	0	2	2,1	7	3	2	1	2	1	1	7	37,6	19	0
357D90	Ak82	0	1	13	6	1	2	5	2	1	1	6	16,7	32	16,7
351B03	Ak83	0	2	2,1	1	3	2	4	2	1	1	5	20,6	12,7	0
351B04	Ak84	0	2	2,1	1	2	2	4	2	1	1	5	18,8	9,32	0

Продовження таблиці Б.2

Модель	<i>Ak</i>	<i>outh</i>	<i>int</i>	<i>cint</i>	<i>hm</i>	<i>El</i>	<i>Si</i>	<i>Ct</i>	<i>Mth</i>	<i>Kl</i>	<i>h0</i>	<i>m</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
351B11	Ak85	0	2	2,1	1	3	2	4	2	1	1	2	10,9	5,16	0
351B41	Ak86	0	2	2,1	1	3	2	4	2	1	1	6	11,2	12,7	0
351B42	Ak87	0	2	2,1	1	2	2	4	2	1	1	6	29	12,7	0
600B13	Ak88	0	2	2,2	6	3	2	1	2	1	1	7	38,1	19,1	0
3641A122	Ak90	0	1	1,2	2	1	1	5	2	1	2	1	5,08	11,9	10,2

**ДОДАТОК В**

**Результати експериментальних досліджень удосконаленого методу  
вибору типових технологічних процесів**

Таблиця В.1 – Результати досліджень за методом «найближчого сусіда»

Метрика 1	Коефіцієнт $\zeta$ 2	Дендрограма 3	Графік силуетів кластерів 4
Евклідова	0,86793994991		
Манхеттенська	0,72530110737		

Продовження таблиці В.1

1	2	3	4
Мінковського	0,8679399499		
Косинусна	0,5721744932		

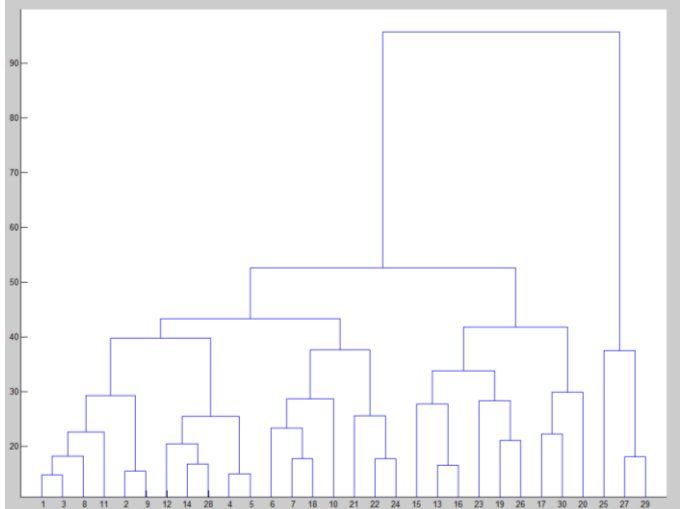
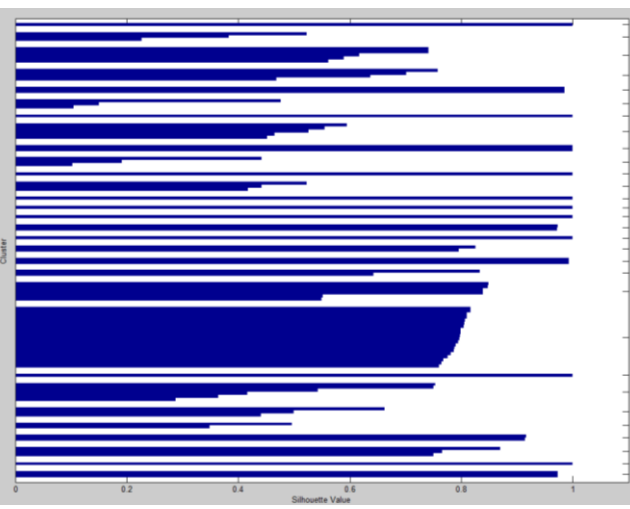
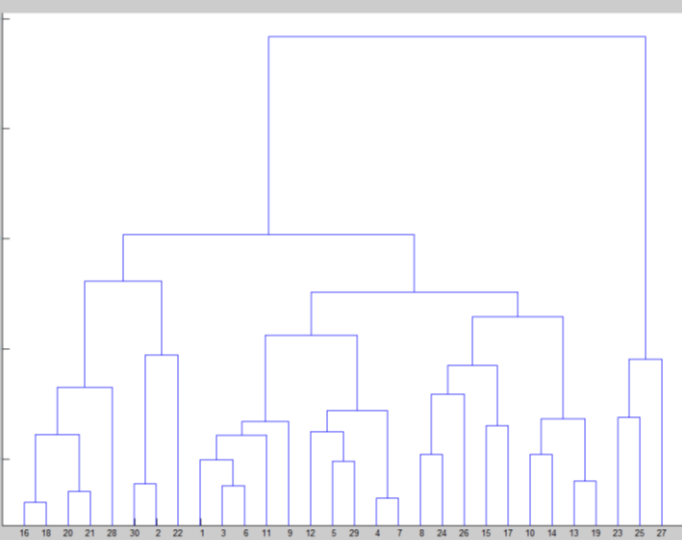
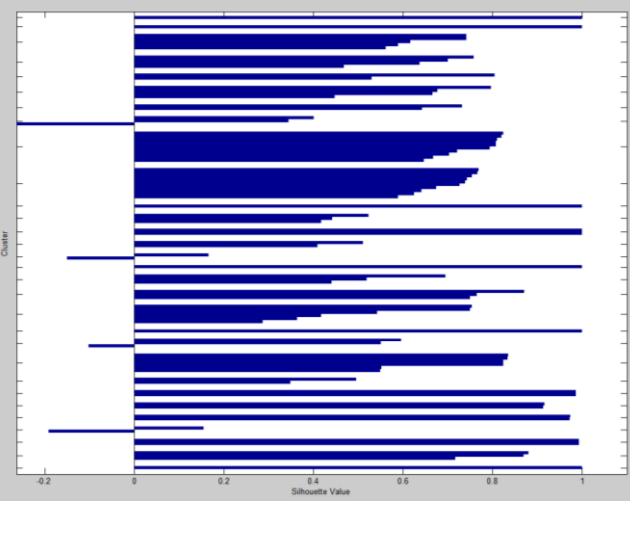
Продовження таблиці В.1

1	2	3	4
Кореляційна	0,5628382722		
Хеммінга	0,9104842409		

Продовження таблиці В.1

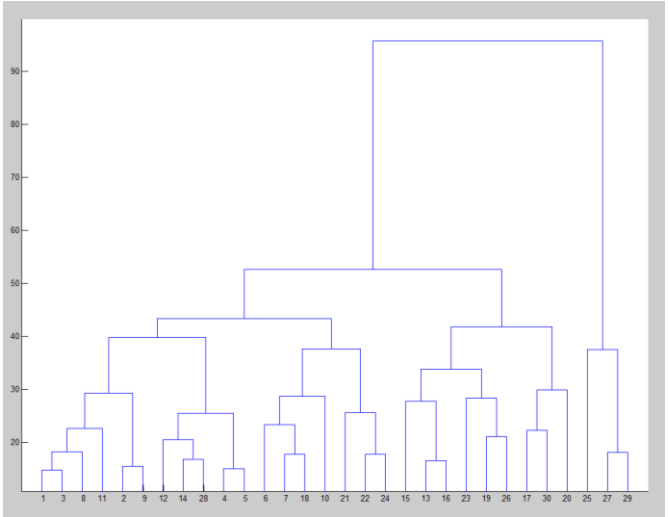
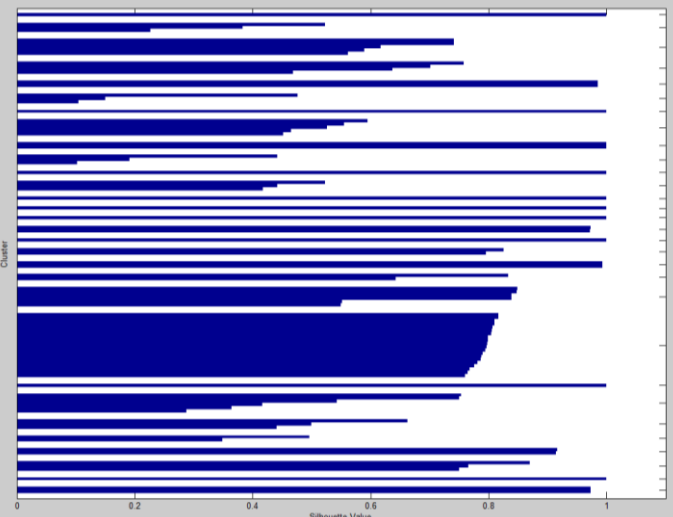
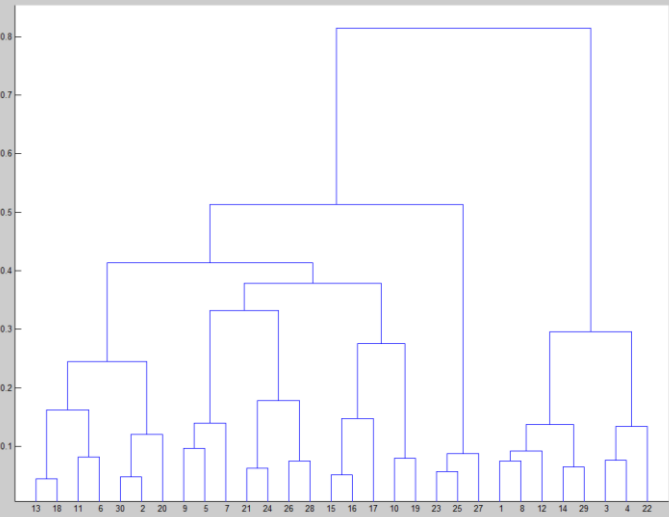
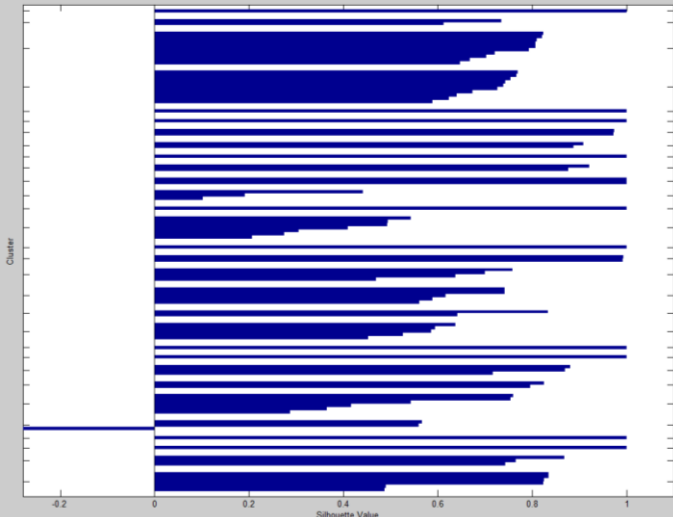
1	2	3	4
Жаккара	0,901246270085		

Таблиця В.2 – Результати досліджень за методом «дальнього сусіда»

Метрика 1	Коефіцієнт $\zeta$ 2	Дендрограма 3	Графік силуетів кластерів 4
Евклідова	0,860121136751		
Манхеттенська	0,805837892790270		



Продовження таблиці В.2

1	2	3	4
Мінковського	0,86012113675047		
Косинусна	0,54950248609439		

Продовження таблиці В.2

1	2	3	4
Кореляційна	0,55237899637636		
Хеммінга	0,91268299152788		

Продовження таблиці В.2

1	2	3	4
Жаккара	0,917011580214080		

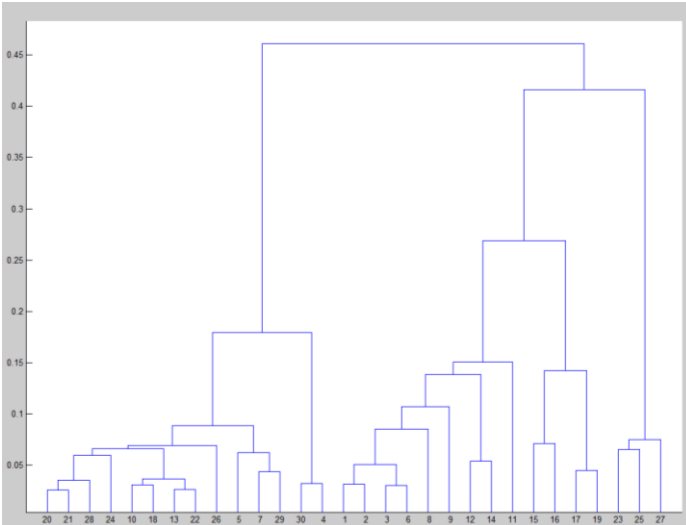

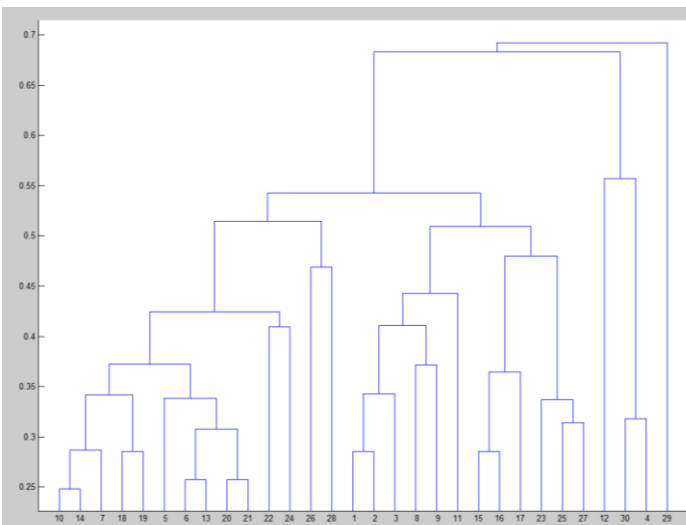
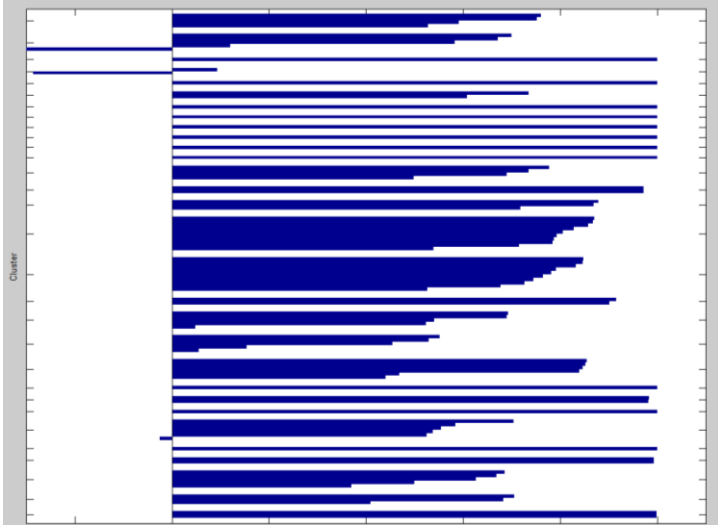
Таблиця В.3 – Результати досліджень за методом «середнього зв'язку»

Метрика 1	Коефіцієнт $\zeta$ 2	Дендрограма 3	Графік силуетів кластерів 5
Евклідова	0,764594673792905		
Манхеттенська	0,844384366432429		

Продовження таблиці В.3

1	2	3	4
Мінковського	0,764594673792905		
Косинусна	0,832117424964713		

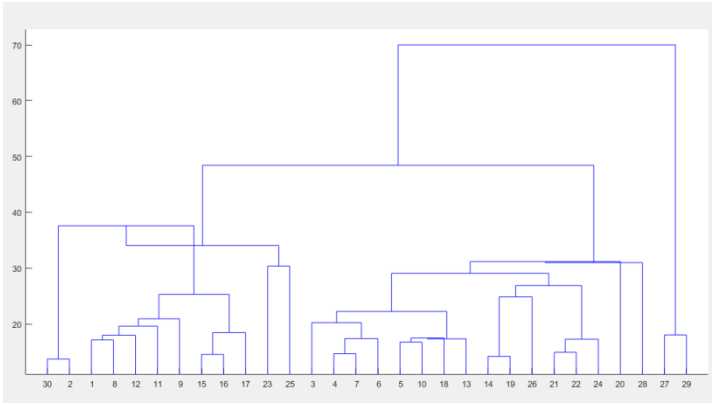
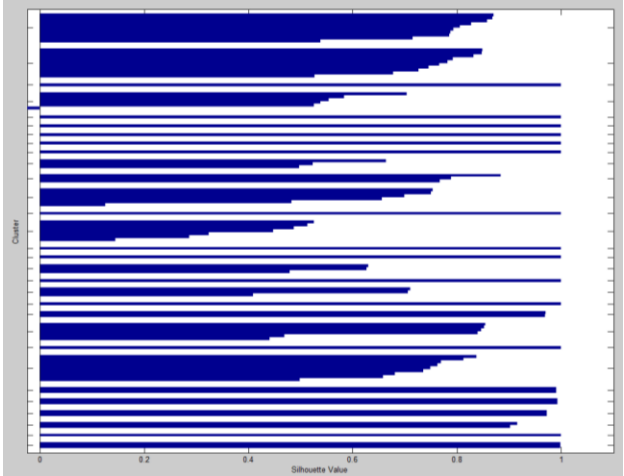
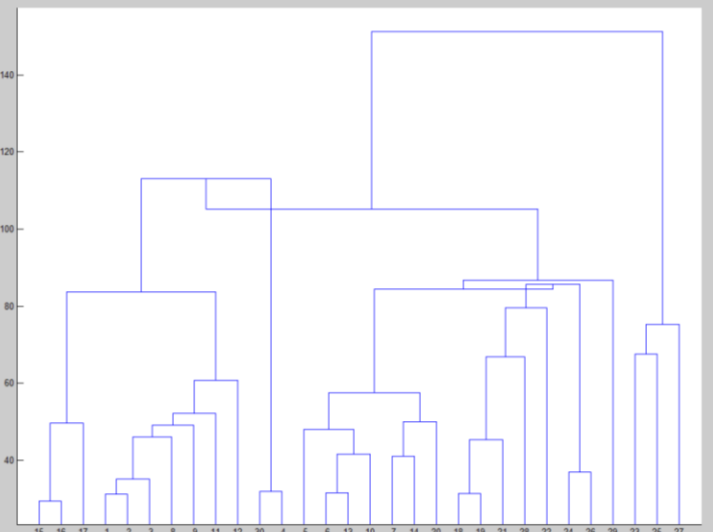
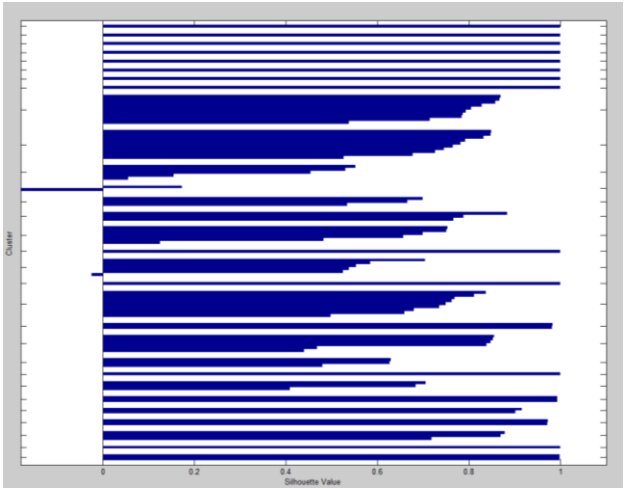
Продовження таблиці В.3

1	2	3	4
Кореляційна	0,853207588217999		
Хеммінга	0,941557871745486		

Продовження таблиці В.3

1	2	3	4
Жаккара	0,936489985076		

Таблиця В.4 – Результати досліджень за центроїдним методом

Метрика 1	Коефіцієнт $\zeta$ 2	Дендрограма 3	Графік силуетів кластерів 5
Евклідова	0,807801438110267		
Манхеттенська	0,819631892482718		



Продовження таблиці В.4

1	2	3	4
Мінковського	0,807801438110267		
Косинусна	0,836405388802882		

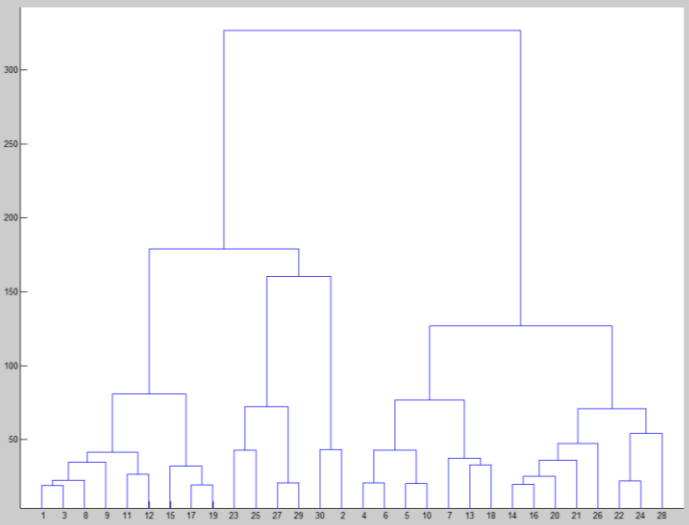
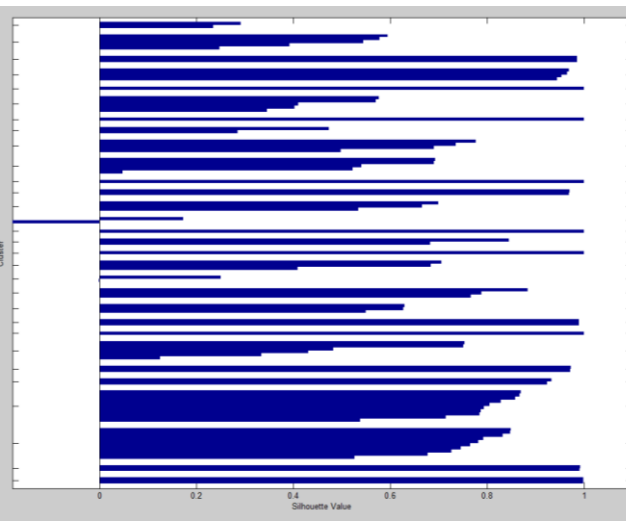
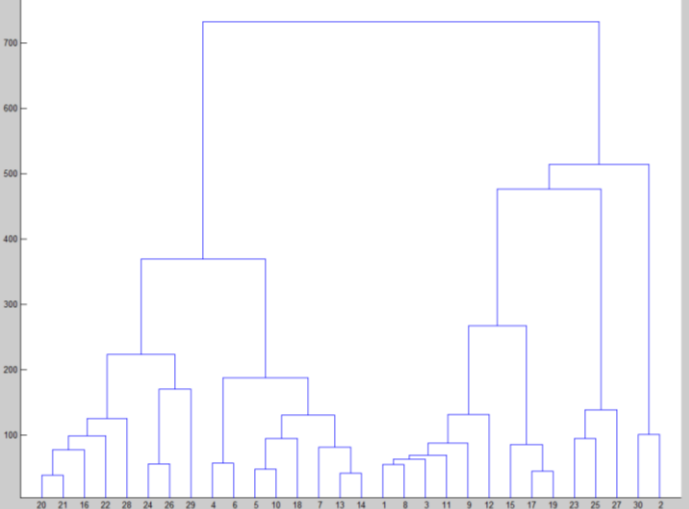
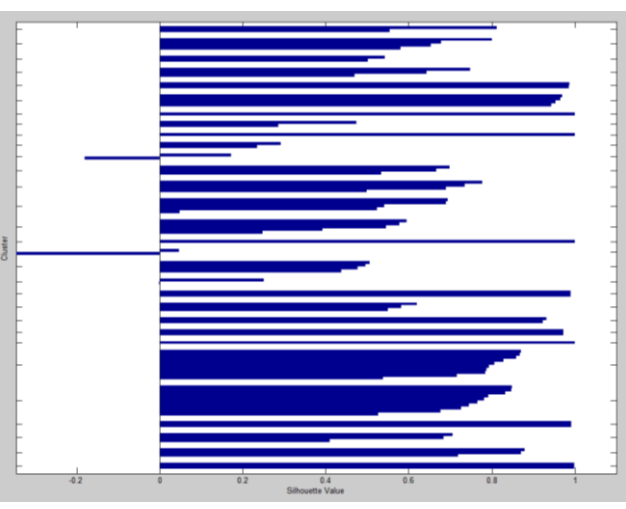
Продовження таблиці В.4

1	2	3	4
Кореляційна	0,851956540054704		
Хеммінга	0,905668994412493		

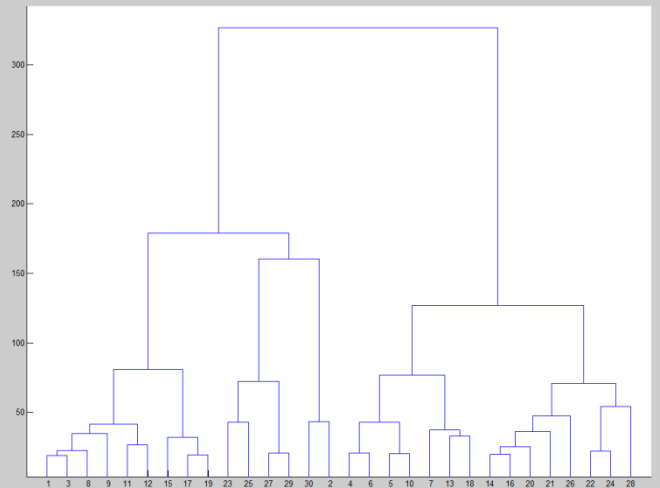
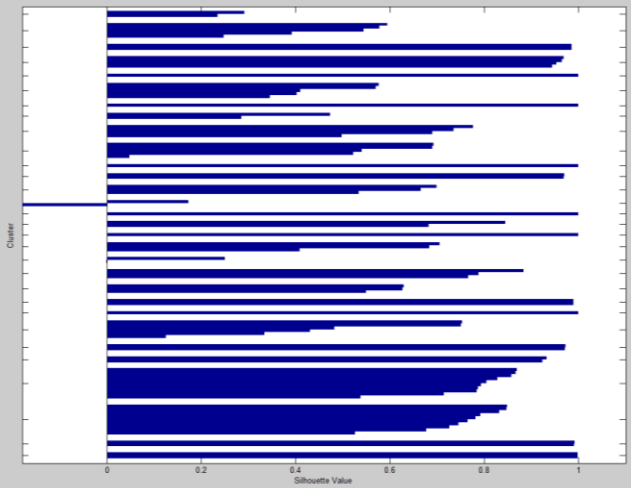
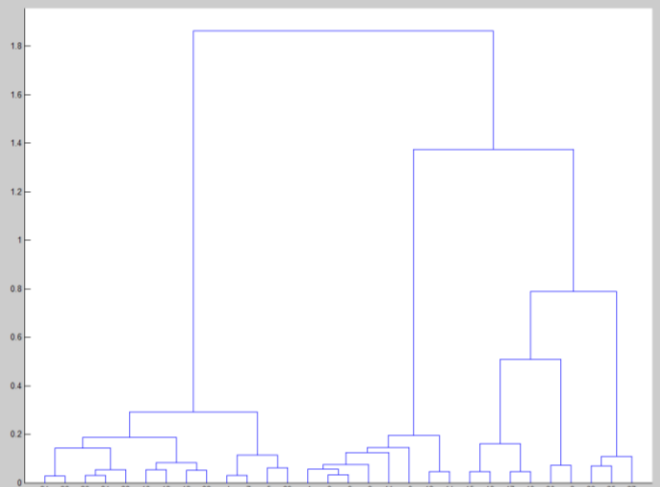
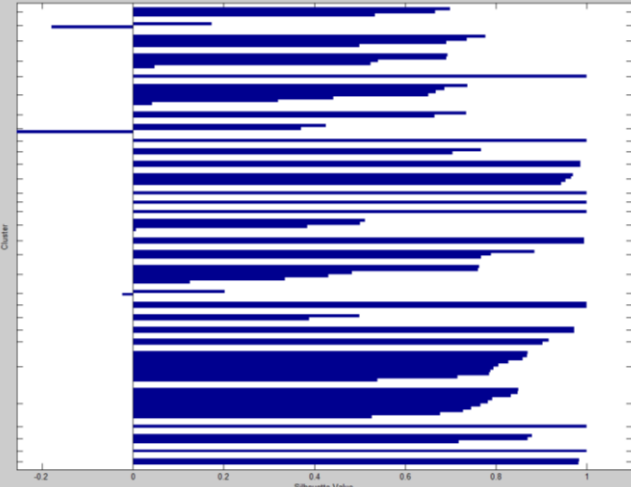
Продовження таблиці В.4

1	2	3	4
Жаккара	0,89921443819578		

Таблиця В.5 – Результати досліджень за методом Варда

Метрика 1	Коефіцієнт $\zeta$ 2	Дендрограма 3	Графік силуетів кластерів 5
Евклідова	0,715368966018373		
Манхеттенська	0,754510174963648		

Продовження таблиці В.5

1	2	3	4
Мінковського	0,715368966018373		
Косинусна	0,664761175081816		

Продовження таблиці В.5

1	2	3	4
Кореляційна	0,787685492651726		
Хеммінга	0,853719312729815		

Продовження таблиці В.5

1	2	3	4
Жаккара	0,808684213602700		

Таблиця В.6 – Розподіл на кластери методом «найближчого сусіда»

Метрика	Евклідова	Манхеттенська	Мінковського	Косинусна	Кореляційна	Хеммінга	Жаккара
1	2	3	4	5	6	7	8
Кластер	Номер акселерометра						
1	85	50,51, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 59	85	68, 69,70	68,69, 70	58	73
2	83, 84	60, 61, 62, 63, 66, 67, 68, 69, 70	83,84	50, 51, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 66, 67	50, 51, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 66, 67	55, 56, 57, 66, 67, 68, 69, 70	74,75
3	17,18	73	17, 18	72	72	60,61, 62, 63	64
4	19,20,21,22	74, 75,	19,20,21,22	76, 77, 78, 79, 80, 81	76, 77, 78, 79, 80, 81	16	65
5	73	17,18	73	9,10	9, 10	17, 18, 19, 20, 21, 22	58
6	74, 75	19, 20, 21, 22	74,75	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,	1, 2, 3,4,5,6, 7	73	55,56,57
7	14	85	14	12, 13	12, 13	74, 75,59	66,67, 68, 69, 70
8	54, 65	83, 84	54,65	8	8	64	60,61, 62, 63
9	12, 13	1	12,13	17, 18	14	65	1
10	1	3, 4, 5, 6,7	1	19, 20, 21, 22	54, 65	1	3,4, 5, 6, 7
11	2,3, 4, 5, 6,7	15	2,3,4,5,6,7	14	17, 18	3,4,5, 6, 7	54
12	90,91	16	90,91	54, 65	19, 20, 21, 22	54	2
13	50, 51, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 66, 67, 68, 69, 70	2	50,51,52,53,55 ,56,57,58,59,6 0, 61, 62, 63, 66, 67, 68, 69, 70	73	90,91	2	15
14	9,10	86, 87	9,10	74,75	73	27, 28, 29	16,17, 18, 19, 20,21, 22
15	64	64	64	90, 91	74, 75	25,26	27,28, 29
16	16	71	16	71	27, 28,29	23,24	25,26
17	71	72	71	64	23,24	50,51, 52, 53	23,24



Продовження таблиці В.6

1	2	3	4	5	6	7	8
18	72, 76, 77, 78, 79, 80, 81	76, 77, 78, 79, 80, 81	72, 76, 77,78, 79, 80, 81	25, 26	71	76,77, 78, 79, 80, 81	50,51, 52, 53, 59
19	15	54, 65	15	23, 24	25,26	72	76,77, 78, 79, 80, 81
20	86	9, 10	86	86	64	71	9, 10
21	87	8	87	83, 84	86	15	8
22	8	88,89	8	85	83,84	8	72
23	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48,49	12,13,14	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49	15	85	9,10	71
24	11	11	11	16	15	88,89	88,89
25	29	90,91	29	27,28,29	16	83,84, 85, 86, 87	83,84,85, 86,87
26	27,28	25,26	27,28	11	11	82	11
27	88, 89	27,28,29	88,89	88, 89	88,89	11	82
28	82	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49	82	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45,46, 47, 48, 49	87	12,13, 14	30,31, 32, 33, 34, 35, 36,37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46,47, 48,49
29	23, 24	82	23,24	87	30,31,32,33,34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42,43, 44, 45, 46, 47, 48, 49,	30,31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39,40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49	12,13, 14
30	25, 26	23,24	25,26	82	82	90,91	90,91

Таблиця В.7 – Розподіл на кластери методом «найближчого сусіда»

Метрика	Евклідова	Манхеттенська	Мінковського	Косинусна	Кореляційна	Хеммінга	Жаккара
1	2	3	4	5	6	7	8
Кластер	Номер акселерометра						
1	1	71	1	73	73	15	15
2	3, 4, 5	72	3, 4, 5	74, 75	74,75	16	16
3	50, 51, 52, 53, 59	50,51, 52, 53, 59	50, 51, 52, 53, 59	40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49	40, 41, 42, 43, 44, 45, 46,47, 48, 49	73	86, 87
4	55, 56, 57, 58	55, 56, 57, 58	55, 56, 57, 58	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37,38, 39	74, 75	83, 84, 85
5	9, 10	80, 81	9, 10	15	25, 26	86, 87	73
6	2, 6, 7	76, 77, 78, 79	2, 6, 7	16	23, 24	83, 84, 85	74, 75
7	71	6, 7	71	25, 26	15	71	71
8	72, 76, 77, 78, 79	3, 4, 5	72, 76, 77, 78,79	23, 24	16	72	72
9	90, 91	40, 41, 42, 43, 44,45, 46, 47, 48, 49	90, 91	86	90, 91	60, 61, 62, 63	60, 61, 62, 63
10	14, 54, 65	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39	14, 54, 65	83, 84	54, 65	66, 67, 68, 69, 70	66, 67, 68, 69, 70
11	64	64	64	90, 91	86	6, 7, 3, 4, 5	6, 7
12	73, 74, 75	73, 74, 75	73, 74, 75	14, 54, 65	83, 84	25, 26	3, 4, 5
13	86	90, 91	86	8	55, 56, 57, 58	27, 28, 29	25, 26
14	87	54, 65	87	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	50, 51, 52, 53,59	50, 51, 52, 53, 59	27, 28, 29
15	29	1, 2	29	87	27, 28, 29	54, 64, 65	50, 51, 52, 53, 59
16	27, 28	8	27, 28	88, 89	87	55, 56, 57, 58	54, 64, 65
17	8	83, 84, 85	8	55, 56, 57, 58	88, 89	8	8
18	12, 13	68, 69, 70	12, 13	50, 51, 52, 53, 59	80, 81	9	9, 10, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49

Продовження таблиці В.7

1	2	3	4	5	6	7	8
19	88, 89	60, 61, 62, 63, 66, 67	88, 89	80, 81	72, 76, 77, 78, 79	10	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37,
20	80, 81	11	80, 81	72, 76, 77, 78, 79	8	23, 24	38, 39
21	17, 18, 19, 20, 21, 22	12, 13, 14	17, 18, 19, 20, 21, 22	11	1, 2,3, 4, 5, 6, 7	40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49,	55, 56, 57, 58
22	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36,37, 38, 39,40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49	17, 18, 19, 20, 21, 22	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49	64	11	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39	17, 18, 19, 20, 21, 22
23	11	15, 16	11	27, 28, 29	64	1, 2	23, 24,
24	60, 61, 62, 63, 66, 67	9, 10	60, 61, 62, 63, 66, 67	12, 13	12, 13, 14	17, 18, 19, 20, 21, 22	1, 2
25	83, 84,85,	23, 24	83, 84, 85	60, 61, 62, 63, 66, 67	60, 61, 62, 63, 66, 67	88, 89,	88, 89
26	15, 16	25, 26	15, 16	9, 10, 71	9, 10, 71	76, 77, 78, 79, 80, 81	76, 77, 78, 79, 80, 81
27	23, 24	86, 87	23, 24	82	82	11	11
28	68, 69, 70	88, 89	68, 69, 70	85	85	82	82
29	82	27, 28, 29	82	68, 69, 70	68, 69, 70	12, 13, 14	12, 13, 14
30	25, 26	82	25, 26	17, 18, 19, 20, 21, 22	17, 18, 19, 20, 21, 22	90, 91	90, 91

Таблиця В.8 – Розподіл на кластери методом «середнього зв'язку»

Метрика	Евклідова	Манхеттенська	Мінковського	Косинусна	Кореляційна	Хеммінга	Жаккара
1	2	3	4	5	6	7	8
Кластер	Номер акселерометра						
1	15	54	66	7, 17	61	15, 16, 29, 27	12
2	16	65, 40, 41, 42	67	32, 75, 6	62, 58, 43, 33, 34, 35, 36	73, 80, 13, 8, 20	28, 64
3	54	15	32	61	28	12	63
4	65	16	75	62, 58, 43, 33, 34, 35, 36	63, 56, 57	28, 64	56, 57,
5	40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49	12	6, 7, 17, 18, 21, 22, 19, 52, 53, 55	28	7, 17	63	15, 16, 29, 27
6	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39	13	70, 60, 25, 26, 88, 89, 82, 9, 10, 11	63, 56, 57	32, 75, 6	56, 57	73, 80, 13, 8, 20
7	72	8	5	66	13, 8, 20	66	66
8	76, 77, 78, 79, 80, 81	20	46, 38, 39, 72, 76, 47	67	15, 16, 29, 27, 73, 80	67	67
9	86	61, 62, 63, 66, 67, 29, 27, 28, 64, 73	77	31, 44, 45, 87, 71, 69, 85, 68, 74, 14	66	70	70
10	83, 84, 85	80, 81, 86, 83, 84, 85, 68, 69, 70, 60	49, 23, 24	76, 47, 77, 49, 23, 24, 1, 2, 3, 30	67	60	60
11	68, 69, 70	25, 26	1, 2, 3	13, 8, 20	31, 44, 45, 87, 71, 69, 85, 68, 74, 14	61	76, 47, 77, 49, 23, 24, 1, 2, 3, 30
12	60, 61, 62, 63, 66, 67	88, 89, 82	30, 31, 44, 45, 87, 71	15, 16, 29, 27, 73, 80	76, 47, 77, 49, 23, 24, 1, 2, 3, 30	62	31, 44, 45, 87, 71, 69, 85, 68, 74, 14
13	29	9, 10, 11	69	25, 26,	81, 86,	54, 65, 40, 41	61
14	27, 28	6, 7, 17, 18, 21, 22	85, 68	88, 89, 82, 9	90, 91	5, 46	62

Продовження таблиці В.8

1	2	3	4	5	6	7	8
15	64	19	74	81, 86	12, 64	38, 39, 72	54, 65, 40, 41
16	73, 74, 75	52, 53, 55, 56, 57, 58	14,50,51	55	25, 26,	31, 44, 45, 87, 71, 69, 85, 68, 74, 14	5, 46
17	87	43	78	52, 53	88, 89, 82, 9	76, 47, 77, 49, 23, 24, 1, 2, 3, 30	38, 39, 72
18	71	32, 33, 34, 35, 36, 37	4	90, 91	55	10, 11	32, 75, 6, 7, 17
19	8	30, 31	12	12, 64	52, 53	50, 51, 78, 4, 42	10, 11
20	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	44, 45	54, 65, 40, 41, 42, 15, 16	70	37	32, 75, 6, 7, 17	25, 26, 88, 89, 82, 9
21	17, 18, 19, 20, 21, 22	74, 75, 87, 71, 1, 2, 3, 4, 5	29, 27, 28, 64, 73,80	60	50, 51, 78, 4, 54, 65, 40, 41, 42	25, 26, 88, 89, 82, 9,	50, 51, 78, 4, 42
22	9, 10	14, 50, 51	13, 8	37	5, 46	18	18
23	11	46	20	5, 46	10, 11,	21, 22,	21, 22
24	12, 13, 14	38, 39	61, 62, 63	10, 11	79, 59, 48, 83, 84	37	81, 86
25	50, 51, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 59	72, 76	56, 57, 58, 43, 33, 34, 35, 36, 37	50, 51, 78, 4, 54, 65, 40, 41, 42	70	58, 43, 33, 34, 35, 36	58, 43, 33, 34, 35, 36
26	88, 89	47, 48, 49	79, 59,	18	60	19	19
27	82	23, 24	48	79, 59, 48, 83, 84	38, 39, 72	81, 86	79, 59, 48, 83, 84
28	25, 26	77, 78, 79	83, 84	38, 39, 72	18	79, 59, 48, 83, 84	37
29	23, 24	59	81, 86	21, 22	21, 22	52, 53, 55	52, 53, 55
30	90, 91	90, 91	90, 91	19	19	90, 91	90, 91

Таблиця В.9 – Розподіл на кластери за методом Варда

Метрика	Евклідова	Манхеттенська	Мінковського	Косинусна	Кореляційна	Хеммінга	Жаккара
1	2	3	4	5	6	7	8
Кластер	Номер акселерометра						
1	1, 2	80, 81	1, 2	83, 84, 85	83, 84, 85	40, 45	71
2	3, 4, 5, 6, 7	76, 77, 78, 79	3, 4, 5, 6, 7	86, 87	86, 87	41, 42, 43, 44, 46, 47, 48, 49	72
3	17, 18	66, 67	17, 18,	55, 56, 57, 58	55, 56, 57, 58	66, 67	86, 87
4	19, 20, 21, 22	68, 69, 70	19, 20, 21, 22	50, 51, 52, 53, 59	50, 51, 52, 53, 59	68, 69, 70	83, 84, 85
5	71	17, 18	71	71	71	86, 87	6, 7
6	72, 76, 77, 78, 79	19, 20, 21, 22	72, 76, 77, 78, 79,	72, 76, 77, 78, 79, 80, 81	72, 76, 77, 78, 79, 80, 81	83, 84, 85	3, 4, 5
7	64	64	64	6, 7	6, 7	6, 7	66, 67
8	54, 65	54, 65	54, 65,	3, 4,5	3, 4, 5,	3, 4, 5	68, 69, 70
9	55, 56, 57, 58	8	55, 56, 57, 58	14	82	54, 64, 65	15
10	50, 51, 52, 53, 59	1, 2	50, 51, 52, 53, 59	12, 13	64, 73, 74, 75	73, 74, 75	16, 17, 18
11	29	86, 87	29	17, 18	14	8	8
12	27, 28	83, 84, 85	27, 28	19, 20, 21, 22	12, 13	1, 2	11
13	83, 84, 85	55, 56, 57, 58	83, 84, 85	15	88, 89	15	54, 64,65
14	86, 87	50, 51, 52, 53, 59	86, 87	16	68, 69, 70	16, 17, 18	73, 74, 75
15	8	3, 4, 5, 6, 7	8	82	60, 61, 62, 63, 66, 67	60, 61, 62, 63	25, 26,
16	80, 81	11	80, 81	64, 73, 74, 75	90, 91	25, 26	27, 28, 29
17	11	71, 72	11	88, 89	54, 65	27, 28, 29	1, 2
18	12, 13, 14	60, 61, 62, 63	12, 13, 14	68, 69, 70	15	71, 72	19, 20, 21, 22
19	15, 16	15, 16	15, 16	60, 61, 62, 63, 66, 67	16	23, 24	9, 10
20	68, 69, 70	9, 10	68, 69, 70	1, 2	17, 18	11	60, 61, 62, 63

Продовження таблиці В.9

1	2	3	4	5	6	7	8
21	73, 74, 75	73, 74, 75	73, 74, 75,	90, 91,	19, 20, 21, 22	19, 20, 21, 22	23, 24,
22	9, 10	23, 24	9, 10	54, 65	1, 2	82	82
23	82	25, 26	82	25, 26	25, 26	76, 77, 78, 79, 80, 81	88, 89
24	60, 61, 62, 63, 66, 67	82	60, 61, 62, 63, 66, 67	23, 24,	23, 24	55, 56, 57, 58	55, 56, 57, 58
25	25, 26	40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49	25, 26	40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49	40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49	50, 51, 52, 53, 59	50, 51, 52, 53, 59
26	23, 24	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39	23, 24	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39	9, 10	76, 77, 78, 79, 80, 81
27	40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49	88, 89	40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49	8	8	88, 89	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39
28	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39	12, 13, 14	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39	27, 28, 29	27, 28, 29	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39	40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49
29	88, 89	27, 28, 29	88, 89	11	11	90, 91	90, 91
30	90, 91	90, 91	90, 91	9, 10	9, 10	12, 13, 14	12, 13, 14

Таблиця В.10 – Розподіл на кластери за методом алгоритмом

Метрика	Евклідова	Манхеттенська	Мінковського	Косинусна	Кореляційна	Хеммінга	Жаккара
1	2	3	4	5	6	7	8
Кластер	Номер акселерометра						
1	73	15	40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49	64	64	60, 61, 62, 63, 66, 67, 68, 69, 70	58
2	74, 75	16	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39	73, 74, 75	73, 74, 75	55, 56, 57, 58	55, 56, 57
3	64	1	72	6, 7	71	64	54
4	65	2	76, 77, 78, 79, 80, 81	3, 4, 5	72, 76, 77, 78, 79, 80, 81	65	64, 65
5	58	71	15	1	6, 7	54	60, 61, 62, 63, 66, 67, 68, 69, 70
6	55, 56, 57	72	16	2	3, 4, 5	73	1
7	66, 67, 68, 69, 70	54	54	71	1	74, 75	3, 4, 5, 6, 7
8	60, 61, 62, 63	65	65	72, 76, 77, 78, 79, 80, 81	2	1	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39
9	1	40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49	86	40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49	40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49	3, 4, 5, 6, 7	40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49
10	3, 4, 5, 6, 7	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39	83, 84, 85,	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39	50, 51, 52, 53, 59	73
11	54	3, 4, 5, 6, 7	68, 69, 70	68, 69, 70,	68, 69, 70,	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39	74, 75
12	2	86, 87,	60, 61, 62, 63, 66, 67	60, 61, 62, 63, 66, 67	60, 61, 62, 63, 66, 67	40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49	16



Продовження таблиці В.10

1	2	3	4	5	6	7	8
13	15	83, 84, 85	8	17, 18	88, 89	72	17, 18, 19, 20, 21, 22
14	16, 17, 18, 19, 20, 21, 22	68, 69, 70	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,	19, 20, 21, 22	17, 18	15	50, 51, 52, 53, 59
15	27, 28, 29	60, 61, 62, 63, 66, 67	87	88, 89	19, 20, 21, 22,	16	27, 28, 29,
16	25, 26	64	64	14	90, 91	27, 28, 29	25, 26
17	23, 24	76, 77, 78, 79, 80, 81	73, 74, 75	12, 13	54, 65	25, 26	23, 24
18	50, 51, 52, 53, 59	8	71	90, 91	14	23, 24	72
19	76, 77, 78, 79, 80, 81	50, 51, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 59	12, 13, 14	54, 65	12, 13	71	71
20	9, 10	9, 10	29	15	50, 51, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 59	17, 18, 19, 20, 21, 22	76, 77, 78, 79, 80, 81
21	8	17, 18, 19, 20, 21, 22	27, 28	16	82	76, 77, 78, 79, 80, 81	8
22	72	73, 74, 75,	17, 18, 19, 20, 21, 22	50, 51, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 59	83, 84, 85, 86, 87	8	2
23	71	11	11	82	25, 26,	2	15
24	88, 89	12, 13, 14	50, 51, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 59	25, 26	23, 24	9, 10	83, 84, 85, 86, 87
25	83, 84, 85, 86, 87	88, 89	9, 10	23, 24	27, 28, 29	11	9, 10
26	11	23, 24	88, 89	83, 84, 85, 86, 87	15	83, 84, 85, 86, 87	88, 89
27	82	25, 26	25, 26	8	16	88, 89,	11
28	30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49	27, 28, 29,	23, 24	27, 28, 29	8	82	82
29	12, 13, 14	82	82	9, 10	9, 10	12, 13, 14	12, 13, 14
30	90, 91	90, 91	90, 91	11	11	90, 91	90, 91

**ДОДАТОК Г**

**Результати експериментальних досліджень, які отримані у модулі  
«AcSAM»**



																					2							
Разраб.	Пользователь								ХНУРЭ								XXXXXXXX.10201.00001											
Провер.	Гл.технолога																											
Утвердил																												
Н.контр.														Чувствительный элемент													КЛИ	
А	цех	Уч.	Рм	Опер.	Код, наименование операции				Обозначение документа																			
Б					Код, наименование оборудования				см	Проф.	Р	УТ	КР	КОИ	ЕН	ОП	К шт.	Тп.з	Т шт.									
А 18	xx	xx	-	0143	Очистка																							
Б 19	АБВГ.хххххх.ххх				Установка чистки полупроводниковых пластин и подложек EVG 301																							
О 05	Химическая обработка смесь 2 раствор 2																											
А 06	xx	xx	-	7143	Окисление																							
Б 07	АБВГ.хххххх.ххх				Вакуумная печь с верхней загрузкой Unitemp VPO-1000-300																							
О 08	Окисление Режим 2																											
О 09	2-ая фотолитография по формированию окон под профиль																											
Т 09	АБВГ.хххххх.ххх фотошаблон 1; с непл. ст. Ф/ш Э.ММА-01-2																											
О 10	Промывка в ванне с HCl/ H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (перекись) концентрация 1:1.5; , t=70°C																10 мин.											
Т 11	АБВГ.хххххх.ххх полиэтиленовый контейнер; АБВГ.хххххх.ххх тефлоновый зажим																											
О 12	Промывка в раствор HF/H <sub>2</sub> O, концентрация HF/H <sub>2</sub> O - [1:50]																10 с.											
Т 13	АБВГ.хххххх.ххх керамическая промывочная ванна																											
А 14	xx	xx	-	7143	Окисление																							
Б 15	АБВГ.хххххх.ххх				Вакуумная печь с верхней загрузкой Unitemp VPO-1000-300																							
О 16	1-ая фотолитография по формированию																											
Т 17	АБВГ.хххххх.ххх фотошаблон 1; АБВГ.хххххх.ххх фотошаблон 2; ЗС с пл. и непл. ст. Ф/ш пл. ст. Э.ММА-01-1 Ф/ш непл. ст.																											
МК	Маршрутная карта																											

Рисунок Г.2 – 2 аркуш МК виготовлення ЧЕ МЕМС акселерометра

**ДОДАТОК Д**  
**Акти впровадження**

«Затверджую»

Товариство з обмеженою відповідальністю ВО «ОВЕН»



Директор

Анакін Є.О.

## Технічний акт

про впровадження у виробництво результатів дисертаційної роботи  
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Бортнікової Вікторії Олегівни

«Моделі та методи автоматизованого проектування технологічних  
процесів виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів»

Комісія у складі директора підприємства Анакіна Є.О., керівника проектів, кандидата технічних наук Цеховського М.В., інженера-електроніка, кандидата технічних наук Плахтія О.А. виконала перевірку та склала цей акт, про те, що результати дисертаційної роботи Бортнікової В.О. «Моделі та методи автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів», а саме:

– математична модель вибору типу та структури МЕМС акселерометра, які на відміну від існуючих враховують функціонально-конструктивні обмеження і дозволяють підвищити ефективність застосованого проектного рішення та сформувані вихідні дані для пошуку типу та виду МЕМС акселерометру;

– метод вибору типових технологічних процесів виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів, який на відмінну від існуючих, шляхом визначення взаємозв'язків між функціонально-конструктивними показниками і технологічними процесами та на основі використання методів

Згідно з оригіналом

Секретар вченої ради Д 64.052.02

Підпис

Л.В. Колесник

Печатка

ієрархічної кластеризації і методів інтелектуального аналізу даних дозволяє підвищити оперативність прийняття проектних рішень;

- метод автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів, на відмінну від існуючих в основу якого покладено метод вибору типових технологічних процесів та імітаційну модель технологічного процесу, що дозволить підвищити ефективність проектних робіт за рахунок зниження наведених витрат та часу вирішення задачі проектування.

Використання розроблених моделей, методів та програмного забезпечення дозволяє підвищити ефективність проектних рішень, скоротити витрати на розв'язання задачі проектування технологічних процесів виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів.

Акт складено для подання до спеціалізованої вченої ради, він не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова комісії

Директор

Члени комісії

Керівник проєктів, к.т.н.

Інженер-електронік, к.т.н.



Анакін Є. О.

Цеховський М.В.

Плахтій О.А.

Згідно з оригіналом

Секретар вченої ради Д 64.052.02

Підпис

Л.В. Колесник

Печатка





ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Запорізького національного  
технічного університету

проф. Беліков С.Б.

«15» травня 2018 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи  
Бортнікової Вікторії Олегівни

Комісія у складі голови: декана факультету радіотехніки та телекомунікацій – к.т.н., доц. Кабака Владислава Семеновича, та членів комісії: завідувача кафедри «Інформаційні технології електронних засобів» (ІТЕЗ) к.т.н., доц. Шило Галини Миколаївни; доцента кафедри ІТЕЗ, к.т.н., доц. Фарафонов Олексія Юрійовича, доцента кафедри ІТЕЗ, к.т.н., Малого Олександра Юрійовича, склала акт про впровадження результатів дисертаційної роботи Бортнікової В.О. на тему «Моделі та методи автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт у навчальний процес Запорізького національного технічного університету.

Склад впровадження:

- моделі та методи, що надають можливість отримати типовий технологічний процес виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів;
- програмний модуль системи автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів «AcSAM», в якому реалізовані запропоновані моделі та методи.

Комісія встановила, що результати дисертаційної роботи Бортнікової В.О. впроваджені у навчальний процес кафедри ІТЕЗ Запорізького національного технічного університету при проведенні лабораторного практикуму з дисциплін: «Автоматизація конструкторсько-технологічного проектування РЕЗ», «Проектування мікро- і наноструктур» для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Голова комісії

Члени комісії:

В.С. Кабак

Г.М. Шило

О.Ю. Фарафонов

О.Ю. Малий

Згідно з оригіналом

Секретар вченої ради Д 64.052.02

Підпис

Л.В. Колесник

Печатка

«Затверджено»  
 Проректор ХНУРЕ  
 Рубан І.В.  
 «09» 2018 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук асистента кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки Бортнікової В.О. «Моделі та методи автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів» у навчальний процес Харківського національного університету радіоелектроніки

Комісія у складі голови: декан факультету Автоматики і комп'ютеризованих технологій – д.т.н., проф. Филипенко Олександра Івановича та членів комісії: заступника завідувача кафедри Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки (КІТАМ) з навчальної роботи к.т.н., доц. Пономарьової Ганни Вікторівни, заступника завідувача кафедри КІТАМ з наукової роботи к.т.н., професора Євсєєва Владислава В'ячеславовича, д.т.н., проф. Цимбала Олександра Михайловича, виконала перевірку і склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Бортнікової В.О. а саме: узагальнений метод автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення МЕМС акселерометрів та удосконалена модель структурно-параметричного синтезу технологічного процесу виготовлення МЕМС акселерометрів, які реалізовані у програмному забезпеченні впроваджені у навчальний процес на кафедрі Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки для лабораторного практикуму з дисципліни «Інтелектуальні технології виробництва пристроїв та систем» для магістрів спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка спеціалізації «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки»

Голова комісії,  
 д.т.н., проф.,  
 декан факультету АКТ

Члени комісії:  
 д.т.н., проф.  
 к.т.н., доц.  
 к.т.н., проф. КІТАМ

Филипенко О.І.

Цимбал О.М.  
 Пономарьова Г.В.  
 Євсєєв В.В.

Згідно з оригіналом

Секретар вченої ради Д 64.052.02

Підпис

Л.В. Колесник

Печатка

**Додаток Е****Список опублікованих праць за темою дисертаційної роботи**

*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 // Системи 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 ОАІ).

7. Невлюдов І.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., Бортникова В.О. Методи автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення МЕМС акселерометрів // Технологія приборостроения, научно-технический журнал. Харьков, 2018. №1. С. 8-10.

9. Невлюдов І.Ш., Пономарьова Г.В., Бортникова 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. Бортникова 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 І.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 «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ 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 И.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 И.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 «АсСАМ» («АсСАМ»): свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 65348 / В.О. Бортникова, В.В. Євсєєв, І.Ш. Невлюдов; дата реєстрації: 16.05.16 р.