

УДК 519.872: 519.67

Невлюдов І.Ш.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Пономарьова Г.В.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Бортнікова В.О.

Харківський національний університет радіоелектроніки

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ

Запропонована імітаційна модель технологічного процесу виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів. Модель дозволяє отримати динамічні характеристики процесу й оптимізувати операції для підвищення ефективності технологічного процесу. Проведено імітаційне моделювання, яке показало працездатність побудованої моделі.

Ключові слова: МЕМСС акселерометр, технологічний процес, імітаційне моделювання, Q-схема, система масового обслуговування.

Постановка проблеми. Сучасні тенденції виробництва ґрунтуються на впровадженні нових рішень і технологій Industry 4.0, IoT, хмарних сервісів тощо [1–4]. Застосування таких підходів на підприємстві обумовлено тим, що вони дозволяють використовувати великі обчислювальні ресурси, гнучкість, швидке нарощування ресурсів і їх збільшення за необхідності. Важливу роль у технології Industry 4.0 відіграють сучасні технічні засоби автоматизації (сенсори, виконавчі пристрої, регулятори тощо), які повинні забезпечувати необхідний рівень точності, параметри швидкодії, малі масогабаритні характеристики, високу функціональність, низьке енергоспоживання та вартість. У зв'язку із цим широко застосовуються датчики, які виготовлені з використанням мікроелектромеханічних систем (далі – МЕМС).

Мікроелектромеханічні (далі – МЕМС) акселерометри є складовою частиною багатьох засобів автоматизації та вирішують широкий спектр задач. Сучасні наукові дослідження спрямовані на моделювання та розроблення нових конструкцій МЕМС акселерометрів для ефективного використання їхніх фізичних властивостей, що пов'язано з особливостями конструкції чутливого елемента та готового датчика. Розроблення нових МЕМС акселерометрів і технологія їх виробництва пов'язані зі складною науково-

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

Завдання дослідження та побудови імітаційної моделі технологічного процесу виготовлення МЕМС акселерометрів актуальне, оскільки сьогодні особливого значення набувають такі питання: як автоматизувати синтез ТП з урахуванням техніко-технологічної бази підприємства; як будуть працювати всі підсистеми в комплексі залежно від зміни навантаження тощо. Імітаційне

моделювання дозволить відстежити динаміку ТП, врахувати вихідну інформацію і складність реалізації ТП, а також отримати динамічні характеристики процесу.

Постановка завдання. Будь-який ТП виготовлення MEMC акселерометрів являє собою систему з безліччю послідовно-паралельних операцій. У даному разі є кінцева множина видів MEMC акселерометрів $\Theta = \{\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_n\}$ і кінцева множина технологічного обладнання $\Xi = \{\Xi_1, \Xi_2, \dots, \Xi_n\}$, що забезпечує реалізацію ТП. Процес отримання MEMC акселерометра $i \in \Theta$ включає $O_{ip} \cup O'_{ip}$ операцій. Водночас кожний MEMC акселерометр на кожну операцію $O_{ip} \in Q_i \cup O'_{ip} \in Q'_i$ зіставляється з деякою безліччю технологічного обладнання $\Omega^i \subseteq \Omega$.

Паралельні операції O_{ip} , що використовують загальну підготовку і подачу сировини, вимагають ретельного складання графіків роботи для мінімізації виробничих витрат як для окремих процесів, так і для виробництва загалом, що призводить до зниження витрат виробництва.

Кожен ТП виготовлення MEMC акселерометрів має різні продуктивність (P) і собівартість (C) і характеризується особливою послідовністю зміни показників якості. Метою є вибір черговості і змісту технологічних операцій O_{ip} , що забезпечують задані параметри якості за найменших затрат часу (t) і матеріальних ресурсів (Z).

Технологічне обладнання, яке використовується на технологічних лініях, пов'язане з безперервним матеріальним потоком, зумовлене початком (t_n) і

кінцем (t_k) операцій O_{ip} . Тому для узгодження операцій O_{ip} з урахуванням послідовності виконання операцій виготовлення MEMC акселерометрів їх необхідно синхронізувати так, щоб узгодити початок t_n^i наступної операції O_{ip} і кінець t_k^k попередньої O_{ip-1} без простою обладнання.

Також необхідно синхронізувати роботу технологічних ліній так, щоб найбільш щільно завантажити технологічне обладнання, мінімізувати число виробничих змін, скоротити число переналадок.

Можна виділити низку завдань, які необхідно враховувати під час автоматизованого проектування ТП виготовлення MEMC акселерометрів: для забезпечення продуктивності (P) ТП виготовлення MEMC акселерометрів необхідно забезпечити безперервність процесу під час його реалізації, для зменшення часу (t) виконання ТП виготовлення MEMC акселерометрів – складання узгодженого виконання операцій O_{ip} , а також забезпечення завантаження матеріальним потоком із достатньою щільністю завантаження.

Постановка завдання. Метою роботи є розроблення нової узагальненої імітаційної моделі технологічного процесу виготовлення MEMC акселерометрів, яка дозволить отримати динамічні характеристики процесу й оптимізувати вибір операції для підвищення його ефективності.

Виклад основного матеріалу дослідження. *Імітаційна модель технологічного процесу виготовлення MEMC акселерометрів.* ТП виготовлення MEMC акселерометрів може бути пред-

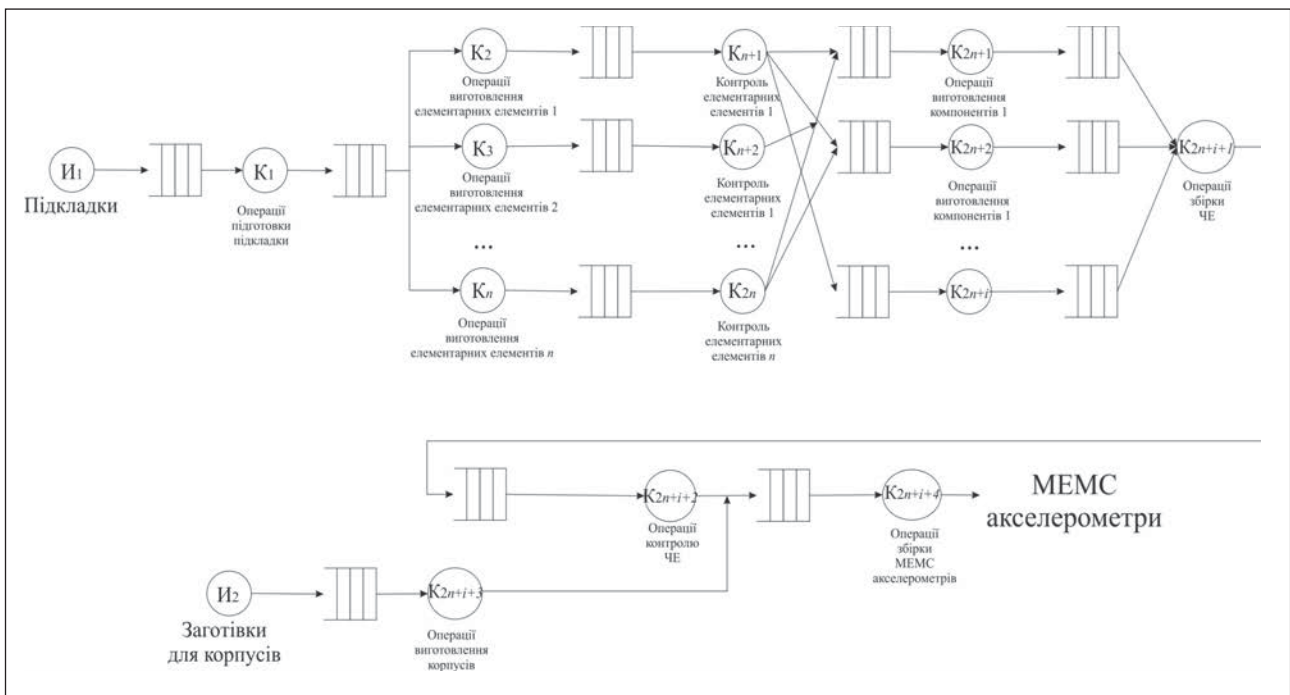


Рис. 1. Q-схема імітаційної моделі ТП виготовлення MEMC акселерометрів

ставлений як багатоканальна система масового обслуговування (далі – СМО) [5]. Це дозволить аналізувати ефективність отриманого маршруту ТП, продуктивність потоків.

Формалізуємо ТП виготовлення MEMS акселерометрів за допомогою Q -схеми і побудуємо його структуру. Під час побудови структури СМО необхідно враховувати три основних елементи [5]: I – джерела; H – накопичувачі; K – канали обслуговування заявок. За джерела $I1$ слугують заготовки

Ψ_i для підкладки і необхідна сировина S_i для виконання етапів отримання чутливого елемента (далі – ЧЕ); $I1$ – заготовки Ψ_i для корпусу і необхідна сировина S_i для виконання етапів отримання корпусу MEMS акселерометрів, які надходять до системи з інтенсивністю λ_1 і λ_2 відповідно.

Каналами обслуговування K_i , $i = \overline{1,14}$ є укрупнені етапи ТП виготовлення MEMS акселерометрів відповідно до структурно-параметричної моделі виготовлення MEMS акселерометрів [6]:

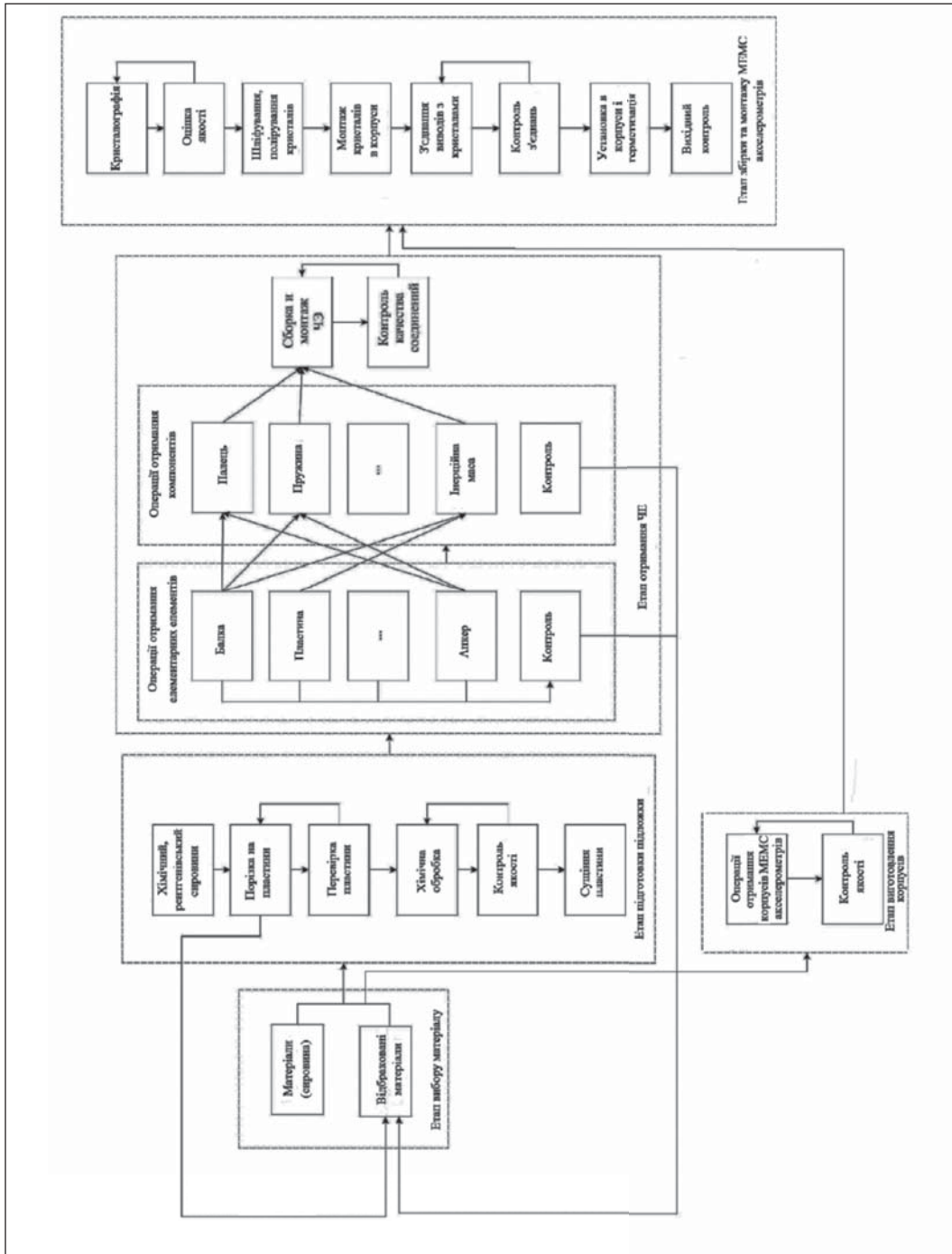


Рис. 2. Структура отриманого ТП виготовлення MEMS акселерометрів

Q_1-Q_2 об'єднані в канал K_1 , етапи Q_5-Q_6 представлені як канали K_2-K_{10} , етап Q_7 представлений каналом K_{11} , етапи Q_8-Q_{10} об'єднані в канал K_{12} , а етапи $Q_{12}-Q_{14}$ об'єднані в канал K_{14} .

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

– t_1 – середній час, необхідний на виконання етапів вибору Q_1 і підготовки підкладки Q_2 ;

– t_2-t_n – середній час, необхідний на виконання операцій отримання елементарних елементів 1- n на етапі Q_5 ;

– $t_{n+1}-t_{2n}$ – середній час, необхідний для виконання операцій контролю отриманих елементарних елементів 1- n відповідно;

– $t_{2n+1}-t_{2n+i}$ – середній час, необхідний для виконання операцій отримання компонентів 1- n на етапі Q_6 ;

– t_{2n+i+1} – середній час, необхідний для виконання операцій збирання ЧЕ на етапі Q_7 ;

– t_{2n+i+2} – середній час, необхідний для виконання операцій контролю, отриманих ЧЕ на етапі Q_8 , а також етапах Q_9-Q_{10} ;

– t_{2n+i+3} – середній час, необхідний для виконання операцій виготовлення корпусів MEMC акселерометрів на етапах Q_3-Q_4 ;

– t_{2n+i+4} – середній час, необхідний для виконання операцій збирання і монтажу MEMC акселерометрів на етапах $Q_{11}-Q_{14}$.

На рисунку 1 представлена розроблена Q-схема імітаційної моделі ТП виготовлення MEMC акселерометрів.

Імітаційне моделювання технологічного процесу виготовлення MEMC акселерометрів. Вхідною інформацією для моделювання є результати синтезу ТП на основі методів інтелектуального аналізу даних і методів багатокритеріальної оптимізації рішень щодо типової структури ТП [6–7]. Основою імітаційної моделі стала типова структура ТП (рис. 2), отримана за допомогою

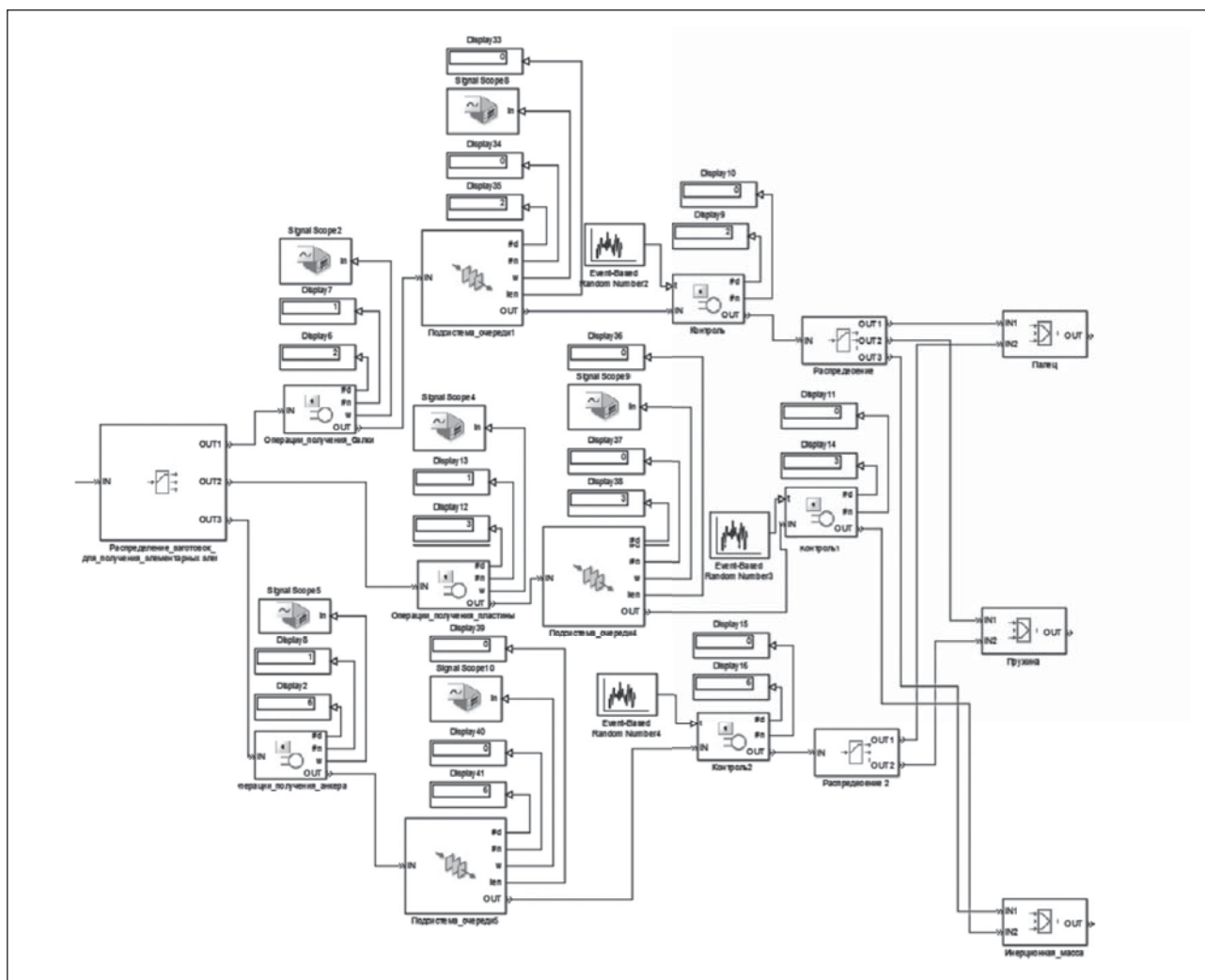


Рис. 3. Імітаційна модель етапів $Q_1 - Q_2$ ТП виготовлення MEMC акселерометрів

структурно-параметричної моделі виготовлення MEMS акселерометрів.

Реальні розподілення та характеристики технологічних операцій оцінюються безпосередньо на конкретному виробництві, вони пов'язані з реальним

технологічним обладнанням виробництва. Ці дані змінюються впродовж виробництва та їх моніторинг є обов'язковим складником виробничого процесу.

Для моделювання обираємо дані, наближені до реальних, що мають нормальне розподілення, яке

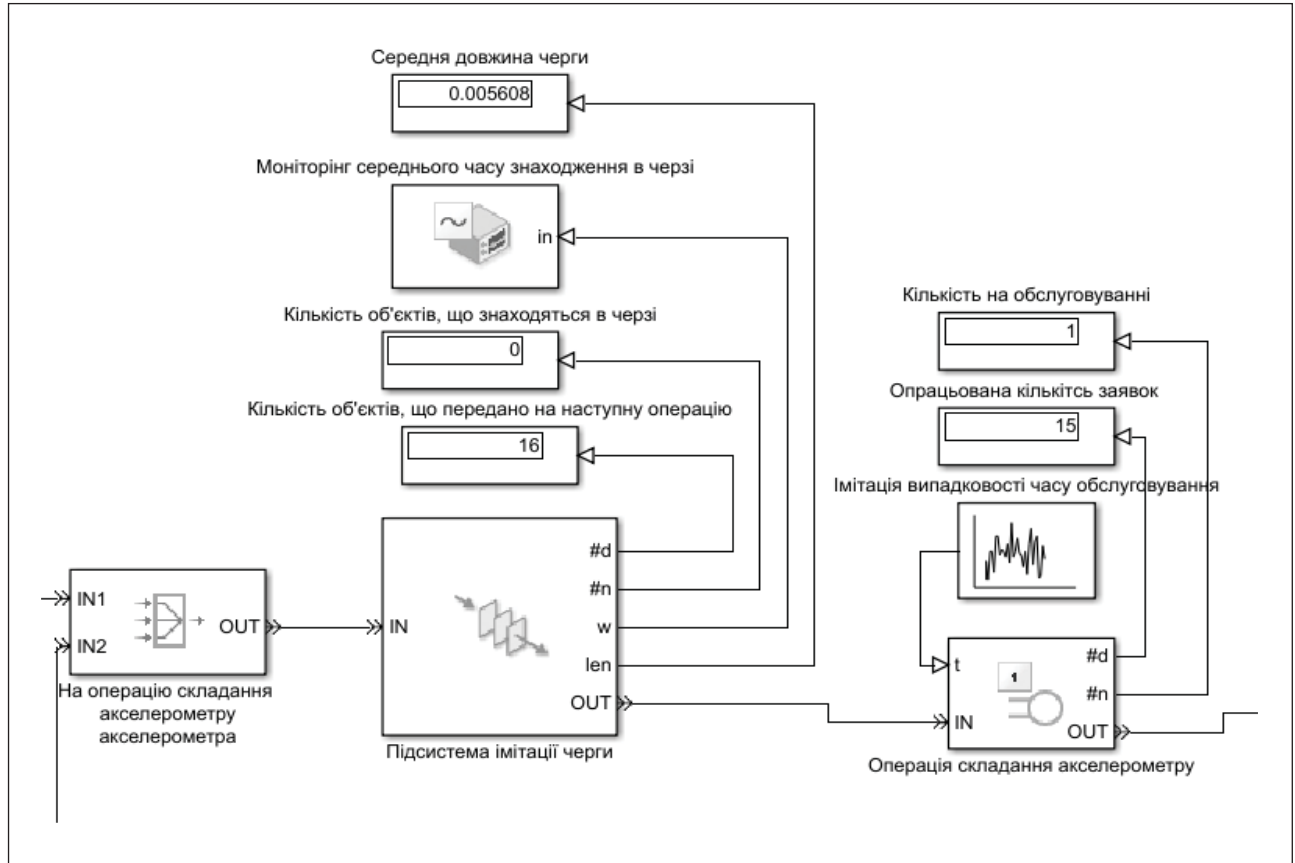


Рис. 4. Фрагмент імітаційної моделі, що реалізує операцію складання MEMS акселерометра

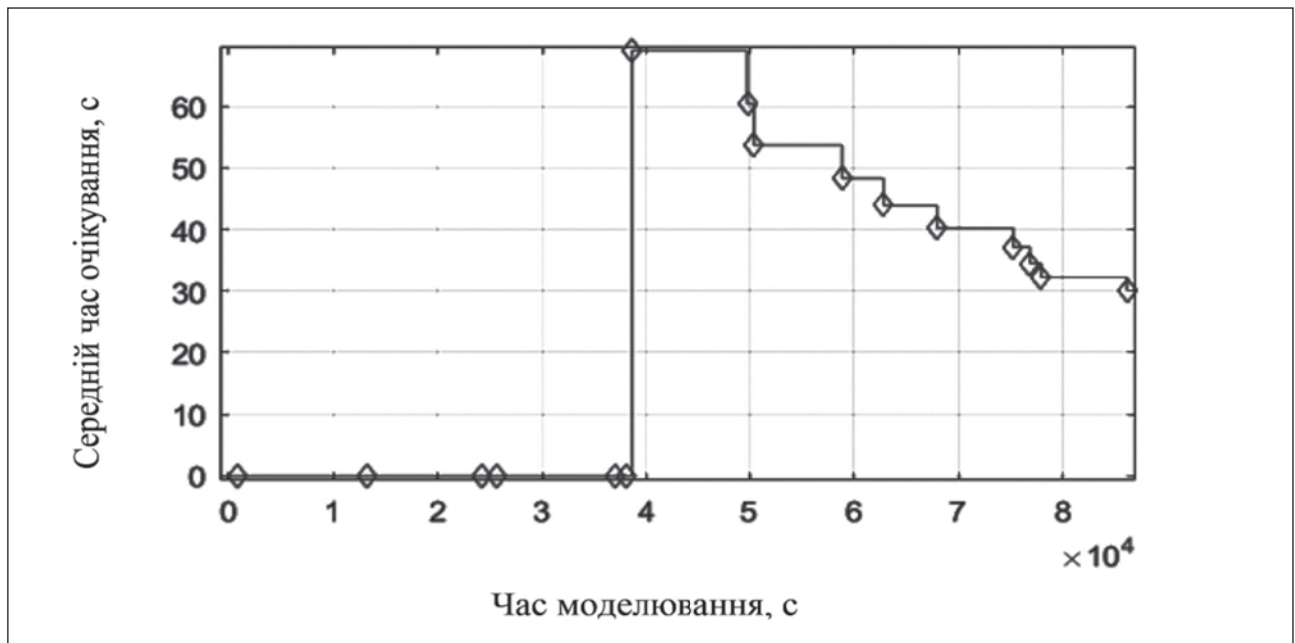


Рис. 5. Часова діаграма середнього часу простою заготовки Ψ_i на етапі складання ЧЕ

перебуває в інтервалі $3\sigma = 3$ с: $t_1 = 362$ с; $t_2 = 12\,365$ с, $t_3 = 13\,407$ с, $t_4 = 13\,407$ с – середній час, необхідний для виконання операцій отримання балки, анкера, пластини відповідно; $t_5 = 127$ с, $t_6 = 117$ с, $t_7 = 107$ с – час, необхідний для виконання операцій контролю отриманих балок, пластин і анкерів; $t_8 = 9\,076$ с, $t_9 = 9\,808$ с, $t_{10} = 9\,076$ с – середній час, необхідний для виконання операцій отримання пальців, пружини, інерційної маси; $t_{11} = 1\,090$ с – середній час, необхідний для виконання операцій збирання ЧЕ; $t_{12} = 192$ с – середній час, необхідний для виконання операцій контролю отриманих ЧЕ й етапів $Q_9 - Q_{10}$; $t_{13} = 865$ с – середній час, необхідний для виконання операцій виготовлення корпусів МЕМС акселерометрів; $t_{14} = 514$ с – середній час, необхідний для виконання операцій збирання і монтажу МЕМС акселерометрів.

Для підвищення точності і забезпечення достовірності результатів доцільний багаторазовий прогін імітаційної моделі з різними початковими умовами. Фрагмент отриманої імітаційної моделі однієї з паралельних гілок етапу Q_5 (отримання балки) представлено на рисунку 3.

Імітація процесу виконується з урахуванням характеру розподілу випадкової величини виконання операції, яка отримується та коригується впродовж реального ТП за результатами кількісної оцінки роботи обладнання. Побудована модель дозволяє провести імітаційне моделювання процесу за різний період часу і проаналізувати кількісні характеристики (рис. 4).

У результаті імітаційного моделювання ТП виготовлення МЕМС акселерометрів генерується інформація:

- про кількість оброблених заготовок на етапах $Q_1 - Q_2$ (канал K_1), етапах $Q_5 - Q_6$ ($K_2 - K_{10}$), Q_7 (K_{11}), $Q_8 - Q_{10}$ (K_{12}), $Q_{12} - Q_{14}$ (K_{14});
- коефіцієнт використання устаткування (коефіцієнт використання каналів ($K_1 - K_{14}$));
- середній час на виконання етапів $Q_1 - Q_{14}$ ТП виготовлення МЕМС акселерометрів;

– максимальна і середня довжина черги заготовок Ψ_i для виконання операцій O_{ip} етапах $Q_1 - Q_{14}$ ТП виготовлення МЕМС акселерометрів;

– середній час перебування заготовок Ψ_i у черзі на виконання операцій O_{ip} на етапах $Q_1 - Q_{14}$ ТП виготовлення МЕМС акселерометрів.

Окрема інформація для зручності може бути відображена графічно у вигляді часової діаграми. Приклад відображення результатів моделювання представлено на часовій діаграмі середнього часу простою заготовки Ψ_i на етапі складання ЧЕ МЕМС акселерометра Q_9 (рис. 5).

За результатами проведення імітаційного моделювання ТП виготовлення МЕМС акселерометрів можна сформулювати висновки щодо пропускної спроможності кожної з ділянок моделі, оцінки середнього часу очікування обслуговування заявки, рівномірності розподілу завантаження устаткування, коефіцієнта використання обладнання тощо. Отримані оцінки дозволять розробити для кожного рішення варіанти підвищення ефективності роботи ТП.

Висновки. На основі структурно-параметричної моделі технологічного процесу виготовлення МЕМС акселерометрів розроблено імітаційну модель такого процесу, яка враховує особливості ТП, характеристики техніко-технологічної бази підприємства, особливості операцій і переходів. Головною задачею імітаційного моделювання ТП є оцінка кількісних характеристик динаміки процесу виготовлення та визначення вузьких місць у структурі ТП з урахуванням характеристик обладнання та параметрів ТП. Імітаційна модель може стати базою для постановки завдання та вирішення оптимізаційних задач щодо визначення необхідної кількості робочих місць, обладнання, режимів роботи обладнання тощо. Результати даного дослідження можна використовувати як рекомендацій під час автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення МЕМС акселерометрів.

Список літератури:

1. Industry 4.0 and Connected Manufacturing. URL: <https://www.ibm.com/internet-of-things/industries/iot-manufacturing> (дата звернення: 23.12.2017).
2. The Internet of Things in manufacturing: benefits, use cases and trends. URL: <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-guide/internet-of-things-in-manufacturing/> (дата звернення: 23.12.2017).
3. Wu D., Thames J., Rosen D., Shcafer D. Enhancing the product realization process with cloud-based design and manufacturing systems. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 2013. № 13. P. 1–14.
4. Wang P., Gao R., Fan Z. Cloud computing for cloud manufacturing: benefits and limitations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2015. № 4. P. 1–9.
5. Стеценко І. Моделювання систем. Черкаси, 2010. 399 с.
6. Невлюдов И., Бортникова В. Структурно-параметрическая модель технологического процесса изготовления МЭМС акселерометра. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Обчислювальна техніка та*

автоматизація». Покровськ: ДВНЗ заклад «Донецький національний технічний університет», 2017. № 1(30). С. 6–16.

7. Nevludov I., Yevsieiev V., Miliutina S., Bortnikova V. MEMS Accelerometers Production Technological Route Selection. CAD Systems in Microelectronics, CADSM '17. 14th International Conference. The Experience of Designing and Applications of CAD Systems in Microelectronics. Lviv, 24 February 2017. Lviv, 2017. P. 332–333.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Предложена имитационная модель технологического процесса изготовления микроэлектромеханических акселерометров. Модель позволит получить динамические характеристики процесса и оптимизировать операции для повышения эффективности технологического процесса. Проведено имитационное моделирование, которое показало работоспособность построенной модели.

Ключевые слова: МЭМС акселерометр, технологический процесс, имитационное моделирование, Q-схема, система массового обслуживания.

MEMS ACCELEROMETERS PRODUCTION TECHNOLOGICAL PROCESS SIMULATION

On the article is proposed MEMS accelerometers production technological process simulation. The model will allow obtaining dynamic characteristics of the process and optimizing operations for improving the efficiency of the technological process. Simulation modeling was carried out, which showed the performance of the constructed model.

Key words: MEMS accelerometers, technological process, simulation, Q-model, queuing system.